



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**" Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης  
στην Περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης  
με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων  
Πεδίου "**

Στεφανόπουλος Κυριάκος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :  
Καρατζάς Π. Γεώργιος (Επιβλέπων)  
Νικολαΐδης Νικόλαος  
Γιδαράκακος Ευάγγελος

Χανιά  
Οκτώβριος 2004

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 κυρία Παπαδοπούλου Μαρία για την άψογη συνεργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κύριο Νικολαΐδη Νικόλαο και Γιδαράκο Ευάγγελο.

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	3
Περίληψη .....	5
1. Υπόγεια Υδραυλική.....	6
1.1 Εισαγωγή .....	6
1.2 Υδροφορείς .....	7
1.3 Παράμετροι Υδροφορέων.....	8
1.4 Υδραυλική Αγωγιμότητα. Νόμος του Darcy.....	9
Υδραυλική αγωγιμότητα.....	10
Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας .....	11
Ομοιογένεια και Ισοτροπία.....	11
1.5 Γενική μορφή του Νόμου Darcy.....	12
2. Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.....	14
2.1 Εισαγωγή .....	14
2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης διεπιφάνειας .....	16
2.3 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg .....	17
Περιορισμένος Υδροφορέας .....	18
Ελεύθερος Υδροφορέας .....	18
2.4 Δομή της Διεπιφάνειας .....	19
2.5 Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρωσης .....	20
3. Μοντέλα υπόγειας ροής.....	22
3.1 Εισαγωγή .....	22
3.2 Πρωτόκολλο μοντελοποίησης .....	22
3.3 Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι.....	23
1. Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint).....	24
2. Η προσέγγιση συστήματος ροής ( Flow system viewpoint).....	24
3.4 Αριθμητικές Μέθοδοι .....	26
3.5 Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος .....	28
Δυσδιάστατα επιφανειακά μοντέλα .....	29
Περιορισμένοι υδροφορείς .....	29
Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή .....	29
Ελεύθεροι υδροφορείς .....	30
Μεικτοί υδροφορείς .....	31
Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα .....	31
Δυσδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα.....	31
Πλέγματα Πεπερασμένων Διαφορών .....	32
Πλέγματα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	33
3.6 Οριακές Συνθήκες.....	35
4. Περιγραφή του μοντέλου PTC.....	41
4.1 Εισαγωγή .....	41
Θεμελιώδες Εξισώσεις.....	41
Επίλυση του Αλγορίθμου.....	42
4.2 Υπόγεια τρισδιάστατη ροή .....	42
Θεμελιώδες εξισώσεις.....	42
Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .....	43
Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών .....	44
Η κάθετη παράγωγος .....	44

Η παράγωγος του χρόνου.....	46
4.3 Οριακές συνθήκες.....	46
Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος.....	46
Καθορισμένη Ροή.....	47
Τρίτου Τύπου.....	47
4.4 Συνθήκες του υδροφόρου ορίζοντα.....	48
4.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων.....	49
Θεμελιώδεις εξισώσεις.....	49
5. Περιγραφή της περιοχής.....	51
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2 Κλιματολογικά στοιχεία.....	52
Βροχοπτώσεις.....	53
Ανεμολογικά στοιχεία.....	53
5.3 Χλωρίδα – Πανίδα.....	54
5.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία.....	55
5.4.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί.....	56
1. Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί.....	56
2. Νεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί.....	57
3. Τεταρτογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί.....	57
5.4.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί.....	57
1. Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί.....	57
2. Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί.....	58
5.4.3 Διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων και υδρογεωλογικών ενοτήτων.....	58
6. Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης Χερσονήσου με τη χρήση του μοντέλου PTC.....	60
6.1 Εισαγωγή.....	60
6.2 Χάρτες.....	60
6.3 Οριακές συνθήκες.....	63
6.4 Υψόμετρο – Αρχικές συνθήκες.....	63
6.5 Βροχόπτωση.....	63
6.6 Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	65
6.7 Αρχική κατάσταση. Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα.....	66
6.8 Μελλοντικός προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης με τη χρήση σεναρίων.....	68
Σενάριο 1.....	69
Σενάριο 2.....	71
Σενάριο 3.....	74
Σενάριο 4.....	77
Σενάριο 5.....	79
Σενάριο 6.....	82
Σενάριο 7.....	84
6.9 Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	86
Βιβλιογραφία.....	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	90

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν κυρίως οι παράκτιες περιοχές και είναι αυτό της υφαλμύρωσης, δηλαδή της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα εστιάζει στη περίπτωση του Δήμο Χερσονήσου στο Νομό Ηρακλείου όπου το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα αυξημένο και προτείνονται κάποιες βελτιώσεις μεσώ των σεναρίων που λαμβάνουν χώρα.

Η περιοχή είναι κατεξοχήν τουριστική και οι κάτοικοι για να αντεπεξέλθουν στις όλο και αυξανόμενες ανάγκες για νερό προχώρησαν στη διάνοιξη πηγαδιών άντλησης και στην υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα. Αυτό είχε σαν συνέπεια την υποχώρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και τη διείσδυση της θάλασσας στο εσωτερικό της περιοχής. Με την εργασία αυτή εκτιμήθηκε το μέτωπο της υφαλμύρωσης στην παρούσα κατάσταση καθώς επίσης έγινε και ένας μελλοντικός προσδιορισμός αυτού με τη μέθοδο των σεναρίων.

Αρχικά έγινε μία σύντομη περιγραφή για τα είδη του υδροφορέα καθώς και για την κίνηση του υπογείου νερού μέσα από θεμελιώδες εξισώσεις. Στη συνέχεια εξετάστηκε το φαινόμενο της υφαλμύρωσης και οι τρόποι αντιμετώπισης ενώ έγινε και μια ανάλυση των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση αυτή. Έπειτα έγινε περιγραφή των υπόγειων μοντέλων που προσομοιώνουν την κίνηση του υπόγειου νερού και από αυτά επιλέχθηκε το μοντέλο PTC, το οποίο και αναλύεται στο Κεφάλαιο 4. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου υδροφορέα ενώ έχει τη δυνατότητα να περιγράψει και τη μεταφορά ρύπων.

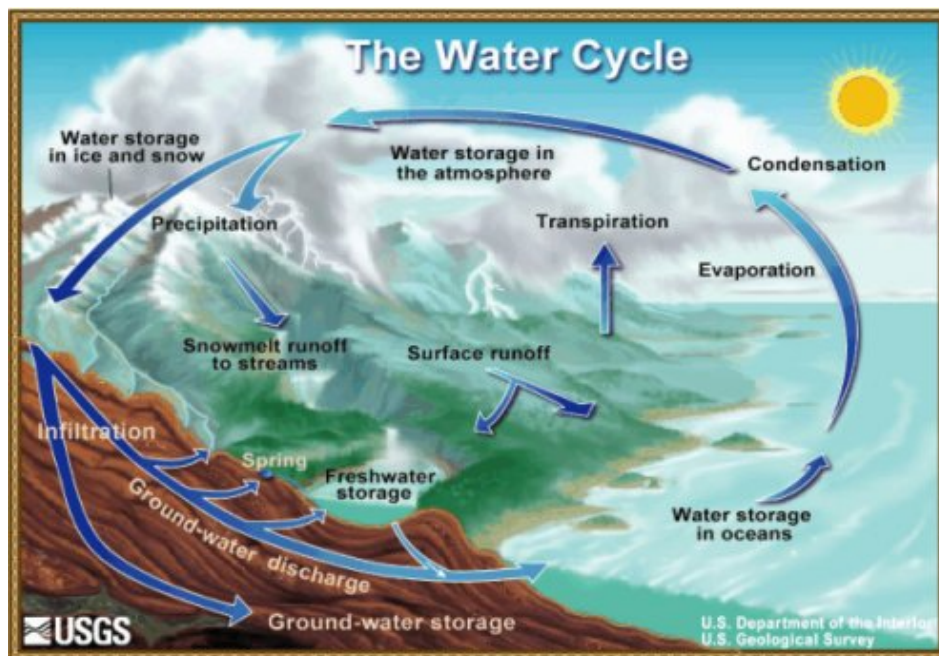
Η μελέτη του φαινομένου επικεντρώθηκε στην περιοχή της Χερσονήσου όπου ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή όσον αφορά τα μορφολογικά, γεωλογικά, και κλιματολογικά στοιχεία. Τέλος παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που εισάγονται στο μοντέλο (οριακές συνθήκες, αρχικές συνθήκες, χάρτες, βροχόπτωση, υψόμετρο) και η βαθμονόμηση αυτού. Γίνεται παρουσίαση της υφιστάμενης κατάστασης η οποία κρίνεται δυσμενής και είναι απαραίτητο να παρθούν μέτρα για την αναχαίτιση του φαινομένου. Εξετάστηκαν 7 σενάρια από τα οποία σε μερικά μειώθηκε ο ρυθμός άντλησης των δημοτικών πηγαδιών και σε άλλα εμπλουτίστηκε ο υδροφορέας από πηγάδια εισαγωγής νερού έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα φράγμα γλυκού νερού το οποίο θα απωθήσει το θαλασσινό. Και στα 7 σενάρια κρίθηκε απαραίτητο να παραμείνουν κλειστά όλα τα ιδιωτικά πηγάδια.

Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά στην περίπτωση του εμπλουτισμού ενώ στα άλλα οι κατάσταση παρέμενε στα ίδια επίπεδα. Για την εφαρμογή αυτών των σεναρίων απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού αλλά και πάλι η αναχαίτιση του μετώπου της υφαλμύρωσης είναι μια δύσκολη και επίπονη διαδικασία.

## 1. Υπόγεια Υδραυλική.

### 1.1 Εισαγωγή

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



Σχήμα 1.1. Ο Υδρολογικός κύκλος. Πηγή:[11].

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

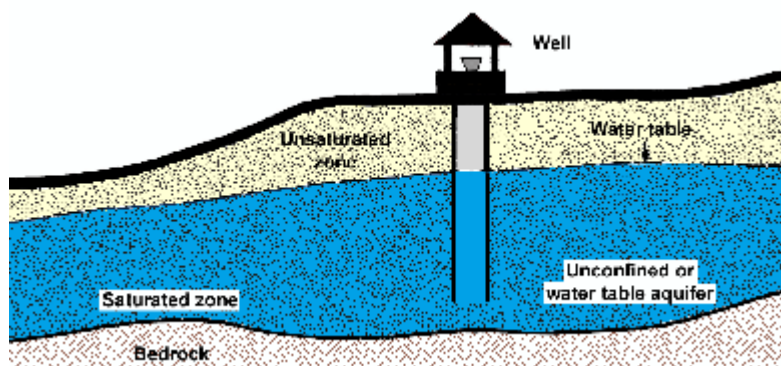
ημιπερατά και τυπικό παράδειγμα τους είναι οι φακοί αργίλου σε εναλλαγές με αμμώδη εδάφη.

Η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται συνήθως ως ροή σε πορώδη μέσα, αφού έτσι ονομάζονται όλα τα πετρώματα και τα εδάφη που αποτελούνται από ένα στερεό σκελετό με τη μορφή συνάθροισης στερεών κόκκων που διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα δηλαδή πόρους. [3]

## 1.2 Υδροφορείς

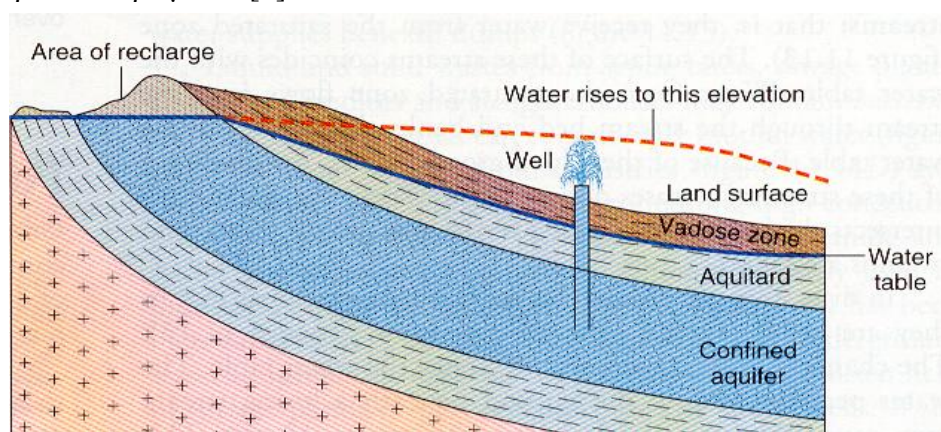
Το βασικό κριτήριο για μια γενική ταξινόμηση των υδροφορέων αποτελεί η θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος. Έτσι διακρίνονται σε:

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



Σχήμα 1.2 Ελεύθερος Υδροφορέας Πηγή[15]

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



Σχήμα 1.3 Περιορισμένος Υδροφορέας. Πηγή: [9]

### 1.3 Παράμετροι Υδροφορέων

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

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

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

$$\text{Πορώδες} : n = \frac{V_v}{V_o}$$

όπου  $V_v$  : ο όγκος των κενών

$V_o$  : ο συνολικός όγκος του δείγματος

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι :

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

Ενώ χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης είναι :

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

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



▪ Το ενεργό πορώδες (effective porosity,  $n_e$ ), ή ειδική απόδοση (specific yield) Ενεργό πορώδες είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων  $i$  δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

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

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

$V_o$  : ο συνολικός όγκος του εδάφους.

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

- Η ειδική συγκράτηση

Ο όρος ειδική συγκράτηση αναφέρεται στο  $S_r$  όπου:

$$S_r = n - n_e$$

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

Η American Society of Testing Materials (ASTM) είναι μια διεθνής μη κερδοσκοπική οργάνωση που ασχολείται με τα υλικά, τα προϊόντα, τα συστήματα και τις υπηρεσίες. Τα πρότυπα που παρέχει η ASTM γίνονται αποδεκτά και χρησιμοποιούνται στην έρευνα και την ανάπτυξη, τη δοκιμή προϊόντων, τα ποιοτικά συστήματα και τις εμπορικές συναλλαγές σε όλη την υδρόγειο.[13]

#### 1.4 Υδραυλική Αγωγιμότητα. Νόμος του Darcy.

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

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

Όπου:  $Q$  : είναι η παροχή ( $L^3 / T$ )

$A$  : είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

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

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

$L$  : είναι το μήκος της στήλης (L)

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

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Η έκφραση  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως  $\Delta h/dL$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds  $< 1$ , έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για  $Re = 10$ . Στην περίπτωση των υπόγειων νερών η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου Darcy χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροή όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα. [2]

Η ταχύτητα του Darcy, εξ' ορισμού θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής [2]:

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

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

$Q$  : είναι ο ρυθμός παροχής ( $L^3/T$ )

$A$  : είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

$n$  : είναι το πορώδες

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

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

$dh$  : είναι η απώλεια φορτίου (L)

$dl$  : είναι το μήκος της στήλης (L)

### Υδραυλική αγωγιμότητα

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

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

όπου :  $k = \text{Cd}^2$  και ορίζεται ειδική διαπερατότητα του πορώρους μέσου.

C συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων.

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατίθενται παρακάτω.

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

Πηγή: Freeze and Cherry, 1979

### Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας

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

$$T = Kb$$

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

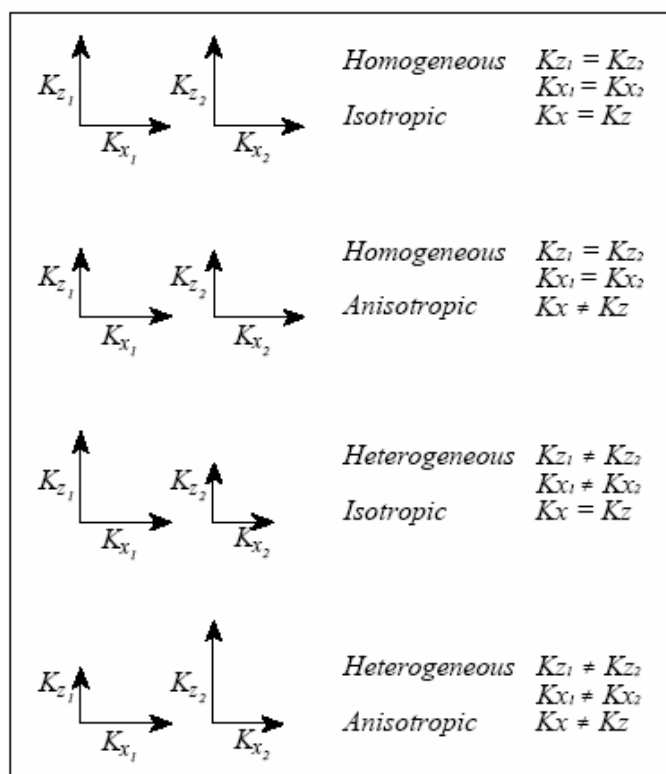
b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα (L)

### Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Επίσης σε ένα δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση είναι η ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και στην δεύτερη της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας [2].

- Ομοιογενής (homogeneous) : χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- Ετερογενής (heterogeneous) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.

- Ισότροπος (Isotropic) : χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ανισότροπος (Anisotropic): χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση.



Πηγή: Freeze and Cherry, 1979

### 1.5 Γενική μορφή του Νόμου Darcy.

Λόγω του φαινομένου της ανιτροπίας, στην περίπτωση εφαρμογής του νόμου του Darcy η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις x, y και z. Εάν ο άξονας των συντεταγμένων είναι κάθετος στη διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι τότε [2]:

- 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 στη γενική του μορφή:

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

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

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

## 2.Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

### 2.1 Εισαγωγή

Το νερό είναι ένα από τα μεγαλύτερα αγαθά που προσφέρει η φύση καθώς είναι απαραίτητο στοιχείο ζωής στους ανθρώπους, τα ζώα και τα φυτά. Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη εκτιμάται γύρω στα 1460 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα. Από το σύνολο αυτό τα υπόγεια νερά, που ο όγκος τους είναι περίπου  $60 \times 10^6 \text{ km}^3$ , αποτελούν ένα μικρό ποσοστό ίσο με 2 %. Ο όγκος όμως αυτών των υπόγειων νερών αντιστοιχεί στο 98% του εκμεταλλεύσιμου πόρου σε υγρή κατάσταση. [3]

	Επιφάνεια $\text{km}^2 \times 10^6$	Όγκος $\text{km}^3 \times 10^6$	Όγκος (%)	Βάθος (m)	Χρόνος παραμονής
Ωκεανοί και θάλασσες	361	1370	94	2500	~4000 yr
Λίμνες Αποθηκευτήρες	1.55	0.13	0.01	0.25	~10 yr
Έλη	<0.1	<0.01	<0.01	0.007	1-10 yr
Ανοιχτοί Αγωγοί	<0.1	<0.01	<0.01	0.003	2 weeks
Υγρασία Εδάφους	130	0.07	<0.01	0.13	2weeks– 1yr
Υπόγεια νερά	130	60	4	120	2weeks – 10000yr
Παγετώνες	17.8	30	2	60	10 – 10000 yr
Ατμόσφαιρα	504	0.01	<0.01	0.025	~10 days

Υδατικό ισοζύγιο του πλανήτη γη. Πηγή :[2]

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η μεγάλη βιομηχανική ανάπτυξη έχουν οδηγήσει στην υπερβολική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, με συνέπεια την εξάντλησή τους και την καταστροφή τους. Η υπεράντληση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, η υποβάθμιση της ποιότητάς τους και υπερεκμετάλλευση των

επιφανειακών υδάτων, ιδιαίτερα για την κάλυψη της υπερβολικής ζήτησης νερού άρδευσης και ύδρευσης, κάνουν το πρόβλημα του νερού θέμα μείζονος σημασίας τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπογείων παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων και επειδή το γλυκό νερό είναι ελαφρύτερο από το αλμυρό επιπλέει πάνω σ' αυτό. Αποτέλεσμα της διείσδυσης αυτής είναι η υφαλμύρωση των υδροφορέων. Με τον όρο υφαλμύρωση υπόγειου υδροφορέα εννοούμε τη διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό με παράλληλη αύξηση της αλατότητας του σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος.

Η υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και περιορισμένους υδροφορείς. Αίτια ύπαρξης υφαλμύρωσης μπορεί να είναι γεωλογικοί παράγοντες, συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται κατά τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η διείσδυση αυτή μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς λόγους :

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

Όσο και σε ανθρωπογενείς παράγοντες όπως:

- Υπεραντλήσεις υδροφορέων
- Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης

Όταν ο ρυθμός άντλησης σε πηγάδια κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα τότε το θαλασσινό νερό εισρέει στους υδροφορείς καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Η διερεύνηση του φαινομένου είναι εξαιρετικά σημαντική επειδή αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία μόλυνσης του γλυκού νερού και ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα σε πολλές παράκτιες περιοχές ανά τον κόσμο, ενώ αποτελεί και έναν εμφανή δείκτη της κακής διαχείρισης των φυσικών πόρων. Επίσης το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί γρήγορα αναστρέψιμο γι' αυτό και η αντιμετώπιση του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Στον Ελληνικό χώρο το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ιδιαίτερα έντονο και έχει επηρεάσει τις περισσότερες νησιωτικές και παράκτιες περιοχές. Η μείωση των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού έχει σαν αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων

υδροφορέων και την διείσδυση της θάλασσας σε πολλούς από αυτούς. Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης ανήκει στην κατηγορία των ιδιαίτερα σύνθετων, μη αντιστρεπτών προβλημάτων ρύπανσης των υπόγειων νερών, με έντονες οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 για το νερό της Ε.Ε. (η οδηγία 2000/60 παρατίθεται στο Παράρτημα [14]), υπάρχει ανάγκη καθιέρωσης διαδικασιών για τη ρύθμιση της άντλησης γλυκού ύδατος και για την παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας του, δεδομένου ότι η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους.

## 2.2 Μέθοδοι προσομοίωσης διεπιφάνειας

Η υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων, όπως και γενικότερα τα θέματα διαχείρισης υπογείων νερών, αποτελεί διεπιστημονικό αντικείμενο και για την αντιμετώπιση 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 υπόγειων νερών, η σχέση του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και γειτονικά οικοσυστήματα, η χημική του σύνθεση και οι πιέσεις και οι επιπτώσεις λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

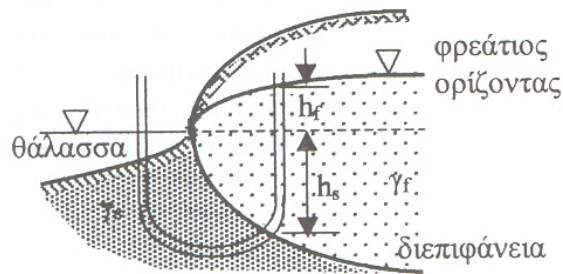
Δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων:

1. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder and Cooper, Henry). Η διείσδυση 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).
2. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης), εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα (Ghyben – Herzgerg) . 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 τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή.



### 2.3 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Σύμφωνα με τη προσέγγιση Ghyben – Herzberg, η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Ορίζοντας με  $h_f$  το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και  $h_s$  τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού κάτω από αυτή,  $\gamma_f, \gamma_s$  τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα ισχύει:



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben – Herzberg. Πηγή :[4]

$$\begin{aligned} h_s \gamma_s &= (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g \rho_f}{g (\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow \\ &\Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \end{aligned} \quad (1)$$

όπου  $\rho_f$  η πυκνότητα του γλυκού νερού και ίση με  $1.000 \text{ kg/m}^3$  και  $\rho_s$  του αλμυρού και ίση με  $1.025 \text{ kg/m}^3$ . Οπότε με αντικατάσταση στη σχέση (1) προκύπτει ότι :

$$h_s = \frac{1.000}{1.025 - 1.000} h_f \Rightarrow h_s \cong 40 h_f$$

Στην πραγματικότητα η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας δεδομένου ότι:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, ιδιαίτερα στη επιφάνεια διαστάλαξης του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η προσέγγιση Ghyben – 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 – Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων, την επιφάνεια διήθησης.

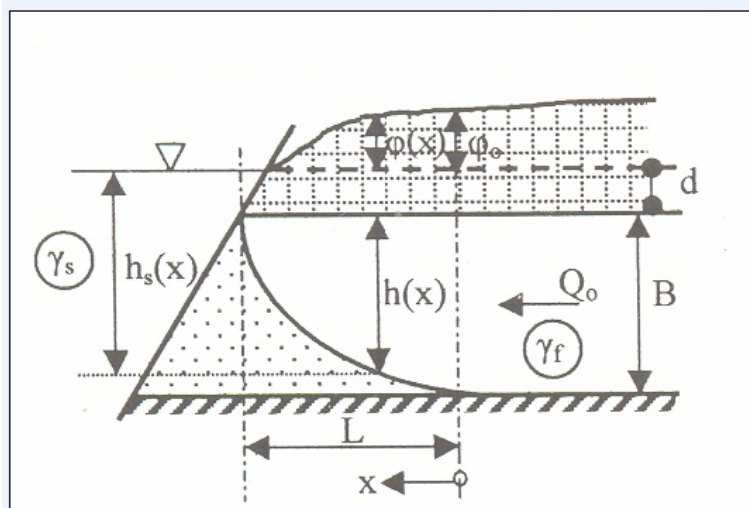
Παρ' όλες υποπεριπτώσεις η εξίσωση Ghyben – Herzberg αποδεικνύεται ένα σημαντικό εργαλείο, που επιτρέπει με απλό τρόπο την εύρεση προσεγγιστικά της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού. Εφ' όσον είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, μπορεί να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέραστο όριο του υδροφορέα ή εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν. [4]

Αναλυτικοί τύποι για την διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού είναι διαθέσιμοι για περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς.

### Περιορισμένος Υδροφορέας

Για τον περιορισμένο υδροφορέα υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$ , πάχους  $B$ , βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας  $d$  και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτουν οι σχέσεις μεταξύ του μήκους  $L$  της υφάλμυρης σφήνας, της παροχής γλυκού νερού προς τη θάλασσα  $Q_0$  και του πιεζομετρικού φορτίου στην άκρη της διεπιφάνειας  $\phi_0$ . Επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας.[4]

$$Q_0 L = \frac{K \phi_0}{2} (\delta \phi_0 - 2d) + \frac{K d^2}{2\delta} = \frac{K}{2\delta} B^2 \quad (2)$$

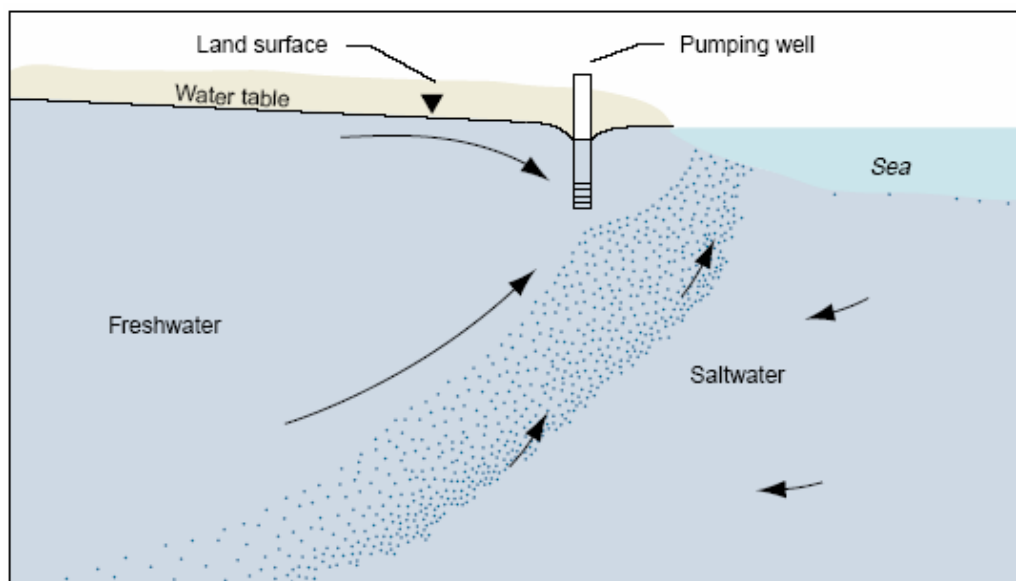


Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση περιορισμένου υδροφορέα. Πηγή :[4]

### Ελεύθερος Υδροφορέας

Αντίστοιχα στους ελεύθερους υδροφορείς και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη την κατακόρυφη διήθηση  $N = \text{σταθ. ή } N = N(x)$  και με βάση το νόμο Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτει μετά από ολοκλήρωση η αντίστοιχη σχέση





Σχήμα 2.4. Ροή υπογείου νερού και η ζώνη διασποράς σε έναν παράκτιο ομοιογενή υδροφορέα. Πηγή:[11]

Η διάχυση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης του υδροφόρου ορίζοντα και την απόσταση που διασχίζει το υπόγειο νερό. Το πάχος της μεταβατικής ζώνης ανάμιξης σε κάθε θέση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης, από την κατάσταση ή μη ισορροπίας του γλυκού νερού, την περατότητα και την παλίρροια. Καθώς το αλατούχο νερό διαχέεται προς τα πάνω στη 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.

## 2.5 Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρωσης

Εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης αλατιού που υπάρχει στο θαλασσινό νερό, ένα 2% αυτού αν 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 αρκετά χρόνια και συνήθως το φαινόμενο είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Για τον έλεγχο της υφαλμύρωσης έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι [8]. Ορισμένες από αυτές είναι:

- Έλεγχος της άντλησης. Εάν η άντληση από έναν παράκτιο υδροφορέα μειωθεί ή 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 το φαινόμενο της υφαλμύρωσης να περιοριστεί εν μέρει.[8]

- Τεχνητή αναπλήρωση. Η υφαλμύρωση μπορεί να περιοριστεί με την τεχνητή αναπλήρωση από φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα ύδατα ή από πηγάδια εμπλουτισμού. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται τα επίπεδα του υπόγειου υδροφορέα και ουσιαστικά λειτουργούν σαν ένα φράγμα και εμποδίζουν την θαλάσσια εισχώρηση. [8]
- Συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού. Η συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης του γλυκού νερού στα παράκτια συστήματα είναι καθοριστικής σημασίας καθώς έτσι προλαμβάνεται η θαλάσσια διείσδυση. Η συντήρηση αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με τη αποφυγή άντλησης του υδροφορέα κατά μήκος της ακτής. [8]
- Ανάπτυξη υποθαλάσσιων φραγμών. Κατασκευάζοντας ένα αδιαπέραστο υποθαλάσσιο φράγμα κατά μήκος της ακτής είναι δυνατόν το φαινόμενο να προληφθεί ή ακόμη και να περιοριστεί. Ωστόσο με αυτή τη μέθοδο πρέπει να υπολογιστεί και τυχόν διαρροή που οφείλεται στη διαβρωτική επίδραση της θάλασσας ή από κανένα σεισμό. [8]
- Κατασκευάζοντας πηγάδια με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με επιφανειακές λεκάνες διήθησης. [8]
- Αντληση θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρωσης έτσι ώστε να μειωθεί η εξάπλωση του φαινομένου. [8]
- Η τεχνική της ‘κρυσταλλοποίησης’, είναι η δημιουργία κρυστάλλων μεγάλου μεγέθους μεταξύ των κόκκων των πορωδών όπου ουσιαστικά λειτουργούν ως ασπίδα για την υφαλμύρωση αφού μειώνουν την υδροπερατότητα των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων.[16]

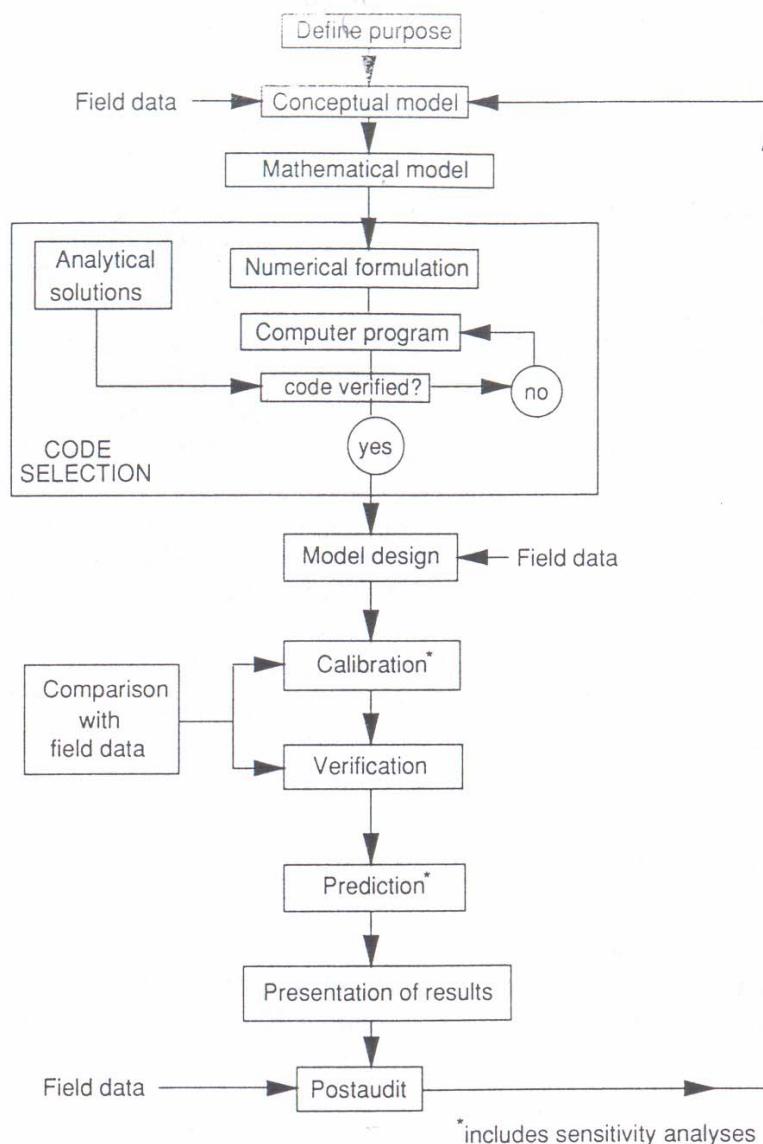
### 3.Μοντέλα υπόγειας ροής.

#### 3.1Εισαγωγή

Τα περισσότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την συμπεριφορά των υπόγειων συστημάτων νερού επιλύονται με τη χρήση μοντέλων υπόγειας ροής. Γενικά με τον όρο ‘μοντέλο’ εννοούμε ένα τέχνασμα το οποίο αντιπροσωπεύει μια προσέγγιση της κατάστασης του πεδίου. Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει την υπόγεια ροή έμμεσα με τη χρήση θεμελιωδών εξισώσεων μεσώ των οποίων αντιπροσωπεύουν τη φυσική διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα στο σύστημα, σε συνδυασμό με άλλες εξισώσεις για να περιγράψουν τα υδραυλικά ύψη ή τις παροχές κατά μήκος των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για προβλήματα που εξαρτώνται από το χρόνο, οι εξισώσεις που περιγράφουν την αρχική κατάσταση για τα υδραυλικά ύψη του συστήματος είναι εξίσου απαραίτητες (αρχικές συνθήκες). Ένα μαθηματικό μοντέλο μπορεί να επιλυθεί είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά, και στις δύο περιπτώσεις όμως η επίλυση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. [1]

#### 3.2 Πρωτόκολλο μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση είναι ένας εξαιρετικός τρόπος στο να βοηθήσει στην οργάνωση και στη σύνθεση των δεδομένων του πεδίου. Έτσι τα βασικά βήματα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την υπόγεια ροή και την μεταφορά ρύπων είναι καταρχάς η ανάπτυξη του μοντέλου και στη συνέχεια ακολουθούν και άλλες διαδικασίες όπως η επιλογή του κώδικα του μοντέλου, η επαλήθευση, ο σχεδιασμός του μοντέλου, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και η πρόβλεψη όπως παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.1 Βασικά βήματα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου. Πηγή[1]

### 3.3 Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι.

Μια ολοκληρωμένη περιγραφή ενός μαθηματικού μοντέλου περιλαμβάνει τις οριακές συνθήκες, τις αρχικές συνθήκες και τις θεμελιώδεις εξισώσεις εάν το μοντέλο εξαρτάται από το χρόνο. Πριν όμως εξαχθούν οι θεμελιώδεις εξισώσεις για την περιγραφή της υπόγειας ροής είναι απαραίτητο ένα θεμελιώδες μοντέλο του συστήματος (conceptual model). Υπάρχουν δυο προσεγγίσεις για το σύστημα υπόγειας ροής [1] :

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

### 1. Η προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)

Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα του περιορισμένου (confined) και μη-περιορισμένου-ελεύθερου υδροφορέα (unconfined). Ο υδροφορέας είναι μια μονάδα ενός πορώδους υλικού ικανό να αποθηκεύει και να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες νερού στα πηγάδια. Ένας περιορισμένος υδροφορέας καλύπτεται στο πάνω μέρος του από ένα αδιαπέραστο στρώμα (confining bed) δηλαδή από μια μονάδα με πορώδες υλικό που επιβραδύνει την κίνηση του νερού, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας έχει ως ανώτερο όριο τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής στα πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις περιλαμβάνοντας και αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Επίσης η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα από τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας. Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) ή τη μεταβιβασιμότητα (transmissivity). Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενές και με σταθερό πάχος ενώ σε έναν ελεύθερο ποικίλει χωροταξικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού.

Η προσέγγιση υδροφορέα χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει δυσδιάστατη και οριζόντια ροή τόσο για περιορισμένο όσο και ελεύθερο υδροφορέα. Εάν έχουμε διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τρισδιάστατης ροής δια της οποίας η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από τον υδροφορέα. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέραστου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. [1]

### 2. Η προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint)

Σ' αυτή τη προσέγγιση δεν είναι άμεσα ενδιαφερόμενη η αναγνώριση των υδροφορέων και των αδιαπέραστων στρωμάτων αυτή καθ' εαυτή, 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 και επιτρέπει τη θεραπεία του σε δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι :

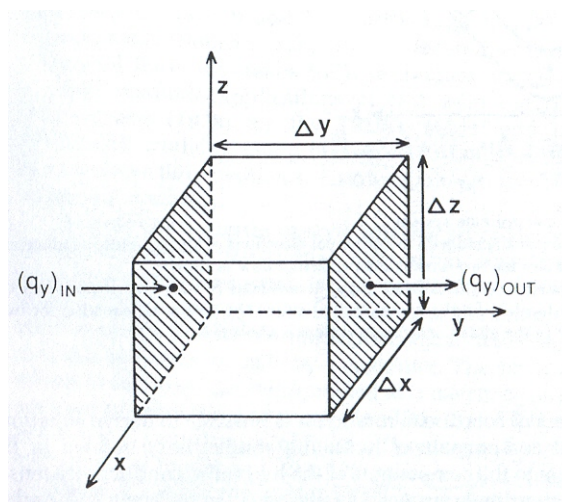
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (4)$$



όπου  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  είναι οι συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα,  $S_s$  η ειδική αποθηκευτικότητα και  $R^*$  ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση (4) εξάγεται συνδυάζοντας μαθηματικά την εξίσωση της ισορροπίας του νερού με τον νόμο του Darcy. Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε έναν κύβο ενός πορώδους υλικού αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρό έτσι ώστε να μην παρατηρούνται αλλαγές στα υδραυλικά ύψη. Ο όγκος του κύβου ισοδυναμεί με το γινόμενο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  και η ροή του νερού εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτωσης  $q$  όπου  $q$  είναι το διάνυσμα το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα τριών συστατικών με τη βοήθεια των μοναδιαίων διανυσμάτων.

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z$$



Σχήμα 3.2 Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των εξισώσεων. Πηγή[1]

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

### Εκροή - Εισροή = μεταβολές στην αποθηκευτικότητα

Αν πάρουμε τη ροή στον  $y$  άξονα τότε η εισροή που λαμβάνει χώρα στον παραπάνω κύβο κατα το μέτωπο  $\Delta x \Delta z$  ισοδυναμεί με  $(q_y)_{IN}$  και η εκροή με  $(q_y)_{OUT}$ . Οπότε ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείων τον ρυθμό εισροής για τον  $y$  άξονα

είναι: 
$$\left[ (q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN} \right] \Delta x \Delta z \quad \text{ή} \quad \frac{\left[ (q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN} \right]}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

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

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

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να εκφράσουμε το ρυθμό της ροής και στους άξονες x και z οπότε ο συνολικός ρυθμός της ροής θα ισοδυναμεί με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και θα είναι:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολές στην αποθηκευτικότητα}$$

Επίσης εάν εξετάσουμε και την περίπτωση να έχουμε πηγάδι άντλησης ή πηγάδι έκχυσης τότε ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής αντιπροσωπεύεται από τον όρο:  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$  όπου  $R^*$  είναι ένας θετικός όρος σε περίπτωση που έχουμε πηγάδι έκχυσης και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.[1] Το αποτέλεσμα είναι :

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολές στην αποθηκευτικότητα} \quad (5)$$

Οι μεταβολές της αποθηκευτικότητας ορίζονται από την ειδική αποθηκευτικότητα  $S_s$  η οποία καθορίζεται από τον όγκο του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής του υδραυλικού ύψους  $h$  και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = -\frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

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

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5) και (6) και διαιρώντας με τον όρο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  καταλήγουμε στην εξίσωση (1) δηλαδή:

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

### 3.4 Αριθμητικές Μέθοδοι

Γενικά οι αναλυτικές λύσεις προϋποθέτουν κανονικά γεωμετρικά σχήματα και ομοιογενείς υδροφορείς, ενώ οι αριθμητικές δεν προϋποθέτουν τίποτα από τα ανωτέρω πλην όμως χρειάζεται μεγάλη προσοχή ώστε να αποφεύγεται το αριθμητικό σφάλμα το οποίο συσσωρευμένο δίνει λύσεις μακριά από τις πραγματικές [1]. Έτσι εκτός από τις απαιτήσεις για την υδραυλική των πηγαδιών, οι αναλυτικές μέθοδοι για την επίλυση της ροής δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες. Αντίθετα οι αριθμητικές μέθοδοι είναι περισσότερο μεταβλητές με μια μεγάλη διαθεσιμότητα στη χρήση των

ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι για την επίλυση των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής γίνεται κυρίως με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι:

- Πεπερασμένες διαφορές
- Πεπερασμένα στοιχεία
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Οριακή ολοκληρωτική μέθοδος (the boundary integral equation method)
- Αναλυτικά στοιχεία

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

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

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

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολη τόσο στην κατανόηση όσο και στον προγραμματισμό. Γενικά απαιτούνται λίγα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος και υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε έναν κόμβο η οποία είναι η μέση τιμή σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο αυτόν. Δεν υπολογίζει όμως την διακύμανση του υδραυλικού ύψους από έναν κόμβο σε έναν άλλο.

Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα σχήματα και όρια καθώς επίσης χειρίζεται καλύτερα τα ‘εσωτερικά’ όρια όπως ελαττωματικές ζώνες. Επιπλέον προσομοιώνει τα σημεία εμπλουτισμού και άντλησης (sources and sinks points) όπως και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του κινούμενου ύδατος πολύ καλύτερα. Ακόμη καθορίζει ακριβώς την τιμή του υδραυλικού ύψους σε έναν κόμβο και προσδιορίζει την διακύμανση του ανάμεσα σε δύο κόμβους με διαφορετικές τιμές. [1]

### 3.5 Το Θεμελιώδες μοντέλο και η κατασκευή του πλέγματος

Ο σκοπός της κατασκευής ενός θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του έτσι ώστε όλο το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Η απλοποίηση του συστήματος είναι απαραίτητη επειδή ολόκληρη η ανακατασκευή του πεδίου είναι ανέφικτη. Για την κατασκευή του θεμελιώδους 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 τη διάρκεια κατασκευής 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 ισοζυγίου

Οι πηγές του συστήματος όπως 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 στην αποθηκευτικότητα του υδροφορέα.

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

Τα υδρογραφικά στοιχεία αποτελούν τη βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Οι υδρολογικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να θεμελιώσουν την κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος ενώ οι πληροφορίες για τη 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 υπόγειων υδροφορέων με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα αλλά για να ισχυροποιηθεί το μοντέλο καλό θα ήταν να περιέχει και πληροφορίες από τη 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 βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά ισότοπα και οργανικούς ρυπαντές.

Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει να γίνει κατάταξη του μοντέλου όσον αφορά τη χωρική του διάταξη.[1] Έτσι έχουμε τις εξής κατηγορίες:

- Δυσδιάστατα επιφανειακά (aquifer viewpoint)
- Δυσδιάστατα profile (flow system viewpoint)
- Ήμι-τρισδιάστατα (aquifer viewpoint)
- Τρισδιάστατα (flow system viewpoint)

### **Δυσδιάστατα επιφανειακά μοντέλα**

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

### Περιορισμένοι υδροφορείς

Όταν προσομοιώνονται περιορισμένοι υδροφορείς, 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 δυσδιάστατο επιφανειακό μοντέλο η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα παρουσιάζεται από τη διαφορά μεταξύ της μεταβιβασιμότητας στις x και y κατευθύνσεις. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από τη βιβλιογραφία ενώ οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας από το τεστ άντλησης.

### 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 το λόγο της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K_z$ ) του αδιαπέραστου στρώματος ως προς το πάχος (b) αυτού.

$$leakance = \frac{K_z}{b}$$

Η πηγή του νερού σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας είτε ένας ελεύθερος ή ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο γενικά όποια κι αν είναι η πηγή του νερού υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό με το χρόνο. Επίσης υποθέτει ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση 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.[1]

### Ελεύθεροι υδροφορείς

Στους ελεύθερους 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. Οι παραδοχές αυτές είναι:

- 1.Ο υδροφορέας είναι ομογενής και ισότροπος
- 2.Ο υδροφορέας όπως και το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστα
3. Η επιφάνεια του νερού βρίσκεται σε ηρεμία (δεν υπάρχει ροή)
- 4.Ο υδροφορέας κατά το χρονικό διάστημα που αντλείται, δεν επανατροφοδοτείται είτε από άμεση κατείσδυση, είτε από υπερκείμενο ή υποκείμενο υδροφόρο στρώμα
5. Ισχύει ο νόμος του Darcy
6. Υπάρχει μόνιμη ροή του νερού με τα συνεπακόλουθα όπως σταθερή πιεζομετρική επιφάνεια, σταθερή ακτίνα επίδρασης, σταθερές ταχύτητες ροής
7. Υπάρχει συναρμογή της επιφάνειας πτώσης στάθμης με τις εκατέρωθεν επιφάνειες του υπόγειου νερού και ειδικά με την επιφάνεια του νερού μέσα στο πηγάδι
8. 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 αυτές τις παραδοχές ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετατρέπεται σε δυσδιάστατο ή ακόμη και σε μονοδιάστατο. Το μοντέλο υπολογίζει τη στάθμη του υπόγειου νερού για κάθε κόμβο. Η προσομοίωση απαιτεί πίνακες με τιμές από υδραυλική αγωγιμότητα, ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς. Τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και το ενεργό πορώδες υπολογίζονται από τεστ άντλησης. [1]

### Μεικτοί υδροφορείς

Σε αυτά τα συστήματα υδροφορέα περιέχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που περιέχονται στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Ένας υδροφορέας μπορεί να διαφέρει χωροταξικά από έναν περιορισμένο σε έναν ελεύθερο ή και το αντίστροφο, σε κάθε περίπτωση όμως όλοι οι προαναφερθέντες πίνακες είναι απαραίτητοι.

### **Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα**

Ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά από υδροφορείς στους οποίους παρεμβαίνουν αδιαπέραστα στρώματα. Όπως και στα δυσδιάστατα επιφανειακά μοντέλα με περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή, τα αδιαπέραστα στρώματα δεν απεικονίζονται σαφώς σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο ούτε και το υδραυλικό ύψος. Η επίδραση των αδιαπέραστων στρωμάτων προσομοιώνεται από έναν όρο διαρροής  $L$  ο οποίος παρουσιάζει την κάθετη ροή ανάμεσα σε δυο υδροφορείς και είναι συνάρτηση της leakance και της διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του αδιαπέραστου στρώματος. Όταν υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερη από δυο ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέραστου στρώματος και του υδροφορέα τότε προτιμάται η χρήση του ημι-τρισδιάστατου μοντέλου.

### **Δυσδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα**

Τα δυσδιάστατα profile και τα τρισδιάστατα μοντέλα οικειοποιούνται την προσέγγιση του συστήματος ροής και έχουν ουσιαστικά τα ίδια δεδομένα με ένα δυσδιάστατο επιφανειακό μοντέλου με τη μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι πρέπει να είναι ξεχωριστοί για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα δυσδιάστατα profile ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία μοντέλων, τα δεδομένα όμως είναι παρόμοια με τα δυσδιάστατα επιφανειακά και τα τρισδιάστατα.

Αυτή η κατηγορία των μοντέλων χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει ελεύθερους υδροφορείς όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι αρκετά μεγάλη. Τόσο οι πεπερασμένες διαφορές όσο και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι αποτελεσματικά για να χρησιμοποιηθούν αλλά στην περίπτωση όπου έχουμε κίνηση της στάθμης του νερού τότε 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. Υπάρχουν δυο τύποι πλεγμάτων με πεπερασμένες διαφορές. Το block-centered πλέγμα και το mesh-centered, με τη μόνη διαφορά να υφίσταται στο τρόπο με τον οποίο οι οριακές διακυμάνσεις αντεπεξέρχονται. Το πιο διαδεδομένο πλέγμα και αυτό που χρησιμοποιείται στα περισσότερα μοντέλα είναι το block-centered. Η επιλογή του τύπου του μοντέλου θα καθορίσει για το εάν ένα ή περισσότερα στρώματα απαιτούνται. Εάν μόνο ένα στρώμα χρειάζεται, αυτό θα αντιπροσωπεύει μία απλή υδρογραφική μονάδα. Η χρήση του θεμελιώδους μοντέλου επιτρέπει, τον καθορισμό του αριθμού των στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν.

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 θα επιδράσουν στην επιλογή της κάθετης απόστασης των κόμβων. Ένας ακόμη παράγοντας είναι μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Τυπικά τα στρώματα των μοντέλων αντιστοιχούν σε μια υδρογραφική μονάδα, παρόλα αυτά όμως εάν υπάρχουν σημαντικές κάθετες κλίσεις στο υδραυλικό ύψος τότε 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 απόσταση. Τέλος ένας ακόμη παράγοντας που θα επηρεάσει στην επιλογή της απόστασης των κόμβων είναι και η έκταση της περιοχής. Ένα πλέγμα με μικρό αριθμό κόμβων είναι προτιμότερο, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του αριθμού των δεδομένων και των υπολογισμών για λόγους πρακτικότητας. Ακόμη είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός από κόμβους ούτως ώστε η αναπαράσταση του συστήματος να είναι επακριβής. [1]

### Πλέγματα Πεπερασμένων Διαφορών

Στα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών,  $i$ ,  $j$  και  $k$ , οι οποίοι δείχνουν τη θέση τους σε μία γραμμή, στήλη και στρώμα του πλέγματος. Οι κόμβοι χωρίζονται έτσι ώστε τα διαστήματα  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  και  $\Delta z$  να είναι σταθερά αλλά όχι και απαραίτητα ίσα. Τις περισσότερες φορές ακανόνιστο πλέγμα με μικρές αποστάσεις των κόμβων χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου συναντάται το κύριο πρόβλημα (π.χ. πηγάδια άντλησης) ή παρουσιάζονται άλλα σημαντικά υδρολογικά γνωρίσματα. Όταν στο εσωτερικό της περιοχής χρησιμοποιηθεί μικρό



πλέγμα μπορεί να είναι απαραίτητο να αυξηθούν οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος και έτσι να διογκωθεί, και να βγει έξω από τα όρια. Γι' αυτό το λόγο ίσως χρειαστεί να αραιωθούν λίγο και ο κανόνας που χρησιμοποιείται στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών είναι ότι το διάστημα ενός κόμβου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κατά 1.5 φορές την απόσταση του προηγούμενου κόμβου. Έτσι από το ανάπτυγμα του πλέγματος προκύπτει ένα όριο εξαιτίας του σφάλματος που υπεισέρχεται λόγω της δεύτερης παραγώγου που υπολογίζεται σε ακανόνιστα διαστήματα των κόμβων. Η διαφορά του σφάλματος μπορεί θεωρητικά να περιοριστεί με τη βοήθεια της σειράς Taylor. [1]

### Πλέγματα Πεπερασμένων Στοιχείων

Το βασικότερο μειονέκτημα στα πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των στοιχείων που απαιτούνται για την κατασκευή του πλέγματος είναι πολύ επίπονη και δύσκολη. Κάθε κόμβος αλλά και στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και η συντεταγμένη θέση ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) κάθε κόμβου και ο αριθμός αυτού θα πρέπει να είναι στενά συνδεδεμένος με κάθε στοιχείο πριν αυτό εισαχθεί στο μοντέλο. Η αρίθμηση γίνεται από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά ανάλογα με το που είναι η μικρότερη διάσταση από το κύριο πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή επεξεργάζεται ξεχωριστά κάθε στοιχείο και στη συνέχεια συναρμολογεί τις εξισώσεις κάθε στοιχείου σε έναν μαθηματικό πίνακα. Η αρίθμηση των κόμβων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, από τη μικρότερη διάσταση του πλέγματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος φάσματος των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο. Κατά το σχεδιασμό του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για ισοτροπικά υλικά θα πρέπει η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης να είναι κοντά στη μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται τα σφάλματα και πετυχαίνεται καλύτερη μείωση με τη χρήση κανονικών τριγωνικών στοιχείων. Επίσης αναλογίες της τάξης του 5 θα πρέπει να αποφεύγονται ενώ η αλλαγή της περιοχής με τη χρήση διαφορετικών μεγεθών στοιχείων θα πρέπει να γίνεται βαθμιαία. Έτσι όταν υπάρχει αλλαγή από ανισοτροπικά υλικά, το μέγεθος των στοιχείων θα πρέπει να εξομαλύνεται ισοδυναμικά και σε καμιά περίπτωση η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης να μην ξεπερνά το 5.

Τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών υπολογίζουν το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο ξεχωριστά. Η τιμή αυτή του υδραυλικού ύψους είναι η μέση τιμή για κάθε κελί και σε ένα block-centered πλέγμα, οι ιδιότητες του υδροφορέα καθώς και οι υδραυλικές πιέσεις που δέχεται προσδιορίζονται γύρω από αυτόν τον κόμβο. Αντίθετα σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, οι ιδιότητες του υδροφορέα

προσδιορίζονται είτε από ένα κόμβο, είτε από ένα στοιχείο είτε από μία περιοχή που επηρεάζεται γύρω από τον κόμβο. Όταν χρησιμοποιούνται γραμμικά τριγωνικά στοιχεία, τότε μπορεί να είναι πιο εύκολο να προσδιοριστούν οι ιδιότητες στους κόμβους λόγω του ότι θα υπάρχουν πάντα λιγότεροι κόμβοι απ' ό,τι στοιχεία σ' αυτό το είδος πλέγματος.

Είναι δύσκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που θα εισαχθούν στο πλέγμα επειδή το μοντέλο απαιτεί δεδομένα για κάθε κόμβο, στοιχείο και κελί και γενικά τα στοιχεία του πεδίου είναι πενιχρά. Όταν δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για κάθε κόμβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρεμβολή. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος γι' αυτό το σκοπό είναι η παρεμβολή 'kriging', σύμφωνα με την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καλύτερη γραμμική απροκάλυπτη εκτίμηση. Η μεταβλητή προσδιορίζεται ως μία τυχαία συνάρτηση, της οποίας η χωρική συσχέτιση προκύπτει από αλλαγές της απόστασης. Η μέθοδος του 'kriging' διαφέρει από άλλες μεθόδους παρεμβολής διότι υπολογίζει τη χωρική δομή της μεταβλητής και προωθεί μία εκτίμηση του σφάλματος της παρεμβολής ως τυπική απόκλιση των τιμών. Η εκτίμηση του λάθους είναι απαραίτητη όταν οι τιμές των παραμέτρων χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

Οπότε συγκεντρωτικά τα δεδομένα που απαιτούνται για να μοντελοποιηθεί η υπόγεια ροή μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η κατηγορία Α περιλαμβάνει τη γεωμετρία του συστήματος καθώς επίσης και το πάχος και την έκταση κάθε υδρογραφικής μονάδας.

#### **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α: ΦΥΣΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

1. Γεωλογικοί χάρτες και τμήματα εκτάσεων που απεικονίζουν το μέγεθος και τα όρια του συστήματος.
2. Τοπογραφικοί χάρτες που περιέχουν πληροφορίες και για επιφανειακά νερά.
3. Χάρτες που περιέχουν πληροφορίες για το περίγραμμα των υδροφορέων καθώς και για τα αδιαπέραστα στρώματα.
4. Χάρτες που περιγράφουν το πάχος των υδροφορέων και των αδιαπέραστων στρωμάτων.
5. Χάρτες που παρουσιάζουν τα όρια και το πάχος των ποταμών και των λιμνών.

Ενώ στην κατηγορία Β περιέχονται υδρολογικές πληροφορίες για το υδραυλικό ύψος και τη ροή, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη θεμελίωση του μοντέλου, καθώς επίσης και στο να καθοριστούν οι ιδιότητες και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

### **ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β: ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

1. Στάθμη νερού και ποτενσιομετρικοί χάρτες για του υδροφορείς.
2. Υδρογραφία των υπόγειων υδάτων και ο ρυθμός αποφόρτισης με τα επιφανειακά ύδατα.
3. Χάρτες που περιγράφουν την υδραυλική αγωγιμότητα και τη μεταβιβασιμότητα.
4. Χάρτες με πληροφορίες για την αποθηκευτική ικανότητα των υδροφορέων.
5. Υδραυλικές αγωγιμότητες και η συμπεριφορά του υδροφορέα με τα παρακείμενα ποτάμια και λίμνες.
6. Χωρική και χρονική κατανομή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής, υπόγειας επαναφόρτισης, αλληλεπίδρασης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, υπόγειας άντλησης και φυσικής υπόγειας αποφόρτισης.

Οι περισσότερες από αυτές τις πληροφορίες και οι διάφοροι συντελεστές προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία ή από μετρήσεις, τόσο από πειράματα που γίνονται σε εξειδικευμένα εργαστήρια όσο και σε μελέτες που γίνονται *in situ* στην εν λόγω περιοχή. [1]

### **3.6 Οριακές Συνθήκες**

Γενικά τα μαθηματικά μοντέλα περιέχουν τις θεμελιώδεις εξισώσεις, τις αρχικές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες. Με τον όρο οριακές συνθήκες εννοούμε μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (flux) στα όρια του κύριου προβλήματος που εξετάζεται. Έτσι οι αρχικές συνθήκες είναι για να περιγράψουν την τιμή μιας παραμέτρου σε κάποιο αρχικό χρόνο ίσο με το μηδέν ενώ οι οριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της υπό μελέτης περιοχής με το εξωτερικό της περιβάλλον.[2]

Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί κρίσιμο βήμα για το σωστό σχεδιασμό, διότι ασκούν επίδραση στην επίλυση του συστήματος, και είναι το πιο πιθανόν να συμβεί λάθος κατά το σχεδιασμό του μοντέλου. [1]

Τα όρια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

Στα φυσικά όρια των συστημάτων της υπόγειας ροής, τα οποία απαρτίζονται από φυσικές υπόγειες παρουσίες όπως αδιαπέραστα στρώματα βράχου και μεγάλα επιφανειακά υδατικά σώματα, και

Στα υδραυλικά όρια, τα οποία είναι δυσδιάκριτα όρια και περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και στρωτές ροές. (streamlines)

Τα υδρογεωλογικά όρια αντιπροσωπεύονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών: [1]

- **Πρώτο Είδος:** Όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, στα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο (*Specified head boundaries-Dirichlet conditions*).
- **Δεύτερο Είδος:** Όρια συγκεκριμένης ροής, στα οποία η παράγωγος του υδραυλικού ύψους-flux είναι δεδομένη. Όταν έχουμε οριακές συνθήκες μηδενικής ροής τότε η flux είναι μηδέν (*Specified flow boundaries-Neumann conditions*).
- **Τρίτο Είδος:** Οριακές συνθήκες ροής εξαρτημένες από το υδραυλικό ύψος, στις οποίες υπολογίζεται η flux κατά μήκος των ορίων από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται και mixed διότι συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής (*Head-dependent flow boundaries-Cauchy or mixed boundary conditions*).

Είναι προτιμότερο, όταν καθορίζονται τα όρια να λαμβάνονται υπόψη όλα τα γνωρίσματα όπως εισροές και εκροές έτσι ώστε η μορφή της ροής που θα προκύπτει από το μοντέλο να ταιριάζει με αυτή του πεδίου. Γενικά θα πρέπει να επιλέγονται φυσικά όρια, όπως αδιαπέραστοι βράχοι επειδή αποτελούν μέρη του όλου συστήματος. [1] Ορισμένα παραδείγματα άλλων ορίων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- Αδιαπέραστοι βράχοι ως το κατώτερο όριο του συστήματος
- Σημεία όπου παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Σ' 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 χαμηλότερη είναι κάθετη.
- Επιφανειακοί υδάτινοι αποδέκτες, οι οποίοι διεισδύουν ολικά σε υπόγειους υδροφορείς και αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους
- Αδιαπέραστα στρώματα καθώς επίσης και ελαττωματικές ζώνες και εισροές αλμυρού νερού σε παραθαλάσσιους υδροφορείς αποτελούν ιδανικά όρια μηδενικής ροής.

Σε ένα σύστημα ροής συνήθως υπάρχουν καθορισμένες τιμές του υδραυλικού ύψους και της ροής αλλά το πρόβλημα μπορεί να υπάρξει εάν χρησιμοποιηθούν μόνο οριακές συνθήκες ροής. Αυτό οφείλεται στο ότι η θεμελιώδης εξίσωση γράφεται με

τη μορφή παραγώγων ή διαφορικών του υδραυλικού ύψους και έτσι η λύση που θα προκύψει δεν θα είναι μοναδική αλλά θα υπάρχουν και άλλες. Σε προβλήματα σταθερών συνθηκών (steady-states) απαιτείται τουλάχιστον ένας οριακός κόμβος με καθορισμένο υδραυλικό ύψος έτσι ώστε να αποτελέσει τη βάση και να αρχίσει να υπολογίζει τις τιμές και στους άλλους κόμβους. Οι οριακές συνθήκες ροής σε συνδυασμό με τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος μπορεί να αποτελέσουν τη βάση για την επίλυση και άλλων σημαντικών προβλημάτων.[1]

Εάν δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν φυσικά όρια ούτε υδραυλικά χωρίσματα, τότε θα πρέπει να επιλεγούν άλλα όπως υδραυλικά όρια τα οποία όμως δεν θα επεμβαίνουν στην επίλυση του μοντέλου ούτε θα διαμορφώνουν τη ροή του συστήματος έτσι ώστε να είναι διαφορετική από αυτή που λαμβάνει χώρα στο πεδίο. Σ' αυτή την κατηγορία υπάρχουν δύο είδη τα οποία δεν συμπίπτουν με τα φυσικά τοπικά όρια:

- Απομακρυσμένα όρια. Σε παροδικές προσομοιώσεις, τα όρια είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένα αυθαίρετα και μακριά από το κέντρο του πλέγματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τις πιέσεις που δέχεται το σύστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και το υδραυλικό ύψος αλλά και η ροή γύρω από τα όρια να παραμένει αμετάβλητη. Έτσι για παράδειγμα σε μια παροδική προσομοίωση, στην οποία τα όρια δεν επηρεάζονται είναι όταν γίνεται άντληση νερού μέσω πηγαδιών και υπάρχει περιορισμένος χρόνος είτε όταν υπάρχει εισροή νερού από παρακείμενη πηγή όπως ποτάμι. Σ' αυτές τις περιπτώσεις το πλέγμα σχεδιάζεται με μικρές αποστάσεις των κόμβων στην περιοχή όπου εστιάζεται το πρόβλημα και κόμβοι με μεγαλύτερες αποστάσεις κοντά στα όρια.[1]
- 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 παρουσιάζεται να μιμείται τον τύπο της ροή που λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερα προβλήματα και συχνά καλούνται και τεχνητά όρια.[1]

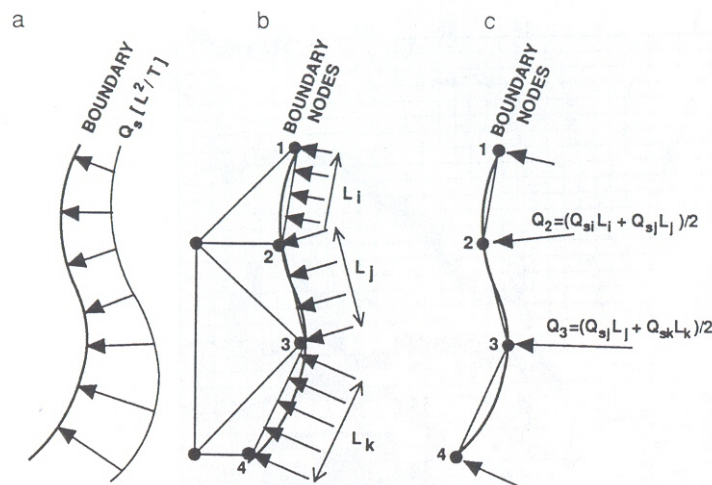
Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν σταθερές συνθήκες ροής όταν απαιτείται να γίνει η βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά μπορεί να μην είναι αποδεκτά για παροδικά προβλήματα ή για προβλέψιμες προσομοιώσεις με σταθερές συνθήκες και αυτό διότι το μοντέλο υποθέτει ότι οι συνθήκες 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 χάρις 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. Σ' αυτή την περίπτωση είτε διευρύνονται τα όρια της υπό μελέτης περιοχής είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές στις οριακές συνθήκες.[1]

Κατά την προσομοίωση των ορίων, σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και mesh-centered οι κόμβοι θα πρέπει πάντα να συμπίπτουν με τα όρια ενώ σε block-centered πλέγματα τα καθορισμένα υδραυλικά ύψη τοποθετούνται πάνω στους κόμβους και τα οι συνθήκες της ροής έξω από αυτούς. Πιο συγκεκριμένα:

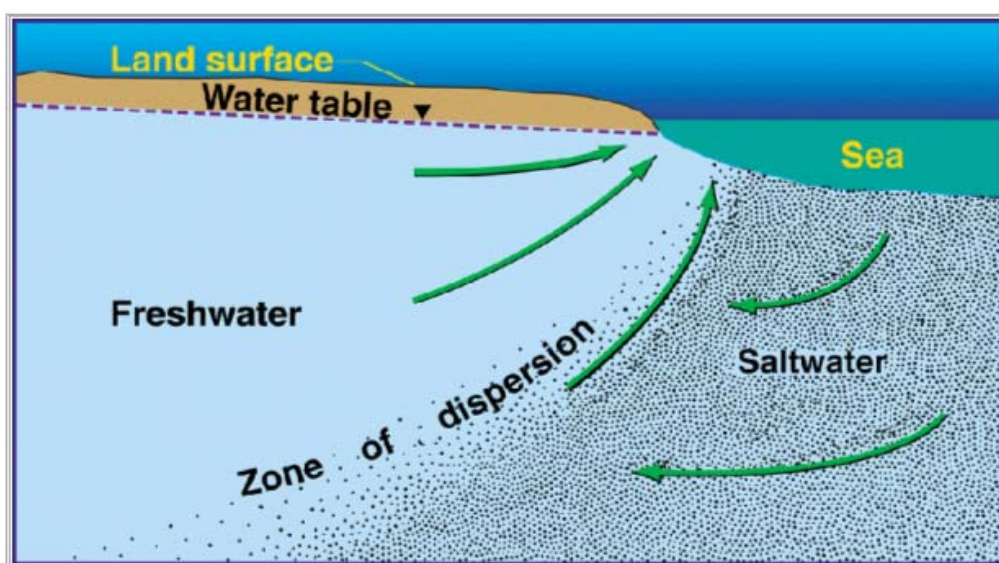
Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος: Σε καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους, η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κατάλληλους κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Όταν το όριο είναι ένα ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού ποικίλει χωρικά, ενώ όταν είναι μία λίμνη ή άλλο σώμα που περιέχει αποθέματα τότε επικρατούν σταθερές συνθήκες. Σε δυσδιάστατες προσομοιώσεις οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδατικά σώματα που διεισδύουν εξολοκλήρου 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. Επίσης είναι σημαντικό να διευκρινισθεί ότι τα καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες προμήθειες νερού και ότι στο υπόγειο σύστημα είναι δυνατόν να συμβαίνουν εισροές και εκροές χωρίς να μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος, πράγμα που δεν είναι ρεαλιστικό. Φυσικά είναι δυνατόν να αλλάξει η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια καθώς γίνεται η προσομοίωση, αρκεί η καινούργια τιμή να μπορεί να δικαιολογηθεί.[1]

Καθορισμένη ροή: Οι συνθήκες καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν fluxes σε επιφανειακά υδατικά σώματα, υπόγειες πηγές και ροές. Επίσης χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν υδραυλικά όρια σε τοπικά συστήματα ροής. Παρόλο που τις περισσότερες φορές είναι προτιμότερες οι συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους, διότι είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό αλλά και στη βαθμονόμηση, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι συνθήκες καθορισμένης ροής αποδίδουν περισσότερο όπως σε συστήματα όπου η ροή παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά το υδραυλικό ύψος όχι. Σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ο χρήστης τοποθετεί τη flux ανάμεσα σε δυο κόμβους και το μοντέλο-κώδικας την επανατοποθετεί όπως παρουσιάζεται στο σχήμα.[1]



Σχήμα 3.4 Οι οριακές συνθήκες σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με τριγωνικά στοιχεία: α. συνεχόμενη κατανομή της ροής κατά μήκος του ορίου β. Ξεχωριστή αναπαράσταση της ροής σε κάθε πλευρά του ορίου γ. Προσδιορισμός της ροής στους κόμβους. Πηγή [1]

Όρια μηδενικής ροής: Οι συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνουν χώρα όταν η flux κατά μήκος των ορίων είναι μηδέν, ενώ τα όρια μηδενικής ροής παρουσιάζονται σε αδιαπέραστους βράχους, σε ελαττωματικές ζώνες, σε υπόγεια χωρίσματα ή ακόμη και σε περιοχές όπου το θαλασσινό νερό συναντιέται με παραθαλάσσιους υδροφορείς. Σ' αυτή την περίπτωση τα υπόγεια νερά του υδροφορέα εκφορτίζονται στη θάλασσα διαμέσου μίας ζώνης διασποράς όπως φαίνεται στο σχήμα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται ένα μοντέλο που να επιτρέπει την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων που προέρχονται από τη διάχυση και διασπορά του θαλασσινού νερού.



Σχήμα 3.5 Ροή υπογείων υδάτων και η ζώνη διασποράς σε έναν ομοιογενή παράκτιο υδροφορέα. Πηγή [11]

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια μηδενικής ροής προσομοιώνονται με το μηδενισμό της μεταβιβασιμότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά έξω από τα όρια. Στα περισσότερα μοντέλα όμως θεωρούν μηδενική ροή στα όρια και μόνο ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να παρέμβει και να αλλάξει αυτές τις συνθήκες.[1]

Ροή εξαρτώμενη από το υδραυλικό ύψος: Η flux κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους στη μία πλευρά του ορίου και της άλλης τιμής που υπολογίζει το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Η διαφορά στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η flux 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 η flux δίνεται από την εξής σχέση:

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K_z'}{b'} (h_{source} - h)$$

όπου  $Q_L$  η ογκομετρική παροχή, και  $A$  η επιφάνεια του κελιού όπου λαμβάνει χώρα η διαρροή,  $h_{source}$  το υδραυλικό ύψος στην πηγή (λίμνη ή ποτάμι),  $h$  η τιμή του υδραυλικού ύψους πολύ κοντά στην πηγή,  $K_z$  η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της κοινής επιφάνειας και  $b$  το πάχος αυτής. Η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος της επιφάνειας του νερού μπορεί να υπολογιστεί με παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος, όπου η flux θα εξαρτάται από το βάθος του νερού και από την επιφάνεια.[1]

Όλες οι επιλογές που υπάρχουν για την προσομοίωση με οριακές συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο εσωτερικό του προβλήματος για να προσδιορίσουν πηγές ή σημεία συγκέντρωσης υπόγειου νερού ή ακόμη και για να προσδιορίσουν εσωτερικά όρια όπως λίμνες και ποτάμια που υπάρχουν στο εσωτερικό του πλέγματος.[1]



## 4. Περιγραφή του μοντέλου PTC

### 4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) είναι να εισάγει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί κυρίως για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για τους θεωρητικούς με αποτέλεσμα να επικεντρώνεται κυρίως στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και στη βιβλιογραφία για τις πηγές του νερού και όχι στις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη των εξισώσεων και στην ανάλυση του λάθους. Παρακάτω δίνονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις του μοντέλου καθώς και η επίλυση του αλγορίθμου.[10]

### Θεμελιώδεις Εξισώσεις

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (7)$$

όπου η υπόγεια ταχύτητα Darcy για κάθε κατεύθυνση είναι :

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (8)$$

και η μεταφορά ρύπων περιγράφεται από τη συγκέντρωση  $c$  :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Και οι τρεις εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy ενώ η διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση αυτών είναι: υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος  $h$  από την εξίσωση (7), υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  από την (8) και στη συνέχεια υπολογίζεται η συγκέντρωση του ρυπαντή  $c$  από την (9). [10]

## Επίλυση του Αλγορίθμου

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων σε σύνθετα φυσικά συστήματα απαιτούνται αριθμητικές μέθοδοι, και ειδικά για συστήματα πεδίου όπου για το υπολογιστικό μέρος χρησιμοποιούνται τρισδιάστατες εξισώσεις ο φόρτος εργασίας είναι πολύ μεγάλος. Το μοντέλο PTC εμπεριέχει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση τέτοιων τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό μέρος σημαντικά. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει με μια διακριτική ευχέρεια το πεδίο ορισμού σε οριζόντια και παράλληλα στρώματα μέσα στα οποία χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία για την εύστοχη αναπαράσταση του ακανόνιστου πεδίου ορισμού [18]. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με πεπερασμένες διαφορές ενώ η μέθοδος της υδρόβιας ένωσης των πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές εξασφαλίζει τη δυνατότητα για να ισχύσει η διαχωριστική διαδικασία. Κατά τη διάρκεια της επανάληψης μιας χρονικής περιόδου όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο μέρη, στο πρώτο όπου όλα τα οριζόντια πεπερασμένα στοιχεία επιλύονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και στο δεύτερο όπου επιλύονται όλες οι κάθετες εξισώσεις σε κάθε δεσμό του στρώματος.[10]

## 4.2 Υπόγεια τρισδιάστατη ροή

### Θεμελιώδεις εξισώσεις

Το μοντέλο PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής του συστήματος επιλύοντας για το υδραυλικό ύψος χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών μέσω των ακόλουθων χωρικών διαφορικών εξισώσεων [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \right) - S \frac{\partial}{\partial t} + \\ + \sum_{i=0}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

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

$h$  είναι το υδραυλικό ύψος [L],

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

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

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

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

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

$\delta$  είναι η Δέλτα συνάρτηση και

$r$  ο αριθμός των σημείων πηγών/ καταβύθισης.

### Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιεί το μοντέλο PTC για να λύσει την εξίσωση (10) εμπεριέχει στρογγυλοποιήσεις στους όρους που περιέχουν τις παραγώγους των  $x$  και  $y$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία στα οριζόντια επίπεδα είναι ευρύτατα διαδεδομένη. Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι υπάρχει ένα απεριόριστο άθροισμα συναρτήσεων που αναπαριστούν ακριβώς την λύση των χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή. Μία πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι :

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (11)$$

όπου

$h$  το υδραυλικό ύψος [L],

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

$h_i$  ένας εκκρεμής συντελεστής [L],

$w_i$  μία συνάρτηση (αδιάστατη) βάσης (παρεμβολής) και

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

Η σειρά προσέγγισης (11) προωθεί μια ακριβή αναπαράσταση καθώς το  $N$  πλησιάζει στο άπειρο (το  $\hat{h}$  πλησιάζει το  $h$ ). Με μια προσεκτική επιλογή της συνάρτησης βάσης  $w_i$ , ο εκκρεμής συντελεστής  $h_i$  μετατρέπεται σε τιμή υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες  $(x, y, z)$ . Ένας τρόπος για τον υπολογισμό του συντελεστή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση συνεχόμενων ξεχωριστών βημάτων στη συνάρτηση βάσης η οποία είναι μη μηδενική πέρα από μια μικρή υποπεριοχή του συνολικού πεδίου ορισμού. Καθώς αρκετά διαφορετικά είδη συναρτήσεων βάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν [17], το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί ξεχωριστές γραμμικές συναρτήσεις ανάμεσα στους παρακείμενους κόμβους των σημείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προέρχεται διαπιστώνοντας ότι ο διαφορικός συντελεστής  $L$  (στην εξίσωση 10) όταν συντελεί στο  $h$  που είναι ίσο με μηδέν, τότε στο συντελεστή  $L$  της προσεγγιστικής συνάρτησης παρουσιάζεται ένα λάθος. Με μαθηματικούς όρους η εξίσωση (10) μπορεί να γραφτεί ως:

$$L(h)=0 \quad (12)$$

ενώ

$$L(\hat{h})=R \quad (13)$$

όπου  $R$  το παραμένον λάθος.

Για την επίλυση της εξίσωσης (11) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ελαχιστοποιηθεί το παραμένον λάθος R. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη ένα ολοκληρωμένο σύστημα συναρτήσεων  $w_i$  και εξαναγκάζοντας το παραμένον λάθος R να είναι εφικτό για όλες τις τιμές του  $w_i$  οπότε στην πραγματικότητα το R πλησιάζει στο μηδέν γεγονός που σημαίνει ότι αποκομίζεται η λύση της εξίσωσης (11). Με μαθηματικούς όρους αυτό σημαίνει [10] :

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

#### Απαιτήσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών

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

$$Ah + B \frac{\partial}{\partial t} - v + f = 0 \quad (14)$$

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

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (15)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (16)$$

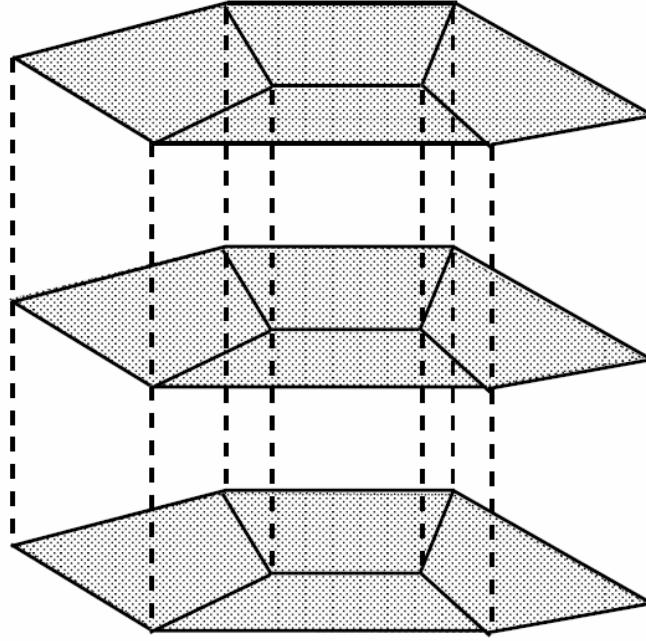
$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (17)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (18)$$

όπου στην f περιέχονται οι γνώστες οριακές συνθήκες.[10]

#### Η κάθετη παράγωγος

Το κεντρικό γνώρισμα στον κώδικα του μοντέλου PTC είναι η χρήση κεντρικής διαφοροποίησης για τα διάφορα διαστήματα στην z κατεύθυνση στην εξίσωση (18). Αυτή η κάθετη διαφοροποίηση ολοκληρώνεται με τη βοήθεια οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντικαθιστούνται από στρώματα με κόμβους τον έναν πάνω στον άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 4.1 Σχηματική αναπαράσταση ενός οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντικαθιστούνται από στρώματα με κόμβους τον έναν πάνω στον άλλο και παίρνουν τρισδιάστατη μορφή. Πηγή: [10]

Αυτό σημαίνει ότι η κάθετη κατεύθυνση σε μια δυσδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια προσέγγιση της εξίσωσης (18). Χρησιμοποιώντας το  $k$  ως κάθετο δείκτη και με  $k=1$  το στρώμα του πυθμένα, η προσέγγιση μπορεί να γραφτεί ως :

$$v \cong C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \quad (19)$$

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

$$C_{ij;k}^\pm = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k \left[ \Delta z_{k+1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k+1} \right]} w_i w_j dx dy \quad (20)$$

όπου  $(\Delta z_k)$  είναι το πάχος του στρώματος  $k$  στο σημείο της προσέγγισης. Η αρμονία υποδηλώνει ότι δίδεται περισσότερη ρεαλιστική ποσότητα όταν αντιμετωπίζονται καταστάσεις με φυσική ετερογένεια. Με αντικατάσταση της εξίσωσης (19) στην (14) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τυπικά στρώματα  $k$  :

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - \left[ C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \right] + f_k = 0 \quad (21)$$

όπου το  $h_k$  αντικαθιστά τον παράγοντα  $h$  του υδραυλικού ύψους στο στρώμα  $k$ ,  $k=1,2,\dots,M$ , και  $M$  ο αριθμός των στρωμάτων στην  $z$  κατεύθυνση. [10]

### Η παράγωγος του χρόνου

Από εμπειρικούς λόγους έχει αποδειχθεί ότι μία ενδεχόμενη προσέγγιση διαφοράς κατευθυνόμενη προς τα πίσω με την παραγωγή του χρόνου εξασφαλίζει την πιο ακριβή λύση για προβλήματα υπόγειας ροής. Σύμφωνα μ' αυτή την προσέγγιση, ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται είναι για να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους που δίνονται σε καινούργια επίπεδα χρόνου. Οπότε εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην (21) για κάθε στρώμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση όπου εξασφαλίζεται με ένα σύστημα  $M \times N$  εξισώσεων με  $N$  αγνώστους από την (11) για κάθε  $M$  στρώματα.[10]

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - \left[ C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k+1}) \right]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (22)$$

### 4.3 Οριακές συνθήκες.

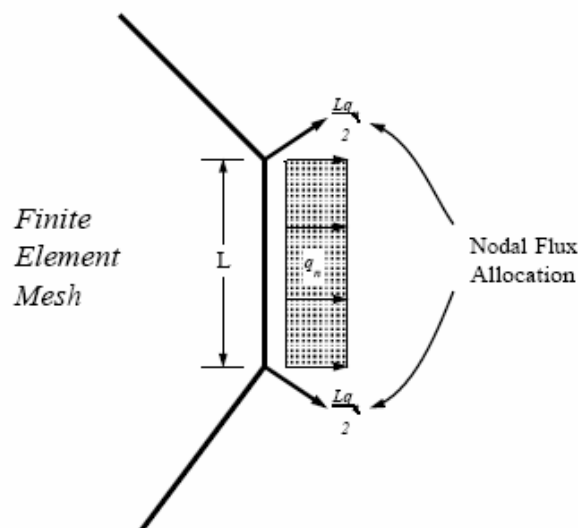
Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Αυτοί οι τρεις τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους), του Neumann (καθορισμένης ροής) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (της διαρροής). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδέν. Αυτό συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα καθώς και αδιαπέραστα στρώματα γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.[10]

### Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Τα όρια καθορισμένου ύψους καθορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους, ως σταθερούς όρους. Αφού οι κόμβοι που έχουν σταθερό υδραυλικό ύψος παραλείπονται από την μαθηματική εξίσωση του πίνακα, τότε απομένουν  $(N \times M - N_C)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_C)$  αγνώστους, με  $N_C$  τον ολικό αριθμό των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.[10]

### Καθορισμένη Ροή

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



Σχήμα 4.2 Κομβική κατανομή της ροής  $q$  κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ . Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος έχει ισοδύναμη βαρύτητα. Πηγή: [10]

Έτσι ο χρήστης χρειάζεται μόνο να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται επίσης μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Για την διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και αυτόματα κάνει ολοκλήρωση της περιοχής για να καθοριστεί η ογκομετρική ροή.[10]

### Τρίτου Τύπου

Στις οριακές συνθήκες τρίτου τύπου εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (leakage conductance) ο οποίος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση και ολοκληρώνεται στην περιοχή για να αναπαραστήσει την κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από το χρήστη, μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.[10]

#### 4.4 Συνθήκες του υδροφόρου ορίζοντα

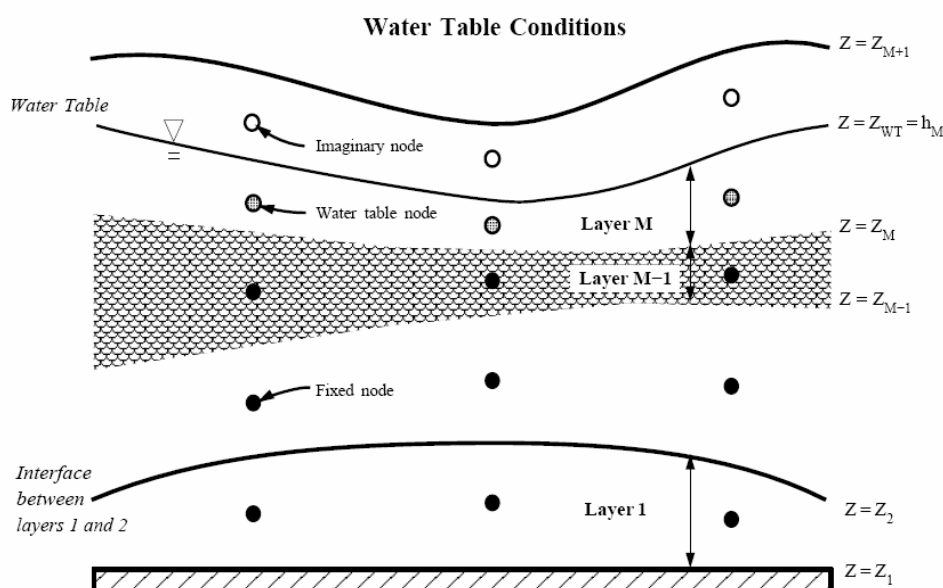
Οι οριακές συνθήκες που απαιτούνται σε έναν ελεύθερο υδροφορέα είναι δύο και εφαρμόζονται στο πάνω στρώμα του υδροφόρου ορίζοντα. Μια σχηματική αναπαράσταση που περιλαμβάνει την κίνηση αυτού και το μέγεθος της διείσδυσης  $R(x,y,t)$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Το σταθερό υψόμετρο του πάνω ορίου στο πεδίο ορισμού της ροής δίδεται από  $z = z_{M+1}(x, y, t)$  και το πραγματικό υψόμετρο της στάθμης του νερού από  $z = z_{WT}(x, y, t)$ .

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

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (23)$$

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

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (24)$$



Σχήμα 4.3 Ο υδροφόρος ορίζοντας και οι συνθήκες που επικρατούν στο πάνω όριο. Η επιφάνεια δηλώνεται με  $z=z_1$ ,  $z=z_2$  είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. **Προσοχή:** ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας  $z = z_{wt}$  πρέπει να ικανοποιεί

τη συνθήκη  $z_M \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$ . Πηγή: [10]



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

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (25)$$

#### 4.5 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

##### Θεμελιώδεις εξισώσεις

Η εξίσωση μεταφοράς είναι :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \\ - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

οι όροι της (26) ξεχωριστά καθορίζονται ως εξής: [Burnett and Frind, 1987]

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

και οι υπόλοιποι όροι:

- $D_M$  συντελεστής μοριακής διάχυσης, γενικά μικρός [ $L^2/T$ ],
- $a_L$  η κατά μήκος διασπορά [ $L$ ],
- $a_T$  η οριζόντια εγκάρσια διασπορά [ $L$ ],
- $a_V$  η κάθετη εγκάρσια διασπορά [ $L$ ],
- $V$  το μέγεθος του συντελεστή της ταχύτητας [ $L/T$ ] ( $V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ ),
- $c$  η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x,y,z) και σε χρόνο t [ $M/L^3$ ],
- $\theta$  το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),
- $E(c)$  η συνάρτηση που αναπαριστά τη χημική προσρόφηση,

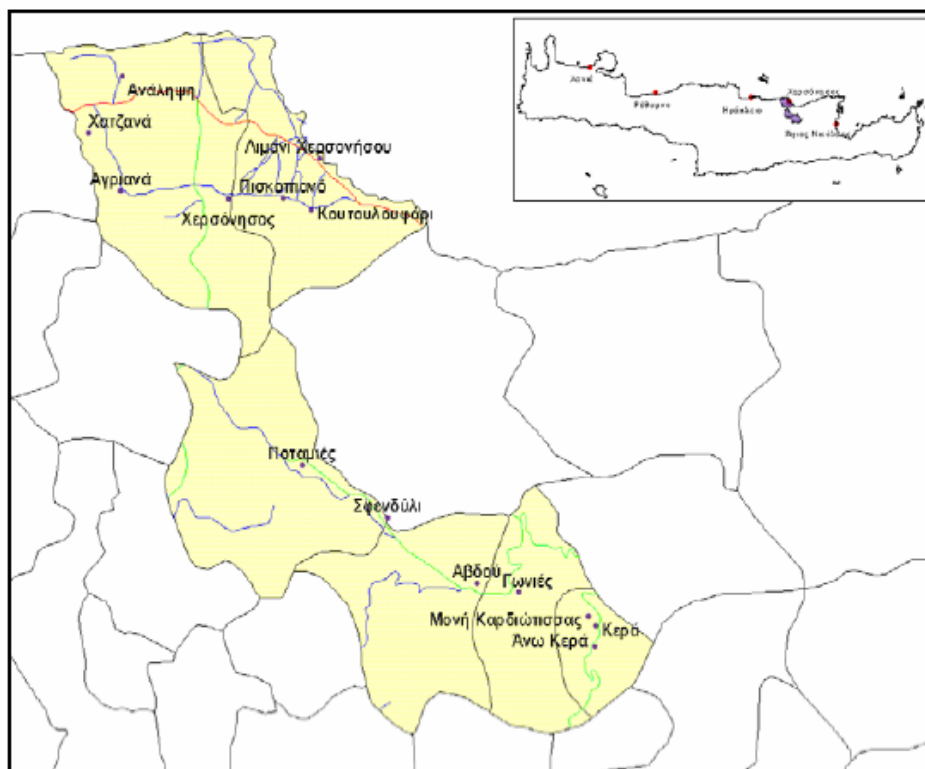
- $Q$  η ισχύς της άντλησης [ $1/T$ ] ( $Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ ),  
 $Q_i$  ο ογκομετρικός ρυθμός φόρτωσης/ εκφόρτωσης [ $L^3/T$ ] στο σημείο  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  
 $c^w$  η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού στο σημείο  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  
 $\delta()$  η συνάρτηση Δέλτα

Για όλες τις περιπτώσεις άντλησης ( $Q_i \leq 0$ ) γίνεται η υπόθεση ότι η συγκέντρωση του νερού  $c^w$  στο πηγάδι ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση  $c$  του περιβάλλοντα χώρου. Έτσι σε όλα τα πηγάδια ο συντελεστής  $Q(c^w - c)$  ισοδυναμεί με μηδέν και επομένως εξασφαλίζεται ο όρος  $Q$  στην εξίσωση (26) μόνο όταν το πηγάδι αντλεί ( $Q_i > 0$ ) τη διαλυμένη ύλη με συγκέντρωση  $c^w$  που αναπαριστά τη συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού.[10]

## 5.Περιγραφή της περιοχής.

### 5.1 Εισαγωγή

Ο Δήμος Χερσονήσου βρίσκεται στα Βόρεια παράλια του Νομού Ηρακλείου και μόλις 25 χλμ. από την πόλη του Ηρακλείου. Είναι πολύ κοντά στις κυριότερες πύλες εισόδου του νησιού που είναι το λιμάνι και το αεροδρόμιο του Ηρακλείου καθώς και στον αρχαιολογικό χώρο της Κνωσού. Από το 1998 περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα Λιμένας Χερσονήσου, Χερσόνησος, Ποταμιές, Αβδού, Γωνιές και Κερά με τους επιμέρους οικισμούς που περιλαμβάνει καθένα από αυτά.



Σχήμα 5.1. Ο λιμένας Χερσονήσου και η ευρύτερη περιοχή του Δήμου Χερσονήσου.  
Πηγή [6]

Ο Λιμένας είναι παραθαλάσσιος και η περιοχή όπου ουσιαστικά αναπτύσσεται η τουριστική δραστηριότητα του Δήμου. Τμήμα της Χερσονήσου είναι παραθαλάσσιο και επίσης παρατηρείται τουριστική ανάπτυξη ενώ τα υπόλοιπα διαμερίσματα βρίσκονται στην ενδοχώρα και η τουριστική τους ανάπτυξη είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη με κύρια οικονομική δραστηριότητα τη γεωργία. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '60 η κύρια απασχόληση του πληθυσμού ήταν η γεωργία και

η κτηνοτροφία (90-95%), ενώ οι υπόλοιπες δραστηριότητες κάλυπταν το 4-5% (ΥΠ.ΕΣ.Δ.Α.Α., 2000). Σήμερα παρατηρείται μία πλήρης αντιστροφή των δεδομένων με τη συντριπτική πλειοψηφία των κατοίκων (10.491 κάτοικοι από τους οποίους 5.727 άνδρες και 4.764 γυναίκες) να απασχολείται στον τριτογενή τομέα. Η περιοχή της Χερσονήσου είναι ένας από τους πλέον δημοφιλείς και ανεπτυγμένους τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης αλλά και της χώρας. Με 118 ξενοδοχεία και 19.566 κρεβάτια κύριων τουριστικών καταλυμάτων το 1999 τα οποία αντιστοιχούν στο 17,7 % των κλινών της Κρήτης και 3,3 % της Ελλάδας, είναι εμφανής η σημασία του τουρισμού στην περιοχή τόσο σαν οικονομική δραστηριότητα όσο και σαν φορέας κοινωνικών και περιβαλλοντικών αλλαγών. Μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν αντιπροσωπευτικό δείγμα των ανεπτυγμένων τουριστικών περιοχών της Ελλάδας, αλλά και της Μεσογείου γενικότερα.[6]

## 5.2 Κλιματολογικά στοιχεία

Γενικά το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό, στους ορεινούς όγκους της όμως τείνει προς τον ηπειρωτικό τύπο. Ο ετήσιος μέσος όρος θερμοκρασίας είναι 14-15<sup>0</sup>C . Ο χειμώνας είναι ήπιος με ψυχρότερους μήνες τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο. Η πεδινή Κρήτη και ιδιαίτερα οι νοτιοανατολικές περιοχές είναι από τις θερμότερες της Ελλάδας. Η ηλιοφάνεια διαρκεί όλους τους μήνες του έτους ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, αν και λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων , το θέρος είναι σχετικά δροσερό. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από την παράκτια ζώνη στην ορεινή.

Το κλίμα της περιοχής της Χερσονήσου είναι τυπικά μεσογειακό με βροχερή περίοδο το χειμώνα από Οκτώβριο μέχρι Μάρτιο. Το θέρος είναι θερμό και ξηρό ενώ οι βροχοπτώσεις μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους. Επίσης η θερμοκρασία στην περιοχή, η μέση τιμή της οποίας ανέρχεται στους 19<sup>0</sup>C, παρουσιάζει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή. Έτσι 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 Ιούλιο σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές.

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754

Γεωγραφικό μήκος 25,11 / Γεωγραφικό πλάτος 35,2

Ύψος σταθμού 38 m

Μήνας	Ώρες ηλιο-φάνειας	Βαρο-μετρική πίεση	Μέση θερμο-κρασία αέρα	Απόλυτη μέγιστη θερμο-κρασία	Απόλυτη ελάχιστη θερμο-κρασία	Σχετική Υγρασία	Μέση Νέφωση	Βροχο-πτώση	Ολική ηλιακή ακτινο-βολία σε οριζόντιο επιπ.	Διάχυτη ηλιακή ακτινο-βολία σε οριζόντιο επιπ.	Ταχύτητα ανέμου
	h	mm Hg	oC	oC	oC	%	8	σε mm			m/sec
1	108,8	1017,1	12,2	24,8	0,2	71	5,3	90,1	67,33	35,22	3,8
2	128,4	1016	12,5	29,2	-0,5	69	5,1	67,6	82,54	40,67	4
3	170,3	1014,9	13,8	34,8	1,7	66	4,8	58,2	124,87	58,28	4
4	234,5	1013,3	16,8	36	4,4	64	3,7	28,5	161,88	62,74	3,4
5	314,3	1013,6	20,8	39	7	64	2,9	14,2	213,96	62,15	2,3
6	353,3	1012,6	24,4	45,7	8,7	59	1,4	3,5	230,23	56,20	3
7	384,7	1011	26,4	41	15	59	0,6	1,0	248,99	54,12	4
8	356,7	1011,4	26,3	40,7	14	60	0,7	0,6	221,15	51,13	4
9	285,2	1014,6	23,7	38,5	10,6	63	1,8	17,7	174,12	42,92	3,4
10	197,2	1016,7	20,3	36,2	7,9	67	3,6	64,9	114,20	44,54	3,2
11	161,5	1017,5	17,1	31,9	1,9	70	4,7	59,0	81,54	33,62	3
12	121,1	1016,8	13,9	26,7	2	70	5,1	77,9	64,60	30,79	4
Σύν.	2816								1785,43	572,39	

Πηγή: E.M.Y. [12]

### Βροχοπτώσεις

Η περίοδος των βροχοπτώσεων είναι κυρίως τους χειμερινούς μήνες από Οκτώβριο μέχρι Μάρτιο με ετήσιο ύψος βροχής 483.2mm. Εντός του έτους όμως η κατανομή τους είναι ανομοιόμορφη με ελάχιστο τους καλοκαιρινούς μήνες με 0.6 mm τον Ιούλιο και μέγιστο τον Ιανουάριο με 90.1 mm βροχής. Χιονοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή δεν υπάρχουν μιας και το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σπάνιο.

### Ανεμολογικά στοιχεία

Από επεξεργασία των στοιχείων από το μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου (Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2) για την περίοδο 1955 έως 1998 προέκυψε ότι :

- Η συχνότητα των ανέμων είναι κυρίως Βόρειοι και Βορειοδυτικοί με ποσοστά 16,9% και 28.9% αντίστοιχα ενώ σημαντική είναι και η συχνότητα των Νότιων ανέμων με 14.6% καθώς 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% ενώ τη 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.

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754										
Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2										
Ύψος σταθμού 38 m										
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

Πηγή: E.M.Y. [12]

### 5.3 Χλωρίδα – Πανίδα

Στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν τα οικοσυστήματα της πεδινής και ημιορεινής ζώνης ενώ επικρατεί κυρίως αυτοφυής υποβαθμισμένη βλάστηση. Η σημασία της χλωρίδας της φυσικής βλάστησης και γενικά των φυτών είναι τεράστια, πρωταρχικής και καθοριστικής σημασίας, αφού τα φυτά είναι οι μόνοι αυτότροφοι οργανισμοί,

παράγουν από ανόργανα στοιχεία οργανική ουσία, είναι η βάση της τροφικής αλυσίδας και χωρίς τα φυτά η ζωή στη γη είναι αδύνατη. Η χλωρίδα της υπό μελέτης περιοχής αναπτύσσεται από δέντρα, θάμνους και από ποώδη βλάστηση. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από:

- |             |              |
|-------------|--------------|
| ▪ φρύγανα   | ▪ αφάνες     |
| ▪ αστιβίδες | ▪ ασπαλάθους |
| ▪ θυμάρια   | ▪ θρύμνα.    |

Επίσης η περιοχή παρουσιάζει ένα μωσαϊκό βλάστησης από τα προαναφερθέντα βλαστικά είδη και εγκαταλελειμμένα ελαιόδεντρα που παλαιότερα καλλιεργούνταν στην περιοχή καθώς και από αραιές στοιβάδες από ξυλώδη βλάστηση σκληρόφυλλων και αείφυλλων:

- |           |            |
|-----------|------------|
| ▪ Σχοίνος | ▪ Χαρουπιά |
| ▪ Ερείκη  | ▪ Πρίνος   |

Η πληθυσμιακή ισορροπία των άλλοτε ευρέως διαδεδομένων ειδών πανίδας της περιοχής σήμερα έχει διαταραχθεί. Οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης, είναι μεν ευνοϊκές για την ανάπτυξη της πανίδας (ζωοκοινότητας) ιδιαίτερα στα αρθρόποδα, τα έντομα, τα αραχνοειδή και τα μαλάκια (σαλιγκάρια), όμως λόγω της αλόγιστης εκμετάλλευσης των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, της σημαντικής υποβάθμισης των φυτικής βλάστησης, της παράνομης θήρευσης και της τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής ο αριθμός των ζώων στις ανώτερες τάξεις, πτηνά και θηλαστικά, είναι περιορισμένος. Επίσης δεν υπάρχουν σπάνια ή προστατευόμενα είδη ενώ τα κύρια είδη της πανίδας είναι :

- ο λαγός
- η ζουρίδα ή το κουνάβι
- η κουκουβάγια
- οι σαύρες, και
- διάφορα είδη πουλιών.

#### 5.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία

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

1. Στους υδροπερατούς σχηματισμούς στους οποίους αναφέρονται τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψοι,

κροκαλοπαγή, και ψαμμίτες του νεογενούς καθώς και τα κροκαλοπαγή, κορήματα του τεταρτογενούς.

2. Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς στους οποίους αναφέρονται οι ψυλλίτες χαλαζίτες και φλύσχης του προνεογούς καθώς και μάργες, άργιλοι του νεογενούς.

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωλογική έρευνα καθώς εντός αυτών αναπτύσσονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Παρ' όλα αυτά όμως για την διαμόρφωση, την διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού νερού ιδιαίτερο ρόλο παρουσιάζουν και οι υδατοστεγείς σχηματισμοί. [7]

#### **5.4.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί**

##### 1. Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Η ομάδα αυτή των πετρωμάτων αποτελείται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους καθώς και 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. Τα πετρώματα που δομούν τους δύο κύριους ορεινούς όγκους Δίκτη και Ψηλορείτη είναι τα ανθρακικά που λόγω του μεγάλου υψομέτρου που τα χαρακτηρίζει δέχονται μεγάλες ποσότητες νερού από τη 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 όπως διαφαίνεται από τις πολλές πηγές (Ζαρού, πηγές Μαλίων). Επιπλέον από τις υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών πετρωμάτων τροφοδοτούνται με σημαντικό ποσοστό νερού τα υπόγεια και πλευρικά υδροφόρα στρώματα των νεογενών αποθέσεων που έρχονται σε άμεση επαφή, κυρίως στις παρυφές των ορεινών όγκων.

Η ποιότητα του νερού στους ανθρακικούς σχηματισμούς είναι συνήθως καλή, προβλήματα μόνο υπάρχουν σε περίπτωση που οι σχηματισμοί αυτοί έρχονται σε επαφή με την θάλασσα οπότε και δημιουργείται το μέτωπο της υφαλμύρωσης όπως συμβαίνει στην περιοχή της Χερσονήσου. Στην περιοχή των Μαλίων και Χερσονήσου μικρό πρόβλημα παρατηρείται και στο τέλος της ξηράς περιόδου, αλλά με τις πρώτες βροχές το ποσοστό σε χλώρια επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.[7]



## 2.Νεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Στους υδροπερατούς σχηματισμούς του νεογενούς κατατάσσονται κυρίως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμος καθώς και πετρώματα γύψων. Η περατότητα στους σχηματισμούς αυτούς οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες που δημιουργείται λόγω διάβρωσης ή τεκτονισμού (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψος) ή στο πρωτογενές πορώδες που εξαρτάται από τη σύσταση και την κοκκομετρία του πετρώματος (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες άμμοι).

Η διαμόρφωση των υπόγειων υδροφορέων εντός των σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή κατείσδυσης, από τον όγκο που καταλαμβάνουν και από την δυνατότητα τροφοδοσίας τους με νερό, είτε απευθείας από τη βροχή είτε πλευρικά από υδροφόρους προνεογενείς σχηματισμούς με τους οποίους έρχονται σε άμεση επαφή. Σε αρκετές περιπτώσεις διαμορφώνονται αξιόλογοι υπόγειοι υδροφορείς κυρίως σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και γύψους. Τα γυψούχα νερά είναι βέβαια ακατάλληλα προς χρήση ύδρευσης αλλά καλύπτουν σημαντικές αρδευτικές ανάγκες. [7]

## 3.Τεταρογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Αναφέρονται κυρίως σε ποτάμιες αποθέσεις, ψαμμίτες άμμου και κορήματα που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους είναι υδροπερατοί σχηματισμοί. Συνήθως επειδή παρουσιάζουν μικρό πάχος αναπτύσσεται εντός αυτών ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας, όπου όμως έχουν σημαντικό πάχος αναπτύσσεται και υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας.[7]

### **5.4.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί**

#### 1.Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς προνεογενείς σχηματισμούς αναφέρονται τα πετρώματα της Φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς, ο φλύσχης και οι σχηματισμοί των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστώδων. Οι σχηματισμοί αυτοί στο σύνολό τους χαρακτηρίζονται σαν υδατοστεγείς, εξαίρεση όμως αποτελεί το σαθρό κάλυμμα τους καθώς και κάποιο δευτερογενές πορώδες που είναι συνέπεια από τεκτονικά αίτια.

Η στεγανότητα των πετρωμάτων αυτών, σε συνδυασμό με την τεκτονική της περιοχής εκπληρώνει σοβαρό ρόλο στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τη διακίνηση του υπόγειου νερού, το διαχωρισμό της περιοχής σε υδρογεωλογικές ενότητες και σαν στεγανό διάφραγμα επιτρέπει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων σε διάφορα υψόμετρα. Η ποιότητα του νερού που εντοπίζεται στους σχηματισμούς αυτούς είναι καλή και καλύπτει τοπικές υδρευτικές ανάγκες.[7]

## 2.Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς του νεογενούς ανήκουν οι μάργες και οι άργιλοι που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους είναι αδιαπέρατοι, πράγμα που αποκλείει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων πρακτικής σημασίας. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αρκετά προβλήματα ανεπάρκειας νερού σε πολλές περιοχές. Επίσης λόγω της υδατοστεγανότητας αυτών των σχηματισμών παρατηρείται αυξημένη επιφανειακή απορροή στις περιοχές όπου εμφανίζονται με αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να καταλήγουν στη θάλασσα και να μένει ανεκμετάλλευτη αυτή η ποσότητα.[7]

### **5.4.3 Διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων και υδρογεωλογικών ενοτήτων**

Η διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων και υδρογεωλογικών ενοτήτων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, το γεωλογικό σχηματισμό που είναι περατός στο νερό και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη τεκτονική μορφή, ή το επίπεδο θάλασσας όταν πρόκειται για υπόβαθρο ανθρακικών πετρωμάτων. Κάτω από την συνύπαρξη αυτών των προϋποθέσεων, τα νερά της βροχής κατεισδύουν στα πετρώματα, συγκεντρώνονται στους πόρους, τα καρστικά και τεκτονικά διάκενα διαμορφώνοντας υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, υδρογεωλογικές ενότητες και λεκάνες υδρογεωλογικών ενοτήτων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δύο ορεινοί όγκοι Ψηλορείτης και Δίκτη είναι οι κύριοι τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής, χωρίζονται οι εξής υδρογεωλογικές ενότητες:

- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη
- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη
- Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων
- Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου

Η Υδρογεωλογική ενότητα όμως που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι η Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη, η οποία περιλαμβάνει τις γεωλογικές ενότητες και υπόγειες υδροφορίες που τροφοδοτούνται από τον ορεινό όγκο, άσχετα αν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν ή όχι στον βασικό κορμό του.

Γενικά ο ορεινός όγκος Δίκτη ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό 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 απωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της Φυλλιτικής – Χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών, ενώ το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελούν Πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης ενότητας Κρήτης πάνω στην οποία έχουν επωπηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες. Η ενότητα των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών στην περιοχή μελέτης δεν εμφανίζεται.

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

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

Από αυτούς τους σχηματισμούς η μελέτη αφορά άμεσα τους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου. Πιο συγκεκριμένα όλες οι ερευνητικές γεωτρήσεις που έχουν γίνει στην προσπάθεια της κοινότητας για εντοπισμό υπόγειων υδροφορέων 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 τη θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστολιθικών του Ιουρασικού και των ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής.[7]

## 6. Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης Χερσονήσου με τη χρήση του μοντέλου PTC.

### 6.1 Εισαγωγή

Για να γίνει ο προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης της Χερσονήσου με τη βοήθεια του μοντέλου PTC είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων στοιχείων, έτσι ώστε να γίνει μια προσομοίωση της περιοχής καθώς και του υδροφορέα που υπάρχει εκεί. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις υδραυλικές αγωγιμότητες, τα υψόμετρα της περιοχής καθώς και τις αρχικές συνθήκες, τις οριακές, τη βροχόπτωση, της εισαγωγή των πηγαιδιών που υπάρχουν, με τους ρυθμούς άντλησης και τέλος το χρόνο της προσομοίωσης. Μ' αυτά τα στοιχεία το μοντέλο PTC επιτυγχάνει μια αναπαράσταση της περιοχής και δίνει το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα και τις κάθετες και οριζόντιες ταχύτητες του νερού. Επίσης υπάρχει δυνατότητα για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ενός ρύπου στον υδροφορέα που οφείλεται στη μεταφορά του από το νερό.

### 6.2 Χάρτες

Αρχικά εισήχθησαν οι χάρτες της περιοχής μελέτης με τέτοιο τρόπο ώστε να αλληλεπικαλύπτονται καθώς το μοντέλο λειτουργεί με στρώματα (layers) και κάθε σημείο του ένα χάρτη θα πρέπει να αντιστοιχεί στο αντίστοιχο του άλλου. Επίσης οι χάρτες ήταν της ίδιας κλίμακας (1 : 50000) και περιείχαν στοιχεία ο μεν υδρολογικός για τα πηγάδια που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή, τόσο ιδιωτικά όσο και δημοτικά,

A/A	Αρ. Πρ.	Βάθος m	Παροχή m <sup>3</sup> /h	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

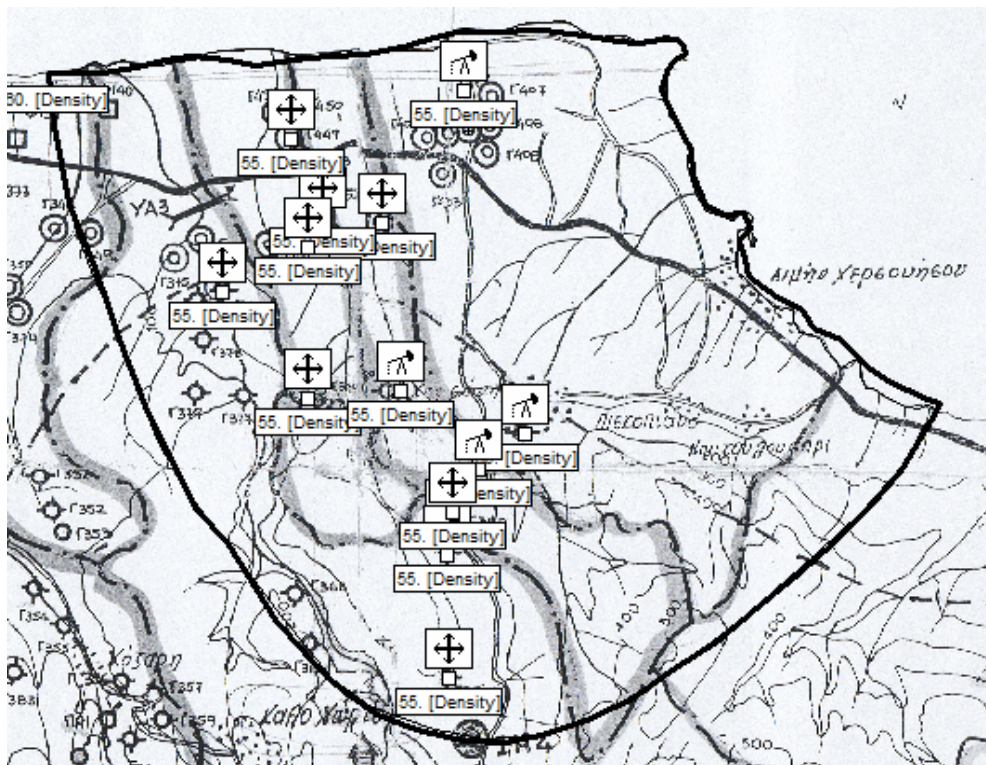
ο δε υδρογεωλογικός για τη γεωλογία και τα υδρολογικά πετρώματα που βρίσκονται εκεί. Επίσης στα σχήματα των χαρτών παρουσιάζεται σκιαγραφημένη η περιοχή μελέτης όπως και τα πηγάδια στις θέσεις που υπάρχουν.

Για την καλύτερη μοντελοποίηση της περιοχής, λόγω μεγάλου αριθμού πηγαιδιών έγινε μια ομαδοποίηση αυτών και από σύνολο 21 πηγαιδιών τελικά εισήχθησαν 13 έκτον οποίων 8 ομαδοποιημένα ιδιωτικά και 5 δημοτικά.

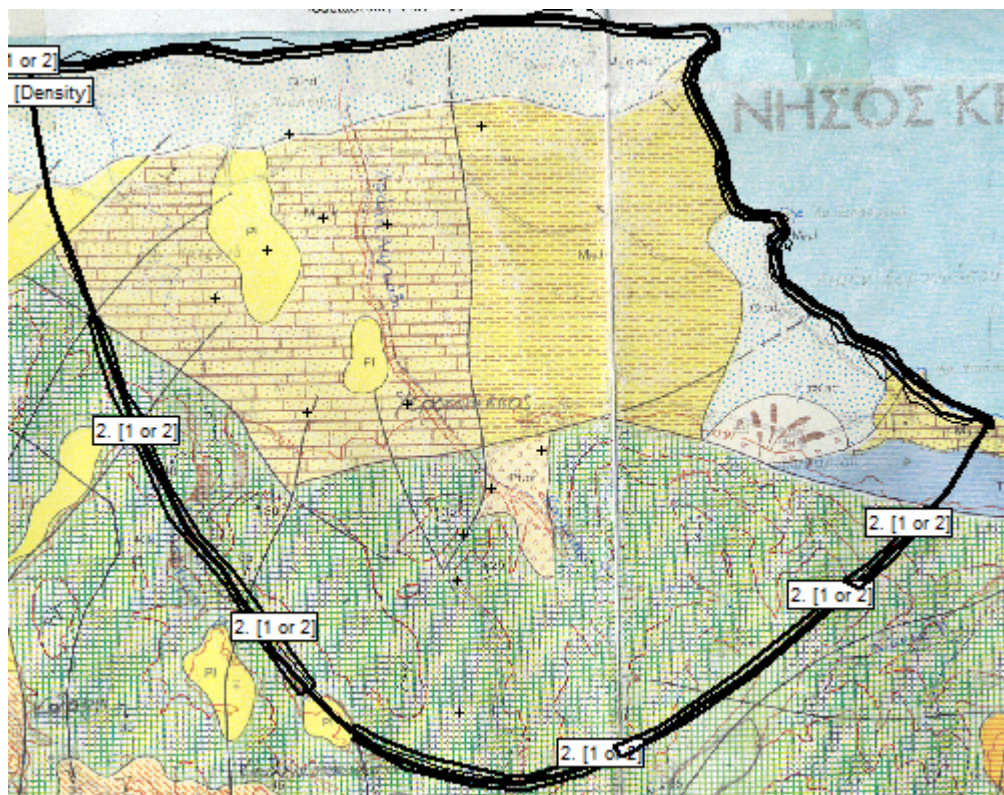
Η περιοχή μελέτης αφορά το ακρωτήριο της Χερσονήσου, το λιμένα Χερσονήσου κατά μήκος της ακτής του και τους οικισμούς Πισκοπιανό, Κουτουλουφάρη και επεκτείνεται νότια μέχρι το Καλό χωριό. Τα πετρώματα που υπάρχουν στην περιοχή είναι κυρίως ως επί των πλείστων ασβεστόλιθοι οι οποίοι παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα στο χάρτη. 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. Επίσης ανατολικά υπάρχουν ιλυούχες άργιλοι και καλά διαβαθμισμένες άμμοι (ελαφρύ κίτρινο) ενώ κατά μήκος της ακτής υπάρχουν άμμοι ακτών και χαλαρά αργιλοαμμώδη (άσπρο με γαλάζιο). Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας γι' αυτά τα πετρώματα όπως βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία και είναι :

Πετρώματα	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθοι – Δομολίτες	12.96
Βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι	5.2
Μάργες - Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0.15
Άργιλος	0.6048
Άμμος – θαλάσσιες αποθέσεις	430
Λατύπες ανθρακικής σύνθεσης	173.2





Σχήμα 7.1. Ο υδρολογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης και τα πηγάδια.



Σχήμα 7.2. Ο υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης, και τις οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους

### **6.3 Οριακές συνθήκες**

Στον υδρογεωλογικό χάρτη παρουσιάζονται επίσης και οι οριακές συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο. Οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους έχουμε κατά μήκος της ακτής όπου το υδραυλικό ύψος είναι ίσο με 100 όσο δηλαδή είναι και το ύψος της θάλασσας σε εκείνο το σημείο. Από τον ασβεστόλιθο (πράσινο χρώμα στο χάρτη), λόγω του γεγονότος ότι είναι υδατοπερατός, θα λαμβάνει χώρα εισροή νερού από τον υπόγειο υδροφορέα προς την περιοχή μελέτης, γι' αυτό στα πετρώματα αυτά έχουν εισαχθεί οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους με σταθερές τιμές ανά μονάδα χρόνου. Οι τιμές αυτές έχουν προσαρμοστεί ανάλογα τη χρονική περίοδο καθώς το χειμώνα αναμένεται μεγαλύτερη εισροή νερού (λιώσιμο των χιονιών από τα βουνά, μεγαλύτερη βροχόπτωση, μικρότερες τιμές άντλησης), ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες έχουν μειωθεί αυτές οι τιμές κατά 20 – 50 %.

Οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους αποτελούν και τα πηγάδια άντλησης της περιοχής, μόνο που οι παροχές άντλησης έχουν προσαρμοστεί ανάλογα με την περίοδο προσομοίωσης. Ο χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί σε δυο περιόδους, την χειμερινή και την καλοκαιρινή, για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η περιοχή είναι αποκλειστικά τουριστική με αποτέλεσμα οι κάτοικοι το καλοκαίρι να υπερδιπλασιάζονται όποτε και οι ανάγκες για νερό είναι πολύ μεγαλύτερες. Το χειμώνα όμως οι ανάγκες σε νερό είναι πολύ λιγότερες γι' αυτό και οι παροχές άντλησης έχουν μειωθεί στο 30% από αυτή που είναι την καλοκαιρινή περίοδο, πράγμα που αντιπροσωπεύει την πραγματική κατάσταση.

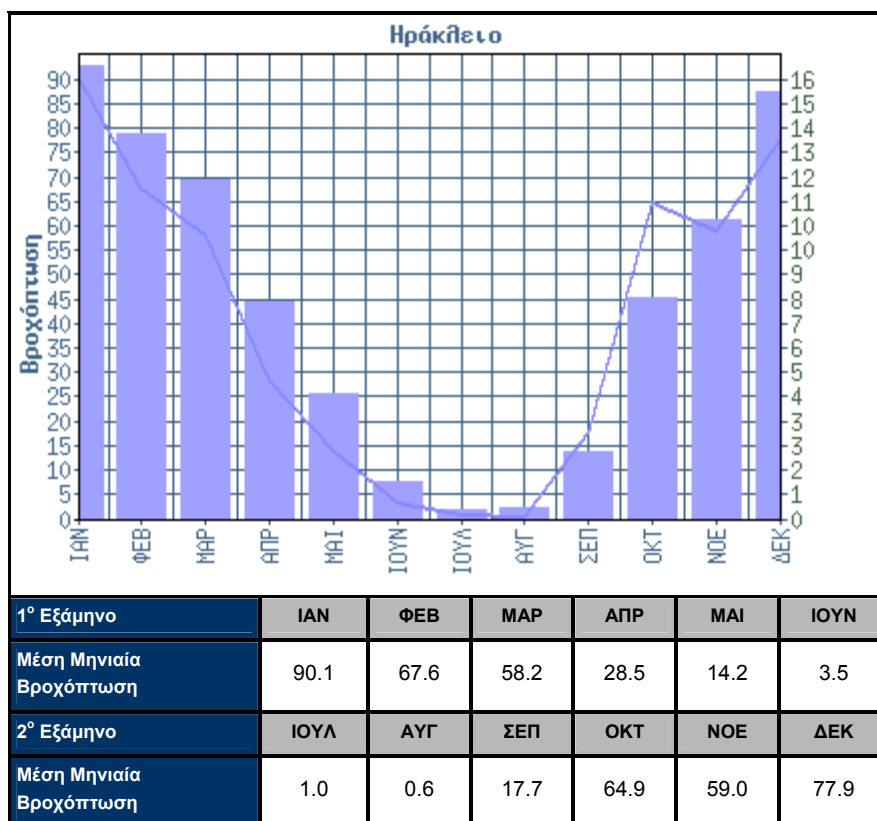
### **6.4 Υψόμετρο – Αρχικές συνθήκες**

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

Το μοντέλο για να προσομοιώσει τη περιοχή και να δώσει μια κατάσταση του υδροφορέα χρειάζεται και κάποιες αρχικές συνθήκες όπως το αρχικό υδραυλικό ύψος. Η τιμή αυτή δόθηκε στα 95 μέτρα.

### **6.5 Βροχόπτωση**

Από τα στοιχεία του Μετεωρολογικού σταθμού του Ηρακλείου προκύπτει ότι το ετήσιο ύψος βροχής στην περιοχή μελέτης ανέρχεται στα 483.2 mm βροχής.



Πηγή Ε.Μ.Υ. [12]

Από αυτά τα στοιχεία η περίοδος των βροχοπτώσεων κυμαίνεται κυρίως την χειμερινή περίοδο (Οκτώβριο μέχρι Μάρτιο), ενώ η καλοκαιρινή (Απρίλιο μέχρι Σεπτέμβριο) είναι ως επί το πλείστον ξηρή. Η βροχόπτωση επηρεάζει άμεσα τα υπόγεια ύδατα καθώς από τον κύκλο του νερού (Σχήμα 1), το νερό της βροχόπτωσης καταλήγει στους υδροφορείς με τη διεργασία της διήθησης. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο PTC ένας επιπλέον όρος που να αντιπροσωπεύει την βροχόπτωση. Αυτός ο όρος εισάγεται μόνο κατά την χειμερινή περίοδο αφού εκεί το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο.

Σύμφωνα με την υδρολογική μελέτη του βόρειου νομού Ηρακλείου, 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% αποτελούν οι υδροπερατοί σχηματισμοί (13.788.415 m<sup>2</sup>), ενώ το υπόλοιπο 22.23% οι αδιαπέραστοι ( 3.941.070 m<sup>2</sup> ). Αν από το τμήμα των υδροπερατών αφαιρεθεί ένα ποσοστό όπου είναι κατοικήσιμο και ουσιαστικά η διήθηση είναι μηδενική, απομένει το 46.7% (10.637.511 m<sup>2</sup>). Οπότε η διήθηση θα 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 το σύνολο της διήθησης ανέρχεται στο  $51.9 + 11.81 = 63.71$  mm/yr και επειδή η χειμερινή περίοδος αποτελείται από 180 μέρες, ο όρος που εισάγεται στο μοντέλο και αφορά τη βροχόπτωση είναι 0.000354 m/d .

## **6.6 Βαθμονόμηση του μοντέλου**

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των στοιχείων στο μοντέλο, είναι απαραίτητη να γίνει η βαθμονόμηση του, πριν γίνει οποιοδήποτε σενάριο και προκύψουν λανθασμένα συμπεράσματα. Η βαθμονόμηση ήταν μια δύσκολη διαδικασία καθώς δεν υπήρχαν πολλά στοιχεία παρά μόνο για ορισμένα πηγάδια ότι βρίσκονται μέσα στη ζώνη υφαλμύρωσης που αντλούν υφάλμυρο νερό, καθώς επίσης και για το σημείο ΠΗ4( στον υδρολογικό χάρτη) του οποίου το υδραυλικό ύψος είναι περίπου στα 10 μέτρα. Μετά την επιλογή κατάλληλων οριακών και αρχικών συνθηκών, προσδιορίστηκε η αρχική ζώνη υφαλμύρωσης στην επιθυμητή θέση.

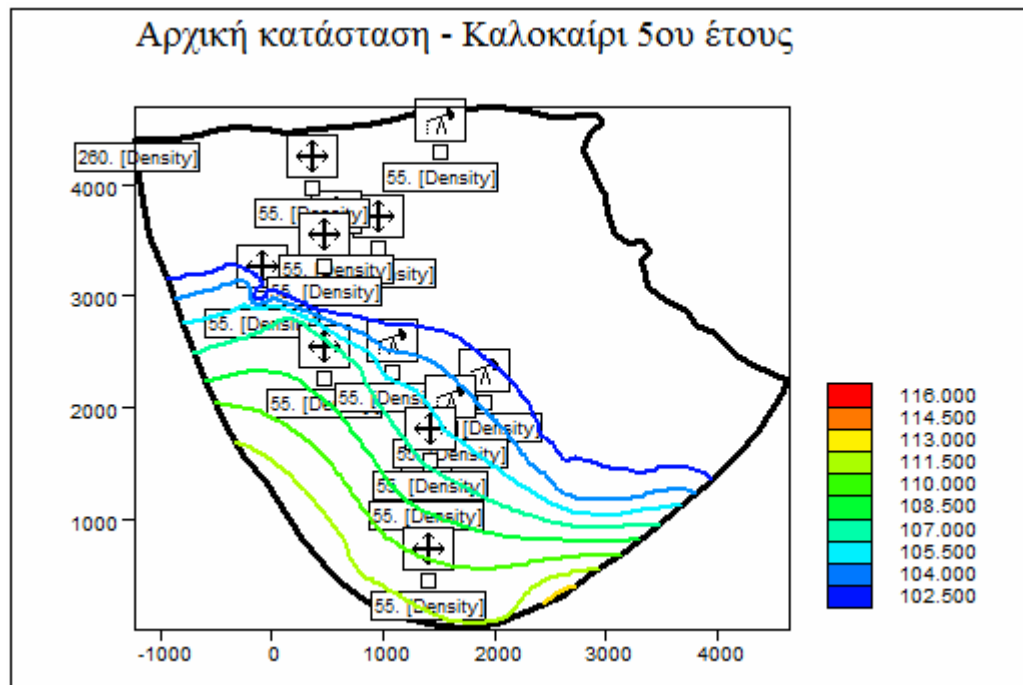
Ο χρόνος προσομοίωσης έχει χωριστεί σε δυο περιόδους( την χειμερινή και την καλοκαιρινή). Ο υδροφορέας της περιοχής χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα ,με τις δεδομένες συνθήκες που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο, για να “έρθει” σε σταθερές συνθήκες (steady states). Αυτός ο χρόνος έχει υπολογιστεί ότι είναι 5 χρόνια. Γι’ αυτό και όλα τα μελλοντικά σενάρια που θα γίνουν θα έχουν ως βάση τους τα 5 χρόνια, δηλαδή σαν αρχικές συνθήκες θα έχουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά το πέρας της πέμπτης χειμερινής περιόδου, και θα έχουν σαν διάρκεια επίσης 5 χρόνια για να μπορέσει πάλι ο υδροφορέας να αγγίξει σταθερές συνθήκες δηλαδή γίνεται εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης για συνολική χρονική διάρκεια τα 10 χρόνια.

Σύμφωνα με τη προσέγγιση Ghyben – Herzgerg, η μέγιστη στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Επειδή το πάχος του υδροφορέα στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 100 μέτρα, το σημείο όπου θα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης θα έχει υδραυλικό ύψος 102.5 μέτρα. Όλα τα σημεία που έχουν μικρότερο υδραυλικό ύψος από αυτό θα βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης.

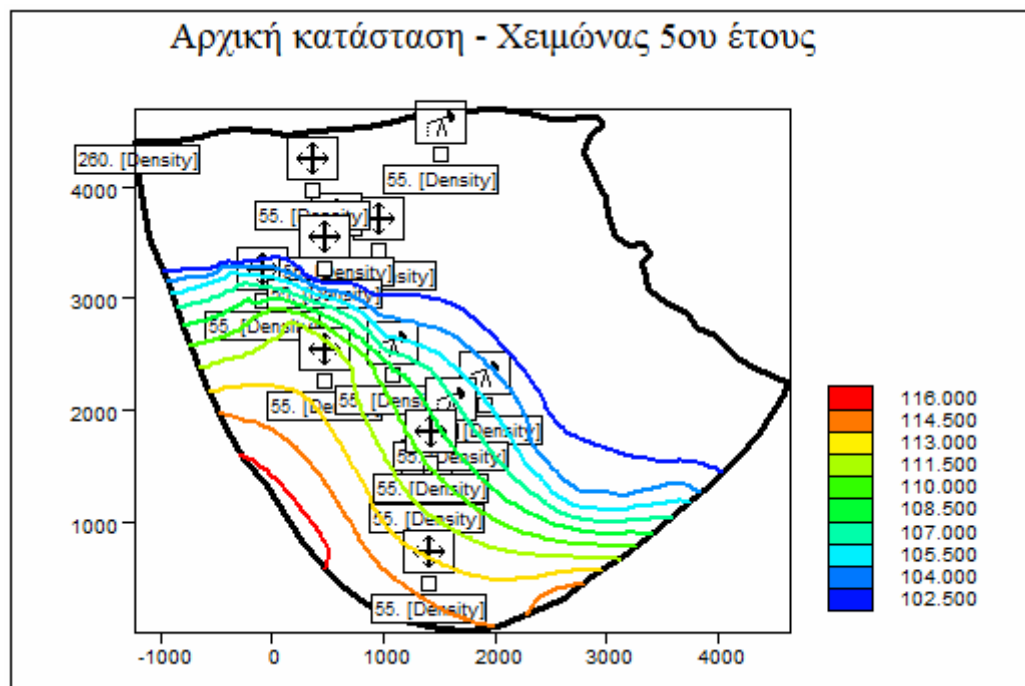
Στα διαγράμματα της αρχικής κατάστασης καθώς και των μελλοντικών σεναρίων, οι ισοδυναμικές γραμμές του υδραυλικού ύψους παρουσιάζονται με κλίμακα που αρχίζει από τα 102.5 μέτρα (το μέτωπο της υφαλμύρωσης) και με σταθερό βήμα το 1.5 μέτρα καταλήγει στα 116 μέτρα. Αντίθετα, στα διαγράμματα της ταχύτητας δεν υπάρχει σταθερό βήμα και σε κάθε περίπτωση οι ταχύτητες είναι διαφορετικές και παρουσιάζονται στα υπομνήματα του εκάστοτε διαγράμματος.

### 6.7 Αρχική κατάσταση. Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα.

Με την εισαγωγή όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο PTC, και για χρονική διάρκεια 5 χρόνων έγινε μία προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής. Μετά το πέρας της καλοκαιρινής και αντίστοιχα της χειμερινής περιόδου τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι :





Σχήμα 7.3 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του πέμπτου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.4 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του πέμπτου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

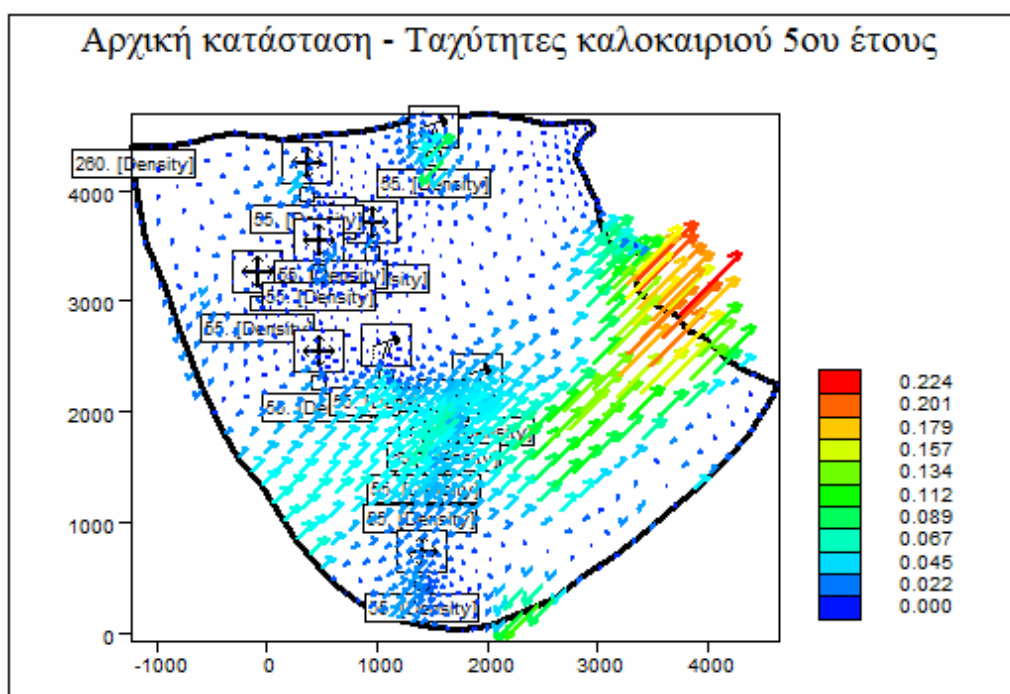
όπου :

 ιδιωτικό πηγάδι άντλησης  δημοτικό πηγάδι άντλησης

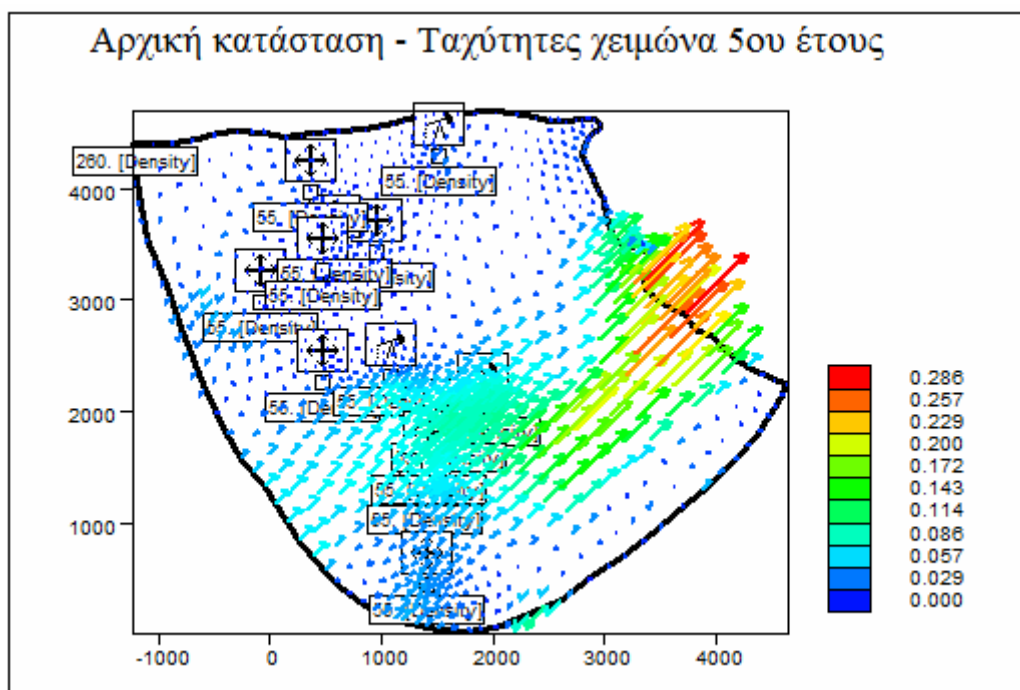
Όπως φαίνεται από τα σχήματα η παρούσα κατάσταση κρίνεται ιδιαίτερα δυσμενής. Πιο συγκεκριμένα την καλοκαιρινή περίοδο το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει εισχωρήσει στην ενδοχώρα και αρκετά από τα πηγάδια της περιοχής βρίσκονται εντός της ζώνης αυτής. Τα επίπεδα του υδραυλικού ύψους είναι χαμηλά κυρίως λόγω της υπεράντλησης αλλά και της έλλειψης βροχόπτωσης.

Το χειμώνα η κατάσταση διαφοροποιείται σημαντικά. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί λόγω περισσότερων εισροών, μικρότερων τιμών άντλησης αλλά και της βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα το μέτωπο της υφαλμύρωσης να μετακινείται προς την ακτή. Η μετακίνηση αυτή είναι μεν σημαντική αλλά αρκετά από τα πηγάδια της περιοχής συνεχίζουν να αντλούν υφάλμυρο νερό όπως και αναμενόταν, αφού η βαθμονόμηση έχει γίνει με αυτά τα κριτήρια. Από τα διαγράμματα αυτά φαίνεται και η σημασία των πηγαδιών άντλησης. Το καλοκαίρι λόγω αυξημένων αναγκών (μεγάλη τουριστική κίνηση) τα πηγάδια αντλούν με πολύ μεγάλους ρυθμούς γι' αυτό και η κατάσταση είναι αρκετά δυσμενής, ενώ το χειμώνα όπου η κίνηση μειώνεται στο 30% και τα πηγάδια αντλούν με μικρότερους ρυθμούς, το φαινόμενο περιορίζεται αρκετά.

Τα διαγράμματα των ταχυτήτων του νερού για κάθε περίοδο είναι :



Σχήμα 7.5 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της θερινής περιόδου του πέμπτου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ ημέρα. και για το χειμώνα :



Σχήμα 7.6 Προσομοίωση της αρχικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του πέμπτου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ ημέρα.

Η συγκεκριμένη κατάσταση κρίνεται ιδιαίτερα δυσμενής και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η λήψη ορισμένων μέτρων. Παρακάτω γίνεται μια προσέγγιση της μελλοντικής κατάστασης με τη χρήση σεναρίων για την καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου. Ως αρχικές συνθήκες για τα σενάρια, έχουν χρησιμοποιηθεί οι συνθήκες του υδροφορέα μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του 5<sup>ου</sup> έτους, γιατί τότε ο υδροφορέας έχει έρθει σε συνθήκες σταθερής ροής. Η προσομοίωση γίνεται επίσης για 5 χρόνια.

## 6.8 Μελλοντικός προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης με τη χρήση σεναρίων.

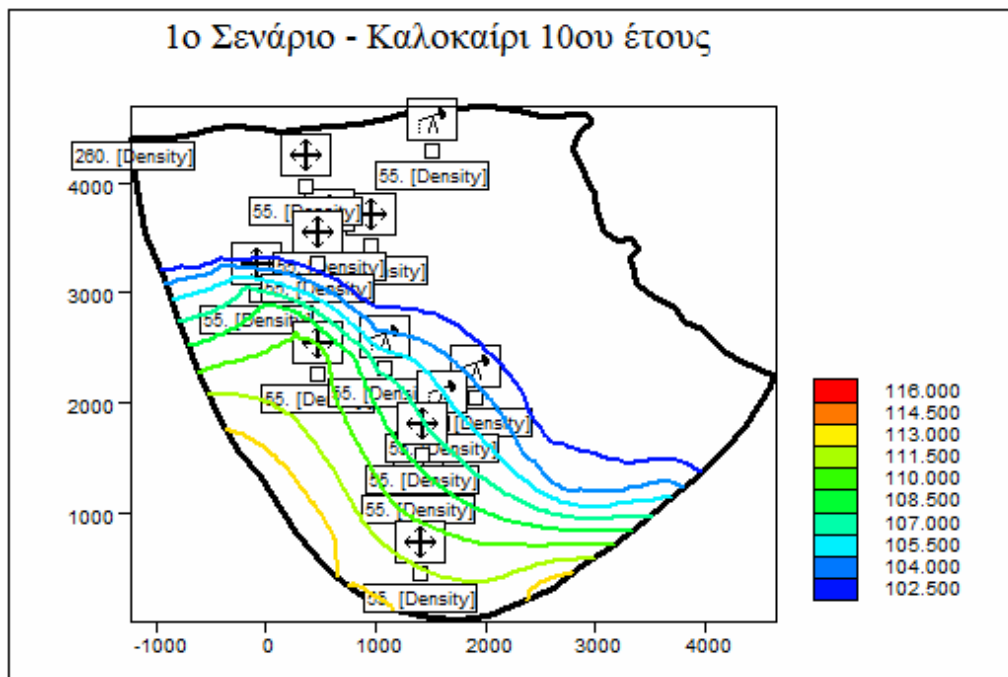
Για το μελλοντικό προσδιορισμό της ζώνης υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των σεναρίων. Έγινε μία εκτίμηση της μελλοντικής κατάστασης, κλείνοντας αρχικά τα ιδιωτικά πηγάδια και επιτρέποντας την άντληση μόνο στα δημοτικά. Στη συνέχεια μειώθηκε η άντληση από τα δημοτικά στο 50%, καθώς προβλέπεται να εισαχθεί νερό από παρακείμενους οικισμούς και τέλος έκλεισαν όλα τα πηγάδια στην περιοχή με την προϋπόθεση ότι η εξ' ολοκλήρου η ύδρευση της περιοχής θα γίνεται με εισαγόμενο νερό από παρακείμενες περιοχές. Σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος εμπλουτισμού του υδροφορέα με την εισαγωγή σε αυτόν, γλυκό νερό ή επεξεργασμένο απόβλητο από ειδικά πηγάδια εισαγωγής. Αναλυτικά τα αποτελέσματα είναι :

### Σενάριο 1

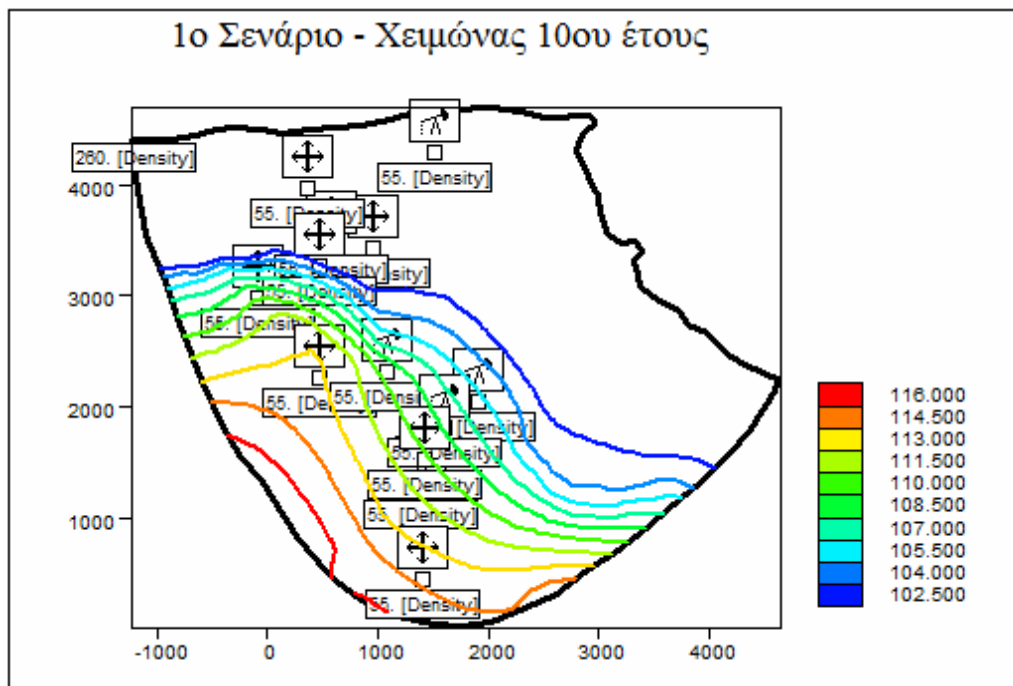
Στο πρώτο σενάριο προβλέπεται η κάλυψη των αναγκών της περιοχής σε νερό να γίνεται μόνο από τα δημοτικά πηγάδια. Από το σύνολο των πηγαδιών της περιοχής που είναι 13, τα 8 είναι ιδιωτικά και τα 5 δημοτικά. Με βάση το σενάριο αυτό προτείνεται να σταματήσουν την άντληση τα 8 και να λειτουργούν τα 5 και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα υδραυλικά ύψη που είναι για χρονική διάρκεια 5 χρόνια παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.7 και 7.8.

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η κατάσταση αλλάζει προς το καλύτερο. Το καλοκαίρι μειώνεται σημαντικά ο ρυθμός άντλησης του υδροφορέα (σε σύνολο 13 πηγαδιών που λειτουργούσαν τώρα λειτουργούν μόνο 5) και τα αποτελέσματα γίνονται άμεσα αισθητά. Το μέτωπο της υφαλμύρωσης μετακινείται οριακά προς την ακτή ενώ αρκετά από τα πηγάδια της περιοχής συνεχίζουν να αντλούν υφάλμυρο νερό. Το χειμώνα η κατάσταση βελτιώνεται περισσότερο, κυρίως λόγω μικρότερων παροχών άντλησης αλλά και λόγω της επίδρασης των βροχοπτώσεων. Το μέτωπο μετακινείται περισσότερο προς την ακτή αλλά ορισμένα πηγάδια συνεχίζουν να βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης.

Το σενάριο αυτό παρουσιάζει μια εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης που επικρατεί στην περιοχή. Δεν επιτυγχάνει πλήρη και συνεχή απομάκρυνση του υφάλμυρου νερού, οπότε κρίνεται απαραίτητο να γίνουν και άλλες παρεμβάσεις για την καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου.

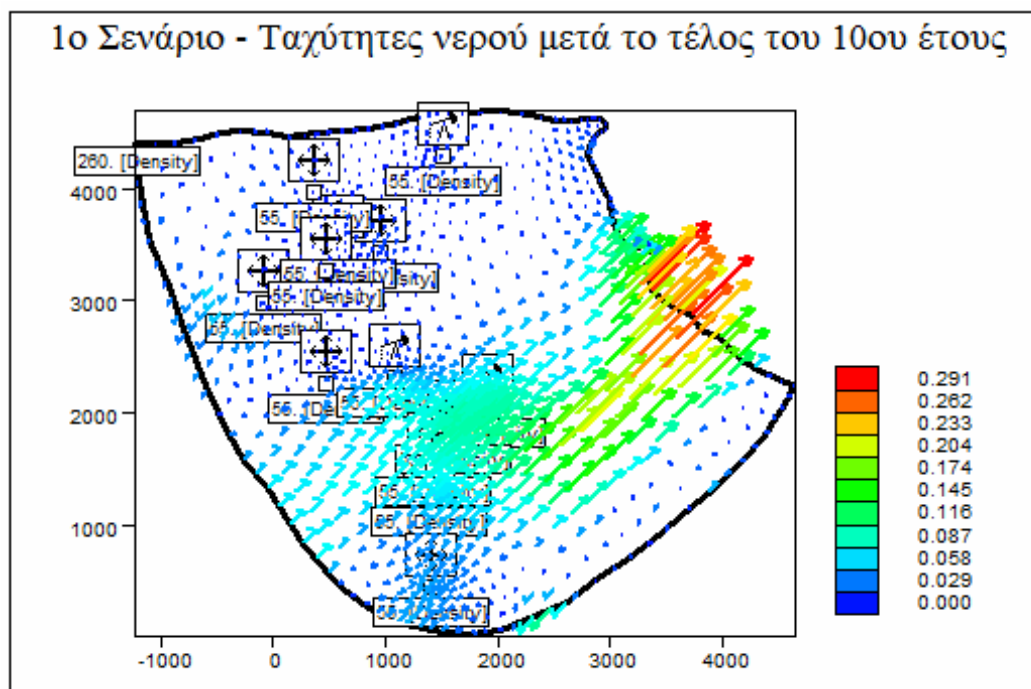


Σχήμα 7.7 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.8 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Από τα διαγράμματα των ταχυτήτων παρουσιάζεται και η τάση του νερού να διαφύγει από τα σημεία όπου υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα.



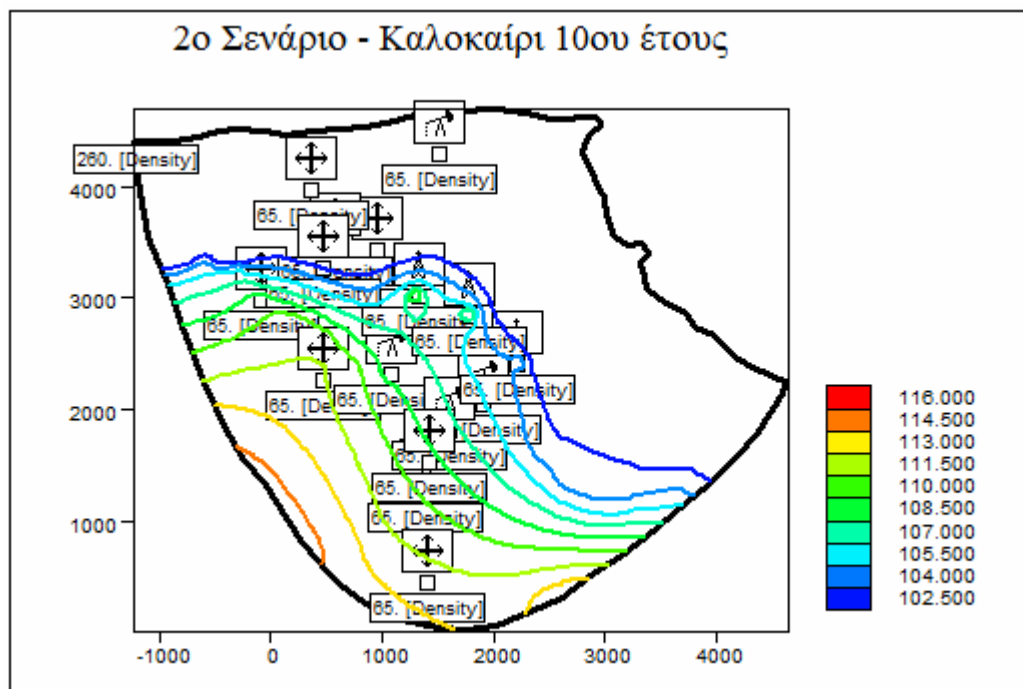
Σχήμα 7.9 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ ημέρα.



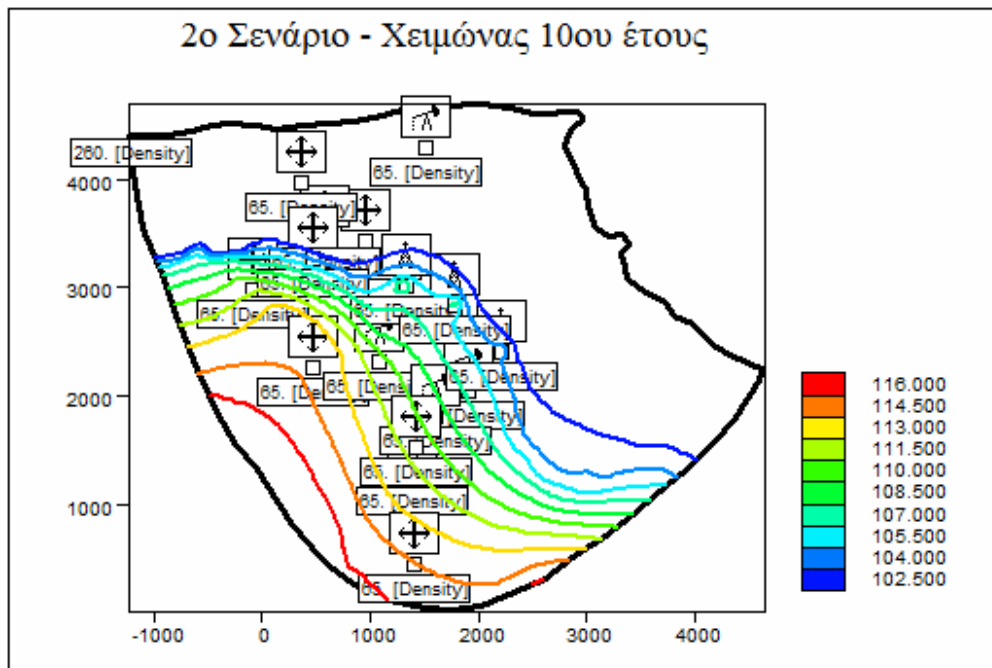
## Σενάριο 2

Για τη βελτίωση της κατάστασης στο δεύτερο σενάριο προβλέπεται η λειτουργία μόνο των δημοτικών πηγαδιών με ταυτόχρονο εμπλουτισμό του υδροφορέα από 3 πηγάδια εισαγωγής με παροχή το καθένα  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  κατά την καλοκαιρινή περίοδο και με  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  την χειμερινή. Τα πηγάδια τοποθετούνται σε σημεία με την καλύτερη δυνατή υδραυλική αγωγιμότητα αλλά και το καλύτερο δυνατό υψόμετρο πάνω στο μέτωπο της υφαλμύρωσης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του 5<sup>ου</sup> έτους.


Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου είναι βελτιωμένα σε σχέση με το προηγούμενο, αλλά μόνο τοπικά, δηλαδή στα σημεία που βρίσκονται εντός της ακτίνας επιρροής των πηγαδιών εμπλουτισμού. Πιο συγκεκριμένα την καλοκαιρινή περίοδο το μέτωπο της υφαλμύρωσης μετακινείται προς την ακτή αλλά μόνο γύρω από την ακτίνα επιρροής των πηγαδιών εμπλουτισμού καθώς τα πετρώματα της γύρω περιοχής (μάργες και άργιλοι) δεν επιτρέπουν την περαιτέρω μετακίνηση του νερού. Εκτός της ζώνης επίδρασης των πηγαδιών αυτών, το μέτωπο της υφαλμύρωσης βρίσκεται στα ίδια επίπεδα με το προηγούμενο σενάριο. Το χειμώνα η κατάσταση δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα. Το μέτωπο μετακινείται λίγο περισσότερο προς την ακτή αλλά και πάλι εντός των ορίων της ακτίνας επιρροής των πηγαδιών εμπλουτισμού. Τα υδραυλικά ύψη σε περιοχές όπου υπάρχουν ασβεστόλιθοι αυξάνονται σημαντικά λόγω περισσότερων εισροών αλλά στη συνέχεια περιορίζονται από τις μάργες που υπάρχουν στην περιοχή.



Σχήμα 7.10 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

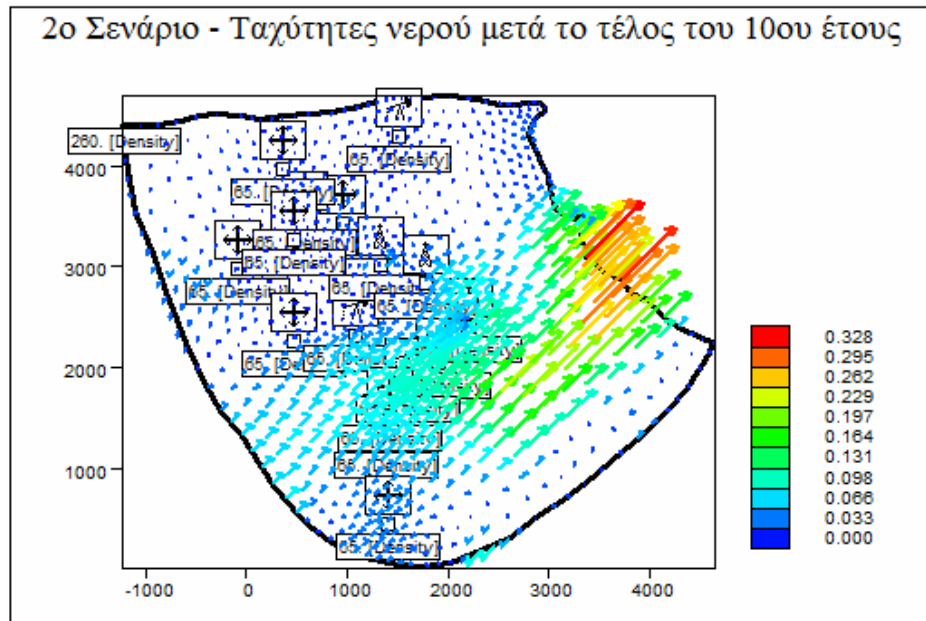


Σχήμα 7.11 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Στους χάρτες τα πηγάδια εμπλουτισμού συμβολίζονται με : .

Το σενάριο αυτό κρίνεται μη ικανοποιητικό, αφού το πρόβλημα δεν αντιμετωπίζεται αλλά περιορίζεται μόνο τοπικά. Επίσης χρειάζονται ποσότητες νερού για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα αλλά το πρόβλημα συνεχίζει να παραμένει σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή. Στα διαγράμματα των ταχυτήτων, τέλος δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές παρά μόνο στα πετρώματα όπου υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα παρουσιάζονται λίγο μεγαλύτερες ταχύτητες.



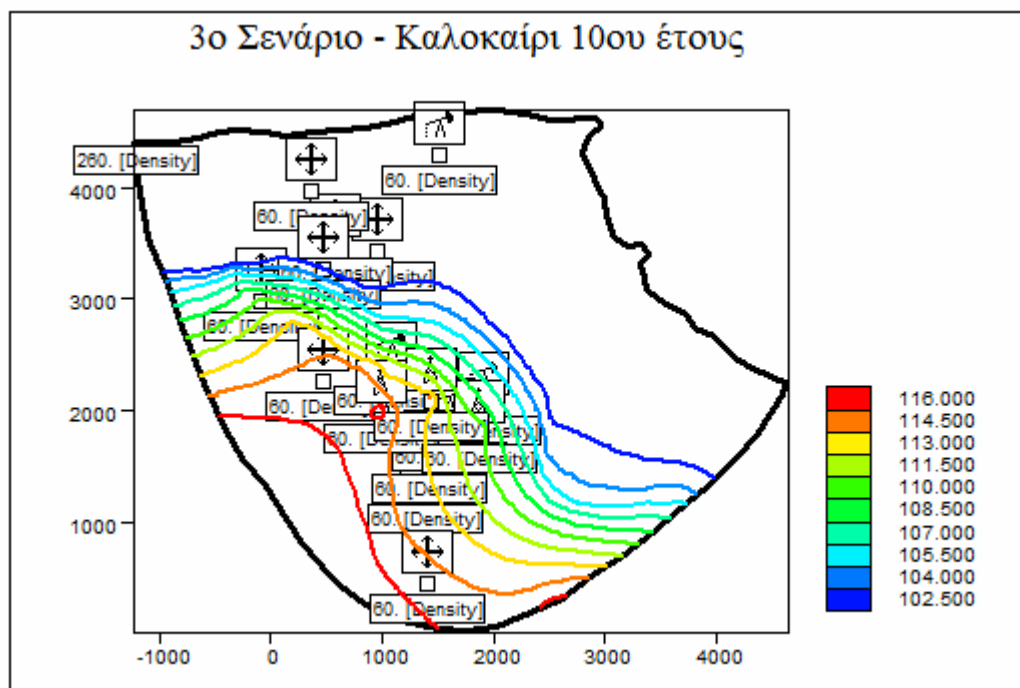


Σχήμα 7.12 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

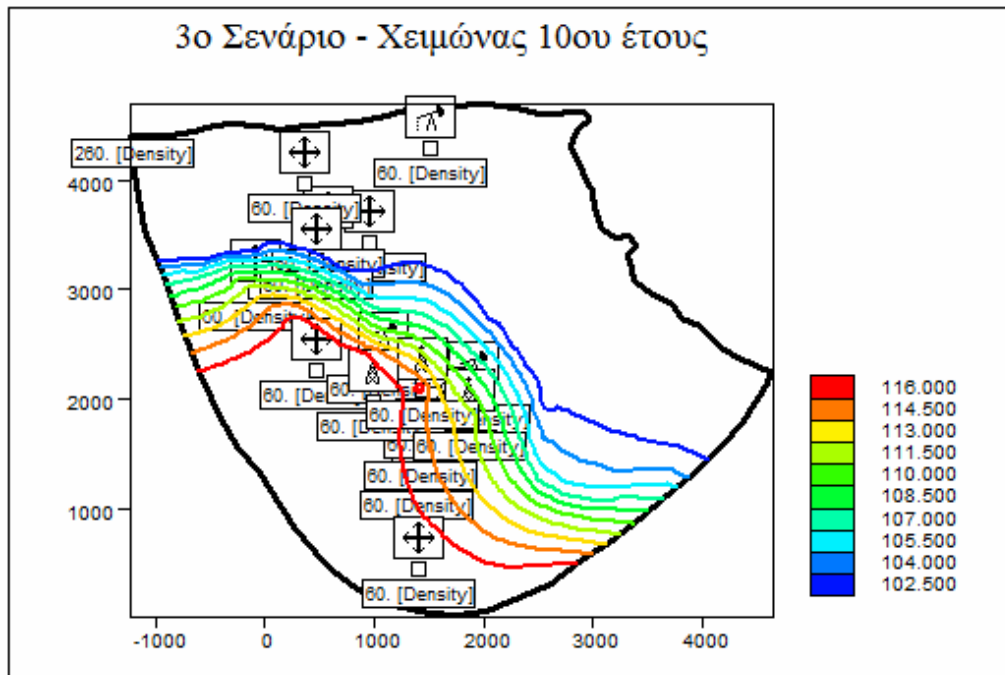
### Σενάριο 3

Μια άλλη περίπτωση είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σενάριο 3. Συνεχίζουν να αντλούν μόνο τα δημοτικά πηγάδια και αυτά των ιδιωτών να είναι κλειστά. Επίσης τοποθετούνται στην περιοχή 3 πηγάδια εμπλουτισμού τα οποία δεν τοποθετούνται πάνω στο μέτωπο της υφαλμύρωσης αλλά εντός της περιοχής. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι τα πετρώματα που υπάρχουν στο εσωτερικό της περιοχής είναι ασβεστόλιθοι με αρκετά υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Το κάθε πηγάδι εμπλουτισμού, εισάγει στον υδροφορέα νερό με σταθερή παροχή  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  τόσο το καλοκαίρι όσο και τον χειμώνα.

Η κατάσταση είναι σαφώς καλύτερη από τις προηγούμενες περιπτώσεις αφού ο εμπλουτισμός γίνεται με πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού και το μέτωπο μετατοπίζεται αισθητά στο κέντρο και λιγότερο στο υπόλοιπο μήκος του σε μετώπου. Ειδικότερα το καλοκαίρι όλο το μήκος του μετώπου της υφαλμύρωσης μετατοπίζεται προς την ακτή και σε ορισμένα σημεία στο κέντρο φτάνει να έχει μετατοπιστεί ακόμη και 200 με 300 μέτρα σε σχέση με το καλοκαίρι του 5<sup>ου</sup> έτους. Το χειμώνα η κατάσταση βελτιώνεται περισσότερο. Το μέτωπο της υφαλμύρωσης μετακινείται ακόμη περισσότερο προς την ακτή και σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα ( ασβεστόλιθοι) οι τιμές του υδραυλικού ύψους αυξάνονται σημαντικά. Ωστόσο η κίνηση του νερού περιορίζεται από την ύπαρξη των μαργαϊκών πετρωμάτων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.14.



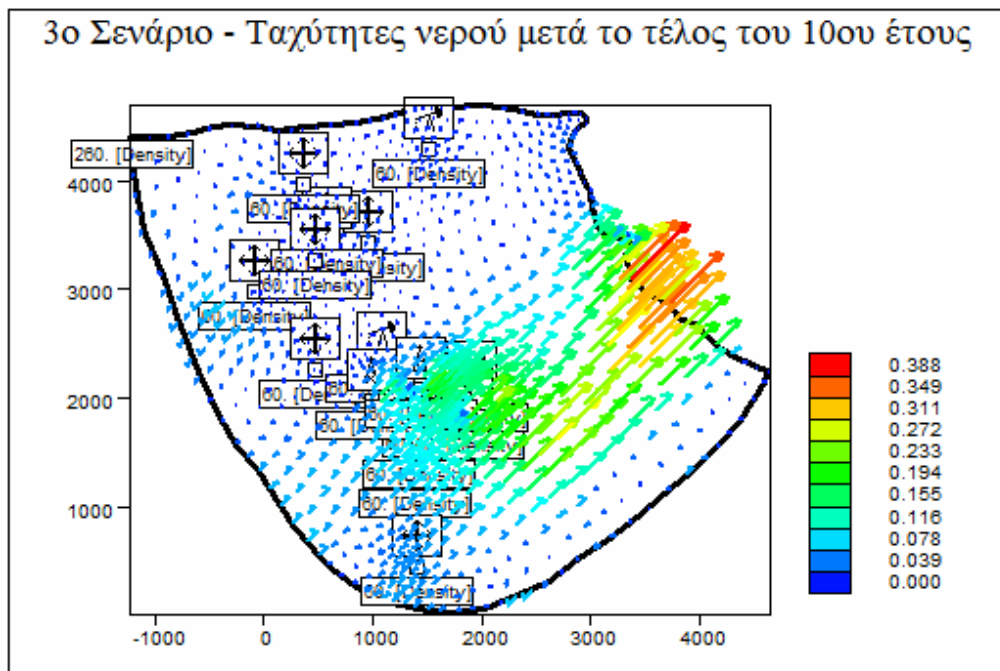
Σχήμα 7.13 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.14 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Το σενάριο αυτό βελτιώνει σημαντικά την κατάσταση. Παρ' όλα αυτά όμως μερικά πηγάδια συνεχίζουν να βρίσκονται στη περιοχή υφαλμύρωσης ενώ τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο ενθαρρυντικά από τα άλλα δύο. Επίσης για την διεκπεραίωση αυτού του σεναρίου απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού, πράγμα που μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα για την πραγματοποίησή του.

Οι επιδράσεις των πηγαδιών εμπλουτισμού αλλά και οι μεγάλες ποσότητες των υδάτων που εισέρχονται στον υδροφορέα φαίνονται και από τα διαγράμματα των ταχυτήτων του νερού όπου παρουσιάζονται με αυξημένες τιμές.



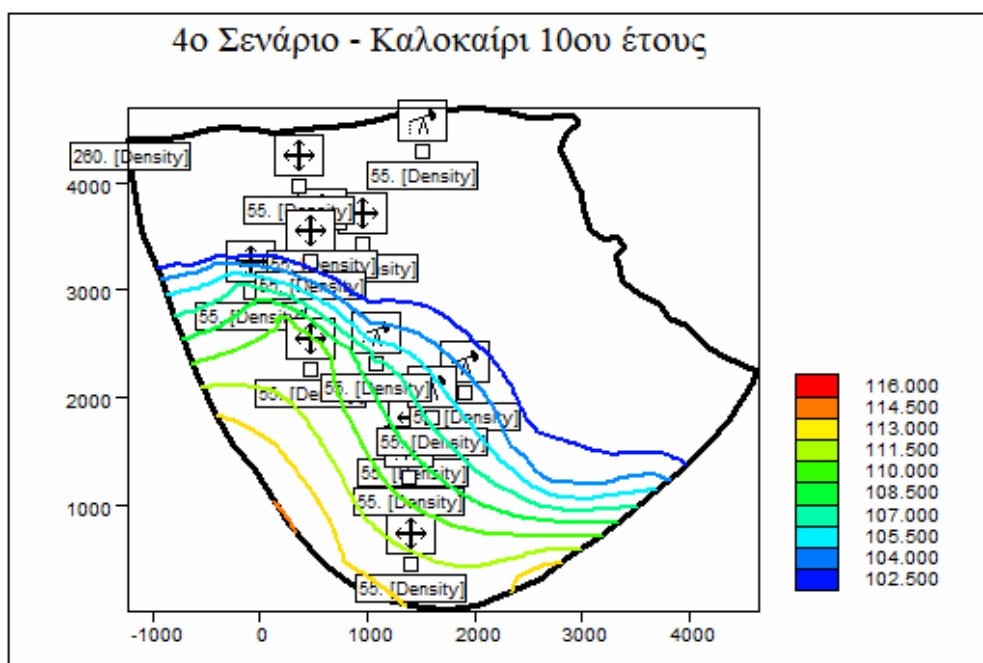
Σχήμα 7.15 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

#### Σενάριο 4

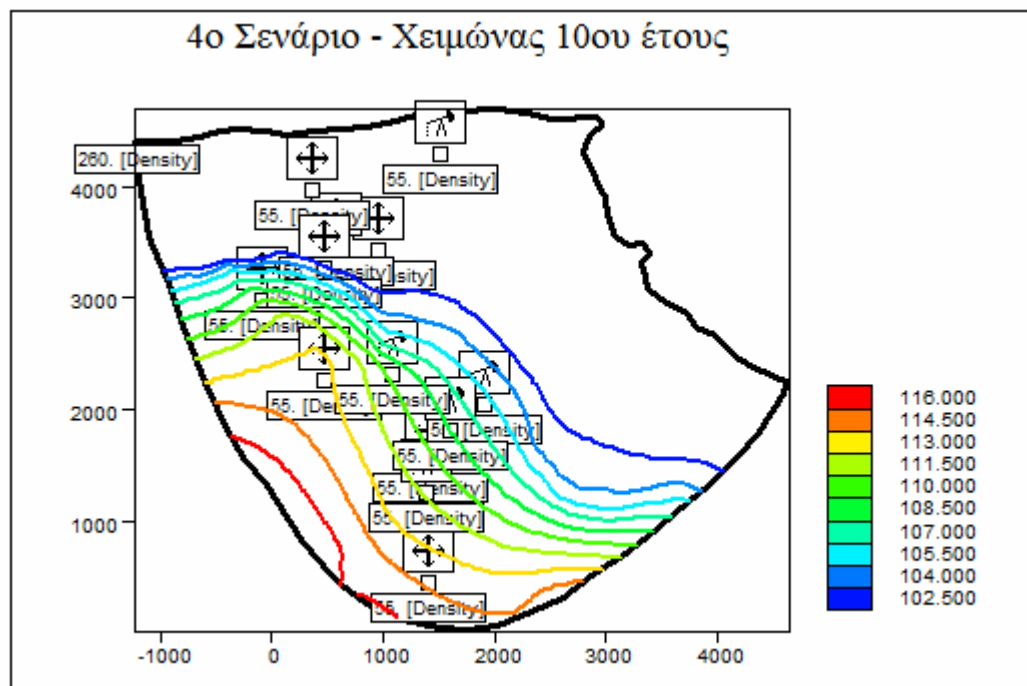
Ένα άλλο σενάριο που εξετάστηκε ήταν να μειωθούν ακόμη περισσότερο οι παροχές άντλησης του υδροφορέα μιας και προβλέπεται εισαγωγή νερού από παρακείμενους υδατικούς πόρους. Για το λόγο αυτό, τα ιδιωτικά πηγάδια παραμένουν κλειστά και στα ιδιωτικά μειώνεται ο ρυθμός άντλησης στο 50%. Η συμπεριφορά του υδροφορέα δεν ήταν και ιδιαίτερα σημαντική κάτω από αυτές τις συνθήκες, μιας και το μεγαλύτερο πρόβλημα το δημιουργούν τα ιδιωτικά αφού τα δημοτικά ως επί το πλείστον αντλούν με μικρές παροχές. Μειώνοντας ακόμη περισσότερο τις παροχές τους δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή.

Μεταβολή παρουσιάζεται μόνο κατά την καλοκαιρινή περίοδο όπου το μέτωπο της υφαλμύρωσης προσεγγίζει την κατάσταση που επικρατούσε το χειμώνα του 5<sup>ου</sup> έτους. Η κατάσταση αυτού του σεναρίου είναι σε αντιστοιχία με το πρώτο σενάριο μιας και επικρατούν παρόμοιες συνθήκες. Τόσο την καλοκαιρινή, όσο και τη χειμερινή περίοδο τα πηγάδια αλλά και ένα μεγάλο μέρος της περιοχής βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης και το σενάριο αυτό κρίνεται μη ικανοποιητικό αφού είναι απαραίτητες να γίνουν και άλλες παρεμβάσεις για την καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου.

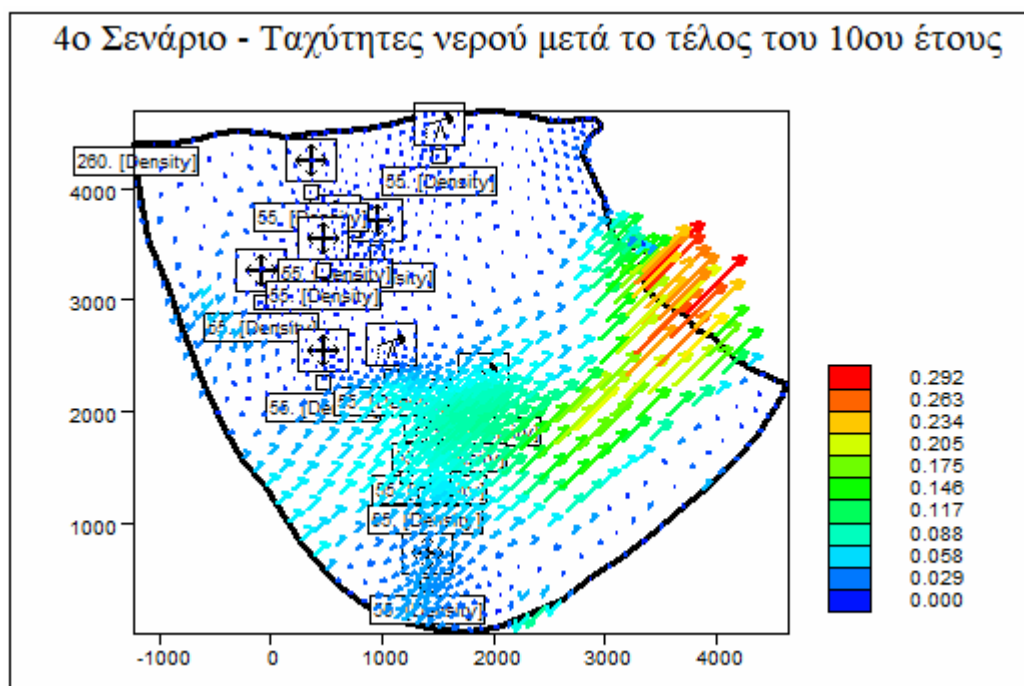
Σε πλήρη αντιστοιχία βρίσκονται ακόμη και οι ταχύτητες του νερού του υδροφορέα με μια ελάχιστη μείωση όπου παρατηρείται η τάση που έχει το νερό να διαφύγει από πετρώματα με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα.



Σχήμα 7.16 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.17 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.18 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

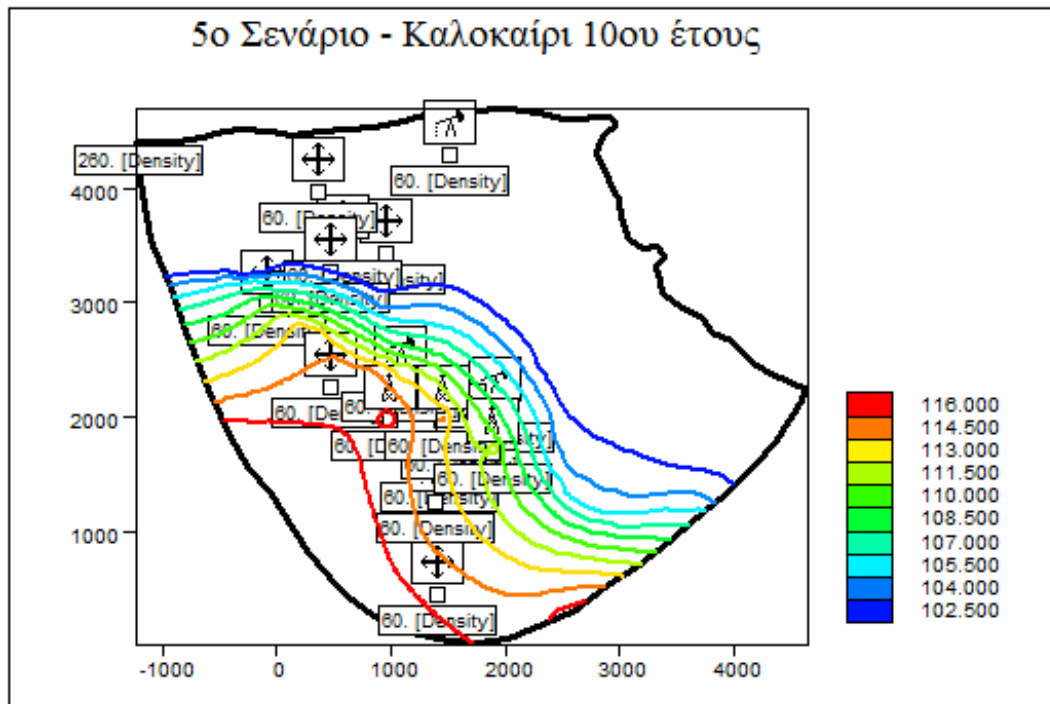
### Σενάριο 5

Στο παρόν σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση εμπλουτισμού του υδροφορέα με 3 πηγάδια εισαγωγής με σταθερή παροχή το καθένα  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Η θέση των πηγαδιών αυτών, όπως και στο 3<sup>ο</sup> σενάριο δεν είναι πάνω στο μέτωπο της υφαλμύρωσης, αλλά στο εσωτερικό της περιοχής και στα σημεία όπου υπάρχει ασβεστόλιθος. Επίσης σ' αυτό το σενάριο από τα υπόλοιπα πηγάδια, τα ιδιωτικά είναι κλειστά ενώ τα δημοτικά όπως και στο 4<sup>ο</sup> σενάριο αντλούν με μειωμένη παροχή 50%.

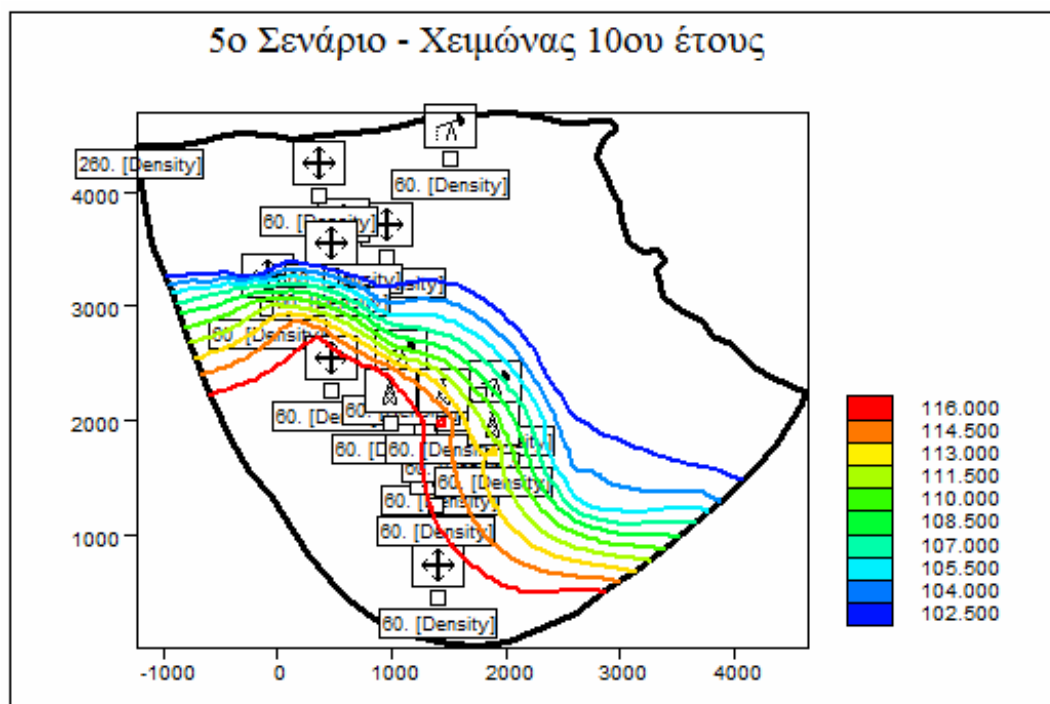
Τα αποτελέσματα από αυτήν την περίπτωση είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα του 3<sup>ου</sup> σεναρίου με το μέτωπο να κινείται λίγο περισσότερο προς την ακτή. Όπως και στην περίπτωση του 3<sup>ου</sup> σεναρίου, την καλοκαιρινή περίοδο το μέτωπο της υφαλμύρωσης μετακινείται 200 με 300 μέτρα σε ορισμένα σημεία προς την ακτή ενώ το χειμώνα η κατάσταση σταθεροποιείται λίγο περισσότερο. Λόγω μεγάλης ποσότητας νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα αλλά και λόγω περισσότερων εισροών το χειμώνα παρατηρούνται μεγάλες τιμές του υδραυλικού ύψους που όμως περιορίζονται από την παρουσία των μαργαϊκών πετρωμάτων και εμποδίζει έτσι το μέτωπο να μετακινηθεί περισσότερο προς την ακτή.

Από περιβαλλοντικής άποψης το σενάριο κρίνεται ανεπαρκές αφού μεγάλο τμήμα της περιοχής συνεχίζει να βρίσκεται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης και τα πηγάδια να αντλούν υφάλμυρο νερό. Από την άλλη πλευρά το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ένα ιδιαίτερο πρόβλημα το οποίο είναι δύσκολα αναστρέψιμο και επιτυγχάνοντας αυτά τα αποτελέσματα, δηλαδή περιορισμός του μετώπου κατά 200 μέτρα είναι σαφώς πολύ ικανοποιητικό. Βέβαια οι ποσότητες του νερού που απαιτούνται είναι πολύ μεγάλες και ίσως αυτός είναι ο ανασταλτικός παράγοντας.

Τέλος για τα διαγράμματα των ταχυτήτων, όπως και στην περίπτωση του 3<sup>ου</sup> σεναρίου όπου λόγω μεγάλης ποσότητας νερού, παρατηρούνται μεγάλες ταχύτητες νερού κυρίως στις παράκτιες περιοχές λόγω μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας που δηλώνει την τάση που έχει το νερό να διαφύγει.

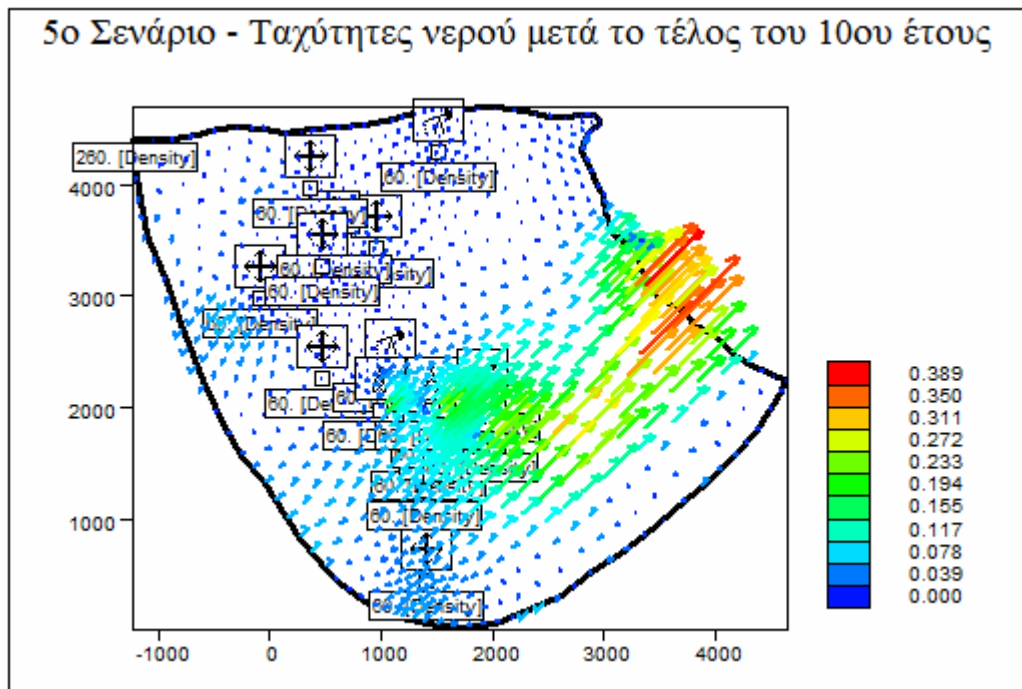


Σχήμα 7.19 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.20 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.





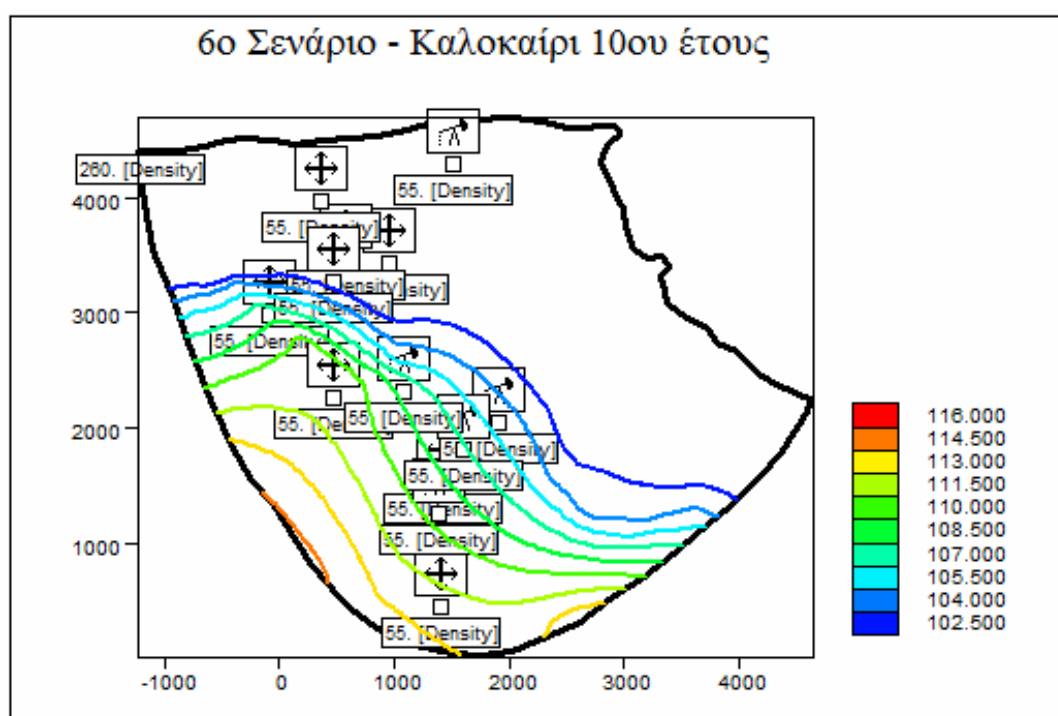
Σχήμα 7.21 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

## Σενάριο 6

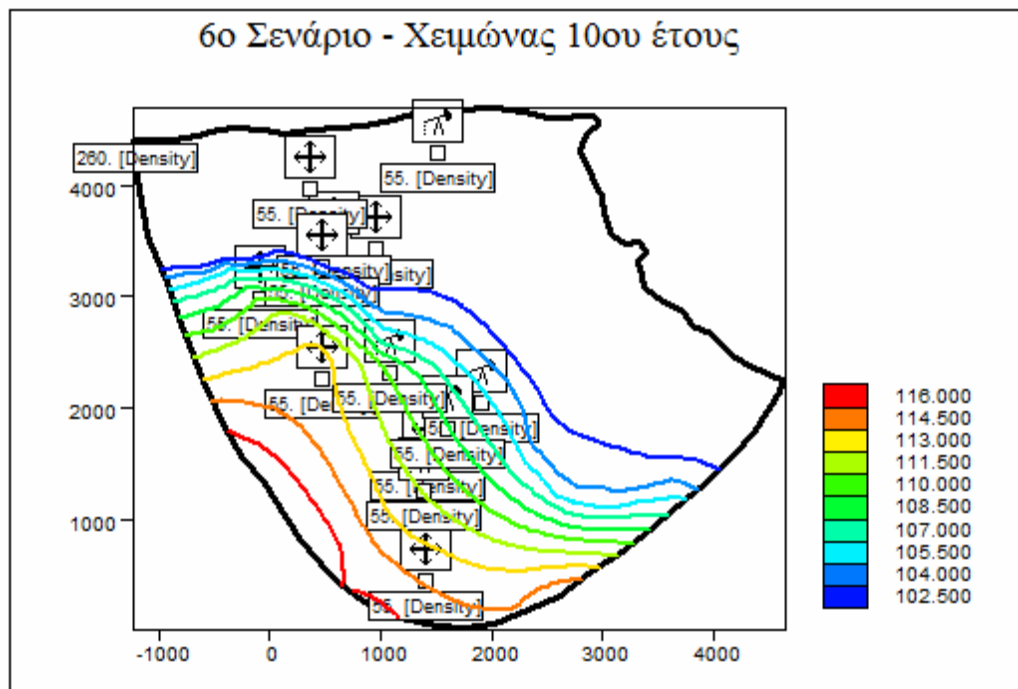
Λόγω της κρισιμότητας της κατάστασης και επειδή το μέτωπο έχει εισχωρήσει πολύ βαθιά στην περιοχή, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί και το ακραίο σενάριο να κλείσουν όλα τα πηγάδια της περιοχής για να φανεί η συμπεριφορά του υδροφορέα.

Από τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού παρατηρείται ότι ο υδροφορέας λόγω της υπερεκμετάλλευσης των τελευταίων ετών έχει μειώσει σημαντικά τα αποθέματα του και είναι αρκετά δύσκολο να αντιστραφεί η κατάσταση από μόνη της και χωρίς ανθρωπογενή παρέμβαση.

Ειδικότερα το καλοκαίρι ο υδροφορέας παρουσιάζει μια μικρή αύξηση και το μέτωπο μετατοπίζεται προς την ακτή αλλά είναι περίπου της τάξης του 1<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> σεναρίου. Είναι σαφώς καλύτερα από το τέλος της καλοκαιρινής περιόδου του 5<sup>ου</sup> έτους αλλά και πάλι τα επίπεδα του υδραυλικού ύψους είναι χαμηλά και μεγάλο μέρος της περιοχής βρίσκεται εντός των ορίων της υφαλμύρωσης. Το χειμώνα η κατάσταση σταθεροποιείται στα επίπεδα του χειμώνα του 5<sup>ου</sup> έτους με μια μικρή αύξηση στις τιμές του υδραυλικού ύψους λόγω εισροών αλλά και του μηδαμινού ρυθμού άντλησης των πηγαδιών.

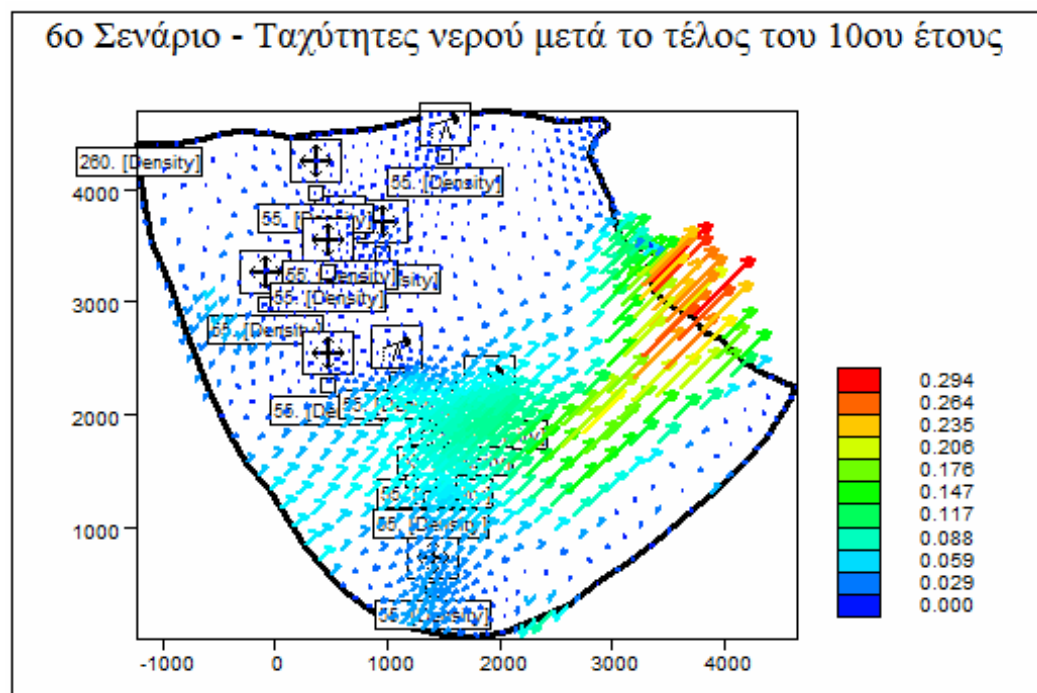


Σχήμα 7.22 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.23 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.

Επίσης για άλλη μια φορά αισθητή είναι η παρουσία των μαργαϊκών πετρωμάτων καθώς περιορίζουν την κίνηση των νερών στο πάνω αριστερό τμήμα της περιοχής. Από τα διαγράμματα των ταχυτήτων παρατηρείται και η χαμηλή ταχύτητα του νερού πράγμα το οποίο αναμενόταν αφού δεν υπάρχει μεγάλη ποσότητα νερού στον υδροφόρα.



Σχήμα 7.24 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ ημέρα.

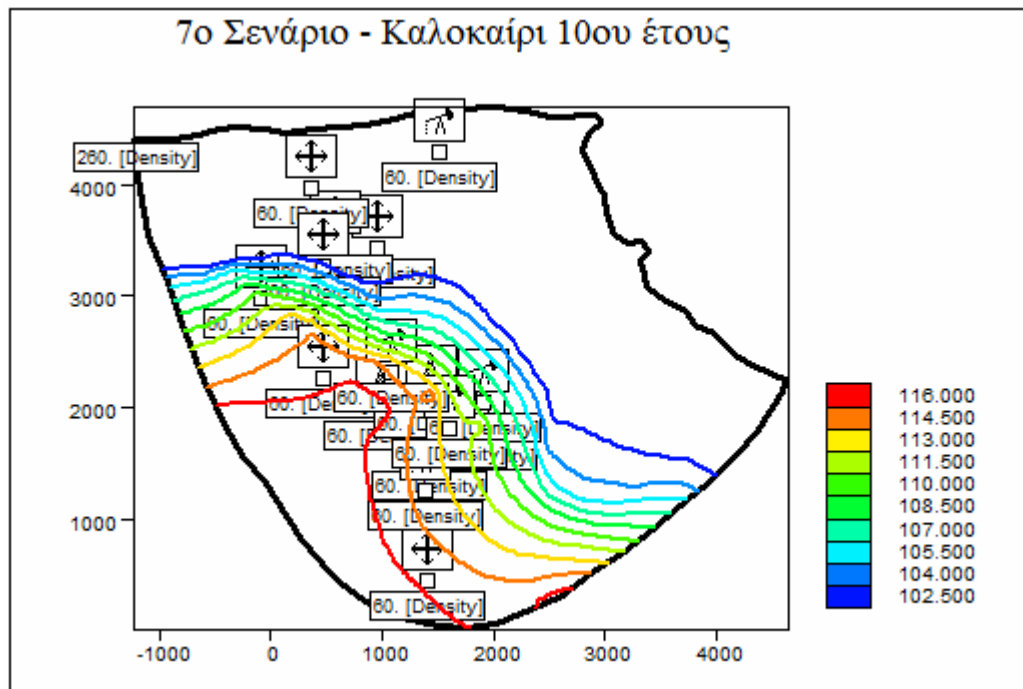
### Σενάριο 7

Ένα τελευταίο σενάριο που εξετάστηκε ήταν αυτό που περιγράφεται παρακάτω. Αναστέλλεται η άντληση σε όλα τα πηγάδια της περιοχής και τοποθετούνται στο εσωτερικό αυτής τα 3 πηγάδια εμπλουτισμού με σταθερή παροχή  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  όλη τη διάρκεια του χρόνου. Το σενάριο αυτό όπως και το σενάριο 6 είναι ένα ακραίο σενάριο που λόγω της μεγάλης εισχώρησης της θάλασσας στην περιοχή και της κρισιμότητας της κατάστασης έγινε μια προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου με κάθε δυνατό μέσο. Βεβαία το σενάριο αυτό απαιτεί αρκετά μεγάλες ποσότητες νερού, όχι μόνο για να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων της περιοχής αλλά και για να εμπλουτίσει και τον υδροφορέα.

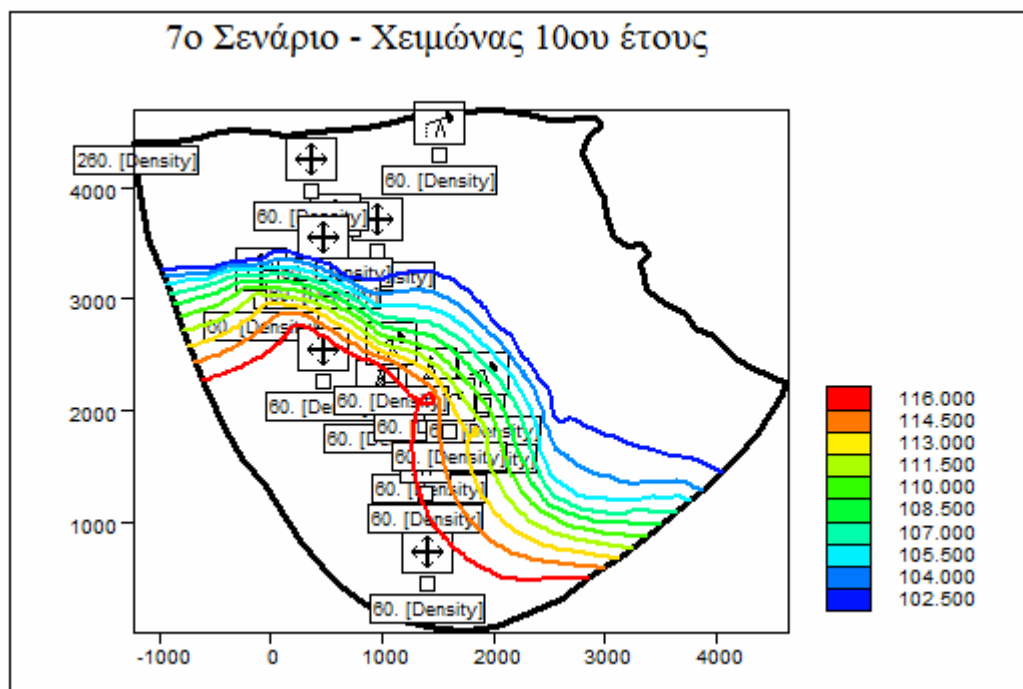
Τα αποτελέσματα είναι σαφώς πιο βελτιωμένα όπως ήταν και αναμενόμενο και μάλιστα το μέτωπο μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου είναι το πλησιέστερο προς την ακτή από όλα τα προηγούμενα σενάρια. Τα υδραυλικά ύψη έχουν αρκετά μεγάλες τιμές αλλά τα μαργαϊκά πετρώματα περιορίζουν σημαντικά την κίνηση του νερού. Το καλοκαίρι είναι επίσης βελτιωμένη η κατάσταση και εδώ λόγω των μαργαϊκών πετρωμάτων περιορίζεται η κίνηση του νερού. Το φαινόμενο περιορίζεται σε όλο το μήκος του μετώπου και εισχωρεί κατά 200 με 300 μέτρα από το καλοκαίρι του 5<sup>ου</sup> έτους αλλά οι τιμές του υδραυλικού ύψους έχουν αυξηθεί αρκετά.

Το σενάριο αυτό από πλευράς αντιμετώπισης του φαινομένου ίσως είναι το καλύτερο από όσα έχουν εξεταστεί αφού επηρεάζει το μέτωπο σε όλο του το μήκος και μάλιστα σε μεγάλο βαθμό. Από την άλλη πλευρά όμως, οι απαιτήσεις σε νερό είναι πολύ μεγάλες τόσο για την κάλυψη των αναγκών σε νερό των κατοίκων της περιοχής αλλά και για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα με μεγάλες ποσότητες. Οπότε εάν υπήρχε η δυνατότητα υλοποίησης του σεναρίου αυτού, τότε θα υπήρχαν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

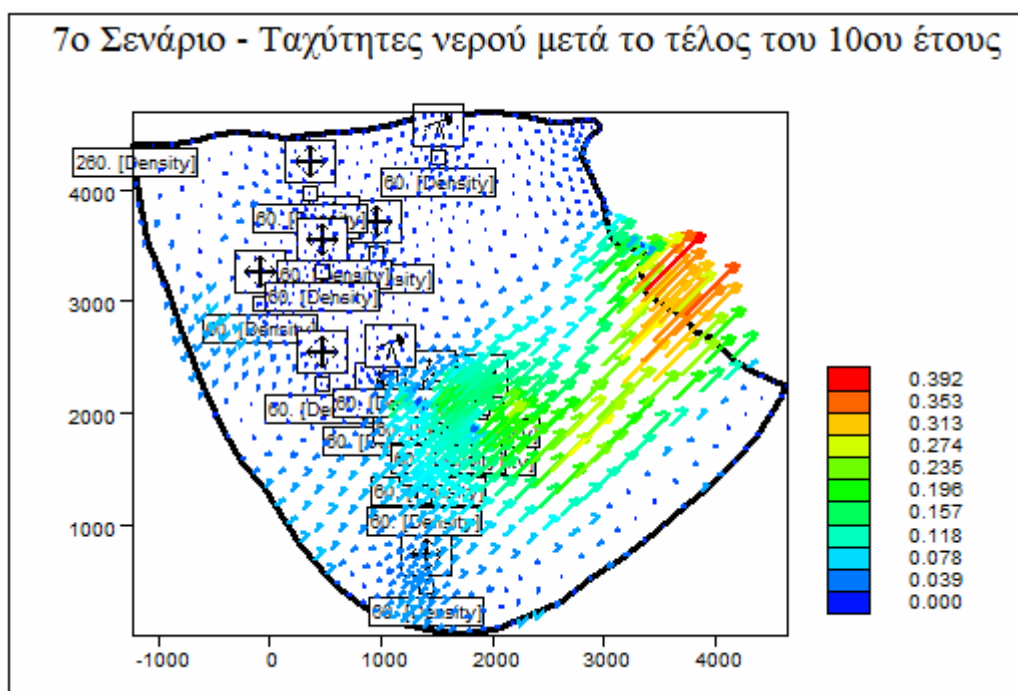
Οι ταχύτητες του νερού είναι αυξημένες όπως και στην περίπτωση των σεναρίων 3 και 5 και μάλιστα είναι αισθητός και ο ρόλος των πηγαδιών εμπλουτισμού. Οι ταχύτητες είναι ίδιας κλίμακας με αυτές των σεναρίων 3 και 5 με ελαφρά μεγαλύτερες τιμές στις περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.



Σχήμα 7.25 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της θερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.26 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα.



Σχήμα 7.27 Προσομοίωση της μελλοντικής κατάστασης των ταχυτήτων μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου του δέκατου έτους. Οι τιμές της ταχύτητας είναι σε μέτρα/ημέρα.

## 6.9 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η Χερσόνησος και η ευρύτερη περιοχή είναι μια κατεξοχήν τουριστική περιοχή η οποία βασίζει την οικονομική της υπόσταση στον τουρισμό. Λόγω της τουριστικής της ανάπτυξης και της μεγάλης ζήτησης το καλοκαίρι, οι ανάγκες σε νερό αυξάνονται κατακόρυφα, με αποτέλεσμα από την πλευρά των κατοίκων τη διάνοιξη πάρα πολλών ιδιωτικών πηγαδιών τα οποία αντλούν με πολύ μεγάλους ρυθμούς τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό είχε σαν συνέπεια το φαινόμενο της υφαλμύρωσης το οποίο έγινε ιδιαίτερα έντονο και έχει διεισδύσει στο εσωτερικό της περιοχής. Αυτή η υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα σε συνδυασμό με την υδρογεωλογία της περιοχής οδήγησε σε αυτή την ιδιαίτερα δυσμενή κατάσταση. Τους χειμερινούς μήνες λόγω μικρότερων αναγκών (η άντληση μειώνεται στο 30% της καλοκαιρινής άντλησης) αλλά και περισσότερων εισροών το φαινόμενο περιορίζεται λίγο από μόνο του αλλά και πάλι η κατάσταση δεν είναι η καλύτερη δυνατή. Γι' αυτό επιτακτική είναι η ανάγκη για τη λήψη κάποιων μέτρων για την αντιμετώπιση ή τον περιορισμό του φαινομένου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη και ορισμένες προτάσεις για τη βελτίωση της κατάστασης είναι :

- Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ιδιαίτερα έντονο στην περιοχή της Χερσονήσου με το μέτωπο να έχει διεισδύσει αρκετά μέτρα στο εσωτερικό της περιοχής. Σ' αυτό συντέλεσε η υπερεκμετάλλευση του υδροφορέα από την πλευρά των κατοίκων και η λανθασμένη διαχείριση των υδατικών πόρων.
- Η αναχαίτιση του φαινομένου είναι μια δύσκολη και επίπονη διαδικασία μιας και είναι ένα φυσικό φαινόμενο που είναι δύσκολα αναστρέψιμο. Επίσης και μετά την αντιμετώπισή του είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί και το αλάτι που έχει προσροφηθεί από τους κόκκους του εδάφους. Γ' αυτό καλύτερη θα ήταν η πρόβλεψη του, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εισροή της θάλασσας στο έδαφος με μια σωστή υδρολογική μελέτη για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων, παρά η αντιμετώπιση του φαινομένου.
- Σε παράκτιες περιοχές όπου τα αποθέματα του υδροφορέα είναι ελάχιστα είναι απαραίτητη να γίνει μια ορθολογική διαχείριση έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερεκμετάλλευσης γιατί οι επιπτώσεις που υπεισέρχονται (πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, διείσδυση της θάλασσας και η υφαλμύρωση των παράκτιων εδαφών, καθιζήσεις εδαφών λόγω συμπίεσης των κενών των πόρων του υδροφορέα, οικονομικό κόστος για μεταφορά γλυκού νερού) είναι πολύ μεγάλες.
- Για την καλύτερη μοντελοποίηση της περιοχής για τη συμπεριφορά του υδροφορέα είναι απαραίτητα στοιχεία που να αφορούν την υδρογεωλογία της περιοχής καθώς και τομές στα σημεία των πηγαδιών για την όσο το δυνατόν καλύτερη βαθμονόμηση των μοντέλων. Τα στοιχεία που εισήχθησαν στο μοντέλο είναι μόνο για τα επιφανειακά στρώματα. Από τομές στην περιοχή που πρέπει να γίνουν ίσως διαπιστωθεί ότι η γεωλογία της δεν αποτελείται από ένα μόνο στρώμα αλλά για παράδειγμα ότι κάτω από τις μάργες είναι δυνατόν να υπάρχουν ασβεστόλιθοι.
- Για την αναχαίτιση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του εμπλουτισμού των υδάτων με πηγάδια εισαγωγής. Μια ενδιαφέρουσα πρόταση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν οι εκροές του βιολογικού καθαρισμού αλλά είναι απαραίτητη περαιτέρω επεξεργασία τους καθώς η νομοθεσία προβλέπει το εισαγόμενο νερό να ικανοποιεί τα κριτήρια του πόσιμου νερού.
- Άλλες μέθοδοι όπως αυτή της δημιουργίας υποθαλάσσιων φραγμάτων ή της τεχνικής της κρυσταλλοποίησης δεν ενδείκνυνται γιατί η μεν πρώτη έχει μεγάλο οικονομικό κόστος και λόγω της σεισμικότητας στον Ελλαδικό χώρο ίσως να μην έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα για την δεύτερη δε, βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο.
- Αναγκαία κρίνεται και η μεταφορά νερού από παρακείμενες περιοχές με περισσεύματα υδατικού δυναμικού για μεγαλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου.
- Είναι απαραίτητη η εκπόνηση μελετών και έργων για την αξιοποίηση και εξοικονόμηση επιφανειακών υδάτων έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων καθώς και υδρογεωλογικών ερευνών και μελετών που να καθορίζουν το υδατικό ισοζύγιο και το υδατικό δυναμικό του υπόγειου υδροφορέα.

- Απαιτείται συνολικός σχεδιασμός, προγραμματισμός και ιεράρχηση όλων των έργων και ειδικά των υδατικών πόρων, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής και όχι ανάλογα με τις διαπροσωπικές σχέσεις και τα διαπλεκόμενα συμφέροντα.
- Από τα προτεινόμενα σενάρια που εξετάστηκαν ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσαν τα 3, 5 και 7 αλλά απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού και ίσως είναι λίγο περιοριστικά καθώς έχουν μεγάλα κόστη.
- Τα σενάρια 1, 5 και 6 δίνουν μια εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης αλλά δεν λύνουν το πρόβλημα. Ο περιορισμός της άντλησης στο 50% ή ο ολικός περιορισμός περιορίζουν το φαινόμενο λίγο αλλά κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες ενώ το χειμώνα η κατάσταση δείχνει να σταθεροποιείται αρκετά μέτρα μακριά από την ακτή.
- Το σενάριο 2 δεν είναι αποδεκτό αφού περιορίζει το πρόβλημα μόνο τοπικά και σε περιπτώσεις που υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και κρίνεται ανεπαρκές.
- Στις παράκτιες περιοχές που αποτελούνται κυρίως από άμμους και αργιλοαμμώδη εδάφη, είναι πρακτικά αδύνατη η αντιμετώπιση του φαινομένου.
- Πριν από οποιαδήποτε επιλογή για την αντιμετώπιση του φαινομένου απαραίτητη κρίνεται η εκπόνηση ενός γενικού σχεδίου που να προβλέπει όλες τις περιοχές με πρόβλημα υφαλμύρωσης και να δίνει τη βέλτιστη λύση για το σύνολο της παράκτιας ζώνης.



## Βιβλιογραφία

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.
2. Γεώργιος Π. Καρατζάς, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.
3. Γ. Τσακίρης, Υδατικοί Πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.
4. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
5. Γεώργιος Χ. Σούλιος, Γενική Υδρογεωλογία, University Studio Press, 1986.
6. Γιάννα Φαρσάρη, Πουλίκος Πραστάκος, Δείκτες, ένα εργαλείο για την αιεφόρο τουριστική ανάπτυξη. Πιλοτική εφαρμογή στο Δήμο Χερσονήσου Κρήτης. Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ηράκλειο Κρήτης.
7. Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης .
8. Chester D. Rail, Groundwater Contamination, Technomic Publishing Company, 1989.
9. Betsy Conclin, Dr Isiorho, Groundwater,
10. D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, Chemical Transport By Three – Dimensional Groundwater Flows, 1997.

## Ιστοσελίδες

11. [www.water.usgs.gov](http://www.water.usgs.gov)
12. [www.emy.gr](http://www.emy.gr)
13. [www.astm.org](http://www.astm.org)
14. [www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)
15. [www.mqtinfo.org/planningeduc0019.asp](http://www.mqtinfo.org/planningeduc0019.asp)
16. [www.spin.gr/spin/story.jsp?id=205](http://www.spin.gr/spin/story.jsp?id=205)

## Δημοσιεύσεις

17. Numerical solution of partial differential equations in science and engineering, Lapidus and Pinder, 1982
18. Finite elements in water resources, Pinder and Gray, 1977

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Η οδηγία 2000/60

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

### Άρθρο 1.

Σκοπός

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

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

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

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

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

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

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

### Άρθρο 2

Οι ορισμοί που χρησιμοποιούνται στην Οδηγία 2000/60 είναι:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **Άρθρο 4**

Οι περιβαλλοντικοί στόχοι που θεσπίζει η οδηγία είναι οι παρακάτω:

Περιβαλλοντικοί στόχοι

(β) για τα υπόγεια ύδατα

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

ii) Τα κράτη μέλη προστατεύουν, αναβαθμίζουν και αποκαθιστούν όλα τα συστήματα των υπόγειων υδάτων, διασφαλίζουν ισορροπία μεταξύ της άντλησης και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων, με στόχο την επίτευξη καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων το αργότερο 15 έτη από την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας, σύμφωνα με τις διατάξεις του Παραρτήματος V, με την επιφύλαξη της εφαρμογής των παρατάσεων που καθορίζονται σύμφωνα με την παράγραφο 4 και της εφαρμογής των παραγράφων 5, 6 και 7 και με την επιφύλαξη της παραγράφου 8 του παρόντος άρθρου, καθώς και με την επιφύλαξη της εφαρμογής του άρθρου 11 παράγραφος 3 σημείο ι).

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

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

#### **Άρθρο 8**

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

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

#### **Άρθρο 17**

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

### 2.1 Αρχικός χαρακτηρισμός

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

η θέση και τα όρια του ή των συστημάτων υπόγειων υδάτων

οι πιέσεις τις οποίες αναμένεται να υποστούν το ή τα συστήματα υπόγειων υδάτων, δηλαδή μεταξύ άλλων :

διάχυτες πηγές ρύπανσης

σημειακές πηγές ρύπανσης

υδροληψία

τεχνητή ανατροφοδότηση,

ο γενικός χαρακτήρας των υπερκείμενων στρωμάτων στην υδρολογική λεκάνη από την οποία τροφοδοτείται το σύστημα υπόγειων υδάτων,

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

### 2.2 Περαιτέρω χαρακτηρισμός

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

- τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης και του τύπου των γεωλογικών ενοτήτων,

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

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

Για τα συστήματα υπόγειων υδάτων που διασχίζουν τα σύνορα μεταξύ δύο ή περισσότερων κρατών μελών ή θεωρούνται στον αρχικό χαρακτηρισμό που διενεργείται σύμφωνα με την παράγραφο 2.1, ως διατρέχοντα τον κίνδυνο να μην πληρούν τους στόχους που καθορίζονται για κάθε σύστημα δυνάμει του άρθρου 4, συλλέγονται και διατηρούνται, κατά περίπτωση, οι ακόλουθες πληροφορίες για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων :

- α) η θέση των σημείων υδροληψίας του συστήματος υπόγειων υδάτων πλην:
  - των σημείων υδροληψίας που παρέχουν λιγότερα από 10 m<sup>3</sup> ημερησίως κατά μέσον όρο, ή
  - των σημείων άντλησης ύδατος προοριζόμενου για ανθρώπινη κατανάλωση, τα οποία παρέχουν λιγότερα από 10m<sup>3</sup> ημερησίως κατά μέσον όρο ή που εξυπηρετούν λιγότερα από 50 άτομα,
- β) οι μέσοι ετήσιοι ρυθμοί υδροληψίας από τα σημεία αυτά.
- γ) η χημική σύνθεση του ύδατος που αντλείται από το σύστημα υπόγειων υδάτων,
- δ) η θέση των σημείων του συστήματος υπόγειων υδάτων στα οποία γίνεται άμεση εισαγωγή ύδατος,
- ε) οι ρυθμοί απόρριψης στα σημεία αυτά,
- στ) η χημική σύνθεση του ύδατος που εισάγεται στο σύστημα υπόγειων υδάτων, και
- ζ) η χρήση γης στην υδρολογική λεκάνη ή λεκάνες από τις οποίες το σύστημα υπόγειων υδάτων δέχεται τις ανατροφοδοτήσεις του, συμπεριλαμβανομένων των εισροών ρύπων και των ανθρωπογενών μεταβολών στα χαρακτηριστικά των ανατροφοδοτήσεων, όπως π.χ. η εκτροπή και η διαρροή ομβρίων λόγω στεγανοποίησης εδαφών, τεχνητής ανατροφοδότησης, κατασκευής φραγμάτων ή αποστράγγισης.

Επισκόπηση των επιπτώσεων των μεταβολών της στάθμης των υπόγειων υδάτων

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

- [i] στα επιφανειακά ύδατα και τα συνδεδεμένα χερσαία οικοσυστήματα,
- [ii] στη ρύθμιση του ύδατος, την προστασία από τις πλημμύρες και την αποστράγγιση των γαιών,
- [iii] στην ανθρώπινη ανάπτυξη.

Επισκόπηση των επιπτώσεων της ρύπανσης στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη προσδιορίζουν επίσης τα συστήματα υπόγειων υδάτων για τα οποία καθορίζονται λιγότερο αυστηροί στόχοι δυνάμει του άρθρου 4, παράγραφος 5 όταν, λόγω των επιπτώσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας που ορίζεται στο άρθρο 5 παράγραφος 1, το σύστημα υπόγειων υδάτων είναι τόσο ρυπασμένο ώστε να είναι ανέφικτο ή δυσανάλογα δαπανηρό να επιτευχθεί καλή χημική κατάσταση υπόγειων υδάτων.

## 2.ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

### 2.1Ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων

2.1.1 Παράμετρος για την ταξινόμηση της ποσοτικής κατάστασης  
Καθεστώς στάθμης των υπόγειων υδάτων

#### 2.1.2 Ορισμός της ποσοτικής κατάστασης

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

## 2.2 Παρακολούθηση της ποσοτικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

### 2.2.1 Δίκτυο παρακολούθησης της στάθμης των υπόγειων υδάτων

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

### 2.2.2 Πυκνότητα των τόπων παρακολούθησης

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

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

### 2.2.3 Συχνότητα της παρακολούθησης

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

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

### 2.2.4 Ερμηνεία και παρουσίαση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων

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

Καλή – πράσινο

Κακή - κόκκινο.



## 2.3 Ερμηνεία και παρουσίαση της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων υδάτων

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

#### Αγωγιμότητα

#### Συγκεντρώσεις ρύπων

### 2.3.2 Ορισμός της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

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

## 2.4 Παρακολούθηση της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

### 2.4.1 Δίκτυο παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων

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

Με βάση το χαρακτηρισμό και την εκτίμηση των επιπτώσεων που διενεργούνται σύμφωνα με το άρθρο 5 και το Παράρτημα II, τα κράτη μέλη, για κάθε περίοδο εφαρμογής ενός Σχεδίου Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού, καταρτίζουν πρόγραμμα εποπτικής παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα του προγράμματος αυτού χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση προγράμματος επιχειρησιακής παρακολούθησης, το οποίο εφαρμόζεται κατά το υπόλοιπο τμήμα της περιόδου του Σχεδίου.

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

### 2.4.2 Εποπτική παρακολούθηση

#### Στόχος

Η εποπτική παρακολούθηση διενεργείται για :

- τη συμπλήρωση και την επικύρωση της διαδικασίας εκτίμησης

- την παροχή πληροφοριών που θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση μακροπρόθεσμων τάσεων που οφείλονται σε μεταβολές των φυσικών συνθηκών αλλά και σε ανθρώπινες δραστηριότητες.

Επιλογή των τόπων παρακολούθησης

Επιλέγονται επαρκείς τόποι παρακολούθησης όσον αφορά:

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

Επιλογή παραμέτρων

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

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

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

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

#### 2.4.3 Επιχειρησιακή παρακολούθηση

Στόχος

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

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

Επιλογή των τόπων παρακολούθησης

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

Συχνότητα της παρακολούθησης

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

#### 2.4.4 Διαπίστωση των τάσεων των ρύπων

Τα κράτη μέλη χρησιμοποιούν τα δεδομένα τόσο της εποπτικής όσο και της επιχειρησιακής παρακολούθησης για τη διαπίστωση μακροπρόθεσμων

ανθρωπογενούς αιτίας ανοδικών τάσεων στις συγκεντρώσεις ρύπων και την αντιστροφή των τάσεων αυτών. Προσδιορίζεται το βασικό έτος ή βασική περίοδος από την οποία υπολογίζονται οι τάσεις αυτές. Ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται σε ένα σύστημα ή, κατά περίπτωση, σε ομάδα συστημάτων υπόγειων υδάτων. Η αντιστροφή των τάσεων αποδεικνύεται στατιστικά και δηλώνεται ο βαθμός αξιοπιστίας της σχετικής διαπίστωσης.

#### 2.4.5 Ερμηνεία και παρουσίαση της χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων

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

- υπολογίζεται η μέση τιμή των αποτελεσμάτων της παρακολούθησης σε κάθε σημείο του συστήματος ή της ομάδας συστημάτων υπόγειων υδάτων και

- σύμφωνα με το άρθρο 17 οι μέσες αυτές τιμές χρησιμοποιούνται για να αποδεικνύεται η τήρηση της καλής χημικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων.

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

Καλή – πράσινο

Κακή - κόκκινο

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

Οι χάρτες αυτοί συμπεριλαμβάνονται στο Σχέδιο Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού.

#### 2.5 Παρουσίαση της κατάστασης των υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη παρέχουν στο Σχέδιο Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού χάρτη, στον οποίο φαίνεται, για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων ή ομάδα συστημάτων, τόσο η ποσοτική όσο και η χημική κατάσταση του εν λόγω συστήματος ή ομάδας συστημάτων, χρησιμοποιώντας χρωματικούς κώδικες σύμφωνα με τις απαιτήσεις των σημείων 2.2.4 και 2.4.5. Τα κράτη μέλη έχουν την επιλογή να μην καταρτίσουν χωριστούς χάρτες για τα σημεία 2.2.4 και 2.4.5, αλλά, στην περίπτωση αυτή, θα δηλώνουν επίσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του σημείου 2.4.5, στον απαιτούμενο από το τμήμα αυτό χάρτη τα συστήματα που υπόκεινται σε σημαντική και μόνιμη ανοδική τάση της συγκέντρωσης οποιουδήποτε ρύπου ή τυχόν αντιστροφή της τάσης αυτής.

