

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Υδρολογικό Ισοζύγιο .....	8
1.3 Ταξινόμηση Υπογείων Υδάτων.....	9
1.4 Υδροφορείς.....	9
1.5 Παράμετροι Υδροφορέων.....	9
1.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία.....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ.....</b>	<b>15</b>
2.1 Εισαγωγή.....	15
2.2 Ευρωπαϊκό και Ελληνικό Νομοθετικό Πλαίσιο σχετικά με τη Διαχείριση των Υδάτων... ..	16
2.3 Γενική Μεθοδολογία Αντιμετώπισης του φαινομένου της Υφαλμύρωσης.....	17
2.4 Μέθοδοι Προσομοίωσης Διεπιφάνειας .....	17
2.5 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg.....	18
2.5.1 Περιορισμένος Υδροφορέας .....	20
2.5.2 Ελεύθερος Υδροφορέας .....	21
2.6 Δομή της Διεπιφάνειας .....	22
2.7 Μέθοδοι Ελέγχου και Αντιμετώπισης της Υφαλμύρωσης .....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΡΟΔΟΥ.....</b>	<b>25</b>
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Γενικά Γεωμορφολογικά Στοιχεία .....	25
3.3 Γεωλογία .....	26
3.4 Τεκτονική .....	28
3.5 Υδρογραφικό Δίκτυο .....	30
3.6 Κλιματολογικά – Υδρολογικά στοιχεία .....	32
3.6.1 Θερμοκρασία .....	32
3.6.2 Ηλιοφάνεια .....	34
3.6.3 Σχετική Υγρασία.....	36
3.6.4 Άνεμοι.....	37
3.6.5 Βροχόπτωση.....	38

3.6.6 Διήθηση.....	39
3.6.7 Απορροή.....	40
3.6.8 Υδατικό Ισοζύγιο.....	42
3.7 Γεωμετρικά και Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφόρων στρωμάτων.....	43
3.7.1 Μέσο πάχος υδροφορέα σε κάθε λεκάνη .....	43
3.7.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα .....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ.....</b>	<b>44</b>
4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Μοντέλα Ροής Υπογείων Υδάτων.....	44
4.3 Πρωτόκολλο Μοντελοποίησης.....	45
4.4 Βασικές Εξισώσεις των συστημάτων Υπόγειας Ροής .....	46
4.5 Αριθμητικές Μέθοδοι των συστημάτων Υπόγειας Ροής .....	52
4.6 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και ο σχεδιασμός του πλέγματος.....	53
4.6.1 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και η κατασκευή του.....	53
4.6.2 Σχεδιασμός του πλέγματος .....	55
4.6.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων.....	57
4.6.4 Μεταφορά των παραμέτρων στο πλέγμα.....	59
4.7 Οριακές Συνθήκες.....	59
4.7.1 Είδη Οριακών Συνθηκών.....	59
4.7.2 Τοποθέτηση των Οριακών Συνθηκών.....	60
4.7.3 Προσομοίωση των Οριακών Συνθηκών .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΓΣΠ ARGUS ONE ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ "PTC".....</b>	<b>64</b>
5.1 Σύντομη αναφορά στο ΓΣΠ ARGUS ONE.....	64
5.2 Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης PTC.....	65
5.3 Επίλυση του Αλγόριθμου του PTC .....	66
5.4 Τρισδιάστατη ροή Υπόγειου Ύδατος.....	66
5.4.1 Βασική Εξίσωση.....	66
5.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	67
5.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών.....	69
5.4.4 Η Κάθετη Παράγωγος.....	70
5.4.5 Η Χρονική Παράγωγος .....	71
5.5 Οριακές Συνθήκες.....	72
5.5.1 Οριακές Συνθήκες Σταθερού Υδραυλικού Ύψους (Dirichlet).....	72
5.5.2 Οριακές Συνθήκες Σταθερής Ροής (Neumann).....	73

5.5.2 Οριακές Συνθήκες Τρίτου Είδους (Διαρροή).....	74
5.6 Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα.....	74
5.7 Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπων.....	76
5.7.1 Βασικές Εξισώσεις .....	76
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ</b>	
<b>ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....</b>	<b>78</b>
6.1 Εισαγωγή.....	78
6.2 Εφαρμογές της Βελτιστοποίησης για Μηχανικούς .....	79
6.3 Κατηγορίες και Παράμετροι Προβλημάτων Βελτιστοποίησης.....	79
6.4 Μεθοδολογίες Επίλυσης Προβλημάτων Βέλτιστης Διαχείρισης Υπόγειων Υδάτων.....	80
6.4.1 Προβλήματα Ποσοτικής Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος.....	81
6.4.2 Προβλήματα Ποιοτικής Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος .....	84
6.4.3 Μικτά Προβλήματα Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος.....	87
6.5 Μαθηματικά των Προβλημάτων Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος... ..	87
6.6 Η Εξωτερική Προσεγγιστική Μέθοδος (ΟΑ).....	92
6.6.1 Βήματα του Αλγόριθμου Βελτιστοποίησης ΟΑ.....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ "ΡΤC" ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	
<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>100</b>
7.1 Εισαγωγή .....	100
7.2 Εισαγωγή Δεδομένων στο Μοντέλο "ΡΤC".....	100
7.3 Βαθμονόμηση .....	108
7.4 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.....	109
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ "ΟΑ" ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	
<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....</b>	<b>118</b>
8.1 Εισαγωγή.....	118
8.2 Εισαγωγή Δεδομένων στο Μοντέλο "ΟΑ".....	118
8.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης.....	122
8.4 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα.....	125
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>128</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	
<b>Χάρτης Ι-1</b>	
<b>Χάρτης Ι-2</b>	

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τον συνδυασμό της Μοντελοποίησης με μεθόδους Βελτιστοποίησης, ώστε να προκύψει ο ορθολογικότερος σχεδιασμός σχετικά με τη διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα στο Βόρειο τμήμα της νήσου Ρόδου. Πιο συγκεκριμένα, εστιάζει στον περιορισμό της εξάπλωσης της ζώνης υφαλμύρωσης, η οποία έχει δημιουργηθεί στην περιοχή και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου ύδατος.

Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στις βασικές έννοιες της υπόγειας υδραυλικής καθώς και μια εκτενής περιγραφή του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γενική εικόνα της περιοχής ενδιαφέροντος με παράθεση στοιχείων σχετικά με τη γεωλογία, την τεκτονική, το υδρογραφικό δίκτυο, αλλά και διάφορων κλιματολογικών και υδρολογικών δεδομένων.

Κατόπιν, ακολουθεί η περιγραφή των μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν τα συστήματα υπόγειας ροής, των εξισώσεων, των αριθμητικών μεθόδων επίλυσής τους και των οριακών συνθηκών που τα διέπουν. Στην παρούσα εργασία η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς της μάζας πραγματοποιείται με την εφαρμογή του αλγόριθμου PTC (*Princeton Transport Code*). Αφού γίνει η εισαγωγή όλων των απαιτούμενων δεδομένων, το μοντέλο βαθμονομείται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σχετικά με τα υδραυλικά ύψη, τις ταχύτητες ροής του υπόγειου ύδατος και την υπάρχουσα κατάσταση υφαλμύρωσης.

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση της περιοχής, ακολουθεί η εφαρμογή του μοντέλου βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι η Μέθοδος της Εξωτερικής Προσέγγισης (*Outer Approximation Method*). Γίνεται μια εκτενής αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου και κατόπιν εισάγονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Στόχος μας είναι η εύρεση του ορθολογικότερου τρόπου διαχείρισης των υπάρχουσων γεωτρήσεων, ώστε να αποφευχθεί η εξάπλωση του μετώπου της υφαλμύρωσης. Έτσι, εξετάζοντας διάφορα σενάρια προκύπτει κάθε φορά μια βέλτιστη λύση, η οποία υποδεικνύει ποια πηγάδια εντός της περιοχής ενδιαφέροντος πρέπει να συνεχίσουν να λειτουργούν καθώς και το ρυθμό με τον οποίο καθένα από αυτά θα αντλεί νερό από τον υπόγειο υδροφορέα. Το διαφορετικό διαχειριστικό πρόγραμμα που προτείνεται από το μοντέλο εξασφαλίζει σε κάθε περίπτωση ότι όλοι οι περιορισμοί που ορίζονται από το φυσικό σύστημα ικανοποιούνται και συνολικά ο σχεδιασμός επιτυγχάνεται με το ελάχιστο δυνατό κόστος, το οποίο και υπολογίζεται από το μοντέλο.

## 1. ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

### 1.1 Εισαγωγή

Το νερό αποτελεί ίσως το μεγαλύτερο αγαθό που προσφέρει η φύση στον άνθρωπο, αφού είναι το βασικότερο στοιχείο ζωής για κάθε ζωντανό οργανισμό. Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών, ενώ υπόγειο είναι το νερό εκείνο το οποίο είναι αποθηκευμένο ή κινείται στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη υπολογίζεται στα 1360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα. Από αυτήν την ποσότητα, τα υπόγεια νερά αποτελούν μόνο ένα μικρό ποσοστό (0,6 %), δηλαδή περίπου  $8 \times 10^6 \text{ km}^3$ . Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στο 98 % του εκμεταλλεύσιμου πόρου σε υγρή κατάσταση, καθώς το νερό των ποταμών και των λιμνών είναι μικρότερο από το 0,03 % του συνολικού όγκου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σχεδόν το ήμισυ των υπογείων υδάτων βρίσκεται σε τόσο μεγάλο βάθος που δεν επιτρέπει τη χρήση τους, τόσο εξαιτίας της χαμηλής ποιότητάς τους όσο και εξαιτίας της εξαιρετικά μεγάλης απαιτούμενης δαπάνης άντλησης. [3]

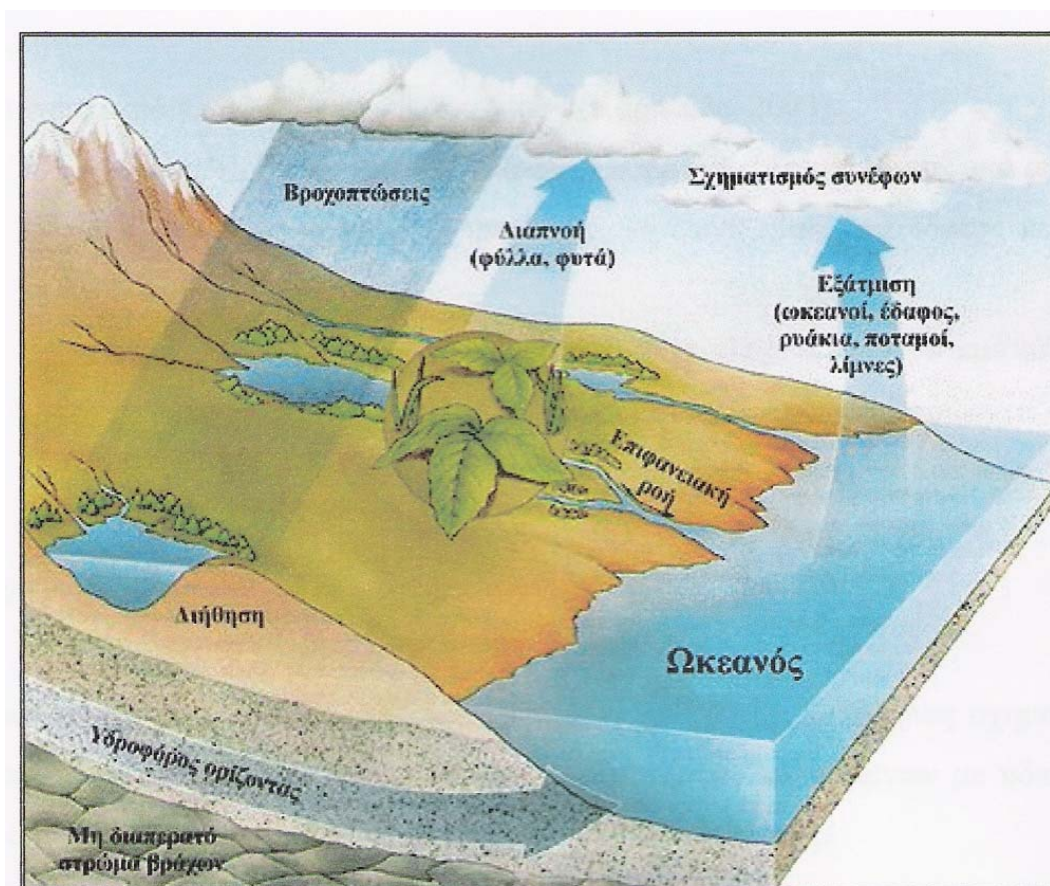
Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά το υδατικό ισοζύγιο της γης.

	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	2 weeks – 1 yr
Υπόγεια νερά	130	60	4	120	2 weeks – 10000 yr
Παγετώνες	17,8	30	2	60	10 – 10000 yr
Ατμόσφαιρα	504	0,01	<0,01	0,025	~10 days

**Πίνακας 1.1:** Υδατικό ισοζύγιο της γης [2]

## 1.2 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Για τη μελέτη των υπογείων υδάτων είναι αναγκαία η άμεση συσχέτισή τους με τον Υδρολογικό κύκλο, καθώς η ανανέωση ενός σημαντικού μέρους του συνολικού εκμεταλλεύσιμου όγκου των υπογείων υδάτων γίνεται με τη διήθηση των νερών των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ μεγάλο τμήμα τους χάνεται καθώς εκφορτίζεται στις θάλασσες και στους ωκεανούς.



**Σχήμα 1.1:** Υδρολογικός κύκλος [11]

Το Υδρολογικό Ισοζύγιο κάθε φυσικού συστήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (1.1)$$

όπου

- ✓ P ο ρυθμός κατακρήμνισης
- ✓ R ο ρυθμός επιφανειακής ροής
- ✓ G ο ρυθμός υπόγειας ροής

- ✓ Ε ο ρυθμός εξάτμισης
- ✓ Τ ο ρυθμός διαπνοής
- ✓ ΔS η μεταβολή του ρυθμού αποθήκευσης του ύδατος

### 1.3 Ταξινόμηση των Υπογείων Υδάτων

Τα υπόγεια ύδατα κατανέμονται σε δύο ζώνες:

- *Ακόρεστη ζώνη*, είναι η ζώνη του υπεδάφους όπου οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό (εκτός από την περίπτωση που καταλαμβάνονται μόνο με νερό – περίπτωση πλημμύρας).
- *Κορεσμένη ζώνη*, είναι η ζώνη όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρεις από νερό και κάτω από υδροστατική πίεση. Η άνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, όπου η υδροστατική πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική. [2]

### 1.4 Υδροφορείς

Υδροφορέας καλείται ο υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό, τα οποία μπορούν να προμηθεύσουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. [2]

Οι υδροφορείς ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα ταξινομούνται σε:

- *Ελεύθερους*, των οποίων η ανώτερη επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.
- *Περιορισμένους ή αρτεσιανούς*, οι οποίοι περιέχουν νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζονται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα.

### 1.5 Παράμετροι Υδροφορέων

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

### Πορώδες

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

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad (1.2)$$

όπου

- ✓  $V_v$  ο όγκος των κενών
- ✓  $V_o$  ο συνολικός όγκος του δείγματος

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι η κοκκομετρική σύνθεση, η διάταξη και το σχήμα των κόκκων, ενώ χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους είναι:

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

**Πίνακας 1.2:** Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους [8]

### Υδραυλική Αγωγιμότητα, Νόμος του Darcy

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy, ο ρυθμός ροής διαμέσου πορώδους υλικού είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής.

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.3)$$

όπου

- ✓  $q$  η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)
- ✓  $Q$  η παροχή (L<sup>3</sup>/T)
- ✓  $A$  η επιφάνεια (L<sup>2</sup>)
- ✓  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)
- ✓  $\Delta h$  η απώλεια φορτίου (L)
- ✓  $L$  το μήκος της στήλης (L)

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η ταχύτητα της ροής γίνεται προς την κατεύθυνση όπου το υδραυλικό ύψος μειώνεται.

Ο λόγος  $\Delta h/L$  ή  $dh/dl$  καλείται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς  $Re < 1$ , έχει όμως παρατηρηθεί ότι μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι και για  $Re = 10$ , χωρίς σοβαρό σφάλμα. Στην περίπτωση των υπογείων νερών η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , γεγονός που εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου του Darcy, χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων όπου έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε κάποιο φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροή, όπως όταν έχουμε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα.

Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι:

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

**Πίνακας 1.3:** Χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας [8]

### Ταχύτητα Διήθησης

Η ταχύτητα του Darcy θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψιν το στερεό υλικό και τους πόρους. Σε ένα πορώδες υλικό, όμως, η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και έτσι η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} - \frac{K}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.4)$$

όπου

- ✓  $q_p$  η ταχύτητα διήθησης (L/T)
- ✓  $n$  το πορώδες (αδιάστατο)
- ✓  $dh$  η απώλεια φορτίου (L)
- ✓  $dl$  το μήκος της στήλης (L)

### Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υπόγεια υδραυλική. Ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση.

$$T = K b \quad (1.5)$$

όπου

- ✓  $T$  ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (L<sup>2</sup>/T)
- ✓  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)
- ✓  $b$  το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα (L)

Η μεταβιβασιμότητα των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερή, εφόσον το πάχος τους είναι αμετάβλητο. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα των ελεύθερων υδροφορέων μεταβάλλεται χωρικά, καθώς το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται σε κάθε θέση από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

---

### Συντελεστής Αποθηκευτικότητας

Στους περιορισμένους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται στη συμπιεστότητα του ύδατος και του υλικού. Αντίθετα, στους ελεύθερους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται κυρίως στην πλήρωση ή εκκένωση των πόρων και πολύ λιγότερο στη συμπιεστότητα του ύδατος και του υλικού [2].

## **1.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία**

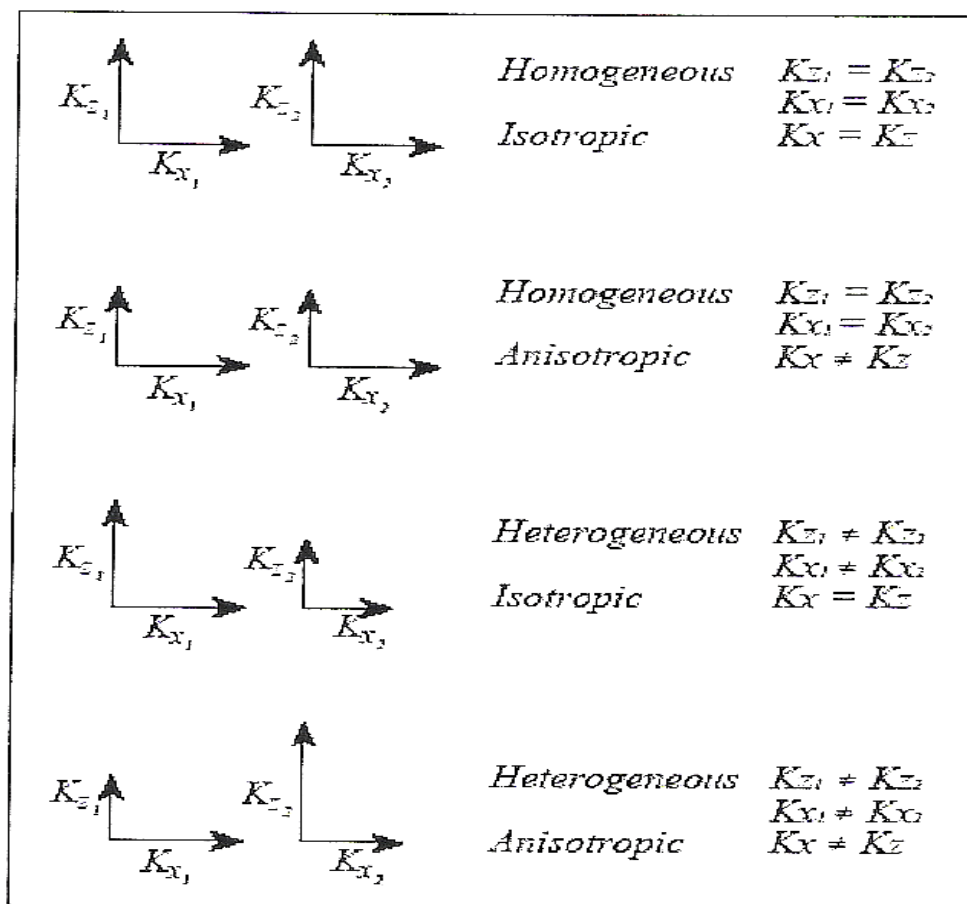
Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Επίσης, είναι δυνατόν σε δεδομένο σημείο να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και στην δεύτερη της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας. Έτσι, ένας υδροφορέας μπορεί να χαρακτηριστεί ως [2]:

*Ομοιογενής*, όταν έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.

*Ετερογενής*, όταν οι υδραυλικές του ιδιότητες μεταβάλλονται χωρικά.

*Ισότροπος*, όταν σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο οι υδραυλικές του ιδιότητες είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις.

*Ανισότροπος*, όταν σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο οι υδραυλικές του ιδιότητες διαφέρουν σε κάθε κατεύθυνση.



**Σχήμα 1.2:** Ομοιογένεια και ισοτροπία υδροφορέα [8]

## 2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Η υφιστάμενη κατάσταση των υδάτινων οικοσυστημάτων στη χώρα μας αποκαλύπτει ότι η βιωσιμότητα των υδατικών πόρων σε ορισμένες περιοχές απειλείται. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με την μεγάλη βιομηχανική ανάπτυξη έχουν ως αποτέλεσμα την υπερβολική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, η οποία οδηγεί στην εξάντληση και στην καταστροφή τους. Η υπεράντληση των υπογείων υδατικών συστημάτων, η υποβάθμιση της ποιότητάς τους και η υπερεκμετάλλευση των επιφανειακών υδάτων, ιδιαίτερα για την κάλυψη της υπερβολικής ζήτησης νερού άρδευσης και ύδρευσης, καθιστούν το πρόβλημα διαχείρισης του ύδατος ως ένα πρόβλημα καίριας σημασίας, τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπογείων νερών παράκτιων υδροφορέων σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, δηλαδή με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο υφαλμύρωση ενός υπόγειου υδροφορέα εννοούμε τη διείσδυση του αλμυρού ύδατος στο γλυκό με παράλληλη αύξηση της αλατότητάς του σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος, που έχει σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού του υδροφορέα. Το γλυκό νερό είναι ελαφρύτερο και έτσι επιπλέει πάνω από το νερό της θάλασσας. Η εισροή του αλμυρού νερού μπορεί να είναι μόνιμη ή συνηθέστερα μη μόνιμη ροή.

Η υφαλμύρωση υπογείων υδροφορέων είναι μια ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και μπορεί να εμφανιστεί τόσο σε ελεύθερους, όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς.

Τα συνηθέστερα αίτια που προκαλούν το φαινόμενο της υφαλμύρωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- *Φυσικά αίτια*, όπως
  - Κλιματικές αλλαγές
  - Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- *Ανθρωπογενή αίτια*, όπως
  - Υπεραντλήσεις των υδροφορέων
  - Λύματα υψηλής αλατότητας τα οποία καταλήγουν στους υδροφορείς, χωρίς να έχουν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία

Η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς τις περισσότερες φορές είναι αποτέλεσμα συνδυασμού φυσικών και ανθρωπογενών λόγων.

Όταν ο ρυθμός άντλησης σε πηγάδια γειτονικά στη θάλασσα ξεπεράσει το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλασσινό νερό εισρέει στους υδροφορείς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριώντων στο νερό του υδροφορέα, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο προς πόση. Όταν το γλυκό νερό ενός υδροφορέα υποστεί διείσδυση θαλασσινού, είναι πλέον πολύ δύσκολη η αντιμετώπιση του φαινομένου. Για τον λόγο αυτό το κυριότερο μέτρο πρόληψης της υφαλμύρωσης είναι η πρόβλεψη και η ορθή διαχείριση. [1]

## **2.2 Ευρωπαϊκό και Ελληνικό Νομοθετικό Πλαίσιο Σχετικά με τη Διαχείριση των Υδάτων**

Στον Ελληνικό χώρο το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι ιδιαίτερα έντονο και έχει επηρεάσει τις περισσότερες νησιωτικές και παράκτιες περιοχές. Σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης νερού, με δεδομένη τη συνεχή μείωση της διαθέσιμης ποσότητας ύδατος, οδηγούμαστε στην υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων που προκαλεί διείσδυση της θάλασσας σε πολλούς από αυτούς. [1]

Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης είναι ένα από τα πλέον σύνθετα και μη αντιστρεπτά προβλήματα της υπόγειας υδραυλικής, με πληθώρα οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2000 θεσπίζει το πλαίσιο κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. Στόχος της Οδηγίας είναι η θέσπιση κοινοτικού πλαισίου για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, υπογείων, μεταβατικών και παράκτιων υδάτων, με σκοπό την προστασία του υδατικού περιβάλλοντος και την αειφόρο χρήση των υδάτων. Σύμφωνα με την Οδηγία αυτή υπάρχει επιτακτική ανάγκη καθιέρωσης των διαδικασιών άντλησης γλυκού ύδατος και παρακολούθησης της ποσότητας και της ποιότητάς του, γεγονός που προϋποθέτει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας από τους αρμόδιους φορείς. [4]

Στην Ελλάδα η θεμελιώδης νομοθετική διάταξη για τη θέσπιση πολιτικής και λήψη δράσης σχετικά με τη διαχείριση και την προστασία των υδάτινων πόρων είναι ο Νόμος 3199/2003, με τον οποίο επιτυγχάνεται η εναρμόνιση του εθνικού δικαίου με την Οδηγία 2000/60/EK.

## 2.3 Γενική Μεθοδολογία Αντιμετώπισης του Φαινομένου της Υφαλμύρωσης

Η υφαλμύρωση των υπόγειων υδροφορέων, όπως και όλα τα θέματα που σχετίζονται με τη διαχείριση των υπόγειων νερών, αποτελεί ένα διεπιστημονικό αντικείμενο για την αντιμετώπιση του οποίου απαιτείται η συνεργασία πολλών ειδικοτήτων. Σημαντικό στοιχείο στην ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της διείσδυσης του αλμυρού νερού στους υδροφορείς, αποτελεί η συλλογή δεδομένων όπως η θέση, τα όρια, τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος των υπογείων νερών της περιοχής, η σχέση του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και γειτονικά οικοσυστήματα, η χημική του σύνθεση και οι πιέσεις – επιπτώσεις εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Επίσης, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι μετρήσεις πεδίου διότι παρέχουν πιο ακριβείς πληροφορίες για την έκταση του φαινομένου. Όπως προβλέπεται από την Οδηγία 2000/60 είναι αναγκαία η ύπαρξη δικτύου παρακολούθησης της στάθμης και της χημικής κατάστασης του υπόγειου ύδατος και η λήψη αξιόπιστων μετρήσεων. Η λειτουργία των δικτύων αυτών βασίζεται στη χρήση εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων (modeling) και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος υπογείων νερών για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Στην εκπόνηση μαθηματικών μοντέλων οι μετρήσεις του πεδίου έχουν διπλό ρόλο. Επιτρέπουν τη βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύουν στην επαλήθευσή του, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αξιοπιστίας του. [1]

## 2.4 Μέθοδοι Προσομοίωσης Διεπιφάνειας

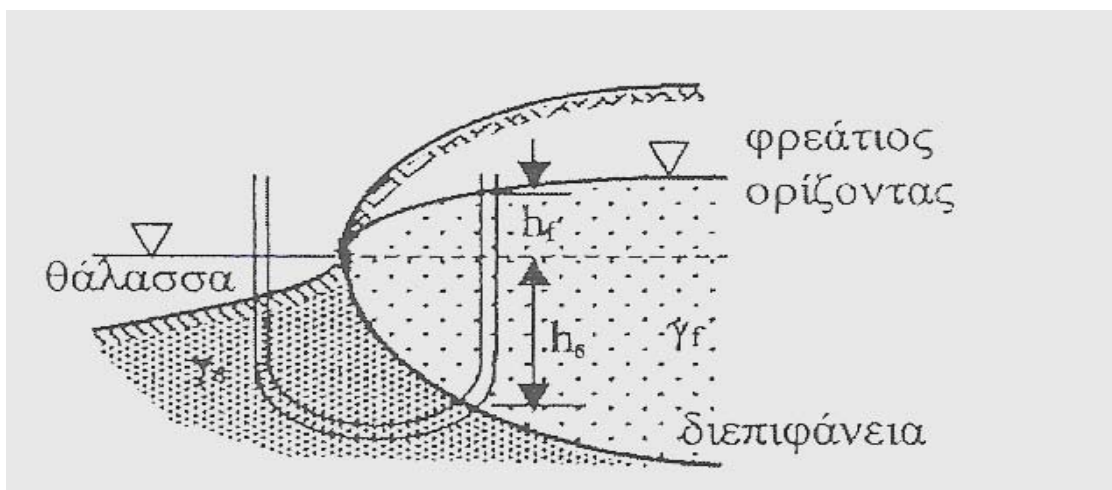
Οι τρόποι αντιμετώπισης των προβλημάτων υφαλμύρωσης είναι οι εξής:

- *Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους*, λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder and Cooper, Henry and Cheng, Segol and Pinder). Η διείσδυση του αλμυρού νερού στους υδροφορείς θεωρείται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης, όπου υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δύο συνιστώσες μιας φάσης), και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν ένα πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).
- *Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης)*, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα (Ghyben, Herzgerg,

Hubbert). Στη θεώρηση αυτή γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, συμβαίνει σε αδιατάρακτες συνθήκες ροής με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα. Όταν υπάρχει άντληση παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής.

## 2.5 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή η στάθμη του θαλασσινού νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, σε βάθος περίπου 40 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. Η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή Dupuit.



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben – Herzberg [1]

Κατά τους Ghyben – Herzberg ισχύει:

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g \rho_f}{g(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (2.1)$$

όπου

- ✓  $h_f$  το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας
- ✓  $h_s$  η θέση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού κάτω από αυτήν
- ✓  $\gamma_f$  το ειδικό βάρος του γλυκού νερού
- ✓  $\gamma_s$  το ειδικό βάρος του αλμυρού νερού

Αντικαθιστώντας στην (2.1) την πυκνότητα του γλυκού νερού  $\rho_f = 1.000 \text{ kg/m}^3$  και την πυκνότητα του αλμυρού νερού  $\rho_s = 1.025 \text{ kg/m}^3$  προκύπτει:

$$h_s = \frac{1.000}{1.025 - 1.000} h_f \Rightarrow h_s \cong 40 h_f \quad (2.2)$$

Στην πραγματικότητα, όμως, η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν απεικονίζει την αληθινή εικόνα της διεπιφάνειας για τους εξής λόγους:

- ✓ Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, κυρίως στην 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 την επιφάνεια διήθησης στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων.

Παρόλα αυτά η εξίσωση Ghyben – Herzberg αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την εύρεση, προσεγγιστικά και με απλό τρόπο, της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού. Εφ' όσον είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, μπορεί να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέρατο όριο του υδροφορέα ή εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν. [1]

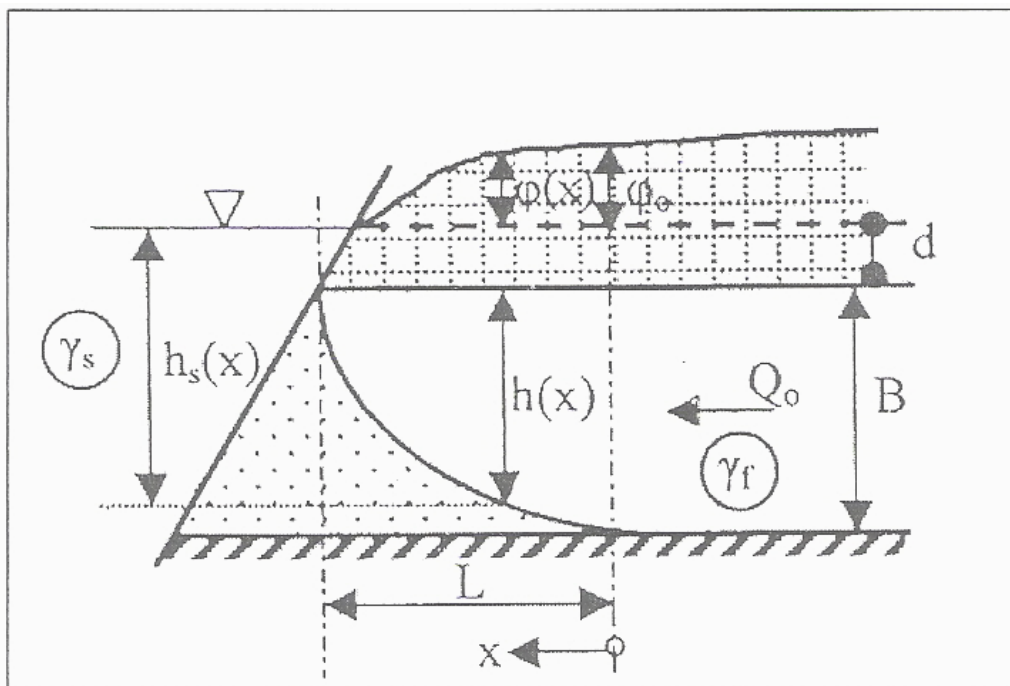
### 2.5.1 Περιορισμένος Υδροφορέας

Για περιορισμένο υδροφόρα υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$ , πάχους  $B$  ο οποίος βρίσκεται σε βάθος  $d$  κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, από το νόμο του Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτει η ακόλουθη σχέση (ως επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας):

$$Q_0 L = \frac{K \phi_0}{2} (\delta \phi_0 - 2d) + \frac{K d^2}{2\delta} = \frac{K}{2\delta} B^2 \quad (2.3)$$

όπου

- ✓  $L$  το μήκος της υφάλμυρης σφήνας
- ✓  $Q_0$  η παροχή γλυκού νερού προς τη θάλασσα
- ✓  $\phi_0$  το πιεζομετρικό φορτίο στην άκρη της διεπιφάνειας
- ✓  $\delta$  η σταθερά Ghyben – Herzberg



**Σχήμα 2.2:** Σχηματική παράσταση περιορισμένου υδροφορέα [1]

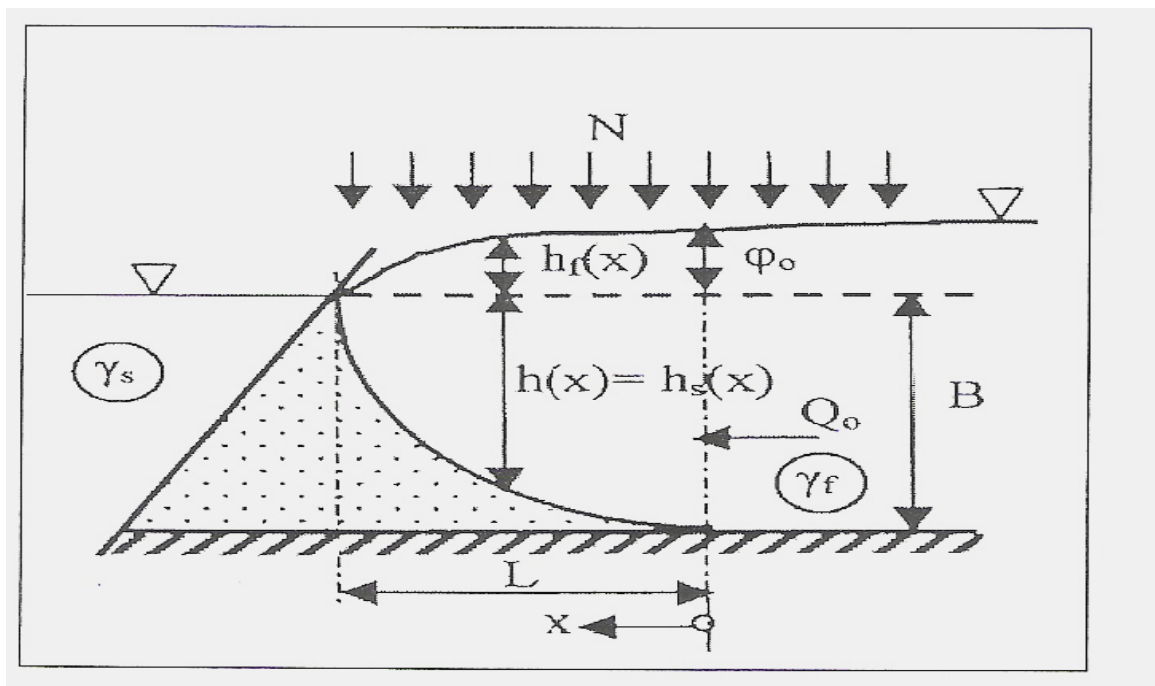
### 2.5.2 Ελεύθερος Υδροφορέας

Αντίστοιχα, για τους ελεύθερους υδροφορείς και λαμβάνοντας επιπλέον υπόψιν την κατακόρυφη διήθηση  $N = \text{σταθ. ή } N = N(x)$ , με βάση και πάλι το νόμο του Darcy και την προσέγγιση Ghyben – Herzberg προκύπτει μετά από ολοκλήρωση η αντίστοιχη σχέση για τη μορφή της διεπιφάνειας (ως επίπεδο αναφοράς θεωρείται η επιφάνεια της θάλασσας):

$$\phi_0^2 = \frac{2Q_0L + NL^2}{K(1+\delta)} \quad \text{ή} \quad Q_0 = \frac{KB^2}{2L} \frac{(1+\delta)}{\delta^2} - \frac{NL}{2}, \quad \phi_0 = \frac{B}{\delta} \quad (2.4)$$

όπου

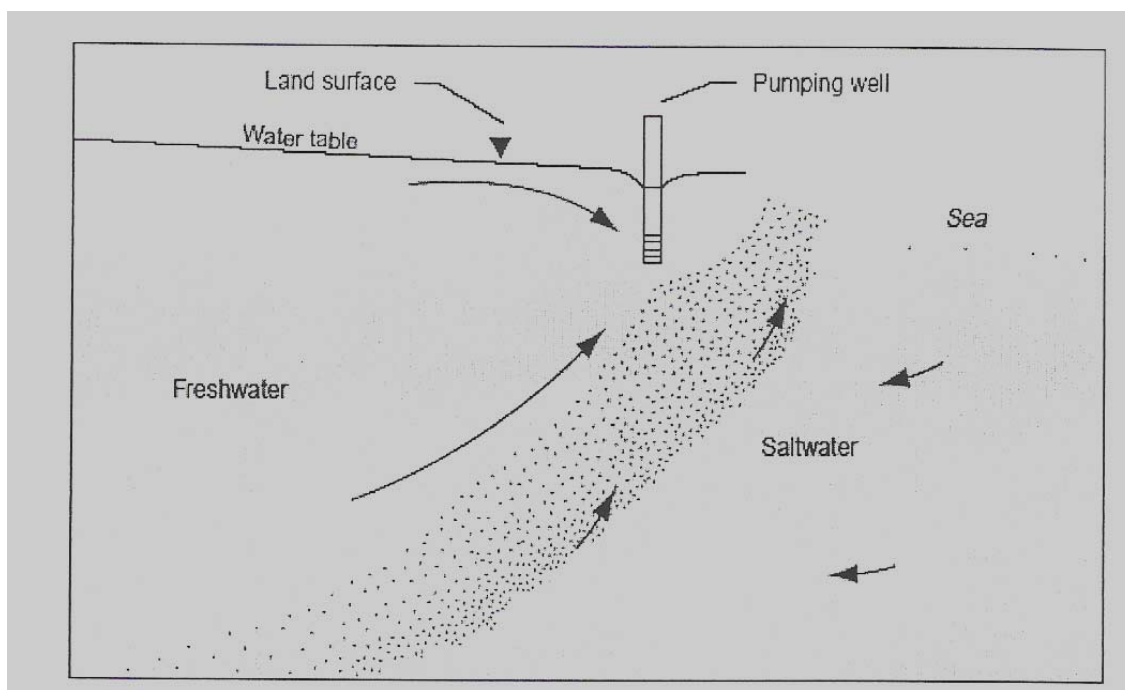
- ✓  $Q_0$  η παροχή γλυκού νερού στην άκρη της διεπιφάνειας
- ✓  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα
- ✓  $B$  η απόσταση της βάσης του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας
- ✓  $\phi_0$  το πιεζομετρικό φορτίο στην άκρη του υδροφορέα



**Σχήμα 2.3:** Σχηματική παράσταση ελεύθερου υδροφορέα [1]

## 2.6 Δομή της Διεπιφάνειας

Από μετρήσεις πεδίου προκύπτει ότι η διεπιφάνεια της ζώνης υφαλμύρωσης δεν ανταποκρίνεται στην μαθηματική έννοια της «επιφάνειας», αλλά είναι μια ζώνη υφάλμυρου νερού με μεταβλητό πάχος. Η ζώνη αυτή δημιουργείται από διάφορες εξωτερικές επιδράσεις, όπως η φύση της φόρτισης και επαναφόρτισης του γλυκού νερού, η παλιρροιακή δράση και ο τρόπος άντλησης, οι οποίες προκαλούν τη συνεχή μετατόπιση της διαχωριστικής επιφάνειας προς μια νέα θέση ισορροπίας. Η διάχυση που δημιουργείται από κάθε κίνηση οδηγεί σε σχηματισμό μεταβατικής ζώνης βαθμιαίας ανάπτυξης και αλατότητας. Η διάχυση εξαρτάται κάθε φορά από το συντελεστή διάχυσης του υδροφόρου ορίζοντα και από την απόσταση που διανύει το υπόγειο νερό. Το πάχος της μεταβατικής ζώνης ανάμιξης σε κάθε θέση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης, από το εάν το γλυκό νερό βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας ή όχι, από την περατότητα και την παλίρροια. Καθώς το γλυκό νερό διαχέεται προς τα πάνω στη μεταβατική ζώνη ανάμιξης λόγω διακυμάνσεων, ένα μέρος οδηγείται προς τη θάλασσα λόγω της ροής του γλυκού νερού. Το γεγονός αυτό προκαλεί μικρές διαβαθμίσεις στην πυκνότητα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αργού δικτύου ροής του αλμυρού νερού προς την ξηρά.



**Σχήμα 2.4:** Ροή υπόγειου νερού και ζώνη διασποράς σε έναν παράκτιο ομοιογενή υδροφορέα [1]

## 2.7 Μέθοδοι Ελέγχου και Αντιμετώπισης της Υφαλμύρωσης

Εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης σε αλάτι στο θαλασσινό νερό, όταν έστω και μια μικρή ποσότητα αυτού (της τάξεως του 2 %) αναμιχθεί με το γλυκό νερό ενός υδροφορέα μπορεί το νερό να γίνει υφάλμυρο και άρα ακατάλληλο για διάφορες χρήσεις. Η διείσδυση θαλασσινού νερού στους υδροφορείς είναι ένα φαινόμενο συνήθως δύσκολα αναστρέψιμο, αφού μπορεί να διαρκέσει αρκετά χρόνια. [10]

Μερικοί από τους τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρωσης είναι οι ακόλουθοι:

- Τεχνητή επαναφόρτιση και εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων που στοχεύει στην αύξηση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η ανύψωση αυτή της στάθμης γίνεται έως λίγο παραπάνω από το επίπεδο της θάλασσας και λειτουργεί σαν ένα φράγμα το οποίο εμποδίζει τη διείσδυση θαλασσινού νερού. Στην πράξη έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού, έμμεσες και κυρίως άμεσες, παροχετεύοντας νερό από ποταμούς και άλλους ταμειυτήρες σε εκτεταμένες λεκάνες, τάφρους, φρέατα, από όπου διηθείται στη συνέχεια στο έδαφος.
- Συντήρηση της επιμήκους ανύψωσης της στάθμης του γλυκού νερού, η οποία λειτουργεί σαν ένα υδραυλικό φράγμα που εμποδίζει την εισροή αλμυρού νερού.
- Έλεγχος της άντλησης σε έναν υδροφορέα με κατάλληλη μετατόπιση του πηγαδιού ή μείωση του ρυθμού άντλησης, ώστε να προκαλέσουμε ανύψωση της στάθμης του ύδατος. Η ανύψωση της στάθμης αυξάνει την υδραυλική κλίση και με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η θαλάσσια διείσδυση.
- Κατασκευή υποθαλάσσιων αδιαπέραστων φραγμών κατά μήκος της ακτής σε παράκτια συστήματα. Με τον τρόπο αυτό το φαινόμενο της υφαλμύρωσης μπορεί να προληφθεί ή ακόμη και να περιοριστεί. Ωστόσο με τη μέθοδο αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψιν και τυχόν διαρροή που μπορεί να οφείλεται σε κάποιο σεισμό ή στη διαβρωτική επίδραση της θάλασσας.
- Τοποθέτηση πηγαδιών άντλησης του θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρωσης, με σκοπό τον περιορισμό της εξάπλωσης του φαινομένου.
- Τοποθέτηση πηγαδιών με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχουν την κίνηση του υπογείου νερού.

Γενικά, κάθε προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρωσης πρέπει να περιλαμβάνει και πρόγραμμα ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης. Η τοποθέτηση πηγαδιών παρατήρησης είναι αναγκαία, ώστε να μπορούν να συλλέγονται χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και τη συγκέντρωση των χλωριώντων στην περιοχή όπου παρατηρείται το πρόβλημα. Ο αριθμός των πηγαδιών παρατήρησης που πρέπει να τοποθετηθούν σε κάθε περίπτωση ποικίλει. [10]

### 3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΡΟΔΟΥ

#### 3.1 Εισαγωγή

Ο Νομός Δωδεκανήσου βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο του Αιγαίου και περιλαμβάνει είκοσι δύο κατοικημένα νησιά και κάποια ακόμη ακατοίκητα. Η Ρόδος είναι η πρωτεύουσα του Νομού με έκταση περίπου 1.400 km<sup>2</sup>, ενώ σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2001 έχει πληθυσμό περίπου 117.000 κατοίκους.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι το βόρειο τμήμα της Ρόδου, στο οποίο ανήκουν οι δήμοι Ρόδου, Ιαλυσού, Πεταλούδων, Καλλιθέας και τμήμα του δήμου Αφάντου.



**Σχήμα 3.1:** Περιοχή μελέτης [11]

#### 3.2 Γενικά Γεωμορφολογικά Στοιχεία

Η νήσος Ρόδος αποτελεί το ανατολικότερο άκρο του νησιωτικού τόξου της Κρήτης. Το σχήμα της είναι ρομβοειδές και ο μεγάλος της άξονας, που έχει μήκος 77 km, έχει διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ. Θεωρείται ως ένα από τα υψηλά σημεία της υποθαλάσσιας τάφρου η οποία ξεκινά από την Πελοπόννησο και καταλήγει στην Ανατολία. Οι υψηλότερες περιοχές του νησιού βρίσκονται στο νότιο – κεντρικό τμήμα, ενώ καθώς κινούμαστε προς τις παραλιακές ζώνες το υψόμετρο σταδιακά μειώνεται.

Το κλίμα της Ρόδου είναι μεσογειακό και συνήθως παρατηρούνται υγροί Χειμώνες και ξηρά Καλοκαίρια. Καταιγίδες δεν εμφανίζονται συχνά, ενώ οι χιονοπτώσεις είναι ακόμη πιο σπάνιες. Οι άνεμοι, που πνέουν σχεδόν πάντοτε, είναι αρκετά ισχυροί.

Το τοπογραφικό ανάγλυφο του νησιού είναι ανώμαλο και οι κύριες φυσιογραφικές μονάδες που παρατηρούνται είναι οι ασβεστολιθικοί όγκοι, οι λοφώδεις περιοχές των τριτογενών κλαστικών σχηματισμών, τα ανωπλειοκαινικά υψίπεδα, οι θαλάσσιες και ποτάμιες αναβαθμίδες και τα παράκτια επίπεδα. Το όρος Ατάβυρος, που έχει υψόμετρο 1215 μέτρα, αποτελεί τον υψηλότερο όγκο του νησιού και δομείται από ασβεστόλιθους, όπως και οι υπόλοιπες υψηλές περιοχές του νησιού.

Η περιοχή του Ακραμύτη - Αρμενιστή βρίσκεται σε αρκετά χαμηλότερο υψόμετρο (825 μέτρα), και είναι μια περιοχή που χαρακτηρίζεται από μεγάλες κλίσεις ανάγλυφου. Μεταξύ του όρους Αταβύρου και της περιοχής του Ακραμύτη – Αρμενιστή υπάρχει μια μικρή κυρτή περιοχή στην οποία εμφανίζεται φλύσσης.

Γενικά, το νησί χαρακτηρίζεται από τοπογραφικές εξάρσεις που οφείλονται σε δομές τεκτονικών κεράτων και τεκτονικών τάφρων. Στους ασβεστολιθικούς όγκους, εξαιτίας της υψηλής διαπερατότητάς τους και του μεγάλου τους υψομέτρου, δεν παρατηρείται υδρογραφικό δίκτυο και η βλάστησή τους είναι φτωχή. Κατά μήκος της ανατολικής ακτής της Ρόδου κυριαρχούν τα οροπέδια. Στις ανατολικές και βορειοδυτικές ακτές παρατηρούνται θαλάσσιες αναβαθμίδες. Συχνά, σε ορισμένους από τους σχηματισμούς παρατηρούνται σημάδια θαλάσσιας διάβρωσης. [11]

### 3.3 Γεωλογία

Στο νησί της Ρόδου υπάρχουν τρεις βασικές τεκτονικές δομές. Κάθε μία από αυτές τις δομές χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη στρωματογραφική διαδοχή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2.

Οι δομές αυτές περιγράφονται ως εξής:

**A. Κατώτερη δομή – αυτόχθονη**, η οποία περιλαμβάνει δύο σχηματισμούς, που από τον παλαιότερο προς τον νεότερο είναι:

- ❖ Η ομάδα Αταβύρου, που αποτελείται από:

- Τον ασβεστόλιθο Ακραμύτη πάχους 480 μέτρων και 800 μέτρων στον Ατάβυρο
- Τον πυριτικό ασβεστόλιθο Ατεμάρη, πάχους 170 μέτρων
- Τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο Κακόσκαλας, πάχους 80 - 120 μέτρων

❖ Ο φλύσχης Κατταβιάς, που αποτελείται από:

- Το μέλος Σιάνα
- Το μέλος Λάερμα
- Το μέλος Σταφύλια
- Το μέλος Κάλαθος
- Το μέλος Καράκια
- Το μέλος Μεγάλο Κάλαβρο

***B. Ενδιάμεση δομή – αλλόχθονη***, η οποία περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες, που από την παλαιότερη προς την νεότερη είναι:

❖ Η κατώτερη αλλόχθονη ενότητα – Ομάδα Αρχαγγέλου, που περιλαμβάνει:

- Τον ασβεστόλιθο Σαλάκου, με πάχος τυπικής τομής 700 μέτρα
- Τον σχηματισμό Κουμούλι, με πάχος τυπικής τομής 55 μέτρα

❖ Η ενδιάμεση αλλόχθονη ενότητα – Φλύσχης Αρχίπολης, με πάχος τυπικής τομής 100 μέτρα

❖ Ο ασβεστόλιθος της Λίνδου, πάχους 450 μέτρα και αβέβαιης τεκτονικής τοποθέτησης

❖ Η ανώτερη αλλόχθονη ενότητα – Ομάδα Προφήτη Ηλία, που περιλαμβάνει:

- Τον πυριτικό ασβεστόλιθο, με πάχος τυπικής τομής 250 μέτρα
- Τον σχηματισμό Μαλόνας, με πάχος τυπικής τομής 200 μέτρα

***Γ. Ανώτερη ενότητα – νεοαυτόχθονη ή Ομάδα Βατί***, η οποία περιλαμβάνει πέντε ιζηματογενείς σχηματισμούς, που από τον παλαιότερο προς τον νεότερο είναι:

❖ Ομάδα Βατί

- Σχηματισμός Θαρί, πάχους 500 – 600 μέτρων
- Κροκαλοπάγες Κοριάτι, πάχους 160 μέτρων
- Μάργα Αγίου Μηνά, πάχους 315 μέτρων

- Ρεύμα τέφρας (σποδού ) Νταλί, πάχους 5 μέτρων
- Ψαμμίτης Μεσαναγρού, πάχους 460 μέτρων
- ❖ “Λεβαντίνια” Ιζήματα
- ❖ Σχηματισμός Σγουρού, μέγιστου πάχους 180 μέτρων
- ❖ Πώρος

### 3.4 Τεκτονική

Στο νησί της Ρόδου παρατηρούνται τρία βασικά συστήματα γεωλογικών δομών, τα οποία σχετίζονται με συγκεκριμένες τεκτονικές φάσεις .

Πιο αναλυτικά, τα γεωλογικά αυτά συστήματα είναι:

- ❖ Ένα σύστημα πτυχώσεων, πρωχωσιγενών ρηγμάτων, καλυμμάτων και εφιππεύσεων, που συναντάται κυρίως στις προγενέστερες δομές της Ομάδας Βατί.
- ❖ Ένα σύστημα ελαφρών πτυχώσεων, το οποίο παρατηρείται στην Ομάδα Βατί και στους υποκείμενους σχηματισμούς (προ – λεβαντίνιες δομές).
- ❖ Ένα σύστημα κανονικών ρηγμάτων το οποίο εντοπίζεται σε ολόκληρη τη στρωματογραφική διαδοχή. Τα ρήγματα αυτά αποτελούν το εντονότερο δομικό και μορφολογικό χαρακτηριστικό του νησιού της Ρόδου και είναι η αιτία της μερικής καταστροφής προηγούμενων δομών.

#### ✓ **ΒΟΡΕΙΟ ΤΜΗΜΑ**

Το Βόρειο τμήμα του νησιού της Ρόδου εκτείνεται από την πόλη της Ρόδου έως τα χωριά Κολύμπια, Αρχίπολη, Σάλακος και Μάνδρικο. Στο τμήμα αυτό κυριαρχούν Λεβαντίνια ιζήματα και ο σχηματισμός Σγουρού. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από συχνή εμφάνιση πυκνών κανονικών ρηγμάτων.

Ένα από τα συνηθέστερα κανονικά ρήγματα εντοπίζεται στις βόρειες κλιτύες της σειράς Λούκα – Κουμούλι, με διεύθυνση ABA – ΔΝΔ και κλίση 40 – 80° προς ΒΒΔ. Το κατερχόμενο τέμαχος βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του ρήγματος.

Ακόμη ένα από τα χαρακτηριστικότερα κανονικά ρήγματα εμφανίζεται βόρεια του χωριού Διμυλιά, με διεύθυνση ANA – ΔΒΔ και βύθιση προς ΝΝΔ. Το κατερχόμενο τέμαχος βρίσκεται στο νότιο τμήμα του ρήγματος και δομείται από Λεβαντίνια ιζήματα. Αντίθετα, στο ανερχόμενο τέμαχος που είναι το βόρειο τμήμα του ρήγματος επικρατούν ιζήματα του σχηματισμού Θαρί.

Τέλος, μικρότερα κανονικά ρήγματα εντοπίζονται στα ανατολικά πρηνή του λόφου Παραδείσιο, με διεύθυνση Β – Ν και βύθιση προς τα ανατολικά. Τα ρήγματα αυτά τέμνουν όχι μόνο τα Λεβαντίνια ιζήματα, αλλά και τις αργίλους και τις άμμους του σχηματισμού Σγουρού.

#### ✓ **ΒΟΡΕΙΟ – ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**

Το τμήμα αυτό του νησιού της Ρόδου χαρακτηρίζεται από τους μεσοζωικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι υπέρκεινται του φλύσχη της Κατταβιάς (Μέλος Λάερμα). Το κάτω όριο μεταξύ των μεσοζωικών ασβεστόλιθων και του φλύσχη γενικά καλύπτεται από νεοαυτόχθονα ιζήματα ή πλευρικά κορήματα, με αποτέλεσμα να μην είναι ευδιάκριτο. Έτσι, η εντόπιση του ορίου γίνεται με την ευθυγράμμιση των πηγών, όπως αυτών στον πόδα των βορείων πρηνών του Προφήτη Ηλία.

Μεταξύ των μεσοζωικών ασβεστόλιθων και των ασβεστόλιθων του Αταβύρου παρεμβάλλεται ο φλύσχη της Κατταβιάς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει υδραυλική επικοινωνία ανάμεσά τους.

#### ✓ **ΑΤΑΒΥΡΟΣ**

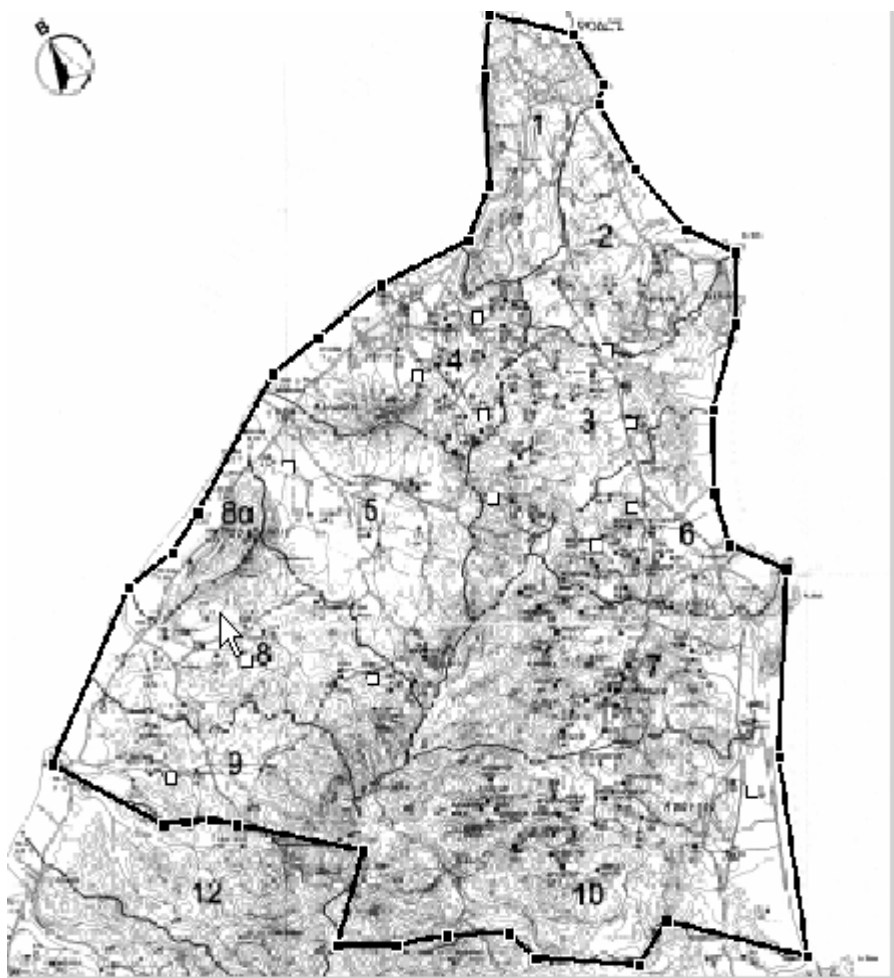
Ο Ατάβυρος αποτελεί τον υψηλότερο όγκο του νησιού (1215 μέτρα). Δομείται από τον ασβεστόλιθο του Ακραμύτη και τον μαργαϊκό ασβεστόλιθο της Κακόσκαλας. Η διεύθυνσή του είναι ΒΒΑ – ΝΝΔ. Ο Ατάβυρος είναι το ανατολικότερο άκρο ενός ευρύ αντικλίνου διεύθυνσης ΒΒΑ – ΝΝΔ και βύθισης αξονικού επιπέδου προς ΒΒΔ. Πιθανώς στο γεγονός αυτό οφείλονται οι αλλαγές στη βύθιση των στρωμάτων.

Ο Ατάβυρος στην νοτιοανατολική πλευρά οριοθετείται από ένα ρήγμα με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, με βύθιση προς ΝΑ. Στα βορειοδυτικά του υπάρχει ο Άμαρτος, ένα κράσπεδο όπου επικρατεί ο φλύσχη της Κατταβιάς και ο οποίος χωρίζει τον Ατάβυρο από την περιοχή της Κρητηνίας. Στην περιοχή αυτή εντοπίζονται ορισμένα κανονικά ρήγματα με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ και Α – Δ. [11]

### 3.5 Υδρογραφικό Δίκτυο

Στην περιοχή εντοπίζεται ένας κύριος υδροκρίτης, ο οποίος τη χωρίζει σε βορειοδυτικό και νοτιοανατολικό τμήμα. Ο υδροκρίτης αυτός είναι μεταβλητής διεύθυνσης και ακολουθεί τις τοπογραφικές εξάρσεις που οφείλονται στο φαινόμενο της εφίππευσης, δηλαδή στην τοποθέτηση παλαιότερων γεωλογικών σχηματισμών επάνω σε νεότερους.

Οι υδρολογικές λεκάνες που ανήκουν στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι οι Λ1, Λ2, Λ3, Λ4, Λ5, Λ6, Λ7, Λ8, Λ8<sup>α</sup>, Λ9, Λ10.



**Γράφημα 3.1:** Υδρολογικές λεκάνες της περιοχής ενδιαφέροντος

Γενικά, χαρακτηρίζονται από την ακανόνιστη διακλάδωση των παραποτάμων προς διάφορες κατευθύνσεις και υπό διαφορετικές γωνίες. Ως αποτέλεσμα το υδρογραφικό δίκτυο των λεκανών είναι *δενδριτικού τύπου*, κάτι το οποίο συναντάται συνήθως σε περιοχές με σχετικά ομοιογενή γεωλογία.

Επίσης, το σχήμα των λεκανών παρέχει στοιχεία σχετικά με το στάδιο της μορφολογικής εξέλιξης του νησιού. Εφόσον η εκβάθυσή τους είναι μεγαλύτερη της διαπλάτυνσής τους, διαπιστώνεται ότι οι λεκάνες βρίσκονται σε στάδιο νεότητας. [11]

Στον πίνακα 3.1 δίνεται η επιφάνεια και το μέσο υψόμετρο των υδρολογικών λεκανών που ανήκουν στην περιοχή μελέτης.

<b>Λεκάνη</b>	<b>Επιφάνεια (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Μέσο υψόμετρο (m)</b>
1	12,612	59,431
2	14,198	61,646
3	20,398	88,574
4	17,407	61,395
5	23,797	76,703
6	15,092	61,099
7	26,823	151,88
8	22,138	97,193
8 <sup>a</sup>	6,209	74,641
9	16,225	109,18
10	46,000	183,95

**Πίνακας 3.1:** Επιφάνεια και μέσο υψόμετρο ανά υδρολογική λεκάνη [14]

### 3.6 Κλιματολογικά - Υδρολογικά Στοιχεία

#### 3.6.1 Θερμοκρασία

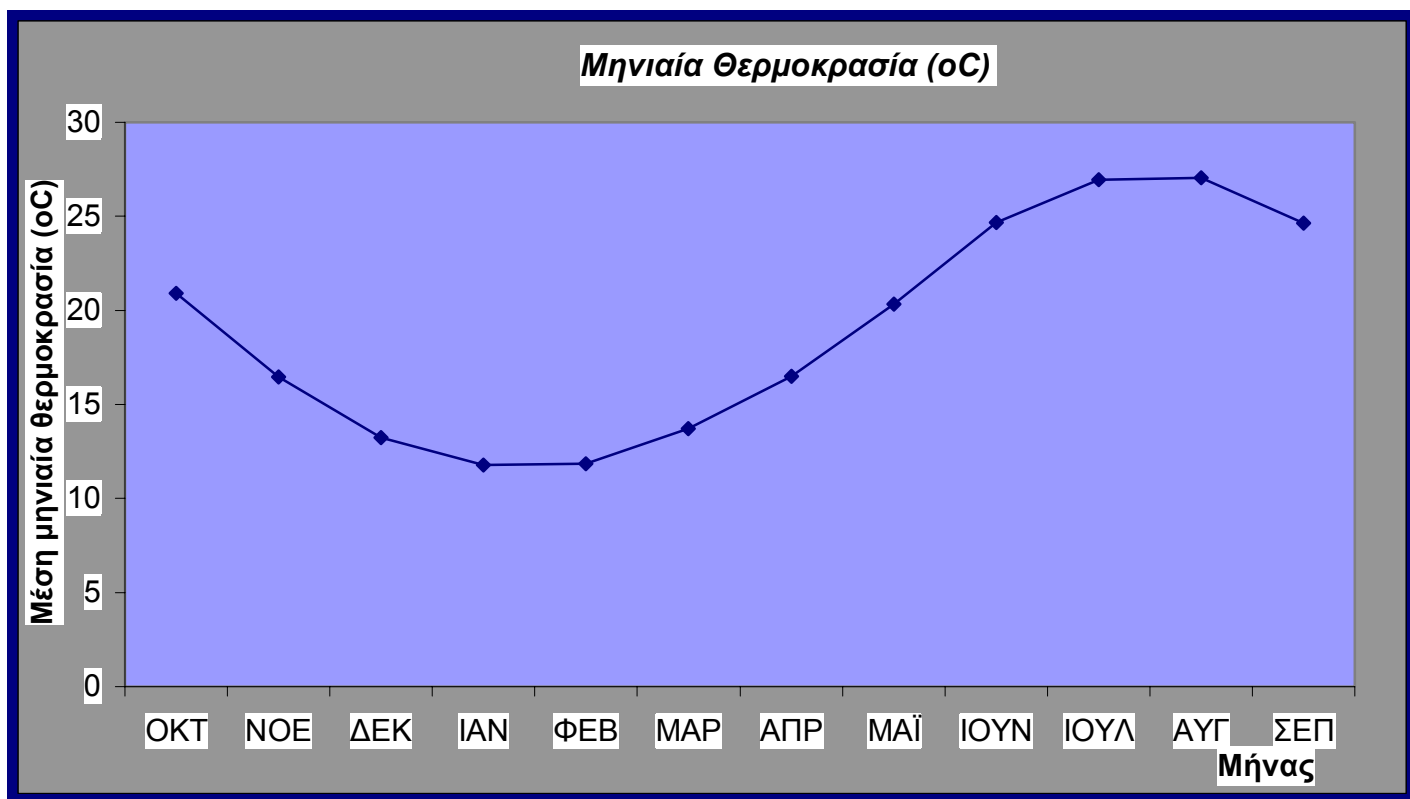
Εντός της περιοχής μελέτης υπάρχει θερμομετρικός σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, από τον οποίο και συλλέχθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες για τη χρονική περίοδο 1955 – 1995, καθώς και η μέση ετήσια θερμοκρασία κάθε υπολογιστικού έτους. Επίσης, παρατίθενται οι μέσοι όροι, οι μέσες μέγιστες και οι μέσες ελάχιστες θερμοκρασίες για κάθε μήνα.

	<i>ΜΕΣΕΣ ΜΗΝΙΑΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)</i>												<b>Μέση ετήσια (°C)</b>
<b>Έτος</b>	<b>ΟΚΤ</b>	<b>ΝΟΕ</b>	<b>ΔΕΚ</b>	<b>ΙΑΝ</b>	<b>ΦΕΒ</b>	<b>ΜΑΡ</b>	<b>ΑΠΡ</b>	<b>ΜΑΪ</b>	<b>ΙΟΥΝ</b>	<b>ΙΟΥΛ</b>	<b>ΑΥΓ</b>	<b>ΣΕΠ</b>	
1955-56	21,7	17,1	13,5	11,8	11,8	11,9	16,5	20	24,6	28	27,7	25,4	19,2
1956-57	19,3	15,8	11,0	10,9	12,3	13,4	16,4	19,2	25,9	26,6	28,3	24,6	18,6
1957-58	21,6	16,8	12,5	11,6	13,0	13,9	15,9	21,4	24,9	27,1	28,4	24,0	19,3
1958-59	20,7	17,1	14,2	11,8	9,6	13,2	16,5	20,6	23,7	26,7	27,6	23,7	18,8
1959-60	18,9	15,9	13,8	11,6	12,7	13,5	16,2	21,5	24,3	26,7	27,6	23,7	19,0
1960-61	22,5	18,3	15,4	11,5	10,9	13,6	17,6	20,8	24,9	27,3	27,4	24,6	19,6
1961-62	19,9	16,4	13,8	12,6	10,9	14,8	16,4	21,3	24,9	27,4	27,5	25,2	19,3
1962-63	20,5	18,4	13,9	12,7	13,6	12,5	16,7	19,6	24,5	27,7	28,6	26,1	19,6
1963-64	20,9	16,8	13,9	9,3	10,8	14,1	16,3	16,3	25	26,1	27,1	23,5	18,3
1964-65	21,4	16,6	13,8	11,2	11,1	13,5	15,5	19,2	25,3	27,7	25,9	24,5	18,8
1965-66	19,0	15,8	13,4	12,0	13,3	13,5	17,2	20,4	24,8	27,0	28,2	24,6	19,1
1966-67	22,4	18,6	12,8	10,8	10,2	12,5	15,8	20,3	24,6	27,2	28,6	25,0	19,1
1967-68	20,2	16,0	13,6	10,4	12,1	12,4	18,0	23,4	25,2	27,8	26,4	24,0	19,1
1968-69	19,4	15,3	13,2	10,6	12,5	13,6	14,7	21,5	25,4	26,1	26,1	25,2	18,6
1969-70	20,1	16,2	13,9	12,6	12,6	14,5	17,5	19,6	25,3	27,1	28,0	24,1	19,3
1970-71	19,3	15,4	11,7	13,8	11,3	13,1	16,0	21,6	25,4	25,9	27,7	23,9	18,8
1971-72	18,9	15,9	11,4	10,5	11,3	13,3	17,2	20,4	25,6	26,5	27,5	24,5	18,6
1972-73	18,7	14,9	11,7	10,8	12,1	12,3	15,2	21,4	24,8	27,6	26,5	24,4	18,4
1973-74	20,5	14,4	13,3	9,6	12,0	13,9	15,7	19,7	24,7	27,9	26,6	24,8	18,6

1974-75	21,4	15,6	11,1	10,6	10,7	14,1	17,2	20,4	24,0	27,1	26,1	25,3	18,6
1975-76	20,3	15,5	11,5	10,6	9,8	12,8	15,5	20,2	23,7	25,5	24,7	22,9	17,8
1976-77	20,1	15,8	12,7	11,1	13,3	13,3	16,6	21,2	25,3	27,4	27,3	24,0	19,0
1977-78	19,9	18,0	12,8	12,7	13,8	14,4	16,7	21,2	24,8	27,1	25,7	23,3	19,2
1978-79	20,6	16,1	14,2	12,5	13,5	15,1	17,0	20,3	25,3	26,6	26,2	24,7	19,3
1979-80	21,2	16,7	14,0	11,5	11,8	13,4	15,7	19,3	24,1	26,2	27,0	24,1	18,8
1980-81	21,7	18,3	14,0	11,5	12,1	15,2	17,5	19,0	25,1	25,4	26,8	23,4	19,2
1981-82	22,5	15,4	15,3	13,2	10,8	13,1	16,5	19,7	24,3	25,8	26,3	25,3	19,0
1982-83	21,8	16,6	13,4	10,8	10,5	13,3	17,2	21,1	23,5	26,7	26,5	24,0	18,8
1983-84	20,0	17,0	14,4	13,0	13,4	13,8	16,1	21,3	24,1	26,9	26,2	24,9	19,3
1984-85	22,2	16,5	13,6	13,4	10,4	13,7	17,4	21,7	24,8	26,6	27,4	25,1	19,4
1985-86	20,0	18,3	14,7	13,3	13,4	14,9	18,9	21,0	24,7	26,6	26,8	25,3	19,8
1986-87	21,0	15,7	13,5	13,5	13,5	10,8	15,9	18,8	24,3	27,2	26,7	25,2	18,8
1987-88	21,1	16,3	13,8	13,4	12,2	13,0	16,6	21,0	25,0	28,7	27,6	25,2	19,5
1988-89	20,5	14,9	13,4	11,1	12,4	15,1	18,7	20,7	23,3	26,4	26,9	25,3	19,1
1989-90	19,9	16,7	13,8	11,8	12,9	14,8	17,5	20,6	24,1	26,9	26,3	25,0	19,2
1990-91	22,1	18,0	14,9	11,8	8,0	12,6	11,2	17,2	24,2	27,0	27,0	25,2	18,3
1991-92	21,7	12,1	9,5	11,9	11,0	17,2	11,3	18,4	23,9	26,1	26,7	24,9	18,0
1992-93	24,1	19,3	13,9	12,9	11,4	15,7	18,8	20,4	24,9	28,7	27,5	25,5	20,3
1993-94	24,0	16,8	14,1	12,8	11,4	13,8	17,9	21,3	24,4	26,9	27,3	25,7	19,7
1994-95	23,6	16,4	10,6	12,0	13,9	14,3	18,6	20,2	25,5	28,2	26,8	24,9	19,6
<b>M.O</b>	20,9	16,5	13,2	11,8	11,9	13,7	16,5	20,3	24,7	26,9	27,1	24,6	19,0
<b>max</b>	24,1	19,3	15,4	13,8	13,9	17,2	18,9	23,4	25,9	28,7	28,6	26,1	20,3
<b>min</b>	18,7	12,9	9,5	9,3	8,0	10,8	11,2	16,3	23,3	25,4	24,7	22,9	17,8

**Πίνακας 3.2:** Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιόδου 1955 – 1995 [15]



**Γράφημα 3.2:** Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιόδου 1955 - 1995

Από το παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι ο κατά μέσο όρο ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος, με μέση θερμοκρασία 11,8 °C, ενώ ο κατά μέσο όρο θερμότερος είναι ο Αύγουστος με μέση θερμοκρασία 27,1 °C.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία για την περίοδο 1955 – 1995 είναι 19,0 °C με μέγιστη τιμή τους 20,3 °C και ελάχιστη τους 17,8 °C.

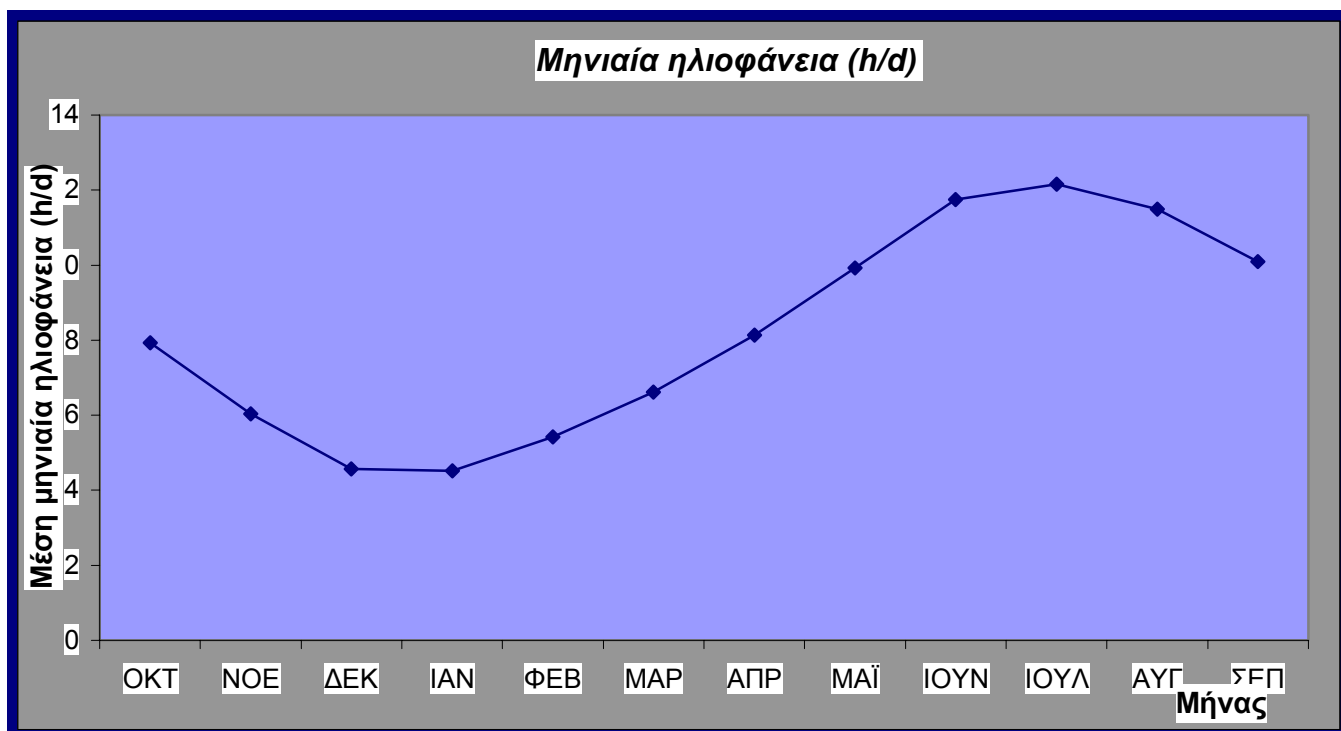
### 3.6.2 Ηλιοφάνεια

Από το σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογίας Ρόδου προέρχονται τα στοιχεία που αφορούν στην ηλιοφάνεια της περιοχής για το χρονικό διάστημα 1964 – 1995.

Έτσι, διαμορφώθηκε ο ακόλουθος πίνακας:

Μήνας	Μέση μηνιαία τιμή ηλιοφάνειας (h/d)
ΟΚΤ	7,93
ΝΟΕ	6,04
ΔΕΚ	4,57
ΙΑΝ	4,52
ΦΕΒ	5,43
ΜΑΡ	6,62
ΑΠΡ	8,14
ΜΑΪ	9,93
ΙΟΥΝ	11,75
ΙΟΥΛ	12,15
ΑΥΓ	11,5
ΣΕΠ	10,1
<b>Μέση ετήσια τιμή ηλιοφάνειας (ώρες)</b>	<b>3006,4</b>

**Πίνακας 3.3:** Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιοφάνειας [15]



**Γράφημα 3.3:** Μέσες μηνιαίες τιμές ηλιοφάνειας

Από το παραπάνω γράφημα, διαπιστώνουμε ότι ο μήνας με την περισσότερη ηλιοφάνεια είναι ο Ιούλιος (12,15 h/d), ενώ ο μήνας με την λιγότερη ηλιοφάνεια είναι ο Ιανουάριος (4,52 h/d).

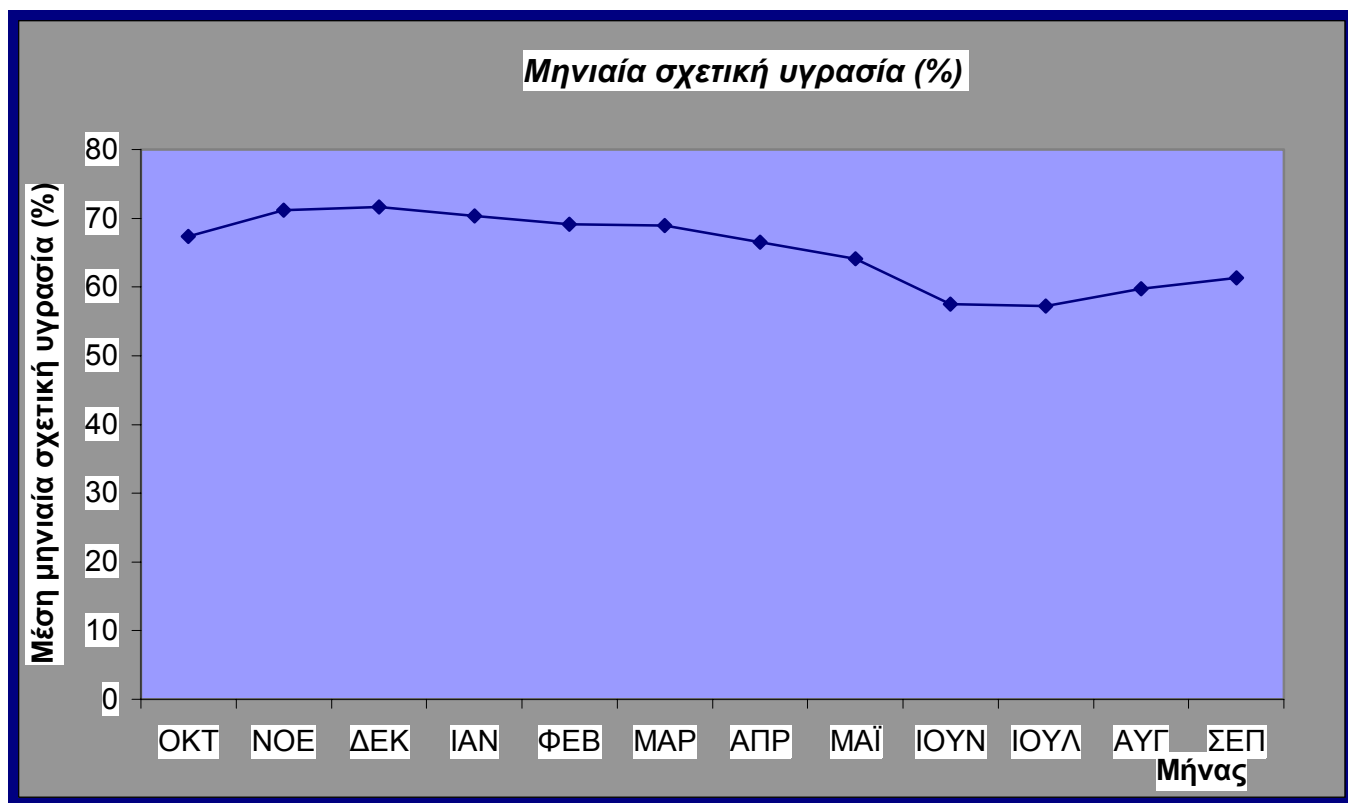
Η μέση ετήσια τιμή ηλιοφάνειας της περιοχής είναι 3006,4 h.

### 3.6.3 Σχετική Υγρασία

Από μετρήσεις της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας Ρόδου προέκυψε ο παρακάτω πίνακας για τις μέσες μηνιαίες τιμές της σχετικής υγρασίας της περιοχής για το χρονικό διάστημα 1955 – 1995.

<b>Μήνας</b>	<b>Μέση μηνιαία σχετική υγρασία (%)</b>
ΟΚΤ	67,4
ΝΟΕ	71,2
ΔΕΚ	71,6
ΙΑΝ	70,3
ΦΕΒ	69,1
ΜΑΡ	68,9
ΑΠΡ	66,5
ΜΑΪ	64,1
ΙΟΥΝ	57,5
ΙΟΥΛ	57,2
ΑΥΓ	59,7
ΣΕΠ	61,3
<b>Μέση ετήσια υγρασία (ώρες)</b>	65,4

**Πίνακας 3.4:** Μέσες μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας [15]



**Γράφημα 3.4:** Μέσες μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι ο πιο υγρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος με μέσο ποσοστό σχετικής υγρασίας 71,6 %, ενώ ο πιο ξηρός μήνας είναι ο Ιούλιος με μέσο ποσοστό σχετικής υγρασίας 57,2 %.

Το μέσο ετήσιο ποσοστό υγρασίας της περιοχής είναι 65,4 %.

### 3.6.4 Άνεμοι

Στον ακόλουθο πίνακας παρουσιάζονται οι ετήσιες συχνότητες έντασης και πνοής του ανέμου στις διάφορες κατευθύνσεις, για το χρονικό διάστημα 1955 – 1997.

ΕΝΤΑΣΗ (Beaufort)	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ								ΝΗΝΕΜΙΑ	SUM
	Β	ΒΑ	Α	ΝΑ	Ν	ΝΔ	Δ	ΒΔ		
0									17,607	17,607
1	0,175	0,066	0,219	0,427	0,307	0,34	0,679	0,23		2,443
2	0,822	0,449	1,205	2,224	1,402	2,399	4,744	1,764		15,009
3	1,107	0,482	1,238	2,268	1,238	3,44	11,14	4,405		25,321

4	1,205	0,175	0,526	1,402	0,778	2,903	14,09	5,884		26,963
5	0,438	0,044	0,142	0,548	0,34	0,69	4,733	2,158		9,093
6	0,153	0,011	0,055	0,362	0,197	0,11	1,118	0,679		2,685
7	0,033	0,011	0,022	0,241	0,099	0,011	0,088	0,099		0,604
8	0,011	0	0,011	0,121	0,033	0,011	0,022	0,011		0,22
9	0	0	0,011	0,011	0,011	0	0	0		0,033
10	0	0	0	0,011	0,011	0	0	0		0,022
<b>SUM</b>	3,944	1,238	3,429	7,615	4,416	9,904	36,62	15,23	17,607	100

**Πίνακας 3.4:** Ετήσιες συχνότητες έντασης και διεύθυνσης πνοής του ανέμου [15]

Από τον πίνακα 3.4 φαίνεται ότι οι άνεμοι που συνήθως πνέουν στην περιοχή είναι οι δυτικοί με ποσοστό εμφάνισης 36,62 %. Επίσης, οι άνεμοι που πνέουν συχνότερα στην περιοχή είναι μέτριας έντασης τεσσάρων Beaufort.

### 3.6.5 Βροχόπτωση

Γενικά, οι βροχοπτώσεις στην περιοχή εμφανίζονται με μια κανονική ετήσια διακύμανση. Το μέγιστο τους παρουσιάζεται κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο, οπότε και αρχίζουν να μειώνονται σταδιακά έως το καλοκαίρι. Κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες ή ανύπαρκτες. Επίσης, παρατηρείται αύξηση των βροχοπτώσεων καθώς προχωρούμε προς μεγαλύτερο υψόμετρο, γεγονός που οφείλεται στην τοπογραφία, στη γεωλογία και σε άλλους δυναμικούς παράγοντες της υπό μελέτη περιοχής. Ο βασικότερος από τους δυναμικούς παράγοντες που συντελεί στην αύξηση αυτή είναι οι υφέσεις. Οι υφέσεις είναι αποτέλεσμα των κύριων ανέμων που πνέουν στη Ρόδο και που έχουν διεύθυνση Δ, ΒΔ, ΝΑ, Ν

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μέσα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης που καταγράφονται σε καθένα από τους τρεις σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται εντός της περιοχής ενδιαφέροντος.

	<i>Μέσα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης(mm)</i>											
<b>Σταθμός</b>	<b>ΟΚΤ</b>	<b>ΝΟΕ</b>	<b>ΔΕΚ</b>	<b>ΙΑΝ</b>	<b>ΦΕΒ</b>	<b>ΜΑΡ</b>	<b>ΑΠΡ</b>	<b>ΜΑΪ</b>	<b>ΙΟΥΝ</b>	<b>ΙΟΥΛ</b>	<b>ΑΥΓ</b>	<b>ΣΕΠ</b>
ΥΕΒ Ρόδου	56,78	138,5	110,5	168,1	122	122,8	33,5	19,11	1	0,167	2,66	0,16
ΕΜΥ	58,25	118,3	136,3	128	103,7	78,5	23,7	20,13	1,98	0,1	0,3	2,47
Βάρη	61,28	107,1	138,2	146,2	107,6	83,9	25,4	18,96	1,38	0	0	0

**Πίνακας 3.5:** Μέσα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης [5]

	<i>Ύψος βροχόπτωσης (m/d)</i>	
<b>Σταθμός</b>	<b>Καλοκαίρι</b>	<b>Χειμώνας</b>
ΥΕΒ Ρόδου	0,00044	0,0039
ΕΜΥ	0,00046	0,0033
Βάρη	0,00045	0,0034
Μ.0	0,00045	0,0035

**Πίνακας 3.6:** Μέσα ύψη βροχόπτωσης Θερινής και Χειμερινής περιόδου [5]

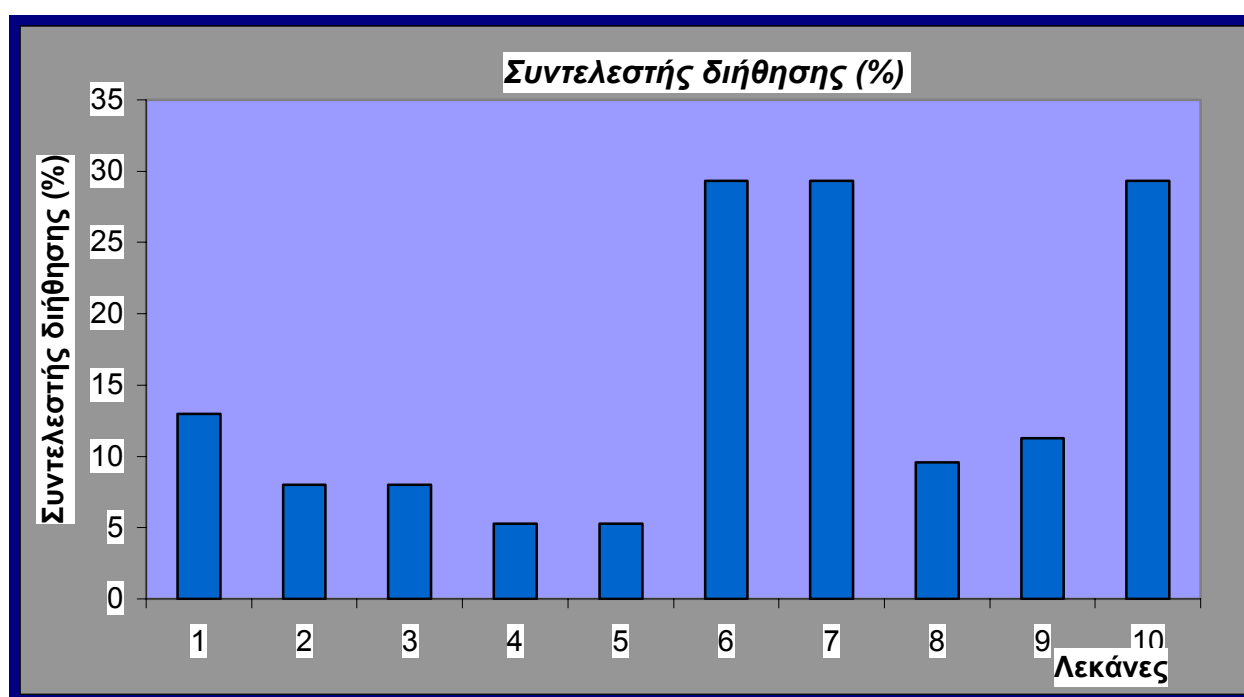
### 3.6.6 Διήθηση

Διήθηση είναι η φυσική διεργασία της εισόδου και κίνησης του νερού στο έδαφος και έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα μιας υδρολογικής λεκάνης. Η διήθηση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες υδρολογικές διεργασίες που περιλαμβάνονται στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου. Η διήθηση εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως η διαπερατότητα του γεωλογικού σχηματισμού, η κλίση των πρανών, η χλωρίδα της περιοχής, ο όγκος της βροχής και άλλοι. [3]

Οι συντελεστές διήθησης που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις υδρολογικές λεκάνες της περιοχής μελέτης δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Λεκάνες	Συντελεστής διήθησης (%)
1	12,97
2 & 3	8,0
4 & 5	5,3
6 & 7 & 10	29,32
8	9,6
9	11,26

**Πίνακας 3.7:** Συντελεστές διήθησης [11]



**Γράφημα 3.5:** Συντελεστές διήθησης

Ως μέσος συντελεστής διήθησης της περιοχής ενδιαφέροντος λαμβάνεται η τιμή: 12,5 %.

### 3.6.7 Απορροή

Η απορροή αποτελεί το τμήμα εκείνο του υδρολογικού κύκλου που σχετίζεται περισσότερο με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Είναι η βασικότερη υδρολογική παράμετρος σε έργα που στόχο έχουν τον έλεγχο, την αξιοποίηση και την προστασία των υδάτινων πόρων. Ως βάση για τον υπολογισμό της απορροής λαμβάνεται το υδρογραφικό δίκτυο κάθε λεκάνης.

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι μικρό και περιλαμβάνει κάποιους μικρούς, αλλά και μεγαλύτερους χείμαρρους. Οι χείμαρροι αυτοί το Χειμώνα παρουσιάζουν εποχιακή απορροή. Σε περίοδο με πολλές βροχοπτώσεις η άμεση απορροή είναι τόσο σημαντική ώστε η συνολική παροχή ξεπερνά τη διοχευτική ικανότητα του υδατορεύματος και έχουμε την εμφάνιση πλημμύρων. Τους Καλοκαιρινούς μήνες η παροχή των χειμάρρων μειώνεται. [11]

Γενικά, οι λεκάνες στις οποίες παρατηρείται μεγαλύτερη απορροή είναι αυτές που δομούνται από γεωλογικούς σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας, έχουν μεγάλη κλίση πρανών και βρίσκονται σε σχετικά υψηλό υψόμετρο. Αντίθετα, η απορροή είναι μικρότερη στις πεδινές περιοχές με γεωλογικούς σχηματισμούς υψηλής διαπερατότητας.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι συντελεστές απορροής που αντιστοιχούν σε κάθε υδρολογική λεκάνη της περιοχής ενδιαφέροντος.

<b>Λεκάνες</b>	<b>Συντελεστής απορροής <math>R_{\text{ΛΕΚ}}</math></b>
1	8,0
2	7,93
3	7,84
4	8,0
5	8,18
6	8,1
7	7,77
8	10,13
9	10,97
10	7,95

**Πίνακας 3.8:** Συντελεστές απορροής [11]

### 3.6.8 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

Το υδατικό ισοζύγιο που ισχύει για κάθε υδρολογική λεκάνη της περιοχής μελέτης εκφράζεται από τη σχέση:

$$P = E + R + I$$

όπου

- ✓ P ο συνολικός όγκος βροχής (m<sup>3</sup>)
- ✓ E η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (m<sup>3</sup>)
- ✓ R η επιφανειακή απορροή (m<sup>3</sup>)
- ✓ I η διήθηση (m<sup>3</sup>)

Στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου, εξαιτίας της έλλειψης των απαραίτητων στοιχείων, δεν συμπεριλήφθηκαν η υπόγεια ροή από και προς τις λεκάνες, ούτε η υπόγεια εκφόρτιση των ασβεστολιθικών σχηματισμών στη θάλασσα.

Επίσης, στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Η επιφανειακή εισροή ισούται με μηδέν
- Η εδαφική υγρασία είναι αμετάβλητη

Έτσι, προέκυψε ο πίνακας 3.9 στον οποίο παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του Υδατικού Ισοζυγίου για κάθε λεκάνη της περιοχής μελέτης.

Λεκάνες	Συνολικός Όγκος βροχής (m <sup>3</sup> )	Εξάτμιση (m <sup>3</sup> )	Επιφανειακή απορροή (m <sup>3</sup> )	Διήθηση (m <sup>3</sup> )
1	9120000	7210000	730000	1180000
2 & 3	25340000	21320000	1980000	2040000
4 & 5	30020000	25990000	2450000	1580000
6 & 7 & 10	67860000	50190000	5370000	12300000
8	164300000	13190000	1660000	1580000
9	12150000	9450000	1330000	1370000

**Πίνακας 3.9:** Υδατικό Ισοζύγιο περιοχής μελέτης [11]

### 3.7 Γεωμετρικά και Υδραυλικά Χαρακτηριστικά Υδροφόρων Στρωμάτων

#### 3.7.1 Μέσο Πάχος Υδροφορέα σε κάθε Λεκάνη

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται στοιχεία για το μέσο πάχος του υδροφορέα σε κάθε λεκάνη (Για τις υδρολογικές λεκάνες 1 & 2 δεν υπάρχουν μετρήσεις).

Λεκάνες	Μέσο πάχος υδροφορέα (m)
3	67
4	40
5	28,5
6	71,5
7	53,5
8	26,5
9	34
10	123

**Πίνακας 3.10:** Μέσο πάχος υδροφορέα ανά λεκάνη [11]

#### 3.7.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Ως μέση τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή ενδιαφέροντος λαμβάνεται η τιμή  $k = 0,04 \text{ m/h} = 0,96 \text{ m/d}$ . [11]

## 4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Συχνά, οι μηχανικοί που ασχολούνται με τα υπόγεια ύδατα καλούνται να προβλέψουν τη συμπεριφορά και την εξέλιξη των συστημάτων υπόγειας ροής. Όμως, κάποιες φορές η εμπειρία και η γνώση των μηχανικών δεν αρκούν, αφού ο υπολογισμός όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με την υπόγεια ροή πολύπλοκων συστημάτων είναι μια διαδικασία σύνθετη και χρονοβόρα. Σήμερα, το βέλτιστο διαθέσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών-υδρογεωλόγων είναι η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου ροής υπογείων υδάτων.

### 4.2 Μοντέλα Ροής Υπογείων Υδάτων

Γενικά, με τον όρο «μοντέλο» εννοούμε ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο παρέχει μια προσεγγιστική περιγραφή μιας κατάστασης που συναντάται στο πεδίο. Η μοντελοποίηση βοηθά στην αποδοτικότερη χρήση και οργάνωση των δεδομένων του πεδίου και εκτελεί περίπλοκες αναλύσεις, οι οποίες οδηγούν σε βάσιμες προβλέψεις για την μελλοντική κατάσταση του συστήματος που μελετάται.

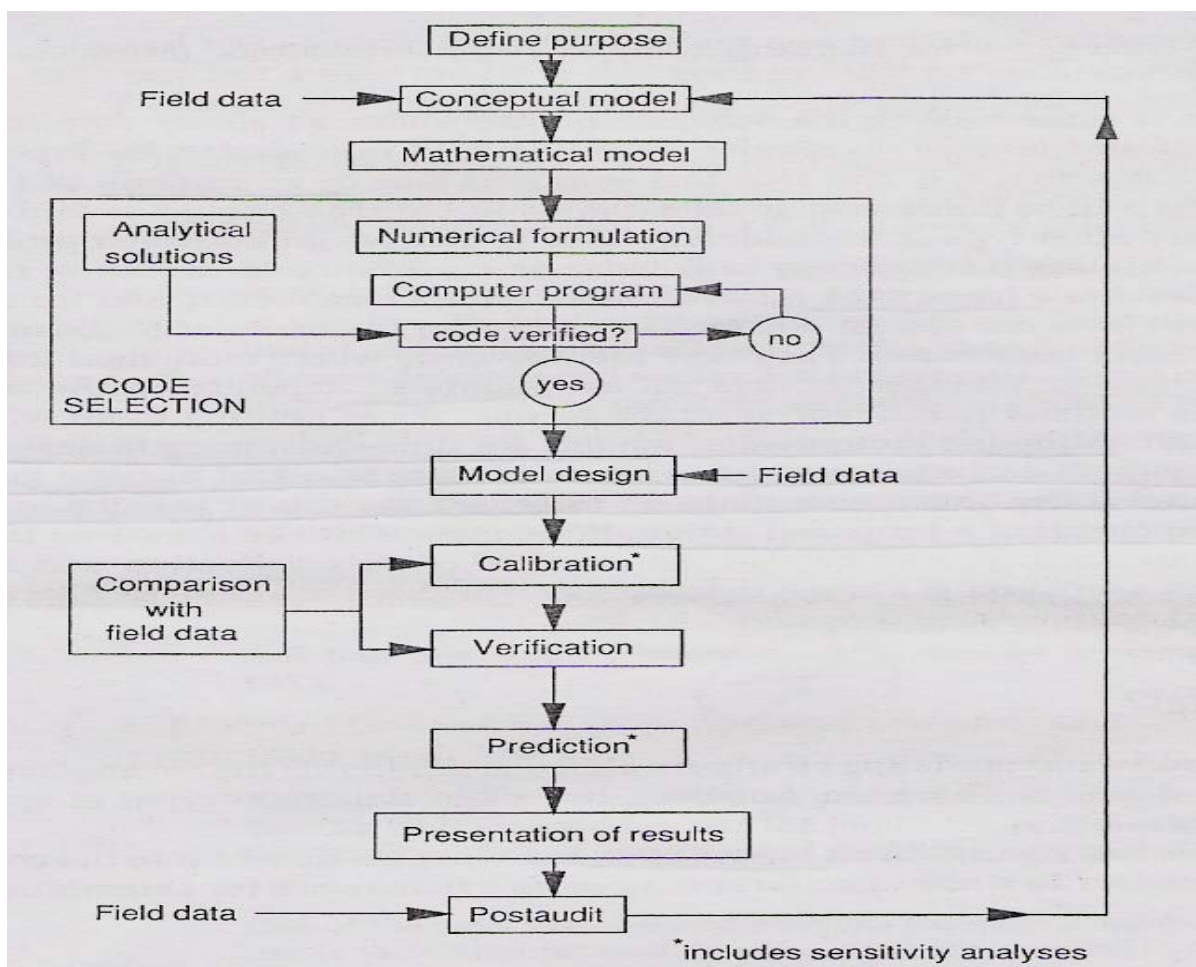
Τα μοντέλα μπορεί να είναι είτε *φυσικά*, οπότε η προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι άμεση, είτε *μαθηματικά*, οπότε η προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι έμμεση. Στην περίπτωση των μαθηματικών μοντέλων η ροή περιγράφεται μέσω μιας βασικής (κυρίαρχης) εξίσωσης, η οποία αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα, σε συνδυασμό με επιμέρους εξισώσεις, οι οποίες αποτελούν τις οριακές συνθήκες. Επίσης, όταν το πρόβλημα είναι μη σταθερό χρονικά (χρονοεξαρτώμενα προβλήματα), είναι απαραίτητη η δημιουργία και μιας ακόμη εξίσωσης που θα περιγράφει τις αρχικές συνθήκες του συστήματος.

Τα μαθηματικά μοντέλα επιλύονται με αναλυτικό ή με αριθμητικό τρόπο. Και στις δύο περιπτώσεις η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι απαραίτητη. Όταν οι υποθέσεις που γίνονται για να εξάγουμε την αναλυτική λύση είναι πολύ απλουστευμένες για το υπό εξέταση πρόβλημα, τότε προτιμάται η χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου. Γενικά, όσο λιγότερες είναι οι απλουστευτικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι αυτό. [6]

### 4.3 Πρωτόκολλο Μοντελοποίησης

Όταν κριθεί απαραίτητη η χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου για την αντιμετώπιση ενός σύνθετου προβλήματος υπόγειας ροής, τότε ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα του «πρωτοκόλλου μοντελοποίησης» για την κατασκευή του μοντέλου:

- Καθορισμός του σκοπού ανάπτυξης του συγκεκριμένου αριθμητικού μοντέλου.
- Ανάπτυξη του θεμελιώδους μοντέλου του συστήματος, το οποίο βασίζεται στη συλλογή δεδομένων από το πεδίο.
- Επιλογή των βασικών (κυρίαρχων) εξισώσεων και του υπολογιστικού κώδικα που θα χρησιμοποιεί το μοντέλο. Στο στάδιο αυτό γίνεται και επαλήθευση του υπολογιστικού κώδικα, με σύγκριση ορισμένων αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από αναλυτικούς υπολογισμούς.
- Σχεδιασμός του μοντέλου (σχεδιασμός πλέγματος, επιλογή χρονικού βήματος, καθορισμός αρχικών και οριακών συνθηκών κ.λ.π.).
- Βαθμονόμηση - ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου και επαλήθευση των αποτελεσμάτων του.
- Πρόβλεψη και εφαρμογή διάφορων εναλλακτικών μελλοντικών σεναρίων σχετικά με την κατάσταση του συστήματος. Και το στάδιο αυτό περιλαμβάνει ανάλυση ευαισθησίας για να υπολογίζεται ο βαθμός της αβεβαιότητας που αντιστοιχεί σε κάθε σενάριο.
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
- Επανεξέταση του αριθμητικού μοντέλου, η οποία πραγματοποιείται μερικά χρόνια αργότερα. Νέα δεδομένα πεδίου εισάγονται στο μοντέλο για να ελεγχθεί εάν οι προβλέψεις που είχαν γίνει ήταν σωστές.
- Ξανασχεδιάζεται το αριθμητικό μοντέλο, βασιζόμενο πλέον στα νέα δεδομένα.



**Σχημα 4.1:** Πρωτόκολλο μοντελοποίησης [6]

#### 4.4 Βασικές Εξισώσεις των Συστημάτων Υπόγειας Ροής

Μια ολοκληρωμένη μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου περιλαμβάνει τον καθορισμό των κυρίαρχων εξισώσεων, των οριακών συνθηκών και των αρχικών συνθηκών, εάν το πρόβλημα που εξετάζουμε δεν είναι χρονικά σταθερό.

Υπάρχουν δύο βασικές απόψεις για την προσέγγιση ενός συστήματος υπόγειας ροής [6]:

- Η *άποψη του υδροφορέα*, η οποία βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα. Χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση της ροής όταν υπάρχουν πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση πολλών αναλυτικών λύσεων, όπως αυτές των Thiern, Theis και Jacob. Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι η υπόγεια ροή διαμέσου του υδροφορέα είναι αυστηρά οριζόντια, ενώ διαμέσου των αδιαπέρατων στρωμάτων είναι αυστηρά κάθετη. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή όταν ο

υδροφορέας είναι ομοιογενής και σταθερού πάχους. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα πάντα μεταβάλλεται χωρικά διότι το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε σημείο.

Η άποψη του υδροφορέα προσομοιώνει τη ροή σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς ως δισδιάστατη, ενώ σε περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή ως τρισδιάστατη. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την κλίση του αδιαπέρατου στρώματος, το πάχος του και την υδραυλική του αγωγιμότητα. Η προσομοίωση των αδιαπέρατων στρωμάτων δεν είναι αρκετά ξεκάθαρη κατά την μοντελοποίηση, γι αυτό τα υδραυλικά ύψη δεν υπολογίζονται στα στρώματα αυτά.

Στην άποψη του υδροφορέα η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (4.1)$$

όπου

$$L = -K'_z \frac{h_{\pi\eta\gamma\gamma\acute{\eta}\varsigma} - h}{b'}$$

και

- ✓  $h$  το υδραυλικό ύψος
- ✓  $T_x, T_y$  οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας στους άξονες  $x, y$  αντίστοιχα
- ✓  $S$  ο συντελεστής αποθηκευτικότητας
- ✓  $R$  ο όρος της πηγής / δεξαμενής, ο οποίος είναι θετικός στην περίπτωση εμπλουτισμού και αρνητικός στην περίπτωση άντλησης
- ✓  $L$  η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος
- ✓  $K'_z$  η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος
- ✓  $b'$  το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος
- ✓  $h_{\pi\eta\gamma\gamma\acute{\eta}\varsigma}$  το υδραυλικό ύψος στην πηγή

Η εξίσωση 4.1 εφαρμόζεται σε περιορισμένους υδροφορείς και οι όροι στο αριστερό μέρος αναφέρονται στην οριζόντια ροή διαμέσου του υδροφορέα.

Η εφαρμογή της εξίσωσης 4.1 σε ελεύθερο υδροφορέα γίνεται αφού ακολουθηθούν οι παραδοχές Dupuit σύμφωνα με τις οποίες: (1) οι γραμμές της ροής είναι οριζόντιες, ενώ οι

ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες και (2) η οριζόντια υδραυλική κλίση ισούται με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και είναι ανεξάρτητη του βάθους.

Για τις συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας ισχύει  $T_x = K_x h$  και  $T_y = K_y h$ . Ο όρος της διαρροής συνήθως είναι μηδενικός.

➤ Στην άποψη του συστήματος ροής δεν εξετάζεται τόσο το είδος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά κυρίως ασχολείται με την κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Σύμφωνα με την άποψη αυτή η ροή μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατη ή τρισδιάστατη.

Στην άποψη του συστήματος ροής η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης είναι:

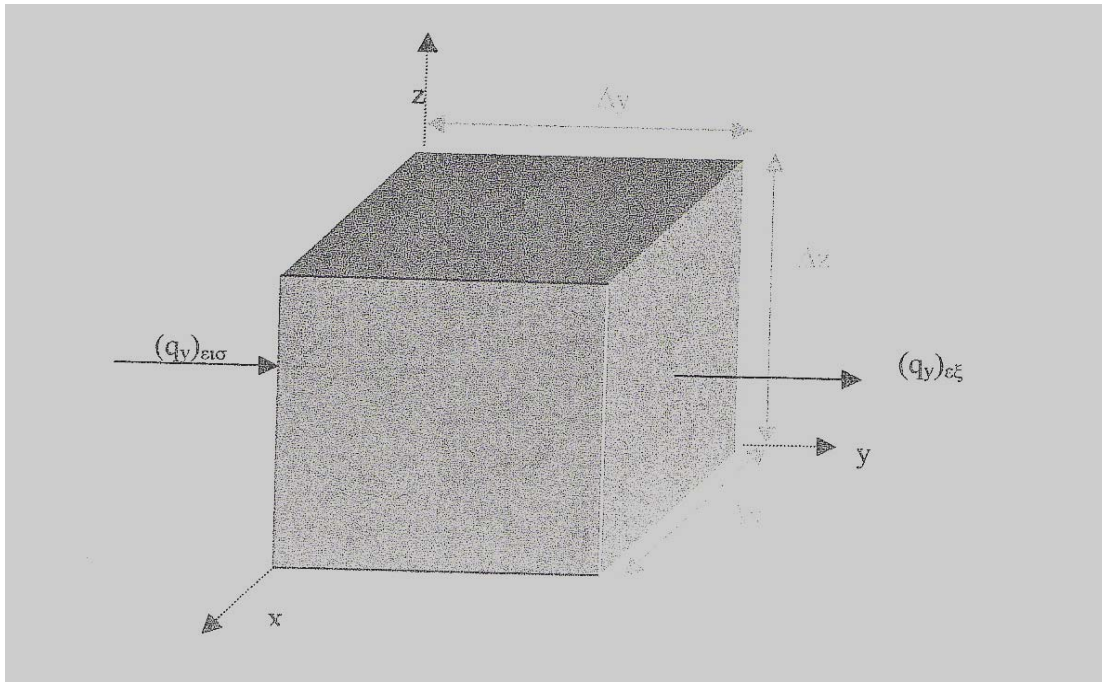
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (4.2)$$

όπου

- ✓  $K_x, K_y, K_z$  οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες  $x, y, z$  αντίστοιχα
- ✓  $S_s$  η ειδική αποθηκευτικότητα
- ✓  $R^*$  ο γενικός όρος που αναφέρεται στην πηγή / δεξαμενή, ο οποίος είναι θετικός στην περίπτωση εμπλουτισμού και αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου.

Η εξίσωση 4.2 προκύπτει συνδυάζοντας την εξίσωση του ισοζυγίου μάζας του νερού και το νόμο του Darcy.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε έναν κύβο από πορώδες υλικό ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου, αλλά ταυτόχρονα και αρκετά μικρός, ώστε η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε αυτόν να είναι σχετικά μικρή. Ο κύβος αυτός είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.2:** Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος [6]

Ο όγκος του πορώδους κύβου ισοδυναμεί με το γινόμενο  $\Delta_x \Delta_y \Delta_z$ , ενώ η ροή του νερού διαμέσου του αντιπροσωπευτικού όγκου εκφράζεται με το ρυθμό εκφόρτισης  $q$ .

Το  $q$  είναι διάνυσμα το οποίο εκφράζεται ως:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (4.3)$$

όπου  $i_x, i_y, i_z$  τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων  $x, y, z$  αντίστοιχα.

Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Μάζας (ή την εξίσωση ισορροπίας του νερού) ισχύει:

$$\text{Εκροή} - \text{Εισροή} = \text{Μεταβολή της Αποθηκευτικότητας} \quad (4.4)$$

Λαμβάνοντας ότι η ροή πραγματοποιείται κατά μήκος του  $y$  άξονα, τότε η επιφάνεια διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή είναι η  $\Delta_x \Delta_z$ , η εισροή ισούται με  $(q_y)_{\text{εισ}}$  και η εκροή με  $(q_y)_{\text{εξοδ}}$ .

Οπότε, η διαφορά του ογκομετρικού ρυθμού εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής κατά μήκος του άξονα  $y$  είναι:

$$[(q_y)_{\text{εξοδ}} - (q_y)_{\text{εισ}}] \Delta_x \Delta_z \quad (4.5)$$

$$\dot{q}_y = \frac{(q_y)_{\varepsilon\zeta\sigma\delta} - (q_y)_{\varepsilon\iota\sigma}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (4.6)$$

Δηλαδή, η μεταβολή του ρυθμού ροής διαμέσου του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδη όγκου, κατά μήκος του άξονα  $y$  είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (4.7)$$

Με παρόμοιο τρόπο εκφράζονται και οι μεταβολές του ρυθμού ροής διαμέσου του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδη όγκου, κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $z$ .

Επομένως, η συνολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και δίνεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Μεταβολή της Αποθηκευτικότητας} \quad (4.8)$$

Στην περίπτωση που έχουμε και πηγάδι εμπλουτισμού ή άντλησης εντός του αντιπροσωπευτικού όγκου, τότε ο ογκομετρικός ρυθμός εισροής εκφράζεται από τον όρο  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ . Επομένως, η συνολική μεταβολή του ρυθμού ροής στην περίπτωση αυτή δίνεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Μεταβολή της Αποθηκευτικότητας} \quad (4.9)$$

Η μεταβολή της αποθηκευτικότητας αναπαριστάται από την ειδική αποθηκευτικότητα  $S_s$ , η οποία ορίζεται ως ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μοναδιαία μεταβολή του υδραυλικού ύψους  $h$  και ανά μοναδιαίο όγκο του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (4.10)$$

Κατά σύμβαση στην παραπάνω εξίσωση το  $\Delta V$  είναι θετικό όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό, δηλαδή έχουμε απελευθέρωση αποθηκευμένου νερού όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται.

Οπότε, ο ρυθμός μεταβολής της αποθηκευτικότητας μέσα στον αντιπροσωπευτικό στοιχειώδη όγκο είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (4.11)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.9 και 4.11 και διαιρώντας με  $\Delta x \Delta y \Delta z$  καταλήγουμε στην τελική μορφή της εξίσωσης ισορροπίας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (4.12)$$

Ο νόμος του Darcy χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη σχέση μεταξύ του  $q$  και του  $h$ . Λόγω του φαινομένου της ανισοτροπίας η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Εάν ο άξονας των συντεταγμένων είναι κάθετος προς τη διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι τότε:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.13)$$

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

$$\begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_y &= -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_z &= -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Στις εξισώσεις 4.1 και 4.2 θεωρήθηκε ότι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας (ή αλλιώς της μεταβιβασιμότητας) είναι συγγραμμικές με τους άξονες  $x, y, z$ . Εάν όμως, εξαιτίας της γεωλογίας της περιοχής, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, τότε απαιτείται η χρησιμοποίηση της τροποποιημένης βασικής εξίσωσης, στην οποία το διάνυσμα της υδραυλικής αγωγιμότητας γράφεται ως εξής:

$$\vec{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

#### 4.5 Αριθμητικές Μέθοδοι των Συστημάτων Υπόγειας Ροής

Οι αναλυτικές λύσεις, εκτός από την εφαρμογή τους στην υδραυλική πηγαδιών, δεν έχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα, οι αριθμητικές λύσεις σε συνδυασμό με την εξέλιξη των υπολογιστών, αποτελούν πολύ ευκολότερο τρόπο αντιμετώπισης των περίπλοκων προβλημάτων της υπόγειας ροής.

Πιο συγκεκριμένα, στη μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες αριθμητικές μέθοδοι είναι οι εξής:

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

Η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης και η χρήση των αναλυτικών στοιχείων είναι σχετικά νέες τεχνικές. Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές είναι μια μέθοδος στενά συσχετισμένη με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Από τις παραπάνω μεθόδους οι περισσότερες διαδεδομένες στα προβλήματα της ροής είναι οι δύο πρώτες. Η επιλογή της μεθόδου ανήκει στο χρήστη και εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι απλή στην κατανόηση και στον προγραμματισμό, διότι απαιτούνται λιγότερα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος.

Από την άλλη, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα τα ακανόνιστα σχηματικά όρια, καθώς είναι ευκολότερος ο καθορισμός του μεγέθους κάθε στοιχείου και της θέσης των ορίων. Επίσης, τα πεπερασμένα στοιχεία χειρίζονται καλύτερα τα εσωτερικά όρια και προσομοιώνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια σημειακές πηγές και δεξαμενές, μέτωπα διαρροής και τη μεταβαλλόμενη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Μολονότι πολλοί επιστήμονες έχουν αποδείξει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι στην πραγματικότητα μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχει μεταξύ τους μια βασική διαφορά. Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία όμως αποτελεί και τη μέση τιμή του υδραυλικού ύψους του κελιού που περιβάλλει τον κόμβο αυτό. Επίσης, δεν γίνεται καμία υπόθεση σχετικά με τη μορφή της διακύμανσης του υδραυλικού ύψους από τον έναν κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζεται με ακρίβεια η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε κάθε στοιχείο. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση εξισώσεων παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη για ευκολία υπολογίζονται στις θέσεις όπου υπάρχουν κόμβοι, αλλά είναι δυνατόν να καθοριστεί η τιμή τους και σε άλλα σημεία του πλέγματος με χρήση βασικών συναρτήσεων. [6]

## **4.6 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και ο Σχεδιασμός του Πλέγματος**

### **4.6.1 Το Θεμελιώδες Μοντέλο και η κατασκευή του**

Το θεμελιώδες μοντέλο είναι μια γραφική αναπαράσταση του συστήματος της υπόγειας ροής, που θέλουμε να εξετάσουμε, και συνήθως έχει τη μορφή διατομής. Το μοντέλο αυτό θα καθορίσει στη συνέχεια τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και τον τρόπο σχεδιασμού του πλέγματος.

Ο σκοπός της κατασκευής κάθε θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιήσει το πρόβλημα που συναντάται στο πεδίο και να οργανώσει τα δεδομένα, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί ευκολότερα. Απλοποιήσεις είναι απαραίτητο να γίνουν, διότι η ολοκληρωμένη αποτύπωση του συστήματος του πεδίου είναι ανέφικτο να πραγματοποιηθεί. Ωστόσο, το θεμελιώδες μοντέλο πρέπει να απλοποιηθεί μέχρι ένα βαθμό, ώστε να διατηρήσει την πολυπλοκότητα που απαιτείται για την αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Όσο περισσότερο το θεμελιώδες μοντέλο προσεγγίσει την κατάσταση του πεδίου, τόσο πιο ακριβείς είναι οι προβλέψεις που θα δώσει κατόπιν το αριθμητικό μοντέλο.

Για την κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου ακολουθούνται τα εξής βήματα [6]:

➤ Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων:

Οι υδροστρωματογραφικές μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο προκύπτουν από συνδυασμό δεδομένων σχετικά με τη γεωλογία και την υδρογεωλογία. Περιλαμβάνουν γεωλογικές μονάδες με παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες. Κάποιες φορές μερικοί γεωλογικοί σχηματισμοί μαζί μπορεί να αποτελούν μια υδροστρωματογραφική μονάδα και άλλες φορές ένας γεωλογικός σχηματισμός υποδιαιρείται σε περισσότερες μονάδες. Οι υδροστρωματογραφικές μονάδες είναι περισσότερο χρήσιμες για την προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα.

➤ Καθορισμός του Υδατικού Ισοζυγίου:

Στη κατάσταση του Υδατικού Ισοζυγίου του θεμελιώδους μοντέλου περιλαμβάνονται οι εισροές νερού στο σύστημα, τα σημεία εξόδου και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις της ροής. Ο εμπλουτισμός του συστήματος με νερό μπορεί να οφείλεται σε βροχόπτωση ή επιφανειακή ροή. Στις εκροές νερού περιλαμβάνεται η υπόγεια ροή προς ποτάμια / ρυάκια, η εξατμισοδιαπνοή και η άντληση. Από τις μετρήσεις του πεδίου δημιουργείται ένα ισοζύγιο το οποίο υπολογίζει τις διαφορές εισροές και εκροές του συστήματος, καθώς και τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας. Κατά τη βαθμονόμηση γίνεται μια σύγκριση του ισοζυγίου αυτού με το υδατικό ισοζύγιο που προκύπτει από το μοντέλο.

➤ Καθορισμός του συστήματος ροής:

Διάφορα υδρολογικά χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την κίνηση του υπογείου νερού του συστήματος. Οι μετρήσεις σχετικά με τη στάθμη του ύδατος δίνουν μια εκτίμηση της γενικής κατεύθυνσης της υπόγειας ροής, τις θέσεις όπου πρέπει να εγκατασταθούν πηγάδια εμπλουτισμού ή άντλησης καθώς και τη σχέση μεταξύ των υδροφορέων και των επιφανειακών υδατικών συστημάτων. Η κατεύθυνση της υπόγειας ροής είναι προτιμότερο, όμως, να καθοριστεί συνδυάζοντας τα υδρολογικά δεδομένα με κάποια χρήσιμα γεωχημικά στοιχεία. Συνήθως, τέτοια χρήσιμα στοιχεία είναι η συγκέντρωση των κυριότερων κατιόντων ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ) και ανιόντων ( $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{CL}^{-}$ ), η θερμοκρασία και το pH.

Τα μοντέλα υπόγειας ροής ταξινομούνται ανάλογα με το αν αναφέρονται σε σταθερές ή μεταβλητές συνθήκες, το είδος των υδροφορέων (ελεύθεροι ή περιορισμένοι) και τις διαστάσεις τους.

Τα μοντέλα ως προς τη χωρική διάσταση τους διακρίνονται σε:

- ✓ Δισδιάστατα επιφανειακά
- ✓ Δισδιάστατα προφίλ
- ✓ Ημι-τρισδιάστατα
- ✓ Τρισδιάστατα

#### 4.6.2 Σχεδιασμός του Πλέγματος

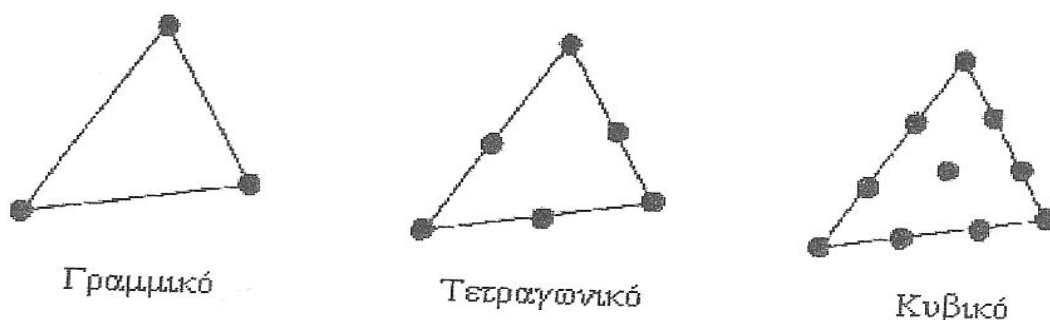
Το πλέγμα των κόμβων μαζί με τα κελιά των πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων, συνιστούν το πλαίσιο εργασίας του αριθμητικού μοντέλου. Το θεμελιώδες μοντέλο και ο τύπος του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζουν τις συνολικές διαστάσεις του πλέγματος. Η απόσταση μεταξύ των κόμβων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η αναμενόμενη καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα, η μεταβολή των υδραυλικών υψών, η μεταβλητότητα ορισμένων από τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος και οι μεταβολές στους ρυθμούς άντλησης και εμπλουτισμού.

Στα *πλέγματα πεπερασμένων διαφορών* ανήκουν τα στοιχειο-κεντρικά και τα δικτυο-κεντρικά πλέγματα. Η διαφορά αυτών έγκειται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις οριακές συνθήκες. Στα στοιχειο-κεντρικά πλέγματα οι οριακές συνθήκες τοποθετούνται πάντα στις άκρες του τετραγώνου, ενώ στα δικτυο-κεντρικά οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με τον κόμβο.

Οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών ( $i, j, k$ ), οι οποίοι προσδιορίζουν τη θέση τους στη γραμμή, τη στήλη και το στρώμα του πλέγματος αντίστοιχα. Οι κόμβοι τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστάσεις  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  να είναι σταθερές, αλλά όχι απαραίτητα ίσες μεταξύ τους. Συνήθως, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ακανόνιστου πλέγματος με μικρές αποστάσεις κόμβων όταν θέλουμε να αποτυπώσουμε επιμέρους περιοχές (εντός της περιοχής ενδιαφέροντος), όπου αναμένονται απότομες υδραυλικές κλίσεις (π.χ. κοντά σε πηγάδια άντλησης) ή άλλα σημαντικά υδρολογικά χαρακτηριστικά. Όταν εισάγεται ένα μικρότερο πλέγμα στο εσωτερικό του βασικού πλέγματος, πιθανώς να είναι απαραίτητο να αυξηθούν οι αποστάσεις ανάμεσα στους κόμβους, αφού το πλέγμα επεκτείνεται εκτός των

ορίων. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών κατά κανόνα ορίζεται ότι για να επεκταθεί το πλέγμα, η αύξηση της απόστασης μεταξύ των κόμβων δεν πρέπει να ξεπερνά περισσότερο από 1,5 φορές την προηγούμενη απόσταση.

Τα *πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων* επιτρέπουν μεγαλύτερη ευχέρεια στο σχεδιασμό του πλέγματος. Το είδος της παρεμβολικής συνάρτησης, η οποία υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο, καθορίζει εάν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό (σχήμα 4.3). Το γραμμικό στοιχείο είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιείται περισσότερο.



**Σχήμα 4.3:** Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία [6]

Ένα βασικό μειονέκτημα των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η εισαγωγή των δεδομένων που απαιτούνται για τον ορισμό του πλέγματος είναι δυσκολότερη και περισσότερο επίπονη, από ότι στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών. Κάθε κόμβος και κάθε στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και επίσης οι συντεταγμένες θέσης κάθε κόμβου ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) και ο αριθμός αυτού πρέπει να είναι συσχετισμένα με κάθε στοιχείο που πρόκειται να εισαχθεί στο μοντέλο. Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει κάθε στοιχείο ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδυάζει τις εξισώσεις όλων των στοιχείων σε μία γενική εξίσωση. Κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε ιστροπικά υλικά, για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών σφαλμάτων, απαιτείται ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη διάσταση κάθε στοιχείου να είναι κοντά στη μονάδα. Σε ανισοτροπικά υλικά απαιτείται ο λόγος αυτός να μην ξεπερνά το πέντε. [6]

### 4.6.3 Προσδιορισμός των παραμέτρων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα υπόγειας ροής διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- *Φυσικά δεδομένα*, τα οποία καθορίζουν τη γεωμετρία του συστήματος (π.χ. το πάχος και την έκταση των υδροστρωματογραφικών μονάδων). Τέτοια δεδομένα είναι:
  - ✓ Γεωλογικοί χάρτες και διατομές που απεικονίζουν την έκταση και τα όρια του συστήματος.
  - ✓ Τοπογραφικοί χάρτες που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τα επιφανειακά νερά.
  - ✓ Χάρτες που περιέχουν πληροφορίες σχετικά με το υψόμετρο και το πάχος των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων.
  - ✓ Χάρτες που απεικονίζουν την έκταση και τα όρια των λιμνών και των ποταμών.
- *Υδρογεωλογικά δεδομένα*, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διατύπωση του θεμελιώδους μοντέλου και για τον έλεγχο της βαθμονόμησής του. Τέτοια δεδομένα είναι:
  - ✓ Στάθμη του ύδατος και ποτενσιομετρικοί χάρτες των υδροφορέων.
  - ✓ Χάρτες και διατομές που περιέχουν πληροφορίες για την υδραυλική αγωγιμότητα και την αποθηκευτικότητα.
  - ✓ Χωρική και χρονική κατανομή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής και της υπόγειας επαναφόρτισης, αλληλεπίδραση επιφανειακού και υπογείου νερού, υπόγεια άντληση και φυσική υπόγεια επαναφόρτιση.

Η συγκέντρωση όλων αυτών των στοιχείων είναι αρκετά επίπονη διαδικασία και σε πολλές περιπτώσεις, εκτός από τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε από ήδη υπάρχουσες μελέτες, είναι απαραίτητη και η επί-τόπου εργασία στο πεδίο.

Όταν γίνεται προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων πρέπει η υδραυλική αγωγιμότητα να εκφράζεται και στις τρεις συνιστώσες  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ . Συχνά, η ανισοτροπία υπολογίζεται βάσει ενός ρυθμού ανισοτροπίας. Πιο συγκεκριμένα, η οριζόντια ανισοτροπία αναπαριστάται από το λόγο μεταξύ των  $K_x$  και  $K_y$ , ενώ η κάθετη από το λόγο μεταξύ των  $K_x$  και  $K_z$ .

Σε σχετικά μικρή κλίμακα εντοπίζονται στο πεδίο ισοτροπικές υδρογεωλογικές μονάδες. Η μοντελοποίηση των γεωλογικών μονάδων σε τόσο μικρή κλίμακα είναι πολύ δύσκολη. Όταν το πάχος του στρώματος του μοντέλου ( $B_{ij}$ ) είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του ισοτροπικού στρώματος ( $b_{ij}$ ), τότε η υδρολογικά ισοδύναμη οριζόντια και κάθετη υδραυλική

αγωγιμότητα του στρώματος του μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$(K_x)_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}} \quad (4.15)$$

$$(K_z)_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{\sum_{k=1}^m b_{i,j,k} / K_{i,j,k}} \quad (4.16)$$

$$B_{i,j} = \sum_{k=1}^m b_{i,j,k} \quad (4.17)$$

Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα των υδροστρωματογραφικών μονάδων ελέγχει τη ροή του νερού ανάμεσα στα στρώματα. Η παρακάτω εξίσωση, η οποία αποδίδεται στον Theis, διορθώνει τις επιδράσεις από την στρωματοποίηση κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων. Οι μονάδες αυτές στη μοντελοποίηση προσομοιώνονται ως οριζόντια στρώματα.

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{R}{1 - (1 - R) \cos^2 A} \quad (4.18)$$

όπου

- ✓  $K_x$  η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x (L/T)
- ✓  $K_y$  η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y (L/T)
- ✓ R ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας στη διεύθυνση x προς την υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y
- ✓ A η γωνία της κλίσης

Οι υδρολογικές παράμετροι περιλαμβάνουν την άντληση, την επαναφόρτιση και την εξατμισοδιαπνοή. Από αυτές ευκολότερα εκτιμώνται οι ρυθμοί άντλησης, ενώ η επαναφόρτιση είναι μια παράμετρος η τιμή της οποίας εκτιμάται δύσκολα. Πληροφορίες σχετικά με την εξατμισοδιαπνοή συλλέγονται από μετρήσεις στο πεδίο με λυσίμετρα. [6]

#### 4.6.4 Μεταφορά των παραμέτρων στο Πλέγμα

Για τη μεταφορά των δεδομένων του πεδίου στο πλέγμα απαιτείται αρχικά η τροποποίηση των τιμών των διάφορων παραμέτρων, ώστε να είναι συμβατές με την κλίμακα του μοντέλου. Στη συνέχεια, εισάγονται οι ιδιότητες των υδροφορέων σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του θεμελιώδους μοντέλου. Επίσης, σε κάθε κόμβο καθορίζεται το πάχος της αντίστοιχης υδροστρωματογραφικής μονάδας. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού. Στα στοιχειο - κεντρικά πλέγματα, οι ιδιότητες των υδροφορέων και οι υδρολογικές παράμετροι αποδίδονται στο τετράγωνο που περιβάλλει τον κόμβο. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων αποδίδονται είτε στον κόμβο είτε στο στοιχείο. [6]

#### 4.7 Οριακές Συνθήκες

##### 4.7.1 Είδη Οριακών Συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο αυτής (ροή) στα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος. Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών αποτελεί κρίσιμο βήμα για το σωστό σχεδιασμό του μοντέλου.

Τα *φυσικά όρια* των συστημάτων υπόγειας ροής δημιουργούνται από την παρουσία αδιαπέρατου βράχου ή μεγάλης μάζας επιφανειακού νερού. Άλλα όρια τα οποία συναντώνται και οφείλονται στις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής, είναι τα *υδραυλικά όρια*. Αυτά αναπαριστώνται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους: Συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (συνθήκες Dirichlet), για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.
- Οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους: Συνθήκες σταθερής ροής (συνθήκες Neumann), για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου είναι δεδομένη.

- Οριακές συνθήκες 3<sup>ου</sup> είδους: Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος (Cauchy ή μικτές οριακές συνθήκες), για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου υπολογίζεται από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Καλούνται μικτές, διότι συσχετίζουν τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής.

Η θέση της οριακής συνθήκης μέσα στο πλέγμα εξαρτάται από το είδος του πλέγματος που χρησιμοποιείται (block-centered πλέγμα πεπερασμένων διαφορών, δικτυο - κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών ή πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων). [6]

#### 4.7.2 Τοποθέτηση των Οριακών Συνθηκών

Γενικά, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται φυσικά όρια, όταν αυτό είναι εφικτό, διότι αποτελούν σταθερά στοιχεία του συστήματος. Τέτοια όρια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι αδιαπέραστοι βράχοι, στρώματα στα οποία παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική τους αγωγιμότητα κατά δύο τάξεις μεγέθους και στρώματα κατά μήκος του ορίου με μικρή υδραυλική κλίση.

Ορισμένες φορές, όμως, δεν είναι δυνατό ή βολικό ο σχεδιασμός του πλέγματος να περιλαμβάνει και τα φυσικά όρια του συστήματος, διότι η περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά από αυτά. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται τοπικά χωρίσματα του υπόγειου ύδατος. Τα χωρίσματα τοποθετούνται κοντά σε τοπογραφικά υψώματα και κάτω από αυτά μπορούν να σχηματίσουν μερικώς διαπερατά στρώματα επιφανειακού νερού. Παρόλο που τα υδραυλικά όρια συνήθως δεν αποτελούν σταθερά σημεία του συστήματος ροής, τα τοπικά χωρίσματα υπογείου ύδατος συχνά είναι περισσότερο μόνιμα όρια.

Στα συστήματα ροής γίνεται συνήθως συνδυασμός των οριακών συνθηκών σταθερού υδραυλικού ύψους και σταθερής ροής, ενώ το θεμελιώδες μοντέλο του προβλήματος μπορεί να διατυπωθεί και μόνο με χρήση οριακών συνθηκών ροής.

Εάν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ούτε φυσικά όρια, ούτε τοπικά υπόγεια χωρίσματα, τότε πρέπει να επιλεγούν άλλα υδραυλικά όρια τα οποία καθορίζονται από πληροφορίες σχετικές με τη διαμόρφωση του συστήματος ροής. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον προσδιορισμό των ορίων αυτών, ώστε να μην προκαλούν σημαντική μεταβολή στη συμπεριφορά του συστήματος.

Τα όρια αυτά, που δεν συμπίπτουν με τα φυσικά όρια, είναι δύο ειδών [6]:

- ✓ *Απομακρυσμένα όρια.* Σε μια προσωρινή προσομοίωση τα όρια μπορούν αυθαίρετα να τοποθετηθούν πολύ μακριά από το κέντρο του πλέγματος, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζονται από τις διάφορες πιέσεις του συστήματος. Έτσι, τα υδραυλικά ύψη και η ροή γύρω από τα όρια αυτά δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης.
- ✓ *Υδραυλικά όρια.* Τα όρια αυτά τοποθετούνται ώστε να δημιουργήσουν μια μικρότερη περιοχή ενδιαφέροντος και μπορεί να είναι όρια σταθερού υδραυλικού ύψους, μηδενικής ή σταθερής ροής.

Οι υδραυλικές οριακές συνθήκες μπορούν να καθοριστούν μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως Τηλεπισκοπική Βελτίωση Δικτύου (TMR), η οποία εισήχθη από τον Ward (1987).

#### 4.7.3 Προσομοίωση των Οριακών Συνθηκών

Στα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και στα δικτυο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι κόμβοι συμπίπτουν με τις θέσεις των ορίων. Στα block-centered πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς επάνω στους κόμβους, ενώ οι οριακές συνθήκες της ροής στις εξωτερικές πλευρές των τετραγώνων.

##### Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους - Σταθερό Υδραυλικό Ύψος:

Στις οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Εάν το όριο είναι ποτάμι, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος αυτού θα μεταβάλλεται χωρικά, ενώ στην περίπτωση λίμνης ή πηγής/δεξαμενής το όριο χαρακτηρίζεται από συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους. Πρέπει να τονιστεί ότι τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες πηγές νερού. Κάποιες φορές, βέβαια, είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης να μεταβληθεί το υδραυλικό ύψος στο όριο, δίνοντας όμως μία νέα τιμή που να μπορεί να δικαιολογηθεί.

### Οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> είδους- Σταθερή ροή:

Οι οριακές συνθήκες σταθερής ροής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη ροή επιφανειακού νερού, τη ροή από πηγές, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Όταν είναι δυνατό, προτιμάται η χρησιμοποίηση οριακών συνθηκών σταθερού υδραυλικού ύψους από ότι σταθερής ροής, διότι είναι πολύ ευκολότερη η μέτρηση της στάθμης του ύδατος παρά της ροής και διότι βοηθούν στην πραγματοποίηση της βαθμονόμησης. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις στις οποίες συνιστάται η χρησιμοποίηση οριακών συνθηκών σταθερής ροής, όπως για παράδειγμα όταν η ροή σε ένα σύστημα είναι σταθερή, ενώ τα υδραυλικά ύψη κατά μήκος του ορίου αναμένεται να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, οι οριακές συνθήκες σταθερής ροής προσομοιώνονται με τη τοποθέτηση πηγαδιών τα οποία αντλούν ή εμπλουτίζουν με νερό τον υδροφορέα με συγκεκριμένο ρυθμό, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης καθορίζει τη ροή σε ένα τμήμα του ορίου ανάμεσα σε δύο κόμβους.

### Οριακές συνθήκες 3<sup>ου</sup> είδους - Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος:

Η ροή διαμέσου του ορίου εξαρτάται από τη διαφορά ανάμεσα στην τιμή του υδραυλικού ύψους που καθορίζεται από τον χρήστη στην μία πλευρά του ορίου, και στην τιμή η οποία υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά του ορίου. Τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων χειρίζονται με παρόμοιο τρόπο τις οριακές συνθήκες αυτού του είδους, με τη διαφορά ότι στα πρώτα υπολογίζεται η ροή σε κάθε κελί, ενώ στα δεύτερα σε κάθε κόμβο.

Η διαρροή από και προς ένα ποτάμι, λίμνη ή πηγή/δεξαμενή μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση οριακών συνθηκών 3<sup>ου</sup> είδους. Ο ρυθμός διαρροής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L = Q_L / A = K'_z / b' (h_{\pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma} - h) \quad (4.19)$$

όπου

- ✓  $Q_L$  η ογκομετρική παροχή
- ✓  $A$  η επιφάνεια του κελιού διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή
- ✓  $h_{\pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma}$  το υδραυλικό ύψος στην πηγή (π.χ. λίμνη ή ποτάμι)
- ✓  $h$  το υδραυλικό ύψος στον ακριβώς υποκείμενο ή σε γειτονικό της πηγής υδροφορέα

- ✓  $K'_z$  η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος που διαχωρίζει τον υδροφορέα από την πηγή
- ✓  $b'$  το πάχος του στρώματος που διαχωρίζει τον υδροφορέα από την πηγή

Η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί και αυτή να αναπαρασταθεί με χρήση οριακών συνθηκών 3<sup>ου</sup> είδους, όπου η ροή είναι ανάλογη του βάθους του νερού κάτω από την επιφάνεια.

#### Οριακές συνθήκες Μηδενικής Ροής:

Οι συνθήκες αυτές εμφανίζονται όταν η ροή κατά μήκος του ορίου είναι μηδενική. Ένα τέτοιο όριο μπορεί να αναπαριστά αδιαπέραστο βράχο, αδιαπέραστη «ελαττωματική» ζώνη, υπόγειο χώρισμα ή το στρώμα που δημιουργείται όταν το γλυκό νερό ενός παράκτιου υδροφορέα έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό.

Τα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων θεωρούν αυτόματα μηδενική ροή γύρω από τα όρια του μοντέλου, και αυτό τροποποιείται μόνο όταν ο χρήστης ενεργοποιήσει κάποιο άλλο είδος οριακών συνθηκών. [6]

## 5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ "ARGUS ONE" ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ "PTC"

### 5.1 Σύντομη Αναφορά στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών "Argus One"

Το ARGUS ONE είναι ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) το οποίο αποτελεί το ιδανικότερο γραφικό περιβάλλον εισαγωγής των δεδομένων για διάφορα μαθηματικά μοντέλα. Είναι ένας εύκολος τρόπος απεικόνισης των παραμέτρων του πεδίου και υποστηρίζει τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που χρησιμοποιούνται από τους υδρογεωλόγους μηχανικούς. Στην παρούσα εργασία το λογισμικό ARGUS ONE θα χρησιμοποιηθεί ως το γραφικό περιβάλλον του κώδικα προσομοίωσης της υπόγειας ροής και μεταφοράς PTC (Princeton Transport Code) καθώς και του αλγόριθμου βελτιστοποίησης OA (Outer Approximation Method).

Το ARGUS ONE GIS υποστηρίζει επίσης τα εξής μαθηματικά μοντέλα:

- *MODFLOW* – Πρόκειται για ένα αρθρωτό τρισδιάστατο μοντέλο υπογείων υδάτων, που με χρήση πεπερασμένων διαφορών προσομοιώνει τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών.
- *NAPL* – Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη ρύπανση του εδάφους και των υδροφορέων από οργανικά υγρά, γνωστά ως υγρά μη υδατώδους φάσης (Non Aqueous Phase Liquids, NAPLs).
- *SUTRA* – Πρόκειται για ένα μοντέλο που προσομοιώνει κορεσμένη και ακόρεστη ροή, ροή υγρού σταθερής ή μεταβλητής πυκνότητας και μεταφορά διαλυμένων ουσιών ή ενέργειας.
- *HST3D* – Πρόκειται για ένα μοντέλο υπογείων υδάτων, που με χρήση πεπερασμένων διαφορών προσομοιώνει σε τρισδιάστατο επίπεδο ρευστά, διαλύματα μίας ουσίας και μεταφορά θερμότητας υπό συνθήκες κορεσμού. Έχει επίσης τη δυνατότητα να προσομοιώνει τις διεργασίες της προσρόφησης και της αποσύνθεσης.

## 5.2 Μαθηματικό Μοντέλο Προσομοίωσης “PTC”

Ο κώδικας PTC έχει σχεδιαστεί κυρίως για πρακτικούς υδρογεωλόγους και γι αυτό δεν επικεντρώνεται στην εξέταση των εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή, αλλά στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης αυτών.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων ώστε να αναπαραστήσει την υπόγεια ροή του ύδατος, η οποία περιγράφεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

➤ **Το υδραυλικό ύψος  $h$**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (5.1)$$

➤ **Τις συνιστώσες της ταχύτητας ροής (ταχύτητα Darcy) του υπόγειου ύδατος**

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5.2)$$

➤ **Τη μεταφορά του ρυπαντή που περιγράφεται από τη συγκέντρωση  $c$**

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \\ & + Q (c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου

- ✓  $h$  το υδραυλικό ύψος (L)
- ✓  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  αντίστοιχα ( $LT^{-1}$ )
- ✓  $S$  η ειδική αποθηκευτικότητα ( $L^{-1}$ )
- ✓  $D_{ij}$  οι συντελεστές της διασποράς στις διάφορες κατευθύνσεις ( $L^2/T$ )
- ✓  $Q$  η ισχύς της άντλησης (πηγής / καταβόθρας) ( $1/T$ )
- ✓  $\theta$  το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο)
- ✓  $E(c)$  η συνάρτηση που αναπαριστά τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης

✓  $c^w$  η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $M/L^3$ )

Οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy και λύνονται με την εξής διαδοχή: Αρχικά υπολογίζονται από την εξίσωση (5.1) τα υδραυλικά ύψη  $h$ , κατόπιν από την εξίσωση (5.2) οι συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy  $V_x, V_y, V_z$  και τέλος, υπολογίζεται η συγκέντρωση των ρύπων από την εξίσωση (5.3). [7]

### 5.3 Επίλυση του Αλγόριθμου PTC

Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, για σύνθετα φυσικά συστήματα, απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Ο χρόνος υπολογισμού αυτών των εξισώσεων στις τρεις διαστάσεις του χώρου είναι πολύ μεγάλος. Γι αυτό οδηγούμαστε στη χρήση του κώδικα PTC, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα του πεδίου με έναν μαθηματικό αλγόριθμο και μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο.

Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: Αρχικά διακριτοποιεί την περιοχή σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα. Χρησιμοποιώντας μέσα σε κάθε στρώμα διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, αναπαριστά με μεγαλύτερη ακρίβεια τις ανομοιομορφίες της περιοχής. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Κατά τη διάρκεια μιας χρονικής επανάληψης, την οποία έχουμε εξ αρχής ορίσει, πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιλύονται οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων, ανεξάρτητα η μία από την άλλη, ενώ στο δεύτερο βήμα, λύνονται οι κάθετες εξισώσεις οι οποίες συνδέουν τα στρώματα μεταξύ τους. [7]

### 5.4 Τρισδιάστατη Ροή Υπόγειου Ύδατος

#### 5.4.1 Βασική Εξίσωση

Ο κώδικας PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής του υπογείου ύδατος ενός συστήματος, μέσω της ακόλουθης διαφορικής εξίσωσης για το υδραυλικό ύψος, την οποία επιλύει χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \\ + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

όπου

- ✓  $h$  το υδραυλικό ύψος (L)
- ✓  $K_{xx}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην  $x$ -διεύθυνση ( $LT^{-1}$ )
- ✓  $K_{yy}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην  $y$ -διεύθυνση ( $LT^{-1}$ )
- ✓  $K_{zz}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην  $z$ -διεύθυνση ( $LT^{-1}$ )
- ✓  $S$  ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας ( $L^{-1}$ )
- ✓  $Q_i$  όρος πηγής / δεξαμενής στη θέση  $i$  ( $L^3T^{-1}$ ) (π.χ. θετική τιμή στην περίπτωση εμπλουτισμού)
- ✓  $\delta$  η συνάρτηση δέλτα του Dirac
- ✓  $r$  ο αριθμός των σημείων με πηγές / καταβόθρες

Για συντομία ο τελευταίος όρος της παραπάνω εξίσωσης θα αναφέρεται ως  $Q$ . [7]

#### 5.4.2 Εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο κώδικας PTC για να λύσει την εξίσωση 5.4, προσεγγίζει τους όρους που περιέχουν τις παραγώγους ως προς την  $x$  και  $y$  διεύθυνση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή, υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο σύνολο εξισώσεων το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει επακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη ροή του υπόγειου ύδατος.

Μία πεπερασμένη προσεγγιστική μορφή της σειράς αυτής είναι:

$$h(x, y, z, t) \approx h'(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (5.5)$$

όπου

- ✓  $h$  το υδραυλικό ύψος (L)
- ✓  $h'$  η προσεγγιστική σειρά του  $h$  (L)
- ✓  $h_i$  ένας απροσδιόριστος συντελεστής (L)
- ✓  $w_i$  μία βασική (ή παρεμβολική) συνάρτηση (αδιάστατη)

✓ N ο αριθμός των κόμβων του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσεγγιστική σειρά παρέχει μία ακριβή αναπαράσταση, όσο το N προσεγγίζει το άπειρο (το  $h'$  προσεγγίζει το  $h$ ). Με μία προσεκτική επιλογή των βασικών εξισώσεων  $w_i$ , οι απροσδιόριστοι συντελεστές  $h_i$ , γίνονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες  $(x, y, z)$ . Σημαντικό κλειδί για την αύξηση της υπολογιστικής αποδοτικότητας της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, είναι η χρήση βασικών συνεχών συναρτήσεων τμηματικά. Οι συναρτήσεις αυτές είναι διάφορες του μηδενός μόνο σε μια μικρή υποπεριοχή της συνολικής περιοχής ενδιαφέροντος. Μεταξύ των διάφορων τύπων βασικών συναρτήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί γραμμικές βασικές συναρτήσεις ανάμεσα στους γειτονικούς κόμβους.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σημειώνεται ότι, παρόλο που ο διαφορικός τελεστής  $L$  (π.χ. εξίσωση 5.4) τείνει στο  $h$  ισούται με μηδέν, όταν το  $L$  τείνει στην προσεγγιστική συνάρτηση εισάγεται κάποιο σφάλμα.

Μαθηματικά, η εξίσωση 5.4 ξαναγράφεται ως:

$$L(h) = 0 \quad \text{όταν} \quad L(h') = R \quad \text{όπου } R \text{ το υπολειμματικό σφάλμα.}$$

Για να επιλύσουμε την εξίσωση 5.5 με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προσπαθούμε ουσιαστικά να ελαχιστοποιήσουμε το υπολειμματικό σφάλμα  $R$ . Αυτό επιτυγχάνεται, αρχικά, θεωρώντας ένα ολοκληρωμένο σύνολο συναρτήσεων  $w_j$ . Στη συνέχεια, εάν υποχρεώσουμε το υπολειμματικό σφάλμα  $R$  να είναι ορθογωνικό για όλες τις πιθανές τιμές της συνάρτησης  $w_j$ , δηλαδή, υποχρεώνοντας το  $R$  να τείνει στο μηδέν, μπορούμε πλέον να λάβουμε την επίλυση της εξίσωσης 5.5.

Αναδιατυπώνοντας έχουμε:

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

Δυστυχώς, όμως η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται μόνο όταν το  $N$  τείνει στο άπειρο, γεγονός που καταργεί τη χρήση υπολογιστή. Έτσι, είμαστε αναγκασμένοι να δημιουργήσουμε ένα πεπερασμένο υποσύνολο τιμών του  $w_i, i=1, 2, \dots, N$ , το οποίο θα μας παρέχει, όμως, μια προσεγγιστική και όχι μια ακριβή τιμή της λύσης. [7]

Με περαιτέρω υπολογισμούς οδηγούμαστε στην ακόλουθη έκφραση της διακριτοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \left( \sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial x} \right) \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \left( \sum_{j=1}^N h_j \frac{\partial w_j}{\partial y} \right) \frac{\partial w_i}{\partial y} - \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial}{\partial z} \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i + S \frac{\partial}{\partial t} \left( \sum_{j=1}^N h_j w_j \right) w_i - Q w_i \right] dx dy - \\ - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial h'}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial h'}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

όπου

- ✓  $i = 1, 2, \dots, N$
- ✓  $\Omega$  η περιοχή ολοκλήρωσης που καλύπτει την οριζόντια τομή της περιοχής ροής
- ✓  $l_x$  το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ του κανονικού και του εγκάρσιου ορίου  $\sigma$  στην κατεύθυνση  $x$
- ✓  $l_y$  το συνημίτονο της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ του κανονικού και του εγκάρσιου ορίου  $\sigma$  στην κατεύθυνση  $y$

### 5.4.3 Εφαρμογή της Μεθόδου των Πεπερασμένων Διαφορών

Ξαναγράφοντας την εξίσωση (5.6) σε μορφή πινάκων έχουμε:

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (5.7)$$

όπου τα  $A$  και  $B$  αντιπροσωπεύουν τετραγωνικούς πίνακες ( $N \times N$ ), ενώ τα  $h$ ,  $\partial h / \partial t$ ,  $v$  και  $f$  αποτελούν διανύσματα στήλης μήκους  $N$ .

Τα στοιχεία των  $A$ ,  $B$ ,  $f$  και  $v$  είναι:

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (5.8)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (5.9)$$

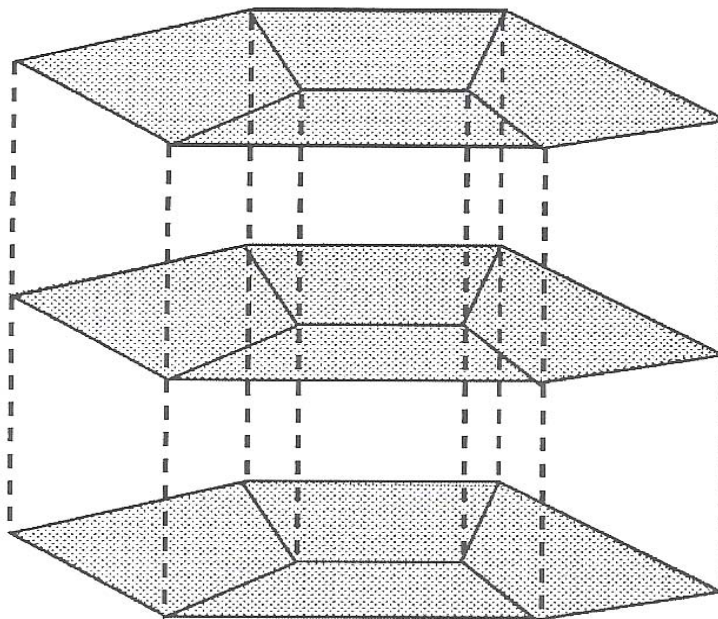
$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial h'}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial h'}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (5.10)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (5.11)$$

(όπου το  $f$  περιλαμβάνει τις γνωστές οριακές συνθήκες).

#### 5.4.4 Η Κάθετη Παράγωγος

Το κύριο γνώρισμα του κώδικα PTC είναι η χρήση κεντρικών διαφορών για τις χωρικές παραγώγους στην  $z$ -διεύθυνση (5.11). Η κάθετη διακριτοποίηση επιτυγχάνεται επαναλαμβάνοντας τα οριζόντια δίκτυα πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα, στα οποία οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι ο ένας πάνω από τον άλλο (σχήμα 5.1). Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι η εξίσωση που αναφέρεται στην κάθετη κατεύθυνση (5.11) μπορεί να προσεγγιστεί με μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.



**Σχήμα 5.1:** Σχηματική αναπαράσταση οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετημένα το ένα πάνω από το άλλο, δημιουργώντας την τρισδιάστατη διακριτοποίηση [7]

Χρησιμοποιώντας το  $k$  ως κάθετο δείκτη, με τιμή  $k = 1$  στο κατώτερο στρώμα, η προσέγγιση γραμμένη σε μορφή πινάκων δίνει:

$$v \cong C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \quad (5.12)$$

όπου, ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων των γειτονικών (παρακείμενων) στρωμάτων χρησιμοποιείται για να ορίσει τα στοιχεία του  $C_k^+$ , που είναι ο κάθετος όρος μεταξύ των στρωμάτων  $k$  και  $k+1$ , και του  $C_k^-$  που είναι ο κάθετος όρος μεταξύ των στρωμάτων  $k$  και  $k-1$ .

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k [\Delta z_{k\pm 1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k\pm 1}]} w_i w_j dx dy \quad (5.13)$$

όπου,  $(\Delta z_k)$  είναι το πάχος του  $k^{ou}$  στρώματος στο σημείο της προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει τις πιο ρεαλιστικές ποσότητες στις ετερογενείς καταστάσεις που συχνά συναντούμε.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.12) στην (5.7) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για ένα τυπικό  $k^o$  στρώμα:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (5.14)$$

όπου το  $h_k$  αναπαριστά το διάνυσμα  $h$  των υδραυλικών υψών στο  $k^o$  στρώμα,  $k = 1, 2, \dots, M$  και όπου  $M$  ο αριθμός των στρωμάτων στην  $z$ -διεύθυνση. [7]

#### 5.4.5 Η Χρονική Παράγωγος

Έχει διαπιστωθεί ότι η προσέγγιση της χρονικής παραγώγου με έμμεση προς τα πίσω διαφορά παρέχει την πιο ακριβή λύση στα προβλήματα ροής του υπόγειου ύδατος, για ένα δεδομένο κόστος. Για την προσέγγιση της χρονικής παραγώγου χρησιμοποιείται ένα σχήμα διόρθωσης πρώτης τάξης. Οι χωρικές παράγωγοι γράφονται πλέον αναφερόμενες στο νέο χρονικό βήμα.

Η εφαρμογή του σχήματος αυτού στην εξίσωση της χρονικής παραγώγου (5.14) για κάθε στρώμα δίνει:

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})]^{(t+\Delta t)} + f_k^t = 0 \quad (5.15)$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την έκφραση τη ολικής διακριτοποίησης της εξίσωσης (5.4), η οποία δίνει  $M \times N$  εξισώσεις με  $N$  αγνώστους στην εξίσωση (5.5) για καθένα από τα  $M$  στρώματα. [7]

## 5.5 Οριακές Συνθήκες

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί τα ακόλουθα τρία είδη οριακών συνθηκών για την εξίσωση της ροής:

- ❖ Οριακές συνθήκες Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους)
- ❖ Οριακές συνθήκες Neumann (σταθερής ροής)
- ❖ Οριακές συνθήκες τρίτου είδους (για τη διαρροή)

Υπάρχει η δυνατότητα προσαρμόσουμε κατ' επιλογήν κάποιες από τις οριακές συνθήκες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του υπογείου συστήματος. Η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη, που ισχύει για όλα τα παραπάνω όρια, είναι αυτή της μηδενικής ροής. Με άλλα λόγια, κάτι τέτοιο συνεπάγεται την ύπαρξη ενός περιορισμένου υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα και πλευρές.

Ο χρήστης του PTC, επιλέγοντας διάφορες εναλλακτικές οριακές συνθήκες εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, μπορεί να αναπαραστήσει και άλλες υδρολογικές συνθήκες. [7]

### 5.5.1 Οριακές Συνθήκες Σταθερού Υδραυλικού Ύψους (Dirichlet)

Οι οριακές συνθήκες αυτού του είδους καθορίζονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους που είναι καθορισμένες σε αυτούς. Ο κώδικας PTC, αυτομάτως, εξαλείφει εκείνες τις γραμμές και τις στήλες στο μητρώο των συντελεστών, οι οποίες αφορούν στους κόμβους αυτούς. Με τον τρόπο αυτό, λοιπόν, εξαλείφονται από τις

εξισώσεις μας οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους, και έτσι απομένουν τελικά  $(N \times M - N_c)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_c)$  αγνώστους.

(όπου  $N_c$  ο συνολικός αριθμός των κόμβων σταθερού υδραυλικού ύψους μέσα στην περιοχή ροής). [7]

### 5.5.2 Οριακές Συνθήκες Σταθερής Ροής (Neumann)

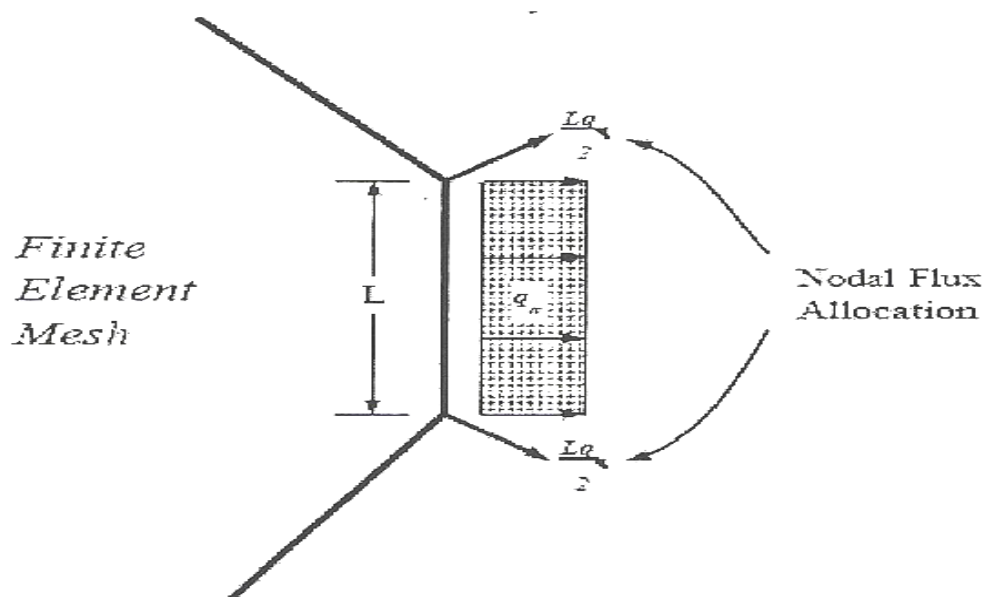
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συνιστά ένα αρκετά απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών ροής.

Μετά από εφαρμογή του θεωρήματος του Green και άλλους υπολογισμούς προέκυψε στην εξίσωση (5.6) ένας οριακός όρος, ο οποίος μπορεί να γραφτεί ξανά ως:

$$-\int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial h'}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial h'}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (5.16)$$

όπου  $q_n$  είναι η κανονική ροή διαμέσου μιας μοναδιαίας επιφάνειας (μήκος  $x$  ύψος) του κάθετου ορίου  $\sigma$ .

Όταν η ροή  $q_n$  θεωρηθεί σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ , η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης δίνει την κομβική κατανομή (σχήμα 5.2).



**Σχήμα 5.2:** Κομβική κατανομή της ροής  $q$  διαμέσου ενός στοιχείου μήκους  $L$  [7]

Επομένως, ο χρήστης πρέπει απλώς να καθορίσει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο, έτσι ώστε να αναπαραστήσει την ροή διαμέσου του ορίου. Η χωρική ολοκλήρωση που δίνει την ογκομετρική ροή εκτελείται αυτομάτως από τον κώδικα PTC. Η ροή που οφείλεται στην άντληση διατυπώνεται μαθηματικά κατά τον ίδιο τρόπο. [7]

### 5.5.3 Οριακές Συνθήκες Τρίτου Είδους (Διαρροή)

Οι οριακές συνθήκες που σχετίζονται με τη διαρροή προκύπτουν με αντικατάσταση στην εξίσωση 5.10 της:

$$Q = k_L (h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (5.17)$$

όπου

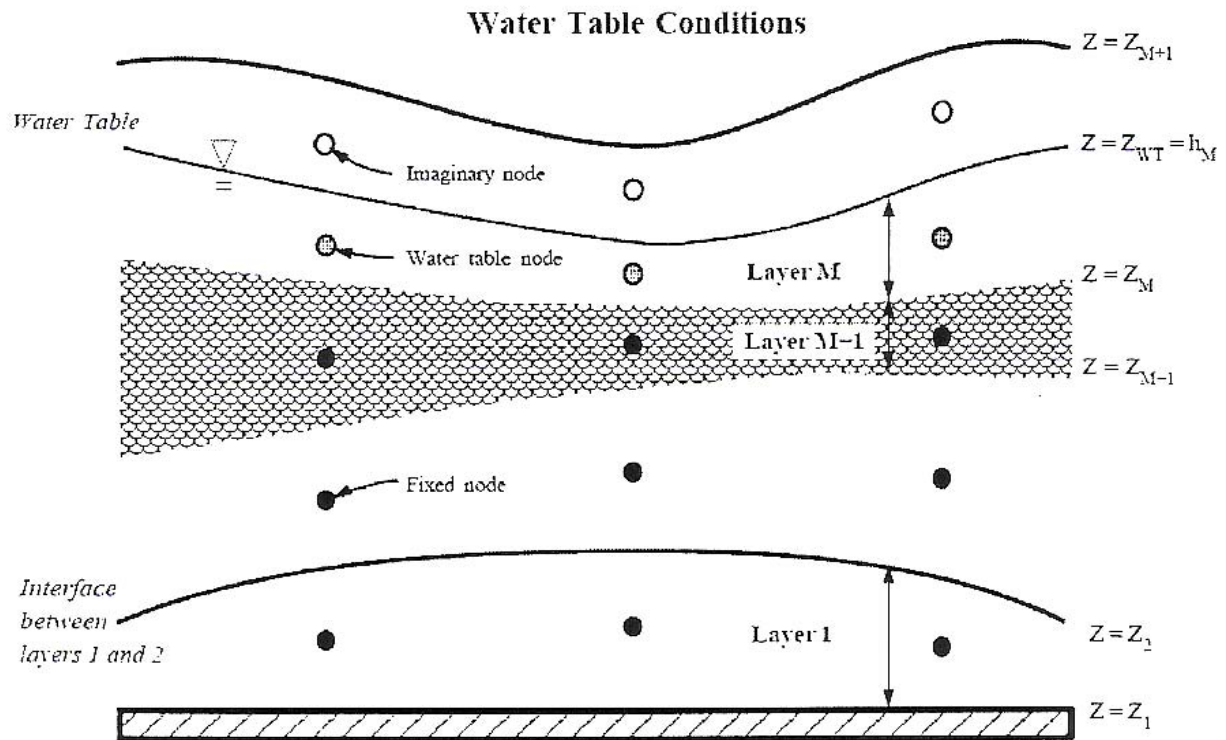
- ✓  $h_{j,k}^t$  το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j, του στρώματος k τη χρονική στιγμή t
- ✓  $h_{j,L}^t$  το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής
- ✓  $k_L$  η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς απόσταση)

Ο όρος της αγωγιμότητας ολοκληρώνεται επιφανειακά και έτσι αντιπροσωπεύει την κάθετη διαρροή. Παρόλα αυτά, με κατάλληλο καθορισμό από το χρήστη της σταθεράς  $k_L$ , μπορεί να προσδιοριστεί η διαρροή σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. [7]

## 5.6 Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα

Η επιβολή οριακών συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή για ελεύθερο υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών σχετικά με το ύψος της στάθμης του ύδατος στο ανώτερο στρώμα.

Στο σχήμα 5.3 απεικονίζεται η κατάσταση που παρουσιάζει ένας κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος υπόκειται σε διήθηση μεγέθους  $R(x, y, t)$ .



**Σχήμα 5.3:** Ο Υδροφόρος ορίζοντας και οι συνθήκες που επικρατούν στο άνω στρώμα. Οι επιφάνειες που δηλώνονται με  $z=z_1, \dots, z=z_{M+1}$  είναι τα σταθερά όρια στο χώρο, τα οποία καθορίζουν τα στρώματα [7]

Το σταθερό υψόμετρο του άνω ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση  $z = z_{M+1}(x, y, t)$ , ενώ το πραγματικό υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα δηλώνεται από τη σχέση  $z = z_{WT}(x, y, t)$ .

Σύμφωνα με την πρώτη οριακή συνθήκη, το ύψος της στάθμης του ύδατος στο ανώτερο στρώμα ( $h_M$ ) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο στρώμα αυτό ( $z_{WT} - z_M$ ).

$$\text{Επομένως, σε κάθε κόμβο απαιτείται } (z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (5.18)$$

Στην παρούσα εργασία, υποθέτουμε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πάντοτε τοποθετημένος εντός του ανώτερου στρώματος ( $k = M$ ). Οπότε, όταν ο κώδικας υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο άνω στρώμα, ελέγχει ταυτόχρονα και το εάν οι τιμές του  $h_M$  στους κόμβους βρίσκονται μεταξύ των υψομέτρων που δίνονται από τη σχέση:

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (5.19)$$

Εάν η παραπάνω συνθήκη (5.19) παραβιάζεται, τότε το πρόγραμμα εμφανίζει το αντίστοιχο μήνυμα και δηλώνει την θέση του κόμβου, το πάχος του υδροφορέα του άνω στρώματος και όλες τις υπόλοιπες πληροφορίες που σχετίζονται με την παραβίαση αυτή. Έπειτα, η εκτέλεση του προγράμματος τερματίζεται. Πρέπει να τονιστεί, επίσης, ότι η εξίσωση (5.19) είναι απαραίτητο να ικανοποιεί και τις αρχικές οριακές συνθήκες για τα υδραυλικά ύψη.

Εφόσον το  $z_{WT}$  ορίζει το πάχος του άνω στρώματος του υδροφορέα, το οποίο εμφανίζεται στα μητρώα των συντελεστών, η εξίσωση (5.18) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων της ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα της λύσης αντιμετωπίζεται μέσω επαναλήψεων στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου. Οι επαναλήψεις εκτελούνται με ορισμένο χρονικό βήμα, και σταματούν όταν η μεταβολή του  $h$  γίνει μικρότερη μιας προκαθορισμένης ανεκτής τιμής. Οι υπολογισμοί τότε προάγονται στο επόμενο χρονικό βήμα και συνεχίζονται οι επαναλήψεις.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη για τον υδροφόρο ορίζοντα περιγράφει την μεταβλητή απόκρισή του στη διήθηση. Η εξίσωση που περιγράφει την κατάσταση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (5.20)$$

όπου  $S_y$  η ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα. [7]

## 5.7 Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπων

### 5.7.1 Βασικές Εξισώσεις

Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα η εξίσωση μεταφοράς της μάζας είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \\ & + Q (c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Οι όροι της διασποράς στην εξίσωση 5.21 ορίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\
 D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M \\
 D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\
 D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \\
 D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

όπου

- ✓  $D_M$  ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, που συνήθως έχει μικρή τιμή ( $L^2/T$ )
- ✓  $a_L$  ο συντελεστής διαμήκους διασποράς ( $L$ )
- ✓  $a_T$  ο συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς ( $L$ )
- ✓  $a_V$  ο συντελεστής κάθετης εγκάρσιας διασποράς ( $L$ )
- ✓  $V$  το μέτρο του διανύσματος της ταχύτητας ( $L/T$ )  $\left( V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \right)$
- ✓  $c$  η χημική συγκέντρωση στο σημείο  $(x, y, z)$  τη χρονική στιγμή  $t$  ( $M/L^3$ )
- ✓  $\theta$  το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο)
- ✓  $E(c)$  η συνάρτηση που αναπαριστά τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης
- ✓  $Q$  η ισχύς της άντλησης (πηγής / δεξαμενής) ( $1/T$ )  $[Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)]$
- ✓  $Q_i$  ο ρυθμός ογκομετρικής άντλησης ή ογκομετρικού εμπλουτισμού στο σημείο  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $L^3/T$ )
- ✓  $c^w$  η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο με συντεταγμένες  $(x_i, y_i, z_i)$  ( $M/L^3$ )
- ✓  $\delta()$  η συνάρτηση δέλτα του Dirac

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ( $Q_i < 0$ ), υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου (ρευστού) νερού  $c^w$  στην αντλία ισούται με τη συγκέντρωση του περιβάλλοντος νερού  $c$ . Επομένως, όποτε χρησιμοποιείται αντλία εκκένωσης ο όρος  $Q = (c^w - c)$  στην εξίσωση 5.20 θα ισούται με μηδέν. Άρα, ο κώδικας PTC διατηρεί τους όρους που περιέχουν το  $Q$  στην εξίσωση 5.21, μόνο όταν έχουμε αντλία εμπλουτισμού του υδροφορέα ( $Q_i > 0$ ), όπου το  $c^w$  στην περίπτωση αυτή δηλώνει τη συγκέντρωση του ρευστού που εγχύεται.

## **6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ**

### **6.1 Εισαγωγή**

Στις αρχές της δεκαετίας του 50' πρωτοεμφανίστηκαν τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης και εύρεσης λύσης στα μεγάλα προβλήματα που σχετίζονταν με δεξαμενές αποθήκευσης λαδιού. Αργότερα, η προσπάθεια αυτή επεκτάθηκε με στόχο την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης της ποιότητας και της ποσότητας του υπόγειου ύδατος. Τα μοντέλα αυτά συνδέουν και λύνουν ταυτόχρονα τις βασικές εξισώσεις της υπόγειας ροής, της μεταφοράς μάζας και της χημικής αντίδρασης.

Στις αρχές της δεκαετίας του 70', τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης άρχισαν να συνδέονται με τεχνικές βελτιστοποίησης και με τον τρόπο αυτό έγιναν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών για τη λύση προβλημάτων διαχείρισης του υπόγειου ύδατος. Το κίνητρο της προσπάθειας συσχέτισης της προσομοίωσης με τη βελτιστοποίηση ήταν η επιθυμία καθορισμού της βέλτιστης λύσης (ανάμεσα σε αρκετές εφικτές λύσεις), που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κάθε ένα από τα προβλήματα διαχείρισης του υπόγειου ύδατος.

Τα μοντέλα προσομοίωσης συχνά κρίνονται ως ανεπαρκή διότι τα προβλήματα που αφορούν στη διαχείριση των υδροφορέων δεν σχετίζονται μόνο με την πρόβλεψη, αλλά και με την βελτιστοποίηση. Ο ρόλος της τελευταίας είναι να καθορίσει την καλύτερη λειτουργική τακτική σε κάθε πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους περιορισμούς.

Ο συνδυασμός της υπόγειας προσομοίωσης και των τεχνικών βελτιστοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως μία οργανωμένη μέθοδος δοκιμής και λάθους, στην οποία όμως το αντικείμενο, δηλαδή οι περιορισμοί και οι στρατηγικές εξεύρεσης της λύσης, είναι ξεκάθαρα καθορισμένο.

[9]

## 6.2 Εφαρμογές της Βελτιστοποίησης για Μηχανικούς

Ορισμένες από τις συχνότερες εφαρμογές των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι οι εξής:

- Σχεδιασμός αεροσκαφών (π.χ. για να επιτευχθεί το μέγιστο ή το ελάχιστο των τριβών).
- Σχεδιασμός κτιρίων, γεφυρών, ουρανοξυστών (π.χ. υπολογισμός μέγιστου φορτίου).
- Σχεδιασμός υδατικών πόρων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του οφέλους και τη βέλτιστη κατανομή της ποσότητας, έτσι ώστε να καλύπτονται οι κοινωνικές ανάγκες.
- Σχεδιασμός μονάδων χημικών και βιολογικών διεργασιών.
- Σχεδιασμός ηλεκτρικών δικτύων.

Στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη διατήρηση οποιουδήποτε συστήματος οι μηχανικοί έχουν να λάβουν πολλές τεχνολογικές και διαχειριστικές αποφάσεις. Ο επιδιωκόμενος σκοπός σε όλες τις αποφάσεις είναι να ελαχιστοποιήσουμε την καταβαλλόμενη προσπάθεια και να αυξήσουμε το όφελος. [9]

## 6.3 Κατηγορίες και Παράμετροι Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης:

- Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα προβλήματα στα οποία σκοπός μας είναι η βελτιστοποίηση της κατάστασης του συστήματος. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι η μεγιστοποίηση ενός υδροδυναμικού έργου για την παραγωγή ενέργειας, η ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης ενός ρυπαντή σε ένα υδατικό σύστημα (επιφανειακό ή υπόγειο), η μεγιστοποίηση μιας υδάτινης παροχής κ.λ.π.
- Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα προβλήματα στα οποία σκοπός μας είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης, δηλαδή η ελαχιστοποίηση του κόστους με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του οφέλους.

Κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται μαθηματικά σαν ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία υπόκειται σε ένα σύνολο περιορισμών, όπως φυσικούς, τεχνικούς και/ή κοινωνικούς.

Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται σε κάθε μαθηματική διατύπωση διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- i) τις ελεγχόμενες παραμέτρους ή παραμέτρους απόφασης, οι οποίες σχετίζονται με διάφορες εξωτερικές επεμβάσεις
- ii) τις μη ελεγχόμενες παραμέτρους, οι οποίες σχετίζονται με το φυσικό σύστημα και καλούνται παράμετροι συστήματος ή κατάστασης. [9]

#### **6.4 Μεθοδολογίες Επίλυσης Προβλημάτων Βέλτιστης Διαχείρισης Υπογείων Υδάτων**

Ένα από τα πλέον κλασικά παραδείγματα εφαρμογής της βελτιστοποίησης, το οποίο βοηθά στην κατανόηση της γενικής μεθοδολογίας επίλυσης παρόμοιων προβλημάτων, είναι το ακόλουθο:

Ένας υδροφορέας αποτελεί τη βασική πηγή για την υδροδότηση μιας περιοχής. Υπάρχει μια ελάχιστη ποσότητα ύδατος που απαιτείται για την κάλυψη της ημερήσιας ζήτησης από τους κατοίκους. Επίσης, υπάρχει και ένα ανώτερο όριο στην ποσότητα του ύδατος που ο υδροφορέας μπορεί να αποδώσει σε ημερήσια βάση. Αυτός ο περιορισμός τίθεται διότι σε κάθε περίπτωση η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να παραμένει πάνω από ένα όριο, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ουσιώδης υπόγεια ροή του ύδατος. Επιπρόσθετα, οι σταθμοί άντλησης (πηγάδια) έχουν ένα μέγιστο δυναμικό άντλησης ύδατος, ανάλογα με την αντλία που χρησιμοποιείται.

Ο σχεδιασμός από τον αρμόδιο μηχανικό έχει ως σκοπό να καθορίσει τον αριθμό των πηγαδιών που πρέπει να εγκατασταθούν στην περιοχή, την ακριβή θέση αυτών καθώς και την ποσότητα του ύδατος που θα αντλεί το κάθε πηγάδι, έτσι ώστε όλοι οι παραπάνω περιορισμοί να ικανοποιούνται και συνολικά η διαδικασία να περατώνεται με το ελάχιστο δυνατό κόστος. [9]

### 6.4.1 Προβλήματα Ποσοτικής Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος

Προσεγγίζοντας το παραπάνω πρόβλημα σαν ένα πρόβλημα ποσοτικής διαχείρισης, δηλαδή σαν ένα πρόβλημα που περιλαμβάνει περιορισμούς μόνο για τα υδραυλικά ύψη και για τους ρυθμούς άντλησης, η διατύπωσή του γίνεται ως εξής:

#### **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ**



#### **ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ**

#### **ΥΠΟ ΤΟΥΣ ΕΞΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ:**

- Η συνολική ποσότητα του ύδατος που αντλείται να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την ελάχιστη ποσότητα που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών των κατοίκων της πόλης.
- Η άντληση να μην χαμηλώνει τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο.
- Ο ρυθμός άντλησης σε κάθε πηγάδι να μην ξεπερνά μια προκαθορισμένη μέγιστη τιμή η οποία αντιστοιχεί σε κάθε τύπο αντλίας.

Οι μεταβλητές του προβλήματος, που αναγνωρίζονται από την παραπάνω περιγραφή, είναι ο ρυθμός άντλησης κάθε πηγαδιού (μεταβλητή απόφασης) και τα υδραυλικά ύψη (μεταβλητές κατάστασης).

Αρχικά, δημιουργούμε την προσομοίωση του υπογείου συστήματος ύδατος. Κάτι τέτοιο απαιτεί τον καθορισμό της περιοχής ενδιαφέροντος καθώς και τη συλλογή όλων των πληροφοριών σχετικές με τις παραμέτρους του φυσικού συστήματος. Αυτές οι πληροφορίες αφορούν στη τοπογραφία, τη μετεωρολογία, τη γεωλογία, τη σχέση επιφανειακών και υπογείων υδάτων της περιοχής κ.α.

Πιο συγκεκριμένα οι πληροφορίες αυτές πρέπει να περιλαμβάνουν:

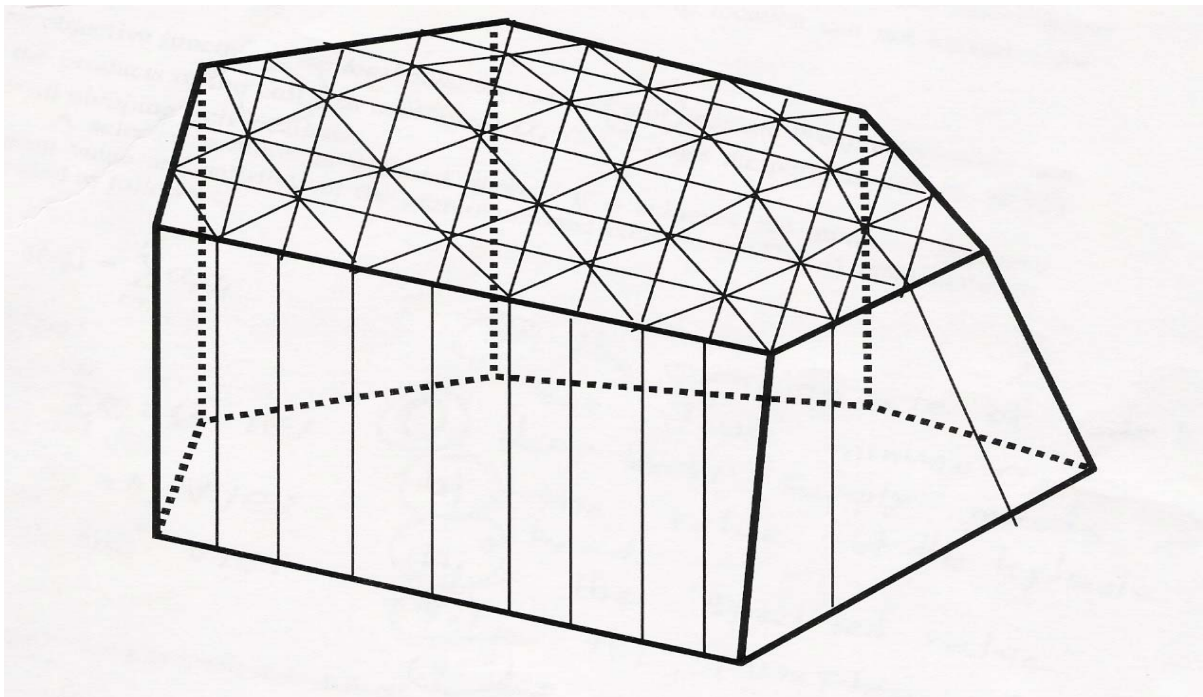
- Δεδομένα για τις γεωλογικές παραμέτρους, όπως πορώδες, υδραυλική αγωγιμότητα, βάθος του υδροφορέα, αποθηκευτικότητα κ.λ.π.
- Αρχικές και οριακές συνθήκες όπως

- Αρχική στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, τοπογραφικά δεδομένα, μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ. ύψος βροχόπτωσης).
- Συνθήκες σχετικές με την αλληλεπίδραση του επιφανειακού και του υπόγειου ύδατος (υπάρχουσες λίμνες, ποτάμια, δεξαμενές).

Στη συνέχεια, ακολουθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου, ώστε να διασφαλιστεί ότι δίνει μία ακριβή αναπαράσταση των συνθηκών του πεδίου με όσο το δυνατόν λιγότερες αποκλίσεις από την πραγματικότητα.

Κατόπιν, το αριθμητικό αυτό μοντέλο προσομοίωσης συνδέεται με το μοντέλο βελτιστοποίησης. Το τελευταίο συλλέγει τις μεταβλητές απόφασης, τις προωθεί στο αριθμητικό μοντέλο και εκτιμά τους υφιστάμενους περιορισμούς. Η βέλτιστη λύση καθορίζει τις τιμές των μεταβλητών απόφασης (ρυθμοί άντλησης) για τις οποίες η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται και όλοι οι περιορισμοί ικανοποιούνται.

Οι μεταβλητές απόφασης και κατάσταση καθορίζονται ως εξής: το φυσικό σύστημα αναπαριστάται με τη κατασκευή ενός δικτύου πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων, σε δισδιάστατο ή σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων (σχήμα 6.1).



**Σχήμα 6.1:** Τρισδιάστατο (3-d) βρογχωτό δίκτυο [9]

Η θέση των μεταβλητών απόφασης μπορεί να οριστεί σε οποιονδήποτε από τους κόμβους του βρογχωτού δικτύου, κατά την κρίση του μηχανικού που χειρίζεται το σύστημα. Διάφοροι κόμβοι μπορούν να θεωρηθούν σαν πιθανές θέσεις πηγαδιών.

Έστω  $\mathbf{I}=\{1, \dots, n\}$  το σύνολο των επιλεγμένων πιθανών θέσεων των σταθμών άντλησης και  $\mathbf{q}_i$  να δηλώνει το ρυθμό άντλησης που αντιστοιχεί στον κόμβο  $i$  του πλέγματος ( $i \in \mathbf{I}$ ). Το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης  $\mathbf{q}$  ορίζεται ως  $\mathbf{q}=[\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n]$ . Από τις προτεινόμενες θέσεις των γεωτρήσεων το μοντέλο βελτιστοποίησης θα επιλέξει τις “καλύτερες” θέσεις ενεργοποίησης των πηγαδιών. Σύμφωνα με τους περιορισμούς του προβλήματος το σύνολο των ρυθμών άντλησης ( $\Sigma \mathbf{q}_i$ ) πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με την ελάχιστη ζήτηση ύδατος για την κάλυψη των αναγκών των κατοίκων της περιοχής σε ημερήσια βάση  $\mathbf{Q}^*$ . Αυτός είναι ο πρώτος περιορισμός στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σύμφωνα με το δεύτερο περιορισμό το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε συγκεκριμένες θέσεις πρέπει να παραμένει πάντοτε πάνω από μία ορισμένη στάθμη έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπέρμετρη άντληση. Έστω  $\mathbf{J}$  το σύνολο των σημείων (κόμβων) όπου παρατηρούνται τα υδραυλικά ύψη. Σε καθένα από αυτά τα σημεία η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα  $\mathbf{h}_j$  πρέπει να είναι πάντα ίση ή μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή  $\mathbf{h}_j^*$ .

Τέλος, υπάρχει ένα όριο σχετικά με την ποσότητα του ύδατος που μπορεί να αντληθεί από κάθε πηγάδι  $\mathbf{q}_i$  και η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο  $\mathbf{q}_i^*$ .

Στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή του συνολικού κόστους άντλησης στη μονάδα του χρόνου. Το κόστος αυτό εκφράζεται ως το άθροισμα των γινομένων ενός συντελεστή κόστους  $\mathbf{a}_i$  ( $\text{€}/\text{L}^3$ ) επί το ρυθμό άντλησης  $\mathbf{q}_i$  ( $\text{L}^3/\text{T}$ ) για το σύνολο των πηγαδιών της περιοχής.

Μια λύση ορίζεται ως βέλτιστη εάν επιτυγχάνει το ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης και ταυτόχρονα ικανοποιεί όλους τους προαναφερθέντες περιορισμούς.

Συνολικά, τα παραπάνω εκφράζονται μαθηματικά ως εξής:

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

**subject to:**

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

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

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

Η βελτιστοποίηση και η μαθηματική προσομοίωση στο συγκεκριμένο πρόβλημα συνδέονται ως εξής: Το μοντέλο βελτιστοποίησης επιλέγει εκείνο το συνδυασμό των πηγαδιών άντλησης ο οποίος ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση (συνολικό κόστος). Στη συνέχεια η πληροφορία αυτή οδηγείται στον αριθμητικό προσομοιωτή και εκτελείται το μοντέλο. Τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο στη φάση αυτή είναι οι τιμές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε κόμβο. Οι τιμές αυτές αποστέλλονται στον αλγόριθμο της βελτιστοποίησης, ο οποίος εκτιμά τους περιορισμούς (υδραυλικά ύψη και ανώτερα όρια άντλησης), και εφόσον όλοι ικανοποιούνται προκύπτει η βέλτιστη λύση.

Εάν κάποιος από τους περιορισμούς παραβιάζεται, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει έναν νέο συνδυασμό για τους ρυθμούς άντλησης και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Το παράδειγμα που παρουσιάστηκε αναλυτικά είναι μια τυπική περίπτωση προβλήματος *ποσοτικής διαχείρισης του υπόγειου ύδατος*. [9]

#### 6.4.2 Προβλήματα Ποιοτικής Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος

Η ίδια διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην λύση προβλημάτων *ποιοτικής διαχείρισης του υπόγειου ύδατος*, δηλαδή σε προβλήματα που περιλαμβάνουν περιορισμούς μόνο για τις συγκεντρώσεις και για τους ρυθμούς άντλησης. Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμητικός προσομοιωτής συνδέει την εξίσωση της υπόγειας ροής με την εξίσωση μεταφοράς μάζας του ρυπαντή. Το σημείο εκκίνησης στα προβλήματα αυτά είναι ο καθορισμός της θέσης και της περιμέτρου του πλουμίου του ρυπαντή. Έτσι, καθορίζονται οι

αρχικές συνθήκες σχετικά με τη συγκέντρωση του ρυπαντή στην αρχή της περιόδου εξυγίανσης. Σε κάθε κόμβο του πλέγματος ορίζεται μία τιμή συγκέντρωσης. Ομοίως με τα προβλήματα ποσοτικής διαχείρισης υπάρχουν κάποιοι κόμβοι παρατήρησης της συγκέντρωσης. Ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης εκτιμά τη συγκέντρωση στα σημεία παρατήρησης  $C_j$ ,  $j \in J$  και διασφαλίζει ότι η τιμή τους παραμένει χαμηλότερα από την προκαθορισμένη στάθμη. [9]

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι η εξής:

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

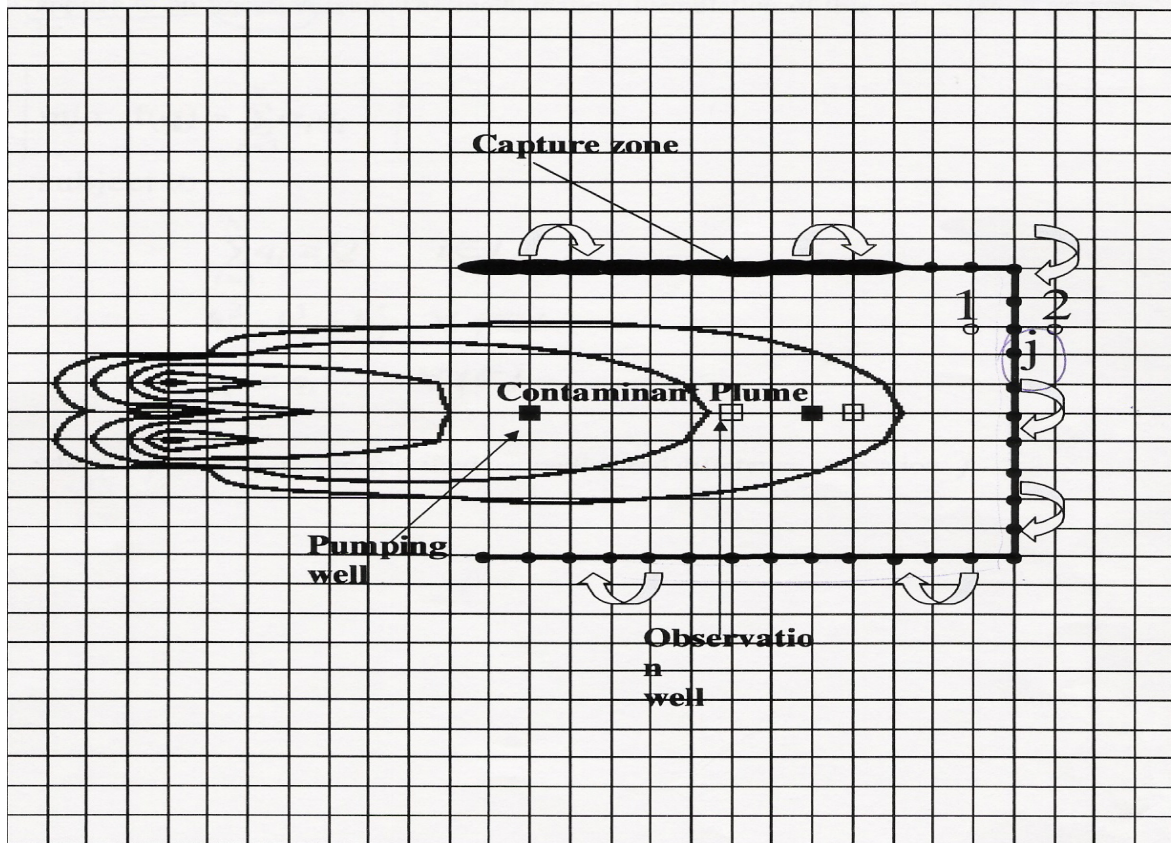
**subject to:**

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

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

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

Αρκετές φορές ένα πρόβλημα ποιοτικής διαχείρισης προσεγγίζεται σαν ένα “πρόβλημα που εξετάζει τον περιορισμό της ζώνης ρύπανσης”. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι απαραίτητη μια *μέθοδος ελέγχου της υδραυλικής κλίσης*, η οποία θα αποτρέψει την κίνηση του ρυπαντικού πλουμίου προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό εάν δημιουργηθεί μια υδραυλική κλίση περιμετρικά του πλουμίου (ζώνη περιορισμού ή ζώνη εγκλωβισμού) που θα διασφαλίζει ότι η υπόγεια ροή έχει κατεύθυνση προς το εσωτερικό της ζώνης αυτής.



**Σχήμα 6.2:** Μέθοδος υδραυλικού ελέγχου [9]

Το υπόγειο νερό πρέπει να ρέει εσωτερικά της γραμμής που ορίζει τη ζώνη εγκλωβισμού. Οι περιορισμοί τίθενται σε συγκεκριμένα σημεία κατά μήκος της γραμμής αυτής. Σε κάθε σημείο  $j$  της γραμμής απαιτείται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στη θέση 2 να είναι μεγαλύτερο από ότι στη θέση 1.

Ο σχεδιασμός εξυγίανσης περιλαμβάνει διάφορες πιθανές θέσεις πηγαδιών τα οποία μπορεί να είναι είτε πηγάδια άντλησης μέσα στη ζώνη εγκλωβισμού, είτε πηγάδια εμπλουτισμού εκτός της ζώνης. Ο ρόλος ενός πηγαδιού άντλησης είναι να μειώσει το υδραυλικό ύψος σε συγκεκριμένο σημείο της περιοχής. Το αντίθετο συμβαίνει με τα πηγάδια εμπλουτισμού.

Η μαθηματική διατύπωση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι:

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

**subject to:**

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

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

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

(όπου  $b_j^*$  δηλώνει την προκαθορισμένη διαφορά του υδραυλικού ύψους στη θέση  $j$ ).

### 6.4.3 Μικτά Προβλήματα Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν να έχουμε ένα *μικτό πρόβλημα διαχείρισης*, το οποίο να περιέχει περιορισμούς και για τα υδραυλικά ύψη και για τις συγκεντρώσεις. [9]

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος αυτού τότε είναι:

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

**subject to:**

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

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

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

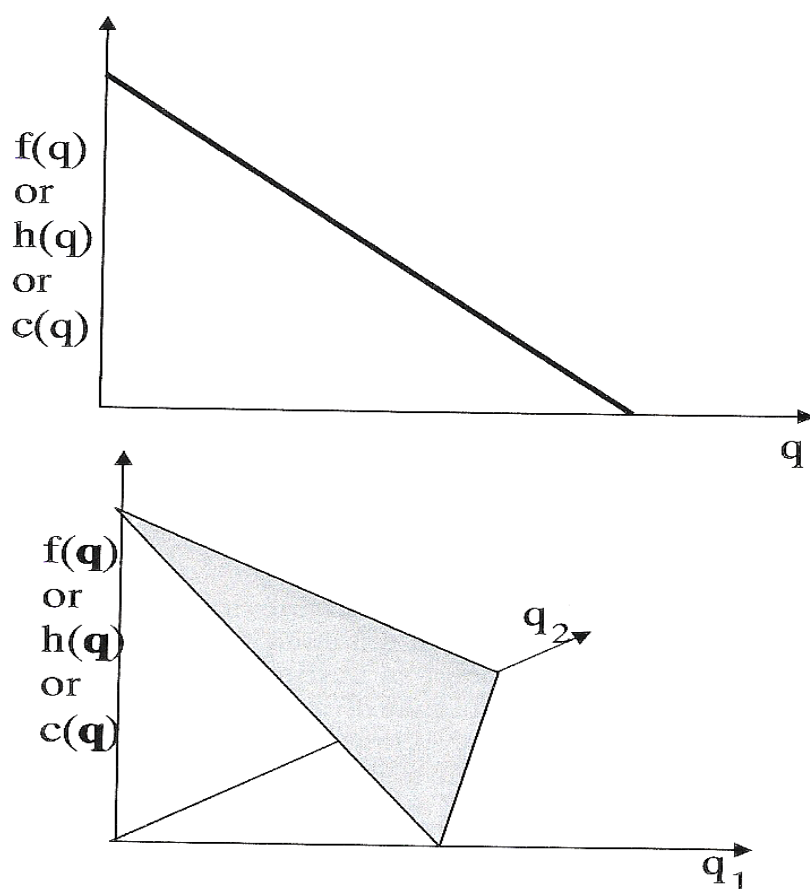
$$q_i \leq q_i^* \quad \forall i \in I$$

### 6.5 Μαθηματικά των Προβλημάτων Διαχείρισης Υπόγειου Ύδατος

Τα προβλήματα διαχείρισης υπόγειου ύδατος μπορεί να είναι από πολύ απλά έως αρκετά περίπλοκα, ανάλογα με τη διατύπωση του εκάστοτε προβλήματος.

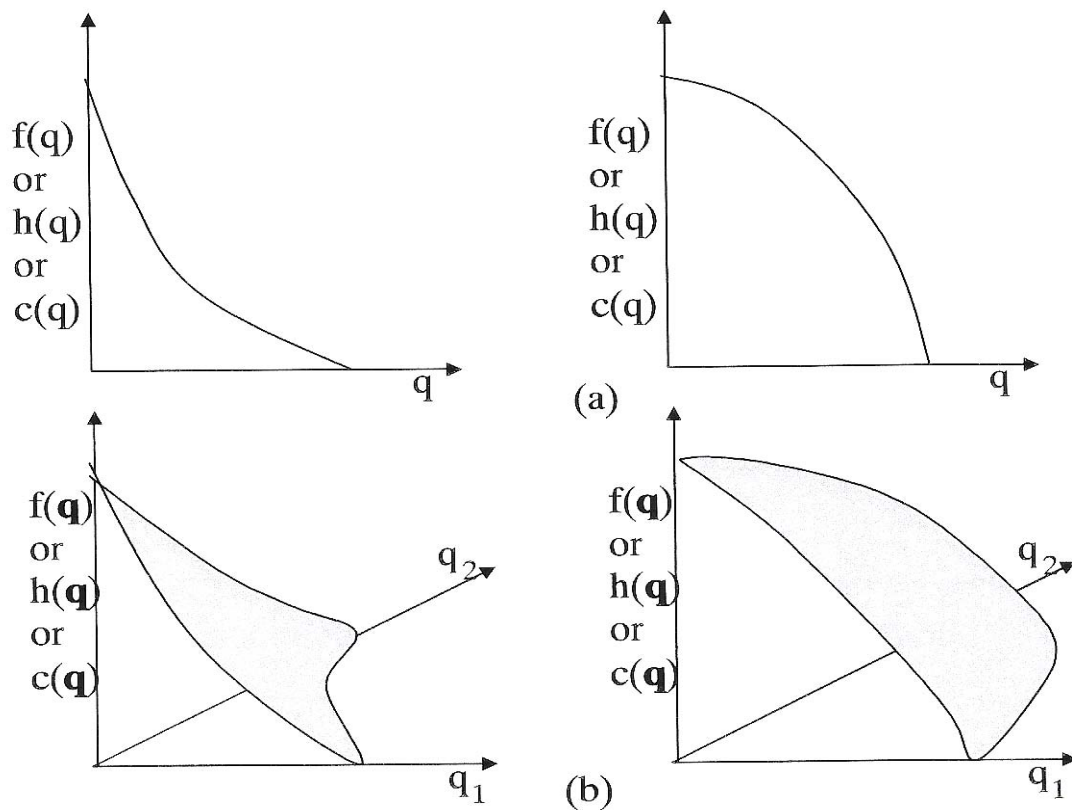
Όταν η αντικειμενική συνάρτηση και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικοί, τότε το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως γραμμικό και άρα εύκολα επιλύσιμο. Επίσης, προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές απόφασης δεν εμφανίζονται υψωμένες σε κάποια δύναμη ή σε κλασματική μορφή παρουσιάζουν και αυτά γραμμική συμπεριφορά. Η γεωμετρική αναπαράσταση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης ή ενός γραμμικού περιορισμού αντιστοιχεί σε μια ευθεία γραμμή για προβλήματα με μια μεταβλητή απόφασης (μονοδιάστατα προβλήματα

1-D), σε ένα επίπεδο για δισδιάστατα 2-D προβλήματα ή σε ένα υπερεπίπεδο για προβλήματα σε περισσότερες διαστάσεις. [9]



**Σχήμα 6.3:** Γραμμική συμπεριφορά συνάρτησης σε μονοδιάστατα και σε δισδιάστατα προβλήματα [9]

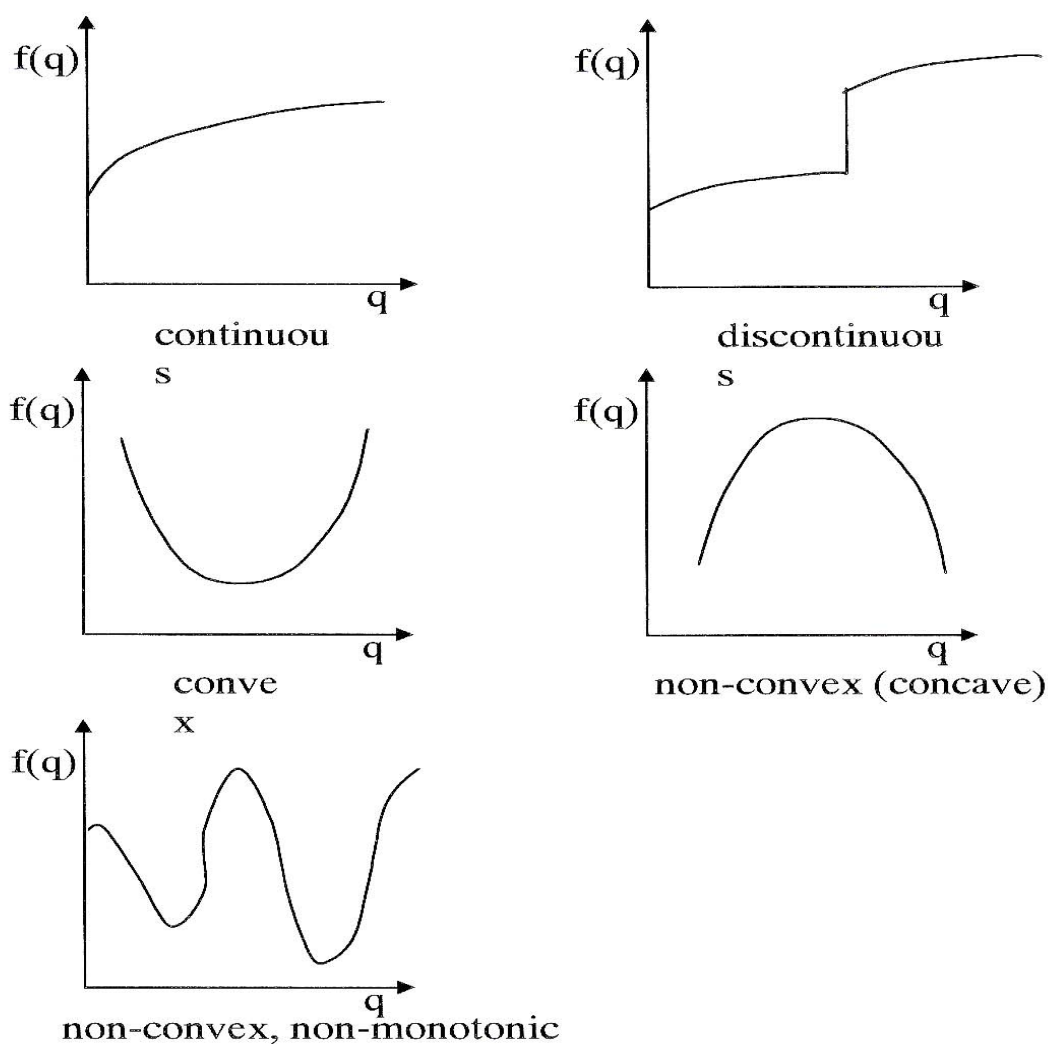
Πιο περίπλοκη αντιμετώπιση έχουν τα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση ή κάποιος από τους περιορισμούς είναι μη-γραμμικός.



**Σχήμα 6.4:** Μη γραμμική συμπεριφορά συνάρτησης σε μονοδιάστατα και σε δισδιάστατα προβλήματα [9]

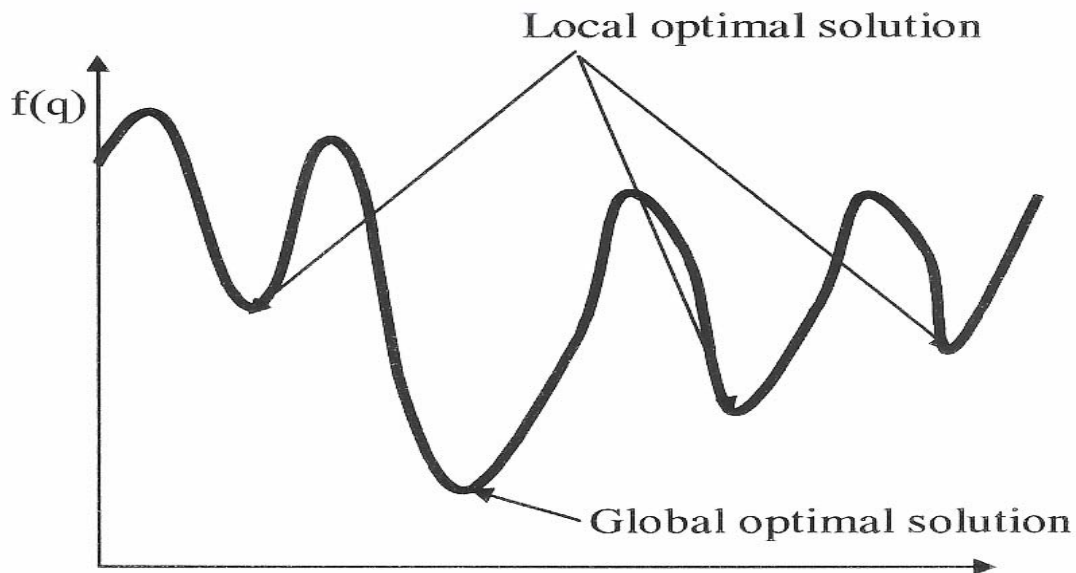
Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι περιορισμοί για τα υδραυλικά ύψη και για τις υδραυλικές κλίσεις παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με το ρυθμό άντλησης. Εάν και η αντικειμενική συνάρτηση είναι επίσης γραμμική, τότε το πρόβλημα διαχείρισης χαρακτηρίζεται ως *γραμμικό*. Η αριθμητική προσομοίωση των γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνει μόνο εξισώσεις ροής. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να τονιστεί πως για να επιδεικνύουν οι παραπάνω περιορισμοί γραμμική συμπεριφορά, πρέπει ο υδροφορέας να βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή να μην παρουσιάζει μεταβολές στη μονάδα του χρόνου. Στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης είναι συνήθως μεγαλύτερος του αριθμού των περιορισμών. Τα προβλήματα αυτά λύνονται με τη χρήση κλασικών μεθόδων, η γνωστότερη από τις οποίες είναι η Simplex Method, αλλά και με τη βοήθεια προγραμμάτων (υπολογιστικών πακέτων), όπως το Lindo, Minos, Modman.

Τα προβλήματα διαχείρισης του υπόγειου ύδατος που περιλαμβάνουν και περιορισμούς συγκέντρωσης είναι *μη-γραμμικά*, εφόσον η εξίσωση μεταφοράς μάζας έχει μη-γραμμική συμπεριφορά, και είναι γνωστά ως “προβλήματα ποιοτικής διαχείρισης”. Στην περίπτωση αυτή η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη-γραμμική. Η επίλυση αυτών των προβλημάτων είναι περισσότερο περίπλοκη και έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Ο βαθμός της δυσκολίας επίλυσής τους εξαρτάται κυρίως από τη συμπεριφορά των εξισώσεων της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση η μαθηματική διατύπωση θα αφορά στην ελαχιστοποίηση (π.χ. ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους) ή στην μεγιστοποίηση (π.χ. μεγιστοποίηση της συνολικής άντλησης) μιας συνάρτησης και μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Μια μη-γραμμική συνάρτηση μπορεί να είναι συνεχής ή μη συνεχής, κοίλη ή κυρτή, μονότονη ή μη μονότονη.



**Σχήμα 6.5:** Τυπικές συμπεριφορές αντικειμενικής συνάρτησης [9]

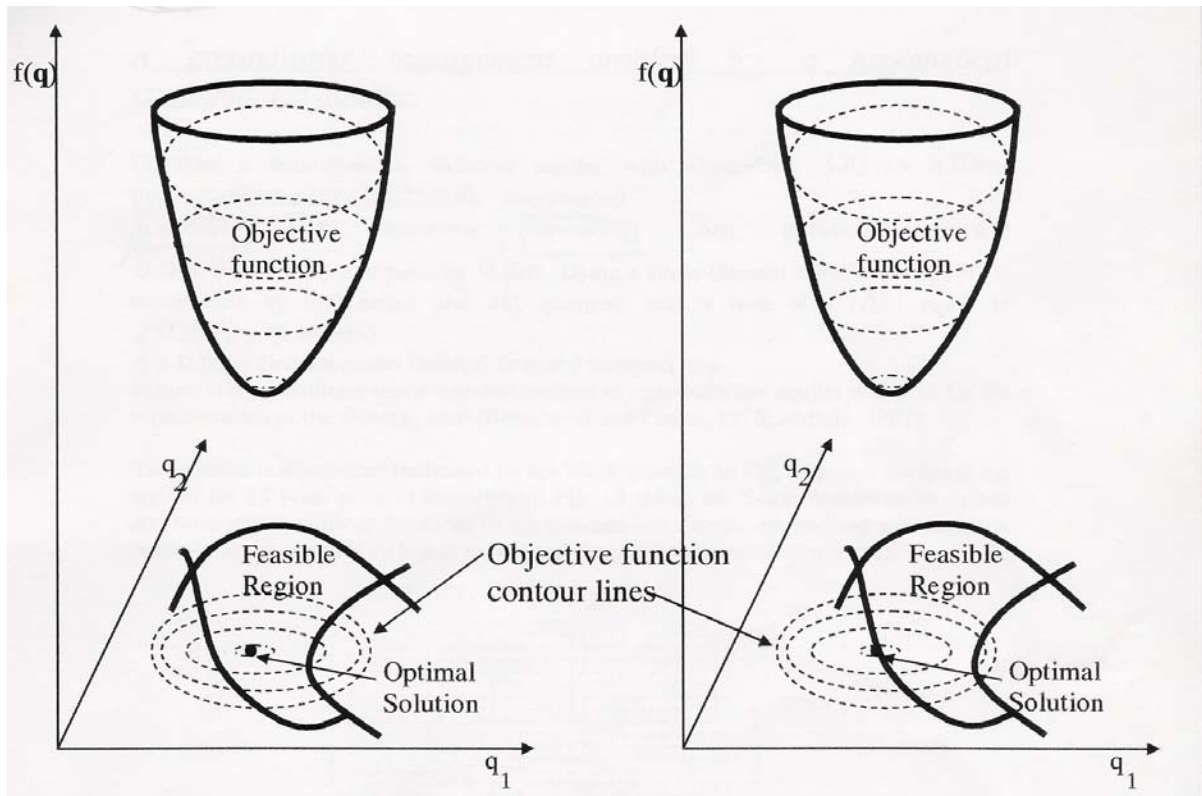
Η πλέον περίπλοκη περίπτωση είναι αυτή της κοίλης, μη μονότονης συνάρτησης διότι οι περισσότερες από τις τεχνικές βελτιστοποίησης αντιμετωπίζουν πρόβλημα στο να καθορίσουν το “σφαιρικό βέλτιστο” και γι αυτό τερματίζουν τη διαδικασία σε ένα “τοπικό βέλτιστο”.



**Σχήμα 6.6:** Τοπικό και σφαιρικό βέλτιστο σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης [9]

Οι εξισώσεις των περιορισμών μπορούν και αυτές να είναι γραμμικές ή μη-γραμμικές, κοίλες ή κυρτές.

Όταν σε ένα πρόβλημα υπάρχουν περισσότεροι του ενός περιορισμοί τότε η *εφικτή περιοχή* ορίζεται από την διασταύρωση (σημείο τομής) όλων των περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να τεθεί εντός της εφικτής περιοχής. Η βέλτιστη λύση μπορεί να βρεθεί είτε εντός της εφικτής περιοχής, είτε περιμετρικά αυτής. [9]



**Σχήμα 6.7:** Γεωμετρική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης, της εφικτής περιοχής και της βέλτιστης λύσης σε ένα δισδιάστατο πρόβλημα ελαχιστοποίησης [9]

## 6.6 Η Μέθοδος της Εξωτερικής Προσέγγισης (ΟΑ)

Στο παρελθόν τα προβλήματα ποσοτικής διαχείρισης του υπόγειου ύδατος, που υπόκεινται σε συγκεκριμένους περιορισμούς, διατυπώθηκαν σαν μικτά προβλήματα ακέραιου και γραμμικού προγραμματισμού.

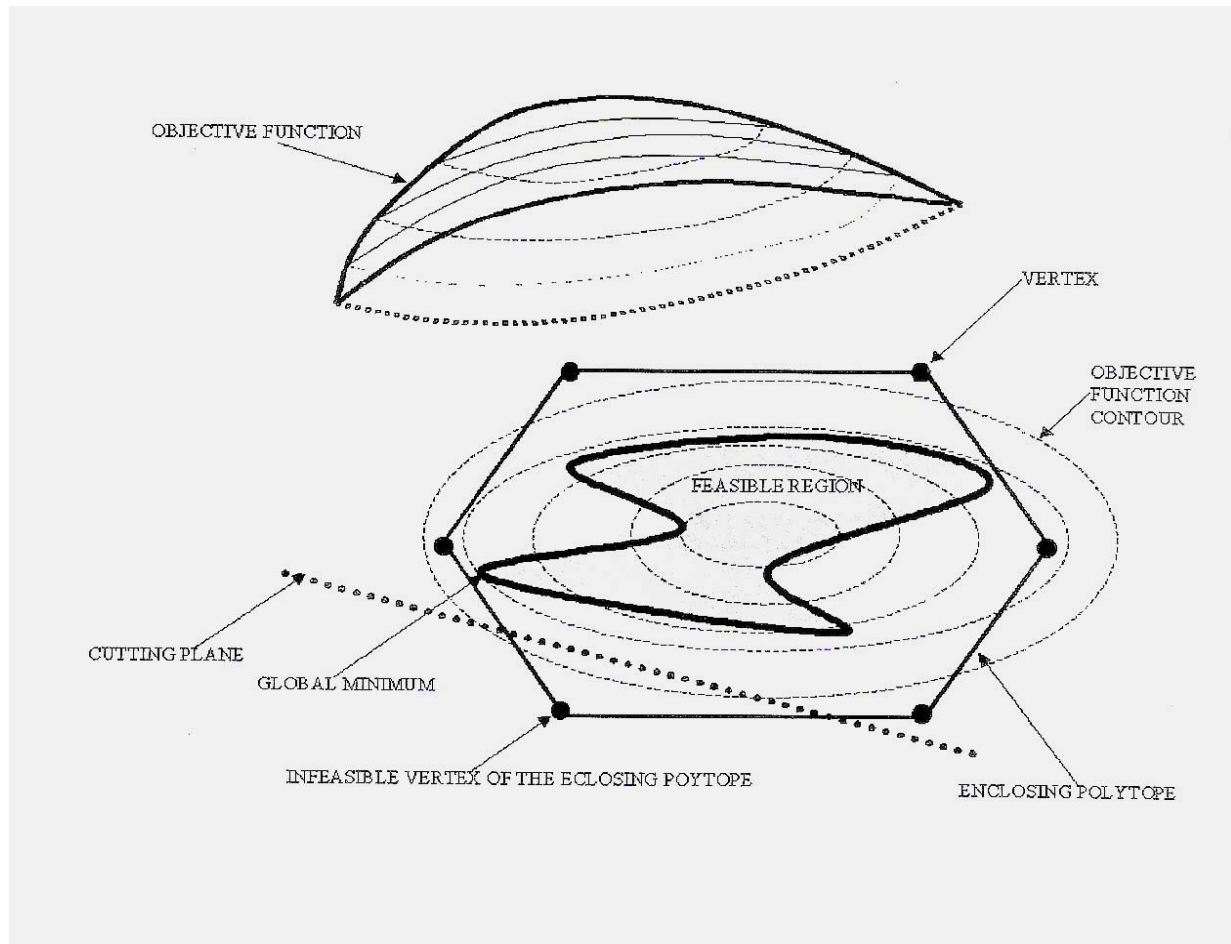
Η ελαχιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης που υπόκειται σε ένα σύνθετο σύνολο περιορισμών έλαβε ιδιαίτερη προσοχή από πολλούς μαθηματικούς για διάφορους λόγους. Πρώτον, διότι πρόκειται για ένα πρόβλημα ολικής ελαχιστοποίησης το οποίο δεν μπορούν να χειριστούν οι υπόλοιπες κλασικές μέθοδοι τοπικής ελαχιστοποίησης. Δεύτερον, διότι πολλά πρακτικά προβλήματα μπορούν να διατυπωθούν σαν προβλήματα κοίλου προγραμματισμού. Τρίτον, ο κοίλος προγραμματισμός αποτελεί ένα είδος «γέφυρας» ανάμεσα στον μη γραμμικό και στον ακέραιο προγραμματισμό. Τέλος, διότι τα προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού μπορούν να αναχθούν σε προβλήματα κοίλου προγραμματισμού.

Η βασική δυσκολία που συναντάται στην προσπάθεια ελαχιστοποίησης μιας κοίλης συνάρτησης που υπόκειται σε ένα σύνολο γραμμικών ή μη γραμμικών περιορισμών, είναι ότι το τοπικό ελάχιστο, που καθορίζεται από κλασικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, μπορεί να μην αποτελεί και το σφαιρικό ελάχιστο. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε η θεωρία της Μεθόδου της Εξωτερικής Προσέγγισης (Outer Approximation Method). Η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη στην ολική ελαχιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης.

Η Μέθοδος της Εξωτερικής Προσέγγισης εισήχθη αρχικά από τους Gomory (1958, 1960), Cheney και Goldstein (1959) και Kelley (1960) στα πλαίσια του συνδυασμού της βελτιστοποίησης με τον κυρτό προγραμματισμό. Αργότερα, ο Tuy (1964) χρησιμοποίησε τη μέθοδο και σε προβλήματα κοίλου προγραμματισμού

Η μέθοδος αυτή, όπως παρουσιάστηκε από τους Καρατζάς και Pinder (1993 και 1996), αποτελεί τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για μια τεχνική ολικής ελαχιστοποίησης που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση υπερεπιπέδου τομής για να καθορίσει τη βέλτιστη λύση.

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τη βασική ιδιότητα μιας κοίλης συνάρτησης  $f$ , σύμφωνα με την οποία το ελάχιστο της συνάρτησης, που υπόκειται σε ένα σύνθετο σύνολο περιορισμών  $D$ , επιτυγχάνεται πάντα σε ένα από τα πιο ακραία σημεία. Η εφικτή περιοχή, η οποία προσδιορίζεται από το σύνολο των περιορισμών, προσεγγίζεται από ένα απλούστερο σύνολο  $D_1$ , και η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται βάσει αυτού πλέον του συνόλου. Εάν η λύση του απλοποιημένου προβλήματος ανήκει στο  $D$ , δηλαδή εάν ικανοποιούνται όλοι οι αρχικοί περιορισμοί, τότε αυτή αποτελεί το σφαιρικό βέλτιστο σημείο. Στην αντίθετη περίπτωση, εισάγεται το κατάλληλο υπερεπίπεδο τομής, το οποίο αποκόπτει ένα τμήμα του συνόλου  $D_1$  και δημιουργεί ένα νέο σύνολο  $D_2$  (που περιέχει το  $D$ ). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά έως ότου επιτεφθεί η εύρεση της βέλτιστης λύσης εντός του συνόλου  $D$ . [12]



**Σχήμα 6.8:** Η Εξωτερική Προσεγγιστική Μέθοδος [12]

Με γεωμετρικούς όρους, ένα σύνολο  $D_k$  στον  $n$ -διάστατο χώρο αποτελεί ένα πολύτοπο και εφόσον  $D_k \supset D$ , δηλαδή το  $D_k$  περιέχει το  $D$ , τότε αυτό ορίζεται ως «περικλειόμενο» πολύτοπο. Το υπερεπίπεδο τομής αντιστοιχεί σε μια γραμμή στο δισδιάστατο χώρο, ενώ στον τρισδιάστατο χώρο σε ένα επίπεδο.

Στα προβλήματα γραμμικών περιορισμών, ένας από τους αρχικούς περιορισμούς αποτελεί και το υπερεπίπεδο τομής που εισάγεται. Στα προβλήματα μη γραμμικών περιορισμών, το υπερεπίπεδο τομής καθορίζεται από την «γραμμικοποιημένη» μορφή ενός από του αρχικούς μη γραμμικούς περιορισμούς.

Η διατύπωση της προσέγγισης εξαρτάται από τη γεωμετρία της εφικτής περιοχής, που καθορίζεται από ένα σύνολο  $m$  περιορισμών της μορφής:

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

Εάν όλοι οι περιορισμοί είναι κυρτοί, τότε η εφικτή περιοχή  $D$  αποτελεί ένα κλειστό κυρτό σύνολο.

Ένα σύνολο  $D$  είναι κυρτό εάν και μόνο εάν  $\alpha, \beta \in D$  και  $0 \leq \lambda \leq 1$ , δηλαδή  $\lambda\alpha + (1-\lambda)\beta \in D$ . Το σύνολο  $D$  παύει να είναι κυρτό όταν ένας ή περισσότεροι περιορισμοί είναι κοίλες συναρτήσεις.

Από θεωρητική άποψη, η περίπτωση της ελαχιστοποίησης μιας κοίλης συνάρτησης που υπόκειται σε ένα κυρτό σύνολο περιορισμών έλαβε περισσότερη προσοχή από ότι η περίπτωση με κοίλους περιορισμούς, διότι η κυρτότητα εμφανίζεται στα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης. [12]

### 6.6.1 Βήματα του Αλγόριθμου Βελτιστοποίησης

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά τα βήματα του αλγόριθμου της Εξωτερικής Προσεγγιστικής Μεθόδου που ακολουθούνται για την ελαχιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης με ένα σύνθετο σύνολο κυρτών περιορισμών.

Το πρόβλημα ορίζεται ως εξής:

$$\min f(x) \text{ ώστε } x \in D, x \geq 0$$

όπου

- ✓  $x$  το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης
- ✓  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  μια ορισμένη στο  $\mathbb{R}^n$  συνεχής κοίλη συνάρτηση
- ✓  $D$  ένα κλειστό κυρτό υποσύνολο του  $\mathbb{R}^n$ , το οποίο ορίζεται από ένα σύνολο  $m$  περιορισμών της μορφής  $g_i(x) \leq 0$   $i=1, 2, \dots, m$ .

1) Το αρχικό βήμα του αλγόριθμου είναι ο καθορισμός του περικλειόμενου πολύτοπου  $D_1$ , εντός του οποίου περιέχεται η εφικτή περιοχή  $D$ . Ένας τρόπος είναι ορίζοντας τις κορυφές του. Ένα σημείο  $x$  του περικλειόμενου πολύτοπου στον  $n$ -διάστατο χώρο αποτελεί κορυφή εάν ικανοποιούνται τουλάχιστον  $n$  περιορισμοί στο σημείο αυτό.

Για ένα πρόβλημα κοίλης ελαχιστοποίησης στο  $n$ -διάστατο χώρο με  $m$  περιορισμούς, το περικλειόμενο πολύτοπο  $D_1$  ορίζεται ως εξής:

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

$$\text{Τότε } D_1 = \left\{ x : x_j \geq 0, j = 1, \dots, n, \sum_{j=1}^n x_j \leq M \right\}$$

Και οι κορυφές είναι  $v^0=0, v^j=Me^j, j=1, \dots, n$  όπου  $e^j$  είναι η  $j$ -στη διανυσματική μονάδα στο  $R^n$ . [12]

2) Προσδιορισμός της κορυφής ( $x^k$ ) που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $f$ , δηλαδή

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

Σε περιπτώσεις που έχουμε πολλές υποψήφιες κορυφές ελαχιστοποίησης επιλέγουμε τυχαία μία από αυτές. Εάν στο σημείο  $x^k$  (κορυφή ελαχιστοποίησης) όλοι οι περιορισμοί  $g_i(x)$  ικανοποιούνται, τότε αυτή είναι η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Στην αντίθετη περίπτωση, ο περιορισμός που παραβιάζεται περισσότερο ορίζεται έτσι ώστε [12]:

$$g_{\max}^k(x) = \max \{ g_i(x^k) \}, \quad i=1, 2, \dots, m$$

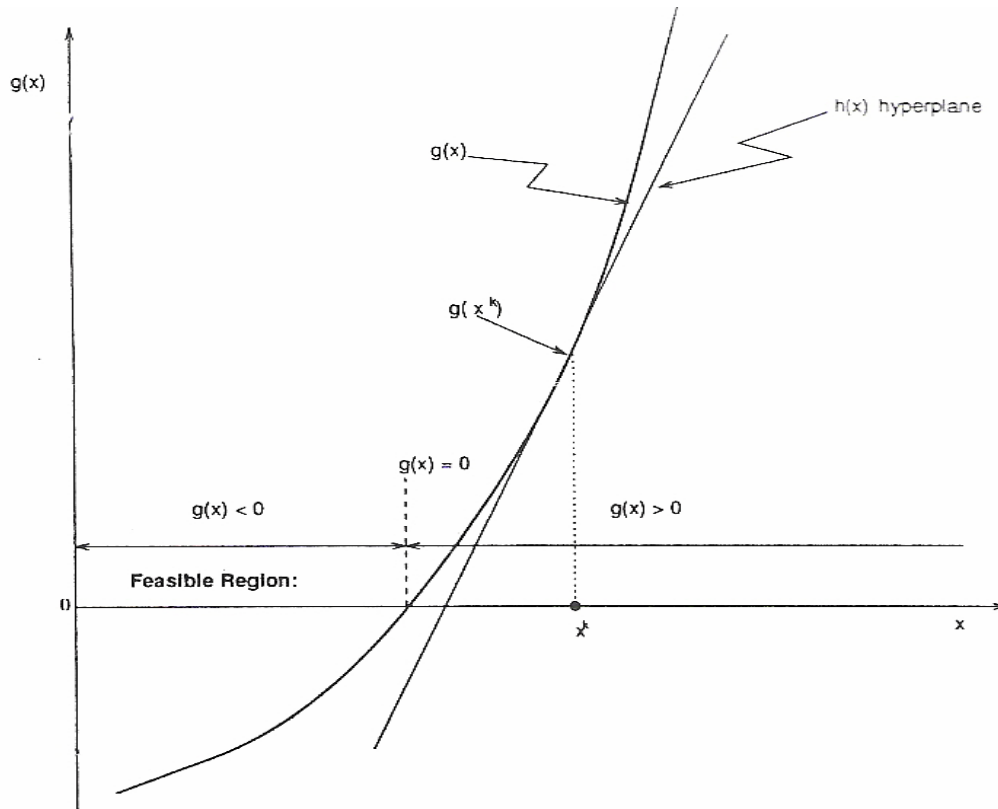
3) Εύρεση της κατάλληλης μεθόδου εισαγωγής του επιπέδου τομής. Η μέθοδος αυτή εξαρτάται από τη συμπεριφορά του περιορισμού που παραβιάζεται περισσότερο. Εάν είναι γραμμικός, τότε αποτελεί ο ίδιος το επίπεδο τομής του αρχικού περικλειόμενου πολύτοπου  $D_k$ , δηλαδή

$$h^k(x) = g_{\max}^k(x) \text{ και δημιουργεί ένα νέο περικλειόμενο πολύτοπο } D_{k+1}.$$

Εάν ο περιορισμός είναι μη γραμμικός, εισάγεται η «γραμμικοποιημένη» του μορφή σαν προσέγγιση του μη γραμμικού επιπέδου τομής, η οποία ορίζεται ως εξής:

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

Εφόσον  $g_{\max}^k(x)$  είναι μια κυρτή συνάρτηση και  $h^k(x)$  είναι το εφαπτομενικό υπερεπίπεδο του  $g_{\max}^k(x)$  στο σημείο  $g_{\max}^k(x^k)$ , το υπερεπίπεδο τομής του περικλειόμενου πολύτοπου  $D_k$  θα βρίσκεται πάντα τοποθετημένο μεταξύ της κορυφής  $x^k$  και του μη γραμμικού περιορισμού  $g_{\max}^k(x)$ . Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι το  $h^k(x)$  δεν θα τέμνει ποτέ την εφικτή περιοχή.



**Σχήμα 6.9:** Το επίπεδο τομής σε μία διάσταση [12]

Στην περίπτωση που ο περιορισμός είναι κοίλος, η εφαπτομενική προσέγγιση του επιπέδου τομής θα εξαλείψει κάποιο μέρος της εφικτής περιοχής, γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μια αρκετά διαφορετική διαδικασία εισαγωγής του υπερεπιπέδου τομής. [13]

Η εισαγωγή του υπερεπιπέδου τομής  $h^k(x)$  διαιρεί το πολύτοπο  $D_k$  σε δύο περιοχές: α)  $\{x : h^k(x) > 0\}$  και β)  $\{x : h^k(x) \leq 0\}$ .

Το νέο περικλειόμενο πολύτοπο ορίζεται:  $D_{k+1} = D_k \cap \{x : h^k(x) \leq 0\}$

Το νέο σύνολο κορυφών  $D_{k+1}$  προσδιορίζεται ως εξής: Έστω  $V_k^+$  το υποσύνολο των κορυφών για τις οποίες το  $h^k(x)$  είναι θετικό και  $V_k^-$  το υποσύνολο των κορυφών για τις οποίες το  $h^k(x)$  είναι αρνητικό.

$$V_k^+ = \{x \in V_k : h^k(x) > 0\}, \quad V_k^- = \{x \in V_k : h^k(x) < 0\}$$

Στο στάδιο αυτό στόχος μας είναι η απόρριψη των κορυφών εκείνων για τις οποίες το  $h^k(x)$  γίνεται θετικό, και ο καθορισμός των νέων κορυφών που προκύπτουν από την εισαγωγή του  $h^k(x)$  στο πολύτοπο  $D_k$ . Η χαρακτηριστική ιδιότητα όλων των σημείων  $p$  που βρίσκονται τοποθετημένα στο υπερεπίπεδο τομής  $h^k(x)$  είναι ότι  $h^k(p)=0$ . Σύμφωνα με τον ορισμό της κορυφής, ένα σημείο  $p$  αποτελεί κορυφή στον  $n$ -διάστατο χώρο εφόσον ικανοποιεί  $n$  περιορισμούς. Επομένως, το  $p$  θα θεωρείται κορυφή του  $D_{k+1}$  εάν και μόνο εάν στο σημείο αυτό ικανοποιούνται τουλάχιστον  $n-1$  περιορισμοί, που ορίζουν το πολύτοπο  $D_k$  (ο  $n$ -οστός περιορισμός θα είναι ο  $h^k(x) = 0$ ).

Εάν το υποσύνολο  $V_k^-$  είναι κενό, το  $V_{k+1}$  αποτελείται από όλες τις κορυφές του  $h^k(x)$  και καθορίζεται από τη διαφορά ανάμεσα στα σύνολα  $V_k$  και  $V_k^+$ .

$$V_{k+1} = V_k \setminus V_k^+, \text{ όπου η κάθετη γραμμή συμβολίζει τη διαφορά συνόλων}$$

Στην αντίθετη περίπτωση, έστω  $v^+$  οποιοδήποτε σημείο του συνόλου  $V_k^+$  και  $v^-$  οποιοδήποτε σημείο του συνόλου  $V_k^-$ . Τότε για κάθε ζεύγος  $(v^+, v^-)$  ορίζουμε το  $\lambda$  ως εξής:

$$\lambda = \frac{h^k(v^+)}{h^k(v^+) - h^k(v^-)}$$

και υπολογίζουμε το  $p$ :

$$p = \lambda v^- + (1 - \lambda)v^+$$

Γενικά, προτείνεται να υπολογίζονται οι τιμές μόνο των γειτονικών ζευγαριών κορυφών. Στο  $n$ -διάστατο χώρο, η κορυφή  $v^+$  είναι γειτονική της  $v^-$  εάν έχουν  $n-1$  κοινούς περιορισμούς. Το ευθύγραμμο τμήμα το οποίο συνδέει τις γειτονικές κορυφές, αποτελεί πλευρά του πολύτοπου. Σκοπός μας είναι ο υπολογισμός των τιμών του  $\lambda$  να γίνει μόνο για τα τμήματα εκείνα πάνω στα οποία θα τοποθετηθούν οι νέες κορυφές, αφού το υπερεπίπεδο τομής δημιουργεί κορυφές μόνο πάνω στις πλευρές του περικλειόμενου πολύτοπου.

Με τη διαδικασία αυτή (διαδικασία παρεμβολής), καθορίζεται κατά μήκος της πλευρά που συνδέει τα  $v^+$  και  $v^-$  το σημείο  $p$  για το οποίο:  $h^k(p) = 0$ .

Έστω  $P_{k+1}$  το σύνολο των σημείων  $p$  που ικανοποιούν τουλάχιστον  $n-1$  περιορισμούς, τότε:

$$V_{k+1} = (V_k | V_k^+) \cup P_{k+1}$$

Επομένως, το νέο σύνολο κορυφών αποτελείται από ορισμένες κορυφές του  $V_k$  (εκείνες για τις οποίες  $h^k(x) \leq 0$ ) συν τις νέες κορυφές που περιλαμβάνονται στο σύνολο  $P_{k+1}$ .

Ο καθορισμός των νέων κορυφών είναι το πιο χρονοβόρο και το πιο επίπονο στάδιο του αλγόριθμου, διότι για κάθε κορυφή  $v^+$  πρέπει να εξεταστεί ολόκληρο το σύνολο  $V_k^-$ , ώστε να βρεθούν οι  $n$  γειτονικές κορυφές της. Για να μειώσουμε τον υπολογιστικό φόρτο, η διαδικασία τερματίζεται αμέσως μόλις καθοριστούν οι  $n$  γειτονικές κορυφές, άρα δεν είναι απαραίτητο να εξεταστούν όλα τα στοιχεία του συνόλου  $V_k^-$ .

Άλλος ένας τρόπος να μειώσουμε τον υπολογιστικό φόρτο είναι η εμφάνιση της λίστας των περιορισμών που αντιστοιχούν σε κάθε κορυφή, αμέσως μόλις η κορυφή δημιουργηθεί, ώστε να μη χρειαστεί επανέλεγχός τους. Σε κάθε βήμα  $k$ , οι  $n$  περιορισμοί που ανήκουν σε κάθε νέα κορυφή αποτελούν τους  $n-1$  κοινούς περιορισμούς με τις γειτονικές κορυφές συν τον περιορισμό του υπερεπιπέδου τομής που εισήχθη.

Έχοντας το νέο σύνολο κορυφών  $V_{k+1}$  συνεχίζουμε στο επόμενο βήμα  $k+1$  και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έως ότου βρεθεί η βέλτιστη εφικτή λύση. [12]

## 7. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ "PTC" ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

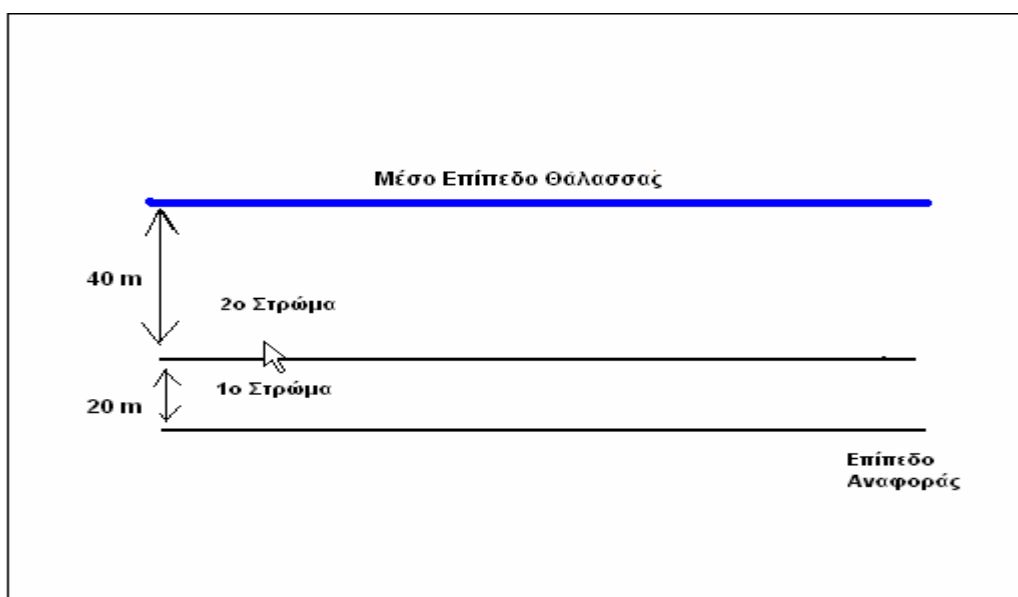
### 7.1 Εισαγωγή

Για να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός διαχείρισης του υπόγειου υδροφορέα του Βόρειου τμήματος της νήσου Ρόδου, που θα οδηγήσει στην πρόληψη της εξάπλωσης του μετώπου της υφαλμύρωσης, είναι απαραίτητο πρώτα να γίνει προσομοίωση της περιοχής ενδιαφέροντος και του υπόγειου συστήματος. Με προσεκτική και ορθή εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων, το μοντέλο PTC μας παρέχει την αναπαράσταση της περιοχής, καθώς και χρήσιμα στοιχεία σχετικά με τα υδραυλικά ύψη, τις ταχύτητες ροής του υπόγειου ύδατος και τα επίπεδα συγκέντρωσης των χλωριώντων στην περιοχή.

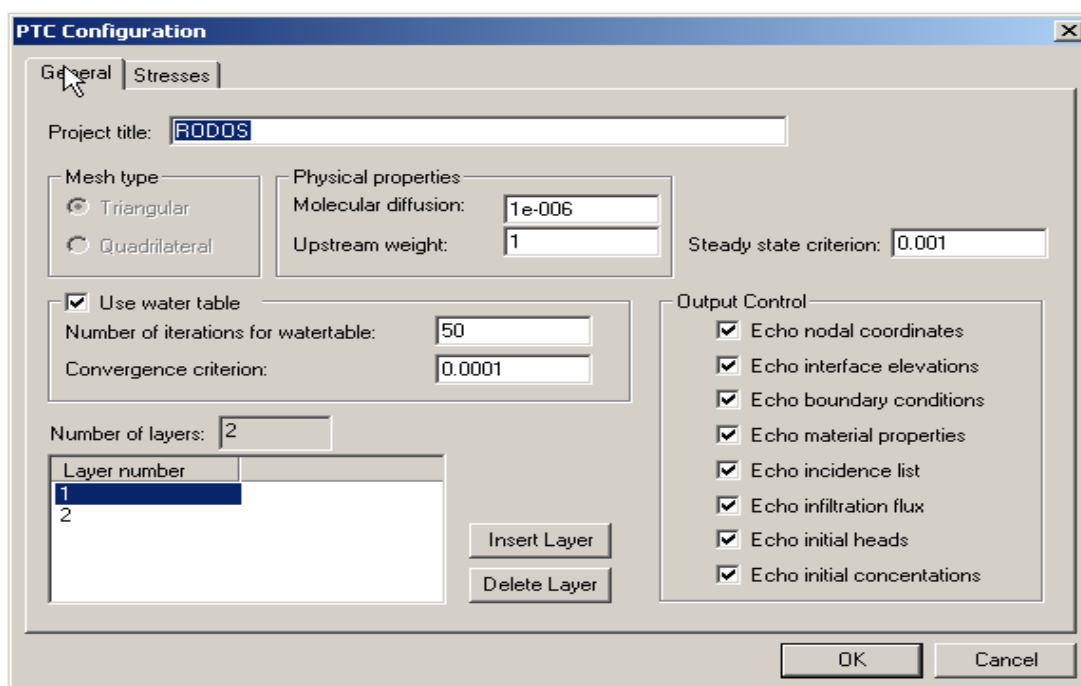
### 7.2 Εισαγωγή Δεδομένων στο Μοντέλο "PTC"

Αρχικά καθορίζονται τα γενικά στοιχεία λειτουργίας του μοντέλου, όπως το είδος των πεπερασμένων στοιχείων του δικτύου (στην περίπτωση μας τριγωνικά), ο συντελεστής της μοριακής διάχυσης, το κριτήριο σταθερής κατάστασης και η ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα, καθώς ο υδροφορέας που εξετάζουμε είναι ελεύθερος.

Η περιοχή ενδιαφέροντος διαχωρίζεται σε δύο στρώματα, ώστε να υπάρχει κάποια διάκριση σχετικά με το βάθος των πηγαδιών.

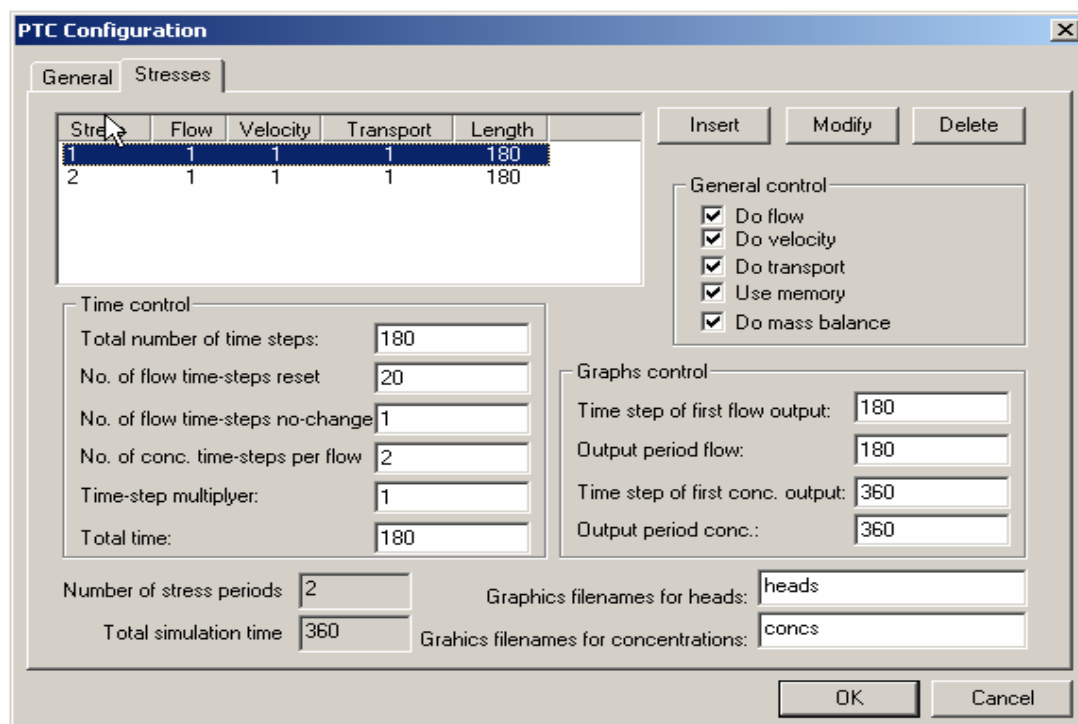


**Σχήμα 7.1:** Στρωματοποίηση περιοχής μελέτης



**Σχήμα 7.2:** Γενικά στοιχεία λειτουργίας του μοντέλου "PTC"

Η προσομοίωση θα διεξαχθεί για τις δύο χρονικές περιόδους ενός έτους (Stress 1 – Καλοκαίρι και Stress 2 – Χειμώνας), επομένως η συνολική χρονική διάρκεια προσομοίωσης είναι 360 ημέρες.

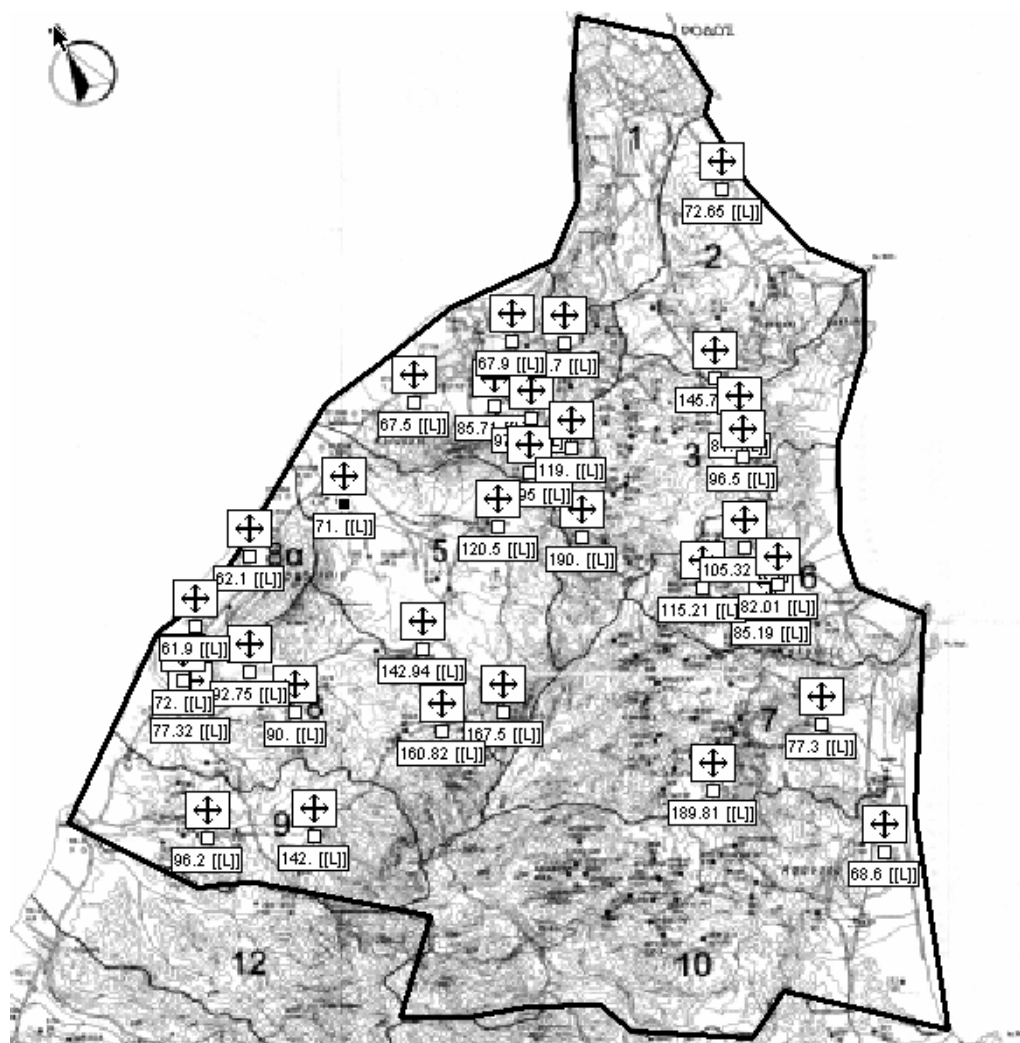


**Σχήμα 7.3:** Γενικά στοιχεία λειτουργίας του μοντέλου "PTC"

Στη συνέχεια, πρέπει να εισάγουμε το χάρτη της περιοχής (υπό σωστή κλίμακα) και να σχεδιάσουμε το περίγραμμά του. Στο σημείο αυτό καθορίζεται και η πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων του δικτύου. Ο αριθμός αυτός, προκειμένου το μοντέλο να μπορέσει να βγάλει αποτελέσματα, δεν πρέπει να ξεπερνά το 2000.

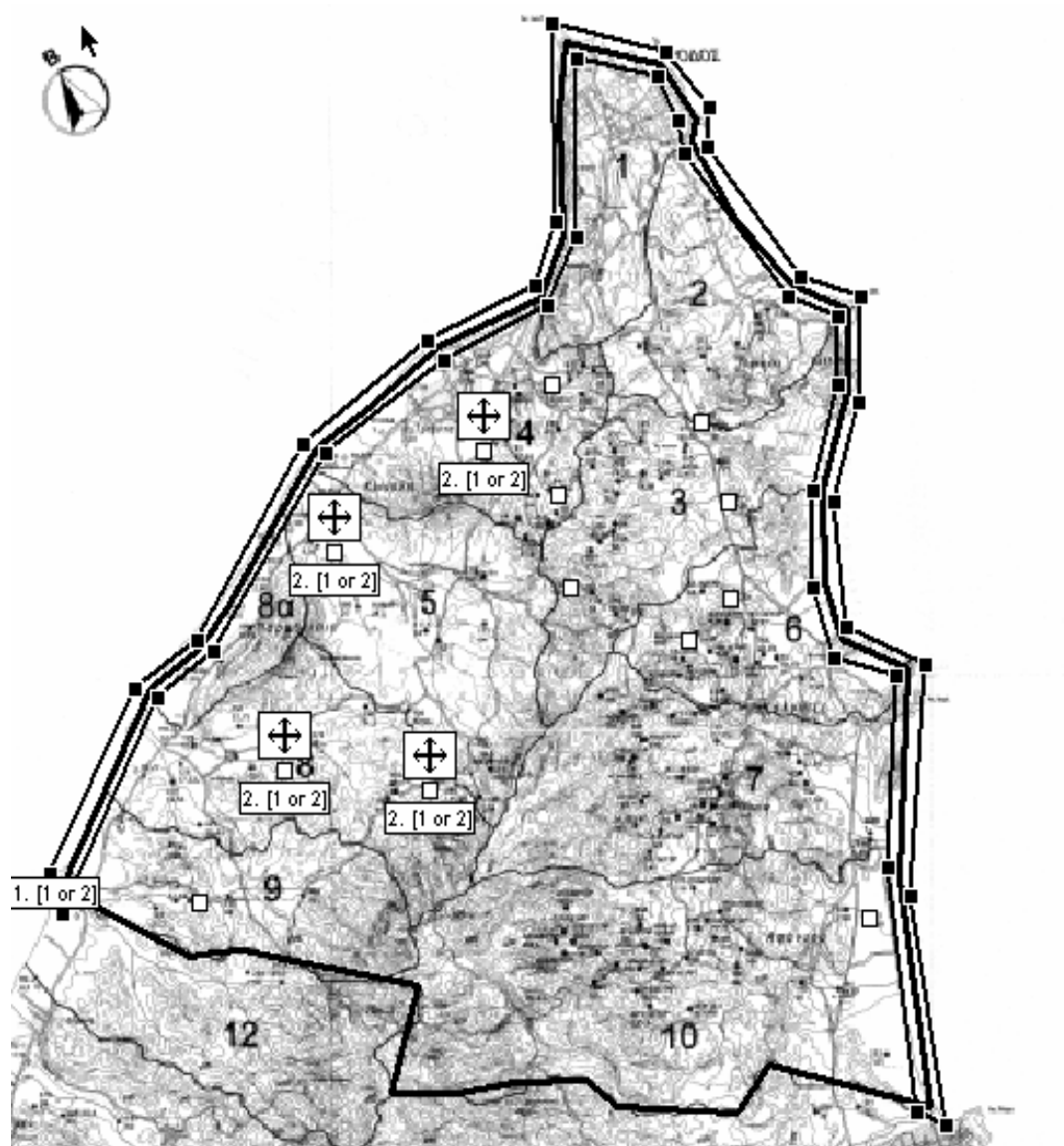
Κατόπιν, εισάγονται τα ακόλουθα στοιχεία σε καθένα από τα δύο στρώματα του υδροφορέα ξεχωριστά:

- Πάχος του στρώματος, το οποίο για το στρώμα 1 είναι σταθερό (20 m), ενώ για το στρώμα 2 δίνεται από τη σχέση: (Απόλυτο υψόμετρο του πηγαδιού + Απόσταση από το επίπεδο αναφοράς). Η απόσταση αυτή εκτιμήθηκε στα 60 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Προκειμένου να αναπαρασταθεί ακριβέστερα το ανάγλυφο της περιοχής εφαρμόζεται από το μοντέλο η μέθοδος της παρεμβολής για τα υψόμετρα του στρώματος 2.

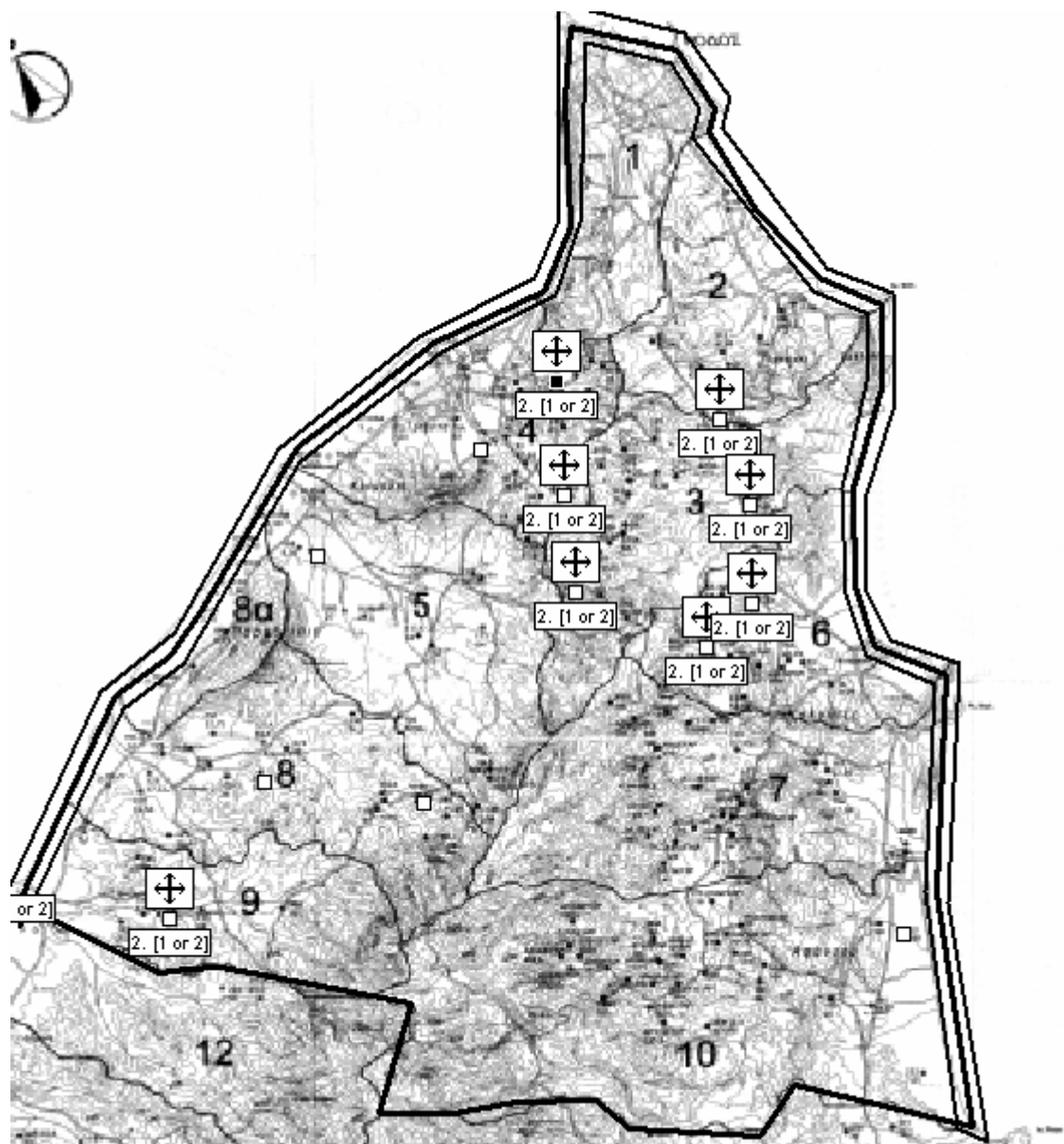


**Γράφημα 7.1:** Υψόμετρα γεωτρήσεων περιοχής μελέτης

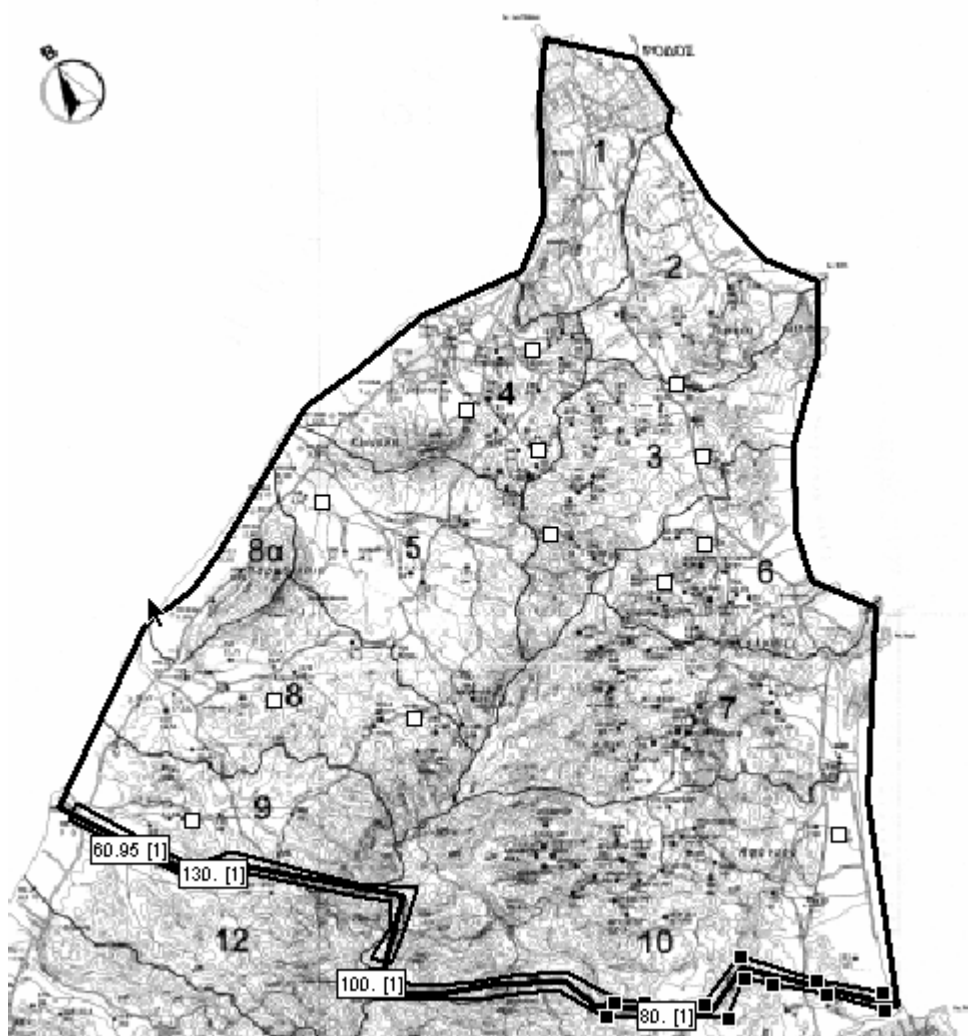
- Υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία δεν μεταβάλλεται για τα δύο στρώματα. Πρέπει να καθοριστεί η τιμή της και στις τρεις διευθύνσεις, γνωρίζοντας ότι στην x και y διεύθυνση είναι ίδια, ενώ στη z διεύθυνση ισούται με το 10% της αντίστοιχης υδραυλικής αγωγιμότητας στην x ή y διεύθυνση.
- Αποθηκευτικότητα, υψόμετρο πυθμένα, πορώδες και διασπορά, τα οποία έχουν την ίδια τιμή και στα δύο στρώματα.
- Οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους, η οποία τοποθετείται με τον ίδιο τρόπο στα δύο στρώματα, κατά μήκος του παράκτιου ορίου της περιοχής μελέτης. Η συνθήκη αυτή είναι σταθερού υδραυλικού ύψους ίσο με 60 m, που σημαίνει ότι το βάθος του υδροφορέα στο επίπεδο της θάλασσας είναι 60 m.
- Οριακή συνθήκη 2<sup>ου</sup> είδους, η οποία προκύπτει από τις γεωτρήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε στρώμα, ανάλογα με το βάθος τοποθέτησής τους. Έτσι, έχουμε 4 και 8 πηγάδια στο κατώτερο και ανώτερο στρώμα αντίστοιχα, τα οποία αποτελούν οριακή συνθήκη 2<sup>ου</sup> είδους διότι αντλούν με σταθερές παροχές. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα με τα στοιχεία που υπήρχαν, δόθηκαν διαφορετικές τιμές παροχής στο ίδιο πηγάδι για τις δύο χρονικές περιόδους (Καλοκαίρι – Χειμώνας).
- Οριακή συνθήκη 3<sup>ου</sup> είδους, η οποία τοποθετείται με τον ίδιο τρόπο στα δύο στρώματα, κατά μήκος του περιγράμματος της περιοχής μελέτης χωρίς το τμήμα αυτού που είναι σε επαφή με τη θάλασσα. Η συνθήκη αυτή χρησιμοποιείται για να δείξει τις διαρροές ύδατος από τις παρακείμενες υδρολογικές λεκάνες στην περιοχή ενδιαφέροντος



**Γράφημα 7.2:** Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> είδους – Στρώμα 1



**Γράφημα 7.3:** Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> και 2<sup>ου</sup> είδους – Στρώμα 2

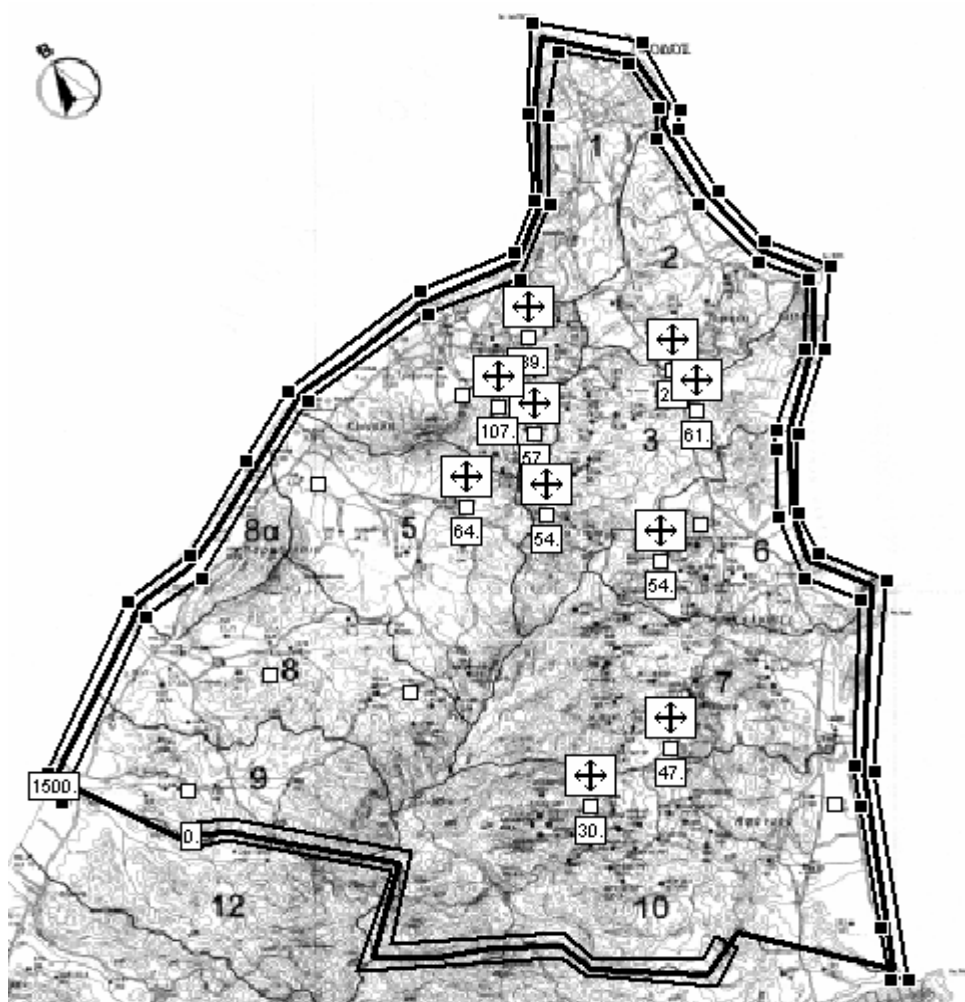


**Γράφημα 7.4:** Οριακές συνθήκες 3<sup>ου</sup> είδους

- Βροχόπτωση, η οποία έχει την ίδια τιμή και στα δύο στρώματα, αλλά διαχωρίζεται για την Θερινή και την Χειμερινή περίοδο. Το νερό της βροχόπτωσης καταλήγει στους υδροφορείς μέσω της διεργασίας της διήθησης, επομένως πρέπει να συσχετιστεί με αυτήν. Ο μέσος συντελεστής διήθησης της περιοχής ενδιαφέροντος ισούται με 12,5 %. Από τον πίνακα 3.6 έχουμε ότι η μέση βροχόπτωση για το Καλοκαίρι ανέρχεται σε 0,00045 m/day και για το Χειμώνα σε 0,0035 m/day. Άρα, οι τιμές που εισάγονται στο μοντέλο σχετικά με την ποσότητα της βροχόπτωσης που διηθείται τελικά στον υπόγειο υδροφόρα είναι για το Καλοκαίρι  $0,125 \cdot 0,00045 = 5,625 \cdot 10^{-5}$  m/day και για το Χειμώνα  $0,125 \cdot 0,0035 = 4,375 \cdot 10^{-4}$  m/day.

- Αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους σε κάθε γεώτρηση, για καθένα από τα δύο στρώματα ξεχωριστά. Τιμές δίνονται μόνο στα πηγάδια για τα οποία υπήρχαν μετρήσεις πεδίου και εφαρμόζεται και πάλι από το μοντέλο η μέθοδος της παρεμβολής.

Προκειμένου το μοντέλο να μπορέσει να αναπαραστήσει την υπάρχουσα κατάσταση υφαλμύρωσης και πόσο αυτή έχει εισχωρήσει στον υδροφορέα, πρέπει να ορίσουμε τις αρχικές συνθήκες της συγκέντρωσης των χλωριώντων. Εκτός από τις αρχικές τιμές που ορίζονται σε όσα από τα πηγάδια υπήρχαν μετρήσεις πεδίου, τοποθετείται σαν οριακή συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους κατά μήκος της ακτογραμμής η σταθερή συγκέντρωση των χλωριώντων (Συγκέντρωση χλωριώντων στο υφάλμυρο νερό 1500 ppm).



**Γράφημα 7.5:** Αρχικές συγκεντρώσεις χλωριώντων – Στρώμα 2

### 7.3 Βαθμονόμηση

Αφού εισαχθούν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα ακολουθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης, προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι το μοντέλο προσομοιώνει σωστά την περιοχή ενδιαφέροντος και τα αποτελέσματα που δίνει ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται συγκρίνοντας στα πηγάδια άντλησης της περιοχής ενδιαφέροντος, τις τιμές του υδραυλικού ύψους που υπολογίζει το μοντέλο στο τέλος της πρώτης χρονικής περιόδου (Καλοκαίρι), με τις τιμές που έχουν μετρηθεί στο πεδίο για την αντίστοιχη περίοδο.

Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

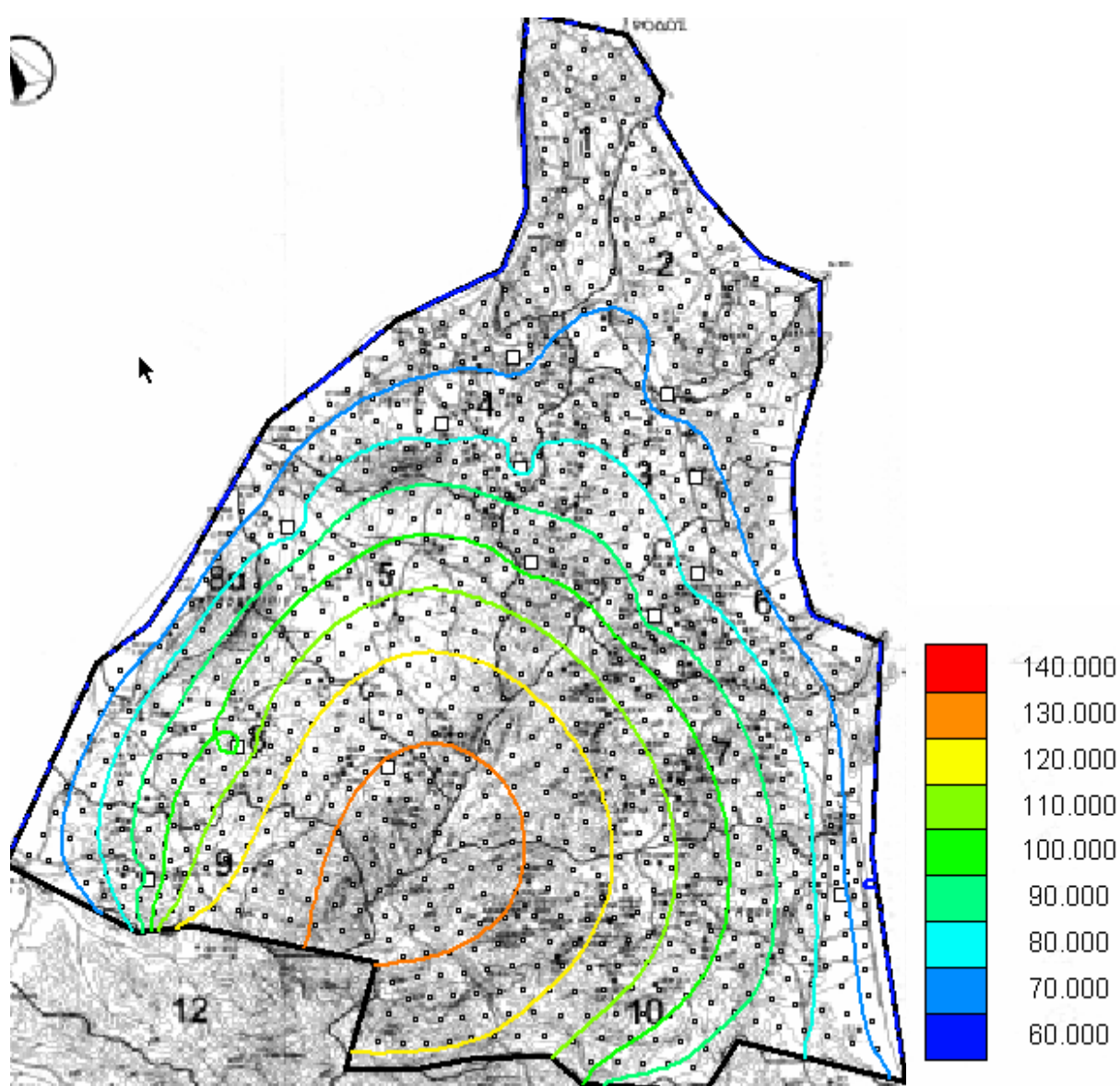
Αριθμός Γεώτρησης	Μετρήσεις Πεδίου	Αποτελέσματα Μοντέλου
<b>Στρώμα 1</b>		
78	76,4	83,2
98	64,5	69,2
119 <sup>A</sup>	142,2	138,3
122	83,2	88,5
<b>Στρώμα 2</b>		
8	-	101,1
11	64,9	67,5
25	83,2	88,2
52	-	80,9
86 <sup>A</sup>	-	94,2
88A	68,7	74,2
114 <sup>A</sup>	100,5	105,8
135	85,8	92,5

**Πίνακας 7.1:** Βαθμονόμηση Μοντέλου

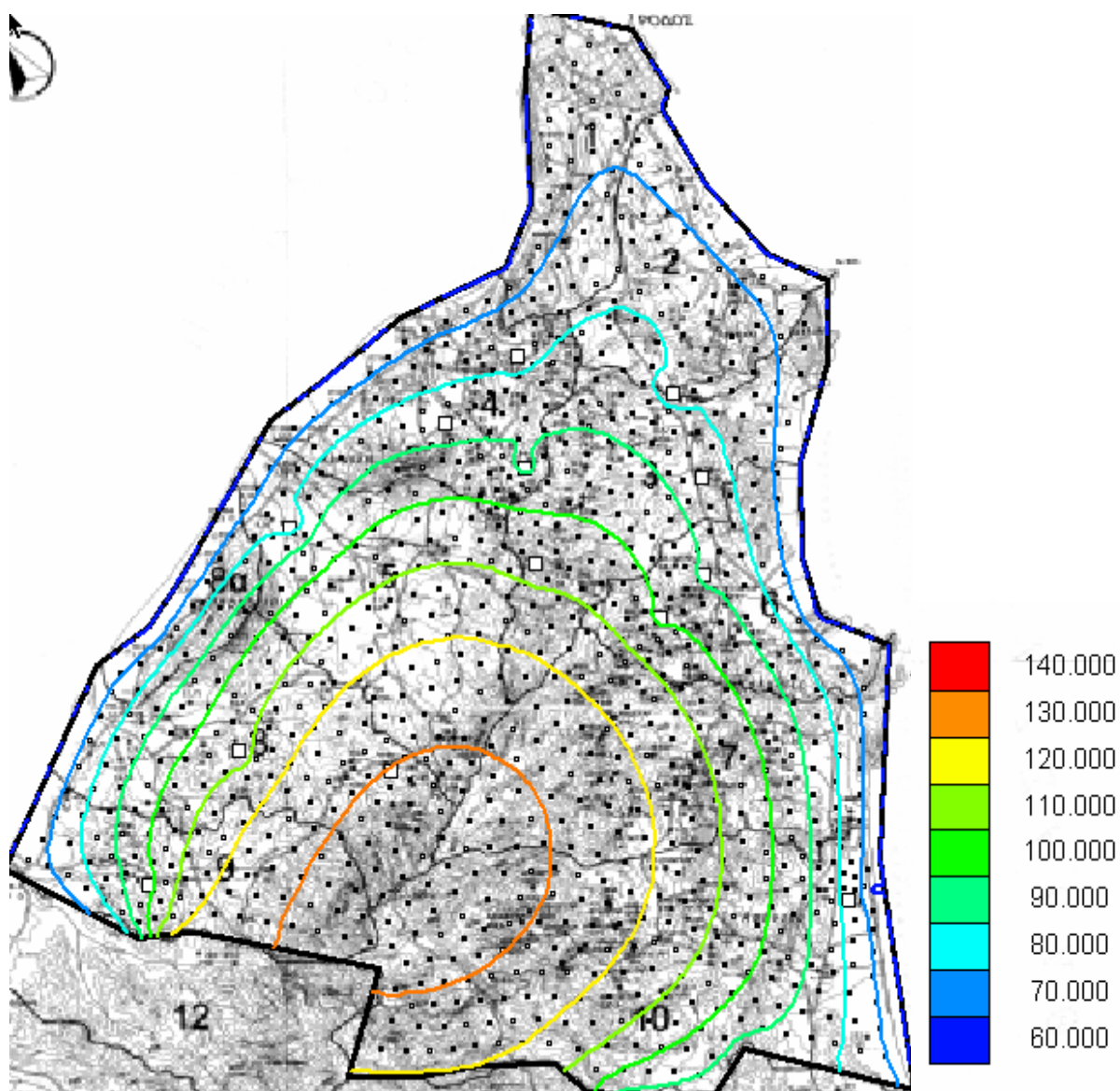
## 7.4 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης

Εφόσον από τη διαδικασία της βαθμονόμησης προέκυψε ότι το μοντέλο προσεγγίζει αρκετά ικανοποιητικά την κατάσταση του πεδίου, προχωρούμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

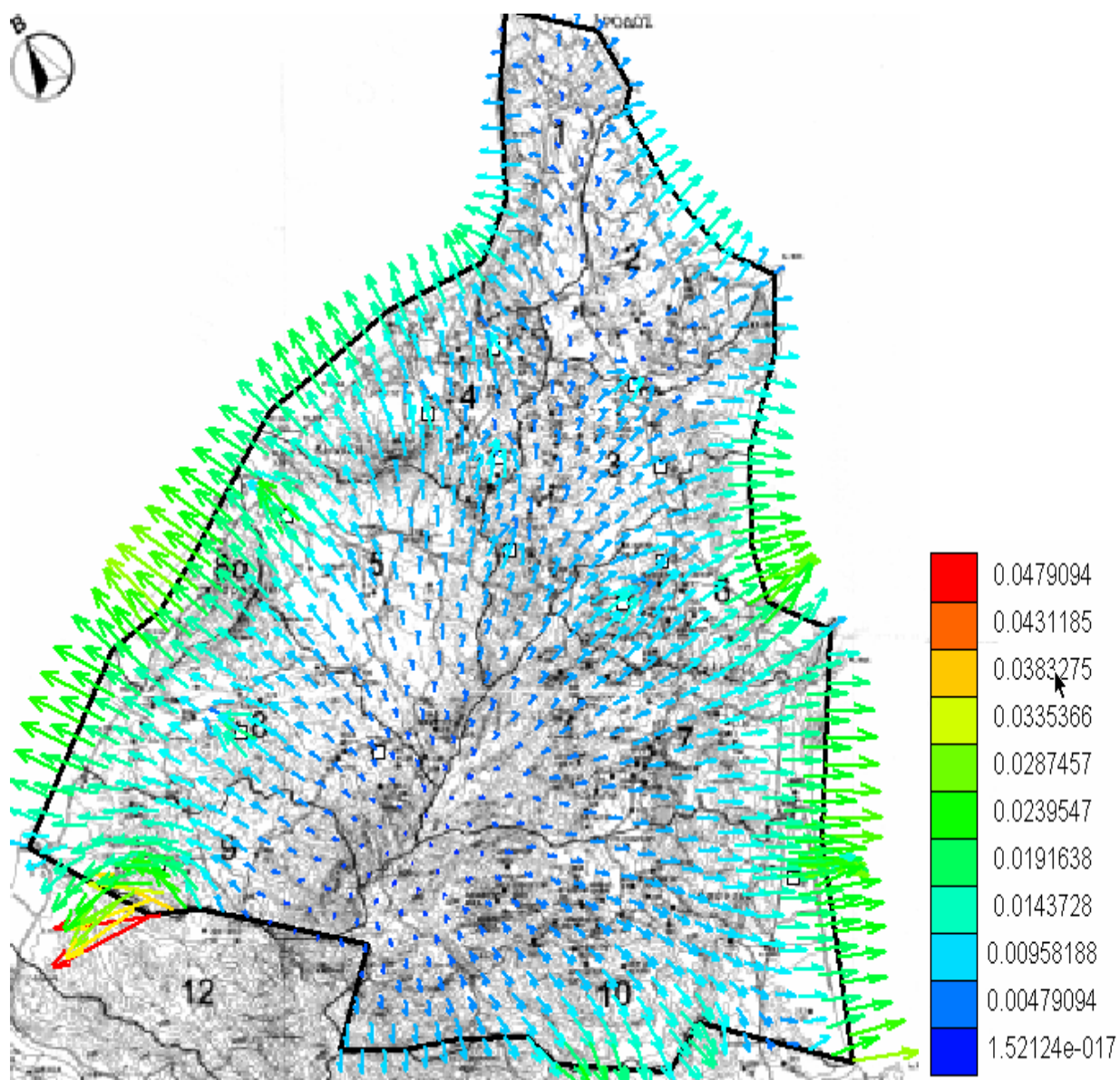
Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με τα υδραυλικά ύψη και τις ταχύτητες ροής μετά το τέλος της θερινής και της χειμερινής περιόδου.



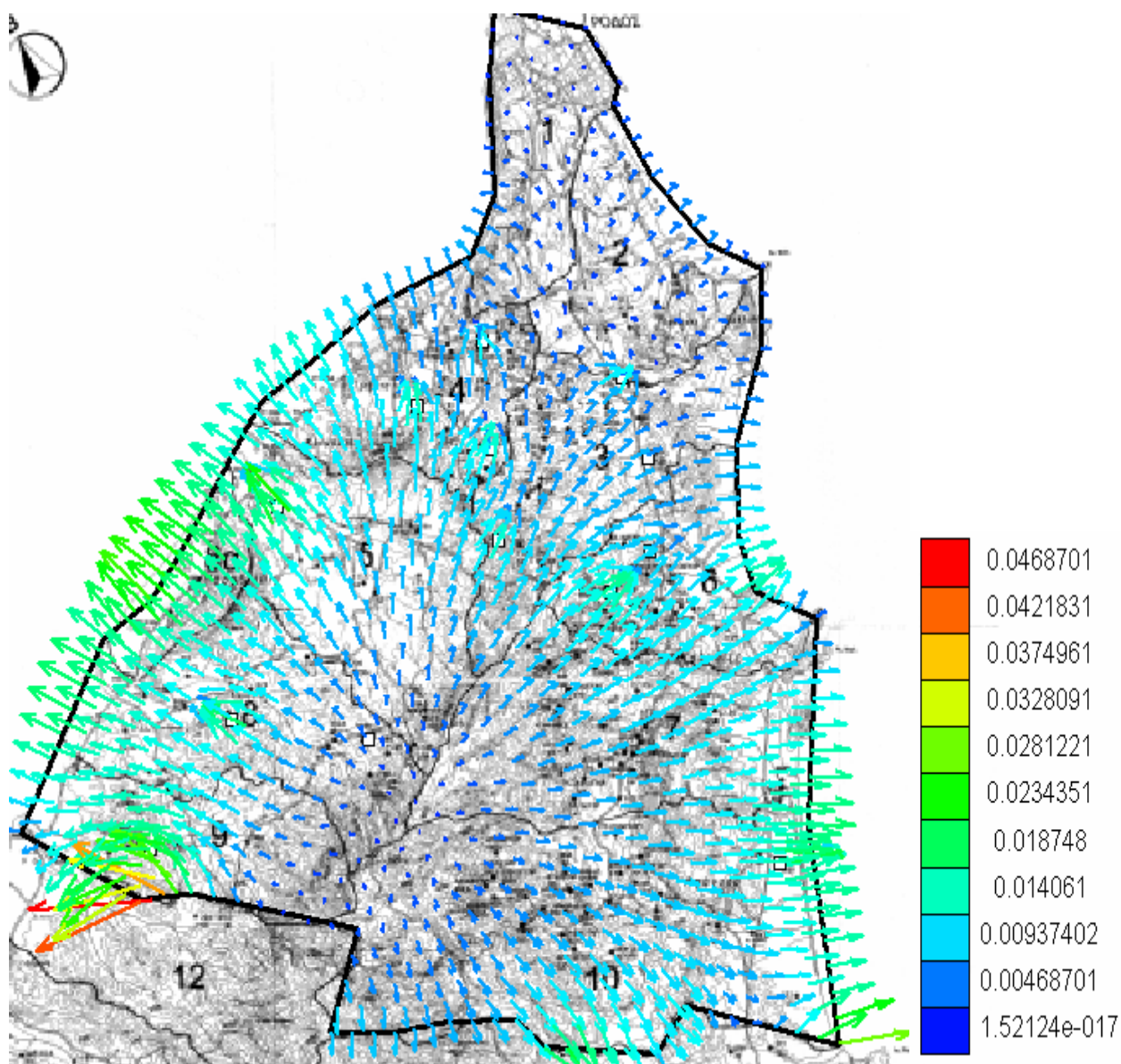
**Γράφημα 7.6:** Υδραυλικά ύψη (m) στο τέλος της θερινής περιόδου



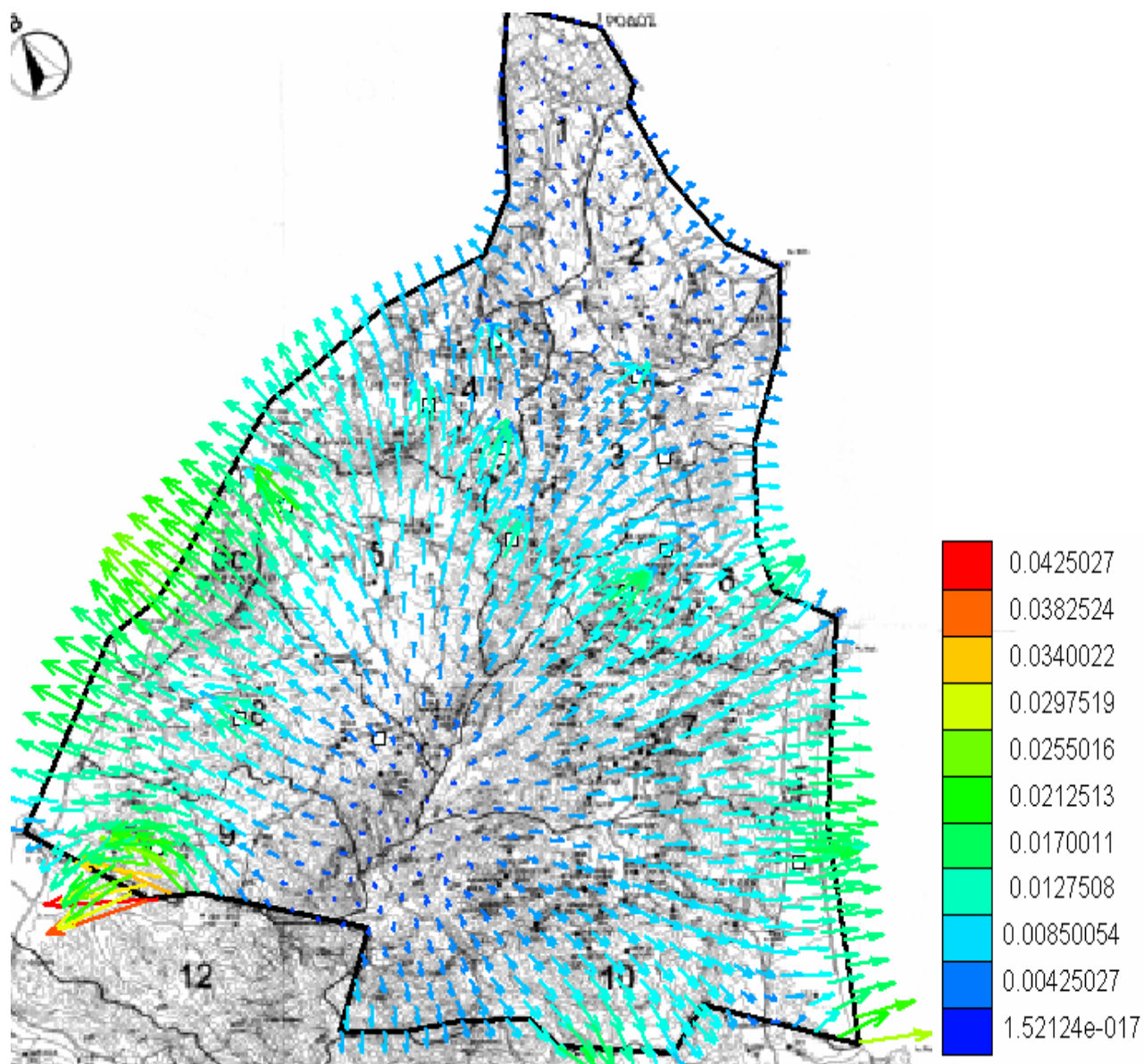
**Γράφημα 7.7:** Υδραυλικά ύψη (m) στο τέλος της Χειμερινής περιόδου



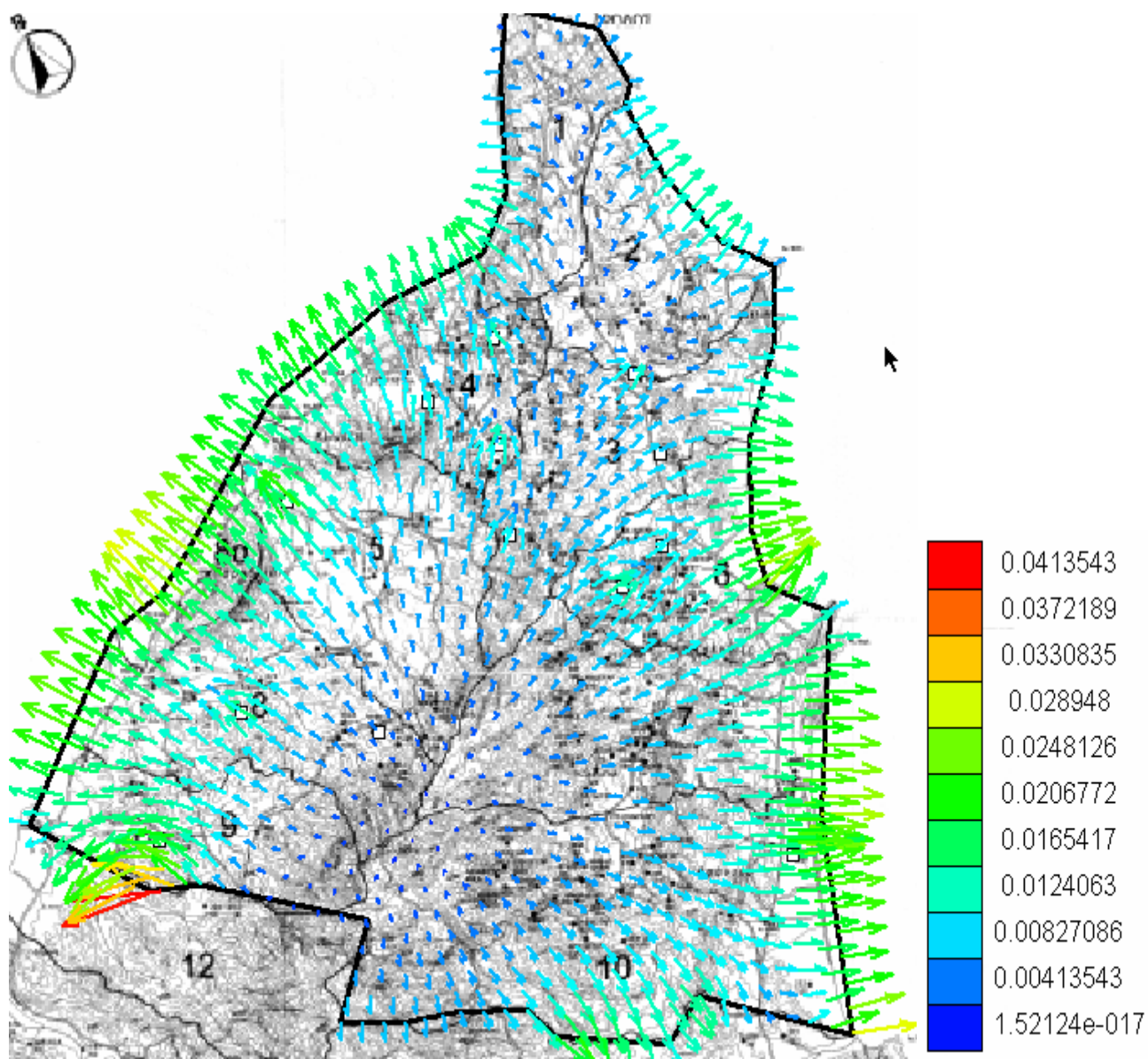
**Γράφημα 7.9:** Ταχύτητες ροής (m/day) στο τέλος της Χειμερινής περιόδου  
Στρώμα 1



**Γράφημα 7.10:** Ταχύτητες ροής (m/day) στο τέλος της Θερινής περιόδου  
Στρώμα 1



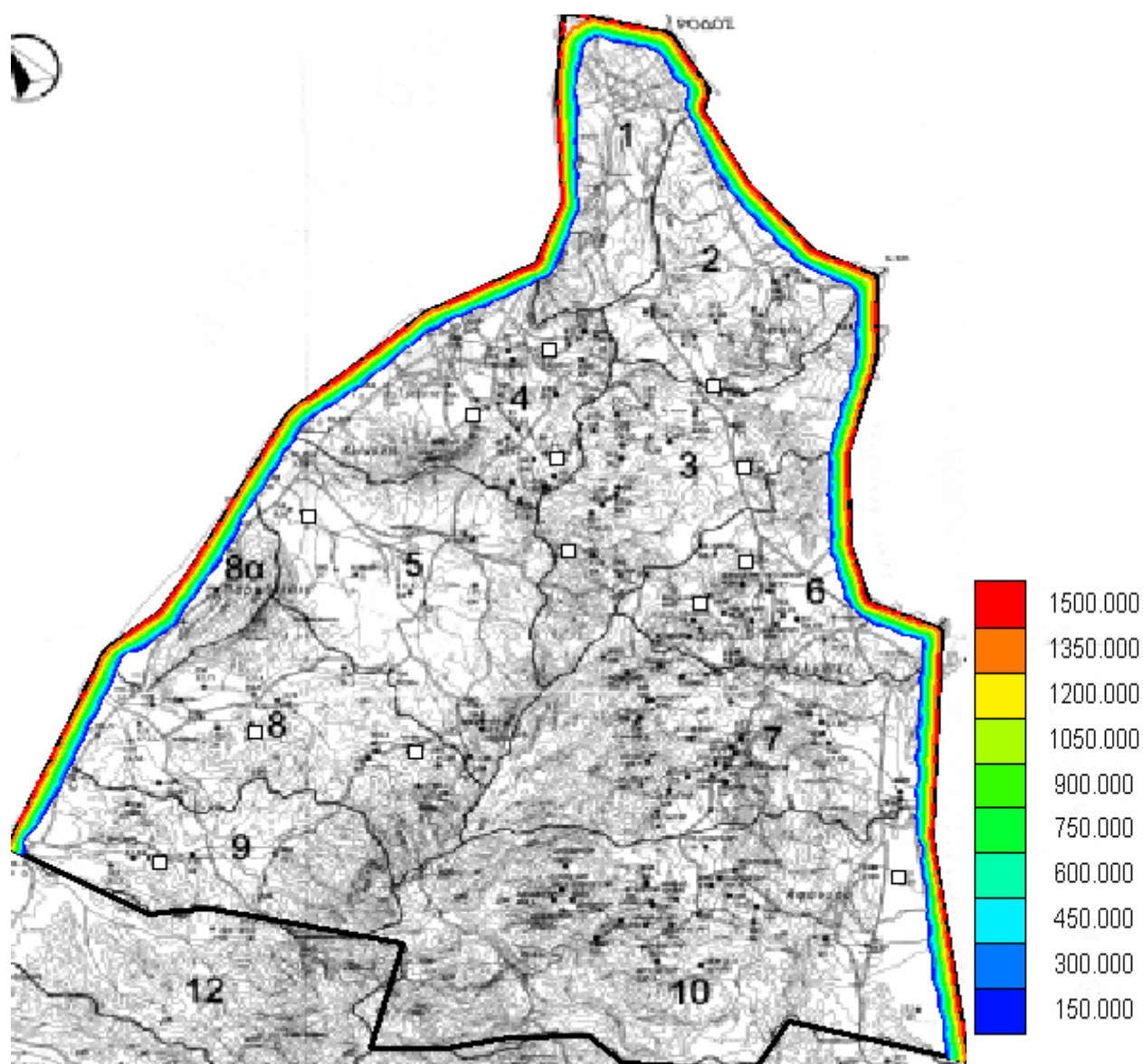
**Γράφημα 7.11:** Ταχύτητες ροής (m/day) στο τέλος της Χειμερινής περιόδου  
Στρώμα 2



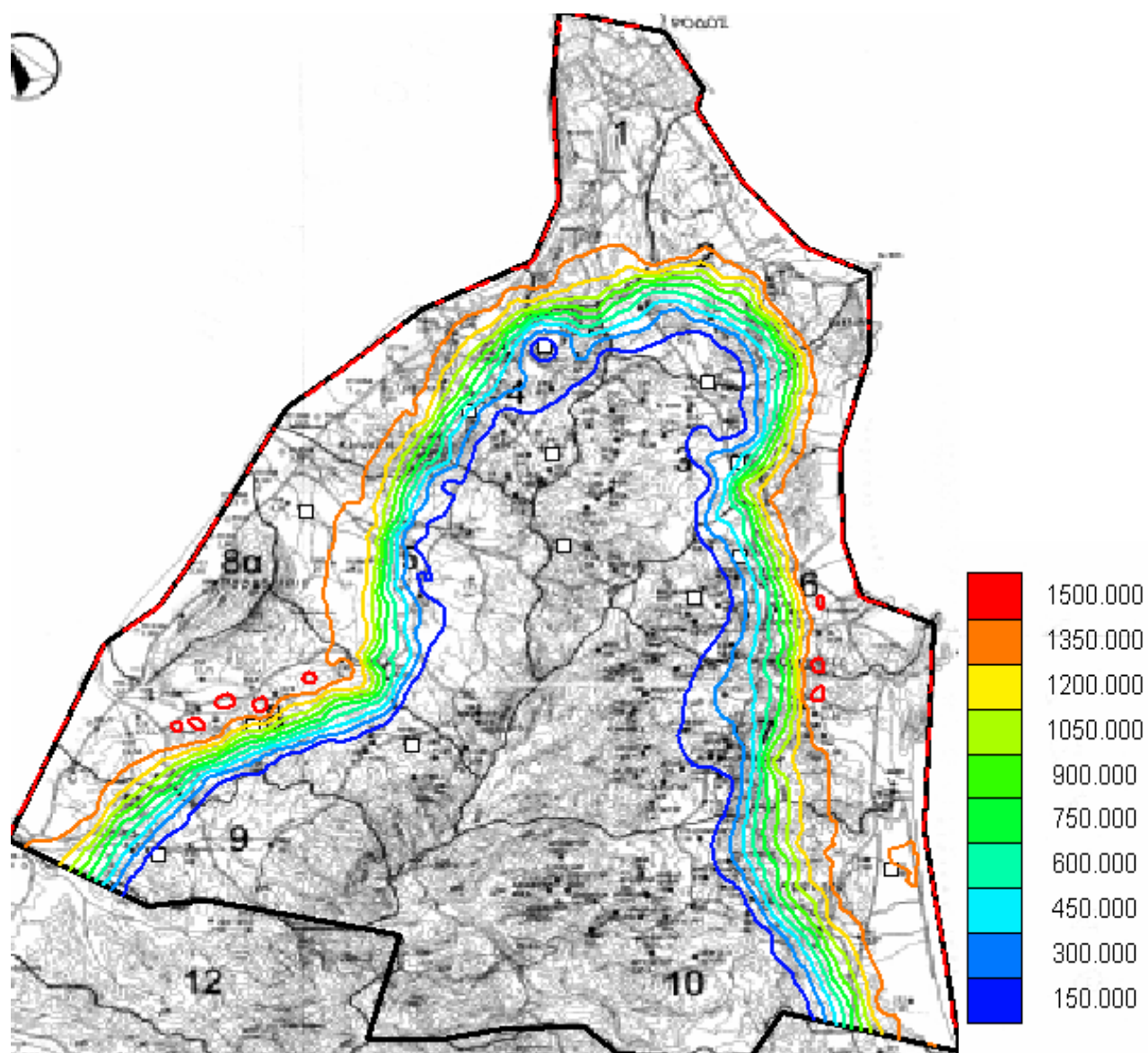
**Γράφημα 7.12:** Ταχύτητες ροής (m/day) στο τέλος της Θερινής περιόδου  
Στρώμα 2

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι τα υδραυλικά ύψη, καθώς και οι ταχύτητες της ροής του υπόγειου ύδατος έχουν λίγο υψηλότερη τιμή κατά την Χειμερινή περίοδο.

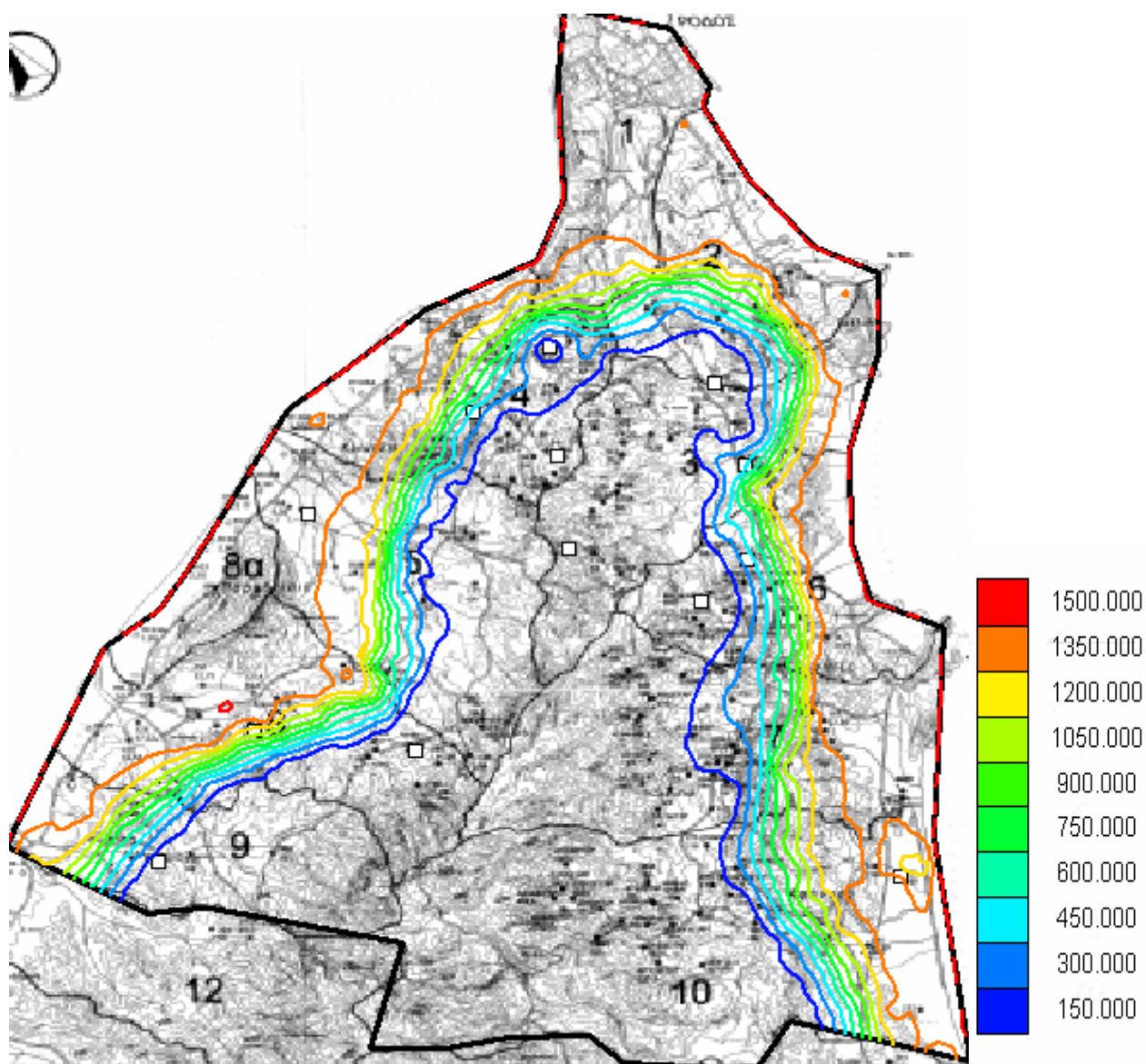
Στα ακόλουθα γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την υπάρχουσα κατάσταση υφαλμύρωσης του υδροφορέα (συγκέντρωση χλωριώντων). Τα στοιχεία του πεδίου σχετικά με τις συγκεντρώσεις των χλωριώντων στο κατώτερο στρώμα ήταν ανεπαρκή και σύμφωνα με αυτά στο στρώμα 1 δεν εντοπίζεται πρόβλημα ανάμιξης του καθαρού νερού με το υφάλμυρο. Για το λόγο αυτό θα περιοριστούμε στην εξέταση της εξάπλωσης του μετώπου της υφαλμύρωσης μόνο στο ανώτερο υδροφόρο στρώμα.



**Γράφημα 7.13:** Συγκεντρώσεις χλωριώντων (ppm) στο κατώτερο στρώμα



**Γράφημα 7.14:** Συγκεντρώσεις χλωριώντων (ppm) στο τέλος της Θερινής περιόδου  
Στρώμα 2



**Γράφημα 7.15:** Συγκεντρώσεις χλωριώντων (ppm) στο τέλος της Χειμερινής περιόδου  
Στρώμα 2

Από τα τελευταία δύο γραφήματα διαπιστώνεται ότι στο ανώτερο υδροφόρο στρώμα έχουν εισχωρήσει ποσότητες υφάλμυρου νερού, καθιστώντας το νερό του υδροφορέα ακατάλληλο για ορισμένες χρήσεις. Τα υδραυλικά ύψη, που είναι λίγο μεγαλύτερα κατά τη Χειμερινή περίοδο, φαίνεται να έχουν μετατοπίσει ελάχιστα σε σχέση με τη Θερινή περίοδο το μέτωπο της υφαλμύρωσης προς την παραλιακή ακτογραμμή.

## **8. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ “ΟΑ” ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **8.1 Εισαγωγή**

Αφού έγινε η προσομοίωση της περιοχής ενδιαφέροντος και του υπόγειου φυσικού συστήματος με το μαθηματικό μοντέλο PTC ακολουθεί η εφαρμογή του αλγόριθμου ΟΑ, ώστε να προκύψει το βέλτιστο πρόγραμμα διαχείρισης των υπάρχουσων γεωτρήσεων με σκοπό την πρόληψη της εξάπλωσης της ζώνης υφαλμύρωσης στο μέλλον. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το μοντέλο της βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στο ανώτερο υδροφόρο στρώμα, λόγω έλλειψης στοιχείων σχετικά με τις συγκεντρώσεις των χλωριώντων στο στρώμα 1.

### **8.2 Εισαγωγή Δεδομένων στο Μοντέλο ΟΑ**

Αρχικά καθορίζονται τα γενικά στοιχεία λειτουργίας του μοντέλου όπως:

- Ο αριθμός των περιόδων για τις οποίες θα εφαρμοστεί το διαχειριστικό πρόγραμμα. Αντίθετα με τον κώδικα PTC, στην περίπτωση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης δεν γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα σε Θερινή και Χειμερινή περίοδο
- Μέγιστος αριθμός των επιπέδων τομής και των κορυφών που θα χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο
- Συντελεστής κόστους λειτουργίας των πηγαδιών ( $\text{€/m}^3$  νερού που αντλείται)

**OA Configuration**

Optimization Configuration

Number of Management Periods	<input type="text" value="1"/>	Maximum Number of Vertices	<input type="text" value="11000"/>
Maximum Number of Cutting Hyperplanes	<input type="text" value="80"/>	Convergence Criterion	<input type="text" value="2.9"/>
Perturbation Coefficient	<input type="text" value="5"/>	Line Search Coefficient	<input type="text" value="1.5"/>
Operation Cost Coefficient	<input type="text" value="40"/>	Installation Cost Coefficient	<input type="text" value="0"/>
		Minimum Pumping Rate	<input type="text" value="0"/>

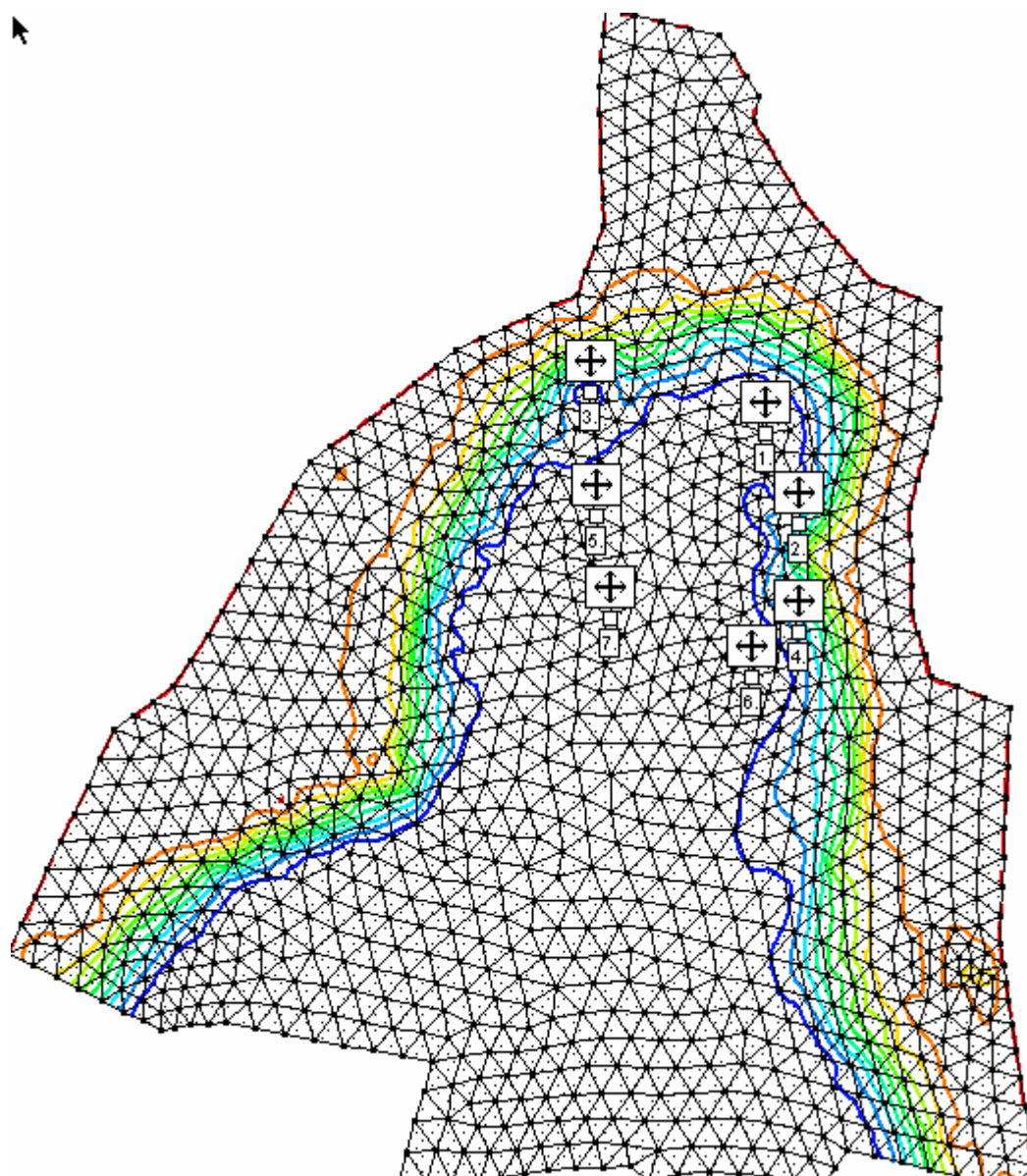
Files

PTC Run File	<input type="text" value="PTC_Mesh.run"/>	<input type="button" value="Browse..."/>	Constraints File	<input type="text" value="constraints.dat"/>
PTC Concentrations File	<input type="text" value="concs_s1.1"/>		Wells File	<input type="text" value="wells.dat"/>
OA Output File	<input type="text" value="optimal.txt"/>		OA Log File	<input type="text" value="oa-log.txt"/>

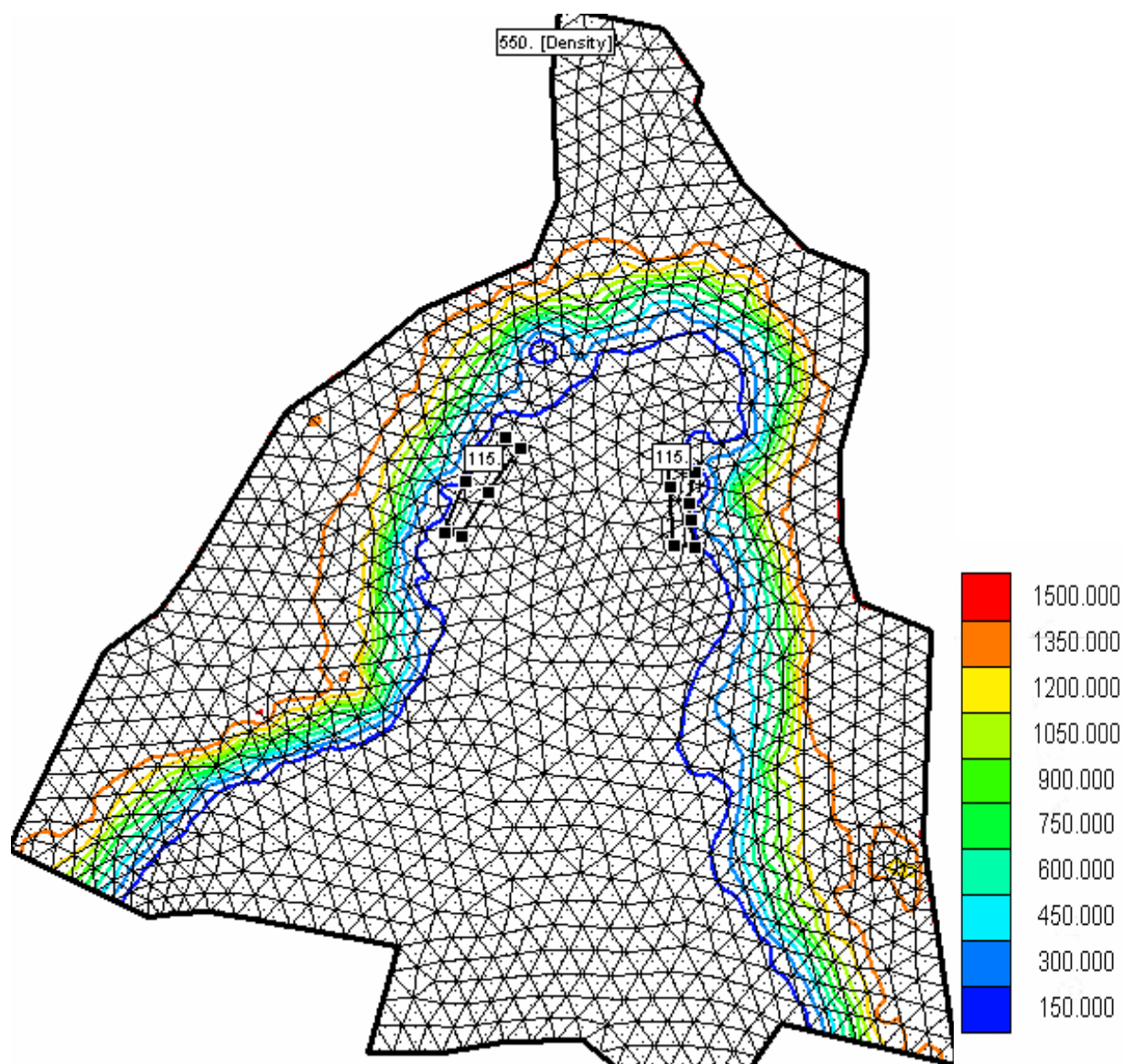
PTC Layer Number to Optimize:

**Σχήμα 8.1:** Γενικά στοιχεία λειτουργίας του μοντέλου "ΟΑ"

Στη συνέχεια, πρέπει να καθοριστούν οι πιθανές θέσεις των πηγαδιών εξυγίανσης καθώς και οι θέσεις όπου θα τοποθετηθούν τα πηγάδια παρατήρησης της συγκέντρωσης των χλωριώντων.



**Γράφημα 8.1:** Θέσεις πηγαδιών εξυγίανσης



**Γράφημα 8.2:** Πηγάδια παρατήρησης της συγκέντρωσης των χλωριώντων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στόχος στην παρούσα εργασία είναι να αποτραπεί η περαιτέρω διείσδυση του υφάλμυρου νερού και όχι η ολοκληρωτική αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την εγκατάσταση νέων πηγαδιών εμπλουτισμού στην περιοχή, αλλά στην παρούσα φάση αυτό δεν είναι εφικτό λόγω ανεπάρκειας νερού το οποίο να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα. Έτσι, έγινε η επιλογή να μην εγκατασταθούν στην περιοχή νέα πηγάδια εξυγίανσης, αλλά να βρεθεί ο καταλληλότερος τρόπος διαχείρισης των ήδη υπάρχουσων γεωτρήσεων. Για το λόγο αυτό εξετάζονται παρακάτω διάφορα σενάρια σχετικά με τις παροχές των πηγαδιών άντλησης που λειτουργούν στην περιοχή. Κάθε φορά ορίζονται στις γεωτρήσεις οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές παροχής που μπορούν να έχουν και το μοντέλο ΟΑ επιλέγει τελικά τον βέλτιστο συνδυασμό αυτών.

Τα *πηγάδια παρατήρησης* τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν σε κάθε σενάριο ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης δεν έχει εισχωρήσει περισσότερο προς το εσωτερικό της περιοχής. Αυτό το επιτυγχάνουν ελέγχοντας ότι η συγκέντρωση των χλωριώντων στις θέσεις αυτές δεν ξεπερνά μία μέγιστη επιτρεπτή τιμή.

### 8.3 Σενάρια και Αποτελέσματα του Μοντέλου Βελτιστοποίησης

Τα σενάρια που θα γίνουν διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Σενάρια στα οποία υποθέτουμε ότι οι μελλοντικές απαιτήσεις σε κατανάλωση ύδατος θα παραμείνει στα ίδια με τα σημερινά ή σε χαμηλότερα επίπεδα και σενάρια στα οποία υποθέτουμε ότι θα υπάρξει αύξηση στις μελλοντικές απαιτήσεις σε κατανάλωση ύδατος

- **Σενάριο 1<sup>ο</sup>:** Στο σενάριο αυτό θεωρείται μια ελάχιστη αύξηση στις μελλοντικές παροχές όλων των πηγαδιών.

Πηγάδι Εξυγίανσης	Υφιστάμενες παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Μέγιστες Μελλοντικές παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Βέλτιστη λύση (m <sup>3</sup> /day)
1	-1440	-1500	-1500
2	-240	-300	-148
3	-1200	-1300	-1300
4	-720	-800	-800
5	-1440	-1500	-1500
6	-1200	-1300	-1200
7	-960	-1000	-415
<b>Συνολική απαίτηση ύδατος (m<sup>3</sup>/day)</b>	<b>-7200</b>		<b>-6863</b>
<i>Κόστος Λειτουργίας (€)</i>			<i>274536</i>

**Πίνακας 8.1:** Σενάριο 1<sup>ο</sup>

- **Σενάριο 2<sup>ο</sup>:** Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι μελλοντικά οι παροχές όλων των πηγαδιών θα αυξηθούν κατά 30%.

Πηγάδι Εξυγίανσης	Υφιστάμενες παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Μέγιστες Μελλοντικές παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Βέλτιστη λύση (m <sup>3</sup> /day)
1	-1440	-1872	-1872
2	-240	-312	0
3	-1200	-1560	-1560
4	-720	-936	-626
5	-1440	-1872	-1872
6	-1200	-1560	0
7	-960	-1248	-1248
<b>Συνολική απαίτηση ύδατος (m<sup>3</sup>/day)</b>	<b>-7200</b>		<b>-7178</b>
<i>Κόστος Λειτουργίας (€)</i>			<i>287158</i>

**Πίνακας 8.2:** Σενάριο 2<sup>ο</sup>

- **Σενάριο 3<sup>ο</sup>:** Στο σενάριο αυτό υποθέτουμε διπλασιασμό της μελλοντικής παροχής των πηγαδιών τα οποία βρίσκονται μακρύτερα από το τέλος της εισχώρησης του μετώπου της υφαλμύρωσης (πηγάδια 5 και 7). Τα πηγάδια 1 και 3 θεωρούμε ότι στο μέλλον θα αντλούν με την ίδια παροχή με σήμερα και στα υπόλοιπα τρία (πηγάδια 2, 4 και 6) υποθέτουμε μείωση της παροχής τους στο μισό.

Πηγάδι Εξυγίανσης	Υφιστάμενες παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Μέγιστες Μελλοντικές παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Βέλτιστη λύση (m <sup>3</sup> /day)
1	-1440	-1440	-494
2	-240	-120	0
3	-1200	-1200	-1200
4	-720	-360	0
5	-1440	-2880	-2880
6	-1200	-600	0
7	-960	-1920	-1920
<b>Συνολική απαίτηση ύδατος (m<sup>3</sup>/day)</b>	<b>-7200</b>		<b>-6494</b>
<i>Κόστος Λειτουργίας (€)</i>			<i>259772</i>

**Πίνακας 8.3:** Σενάριο 3<sup>ο</sup>

- **Σενάριο 4<sup>ο</sup>:** Στο σενάριο αυτό υποθέτουμε διπλασιασμό της μελλοντικής παροχής των πηγαδιών τα οποία βρίσκονται μακρύτερα από το τέλος της εισχώρησης του μετώπου της υφαλμύρωσης (πηγάδια 5 και 7). Η παροχή στα υπόλοιπα πηγάδια δεν μεταβάλλεται.

Πηγάδι Εξυγίανσης	Υφιστάμενες παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Μέγιστες Μελλοντικές παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Βέλτιστη λύση (m <sup>3</sup> /day)
1	-1440	-1440	-748
2	-240	-240	0
3	-1200	-1200	-1200
4	-720	-720	-720
5	-1440	-2880	-2880
6	-1200	-1200	-1200
7	-960	-1920	-1920
<b>Συνολική απαίτηση ύδατος (m<sup>3</sup>/day)</b>	<b>-7200</b>		<b>-8668</b>
<i>Κόστος Λειτουργίας (€)</i>			<i>346337</i>

**Πίνακας 8.4:** Σενάριο 4<sup>ο</sup>

- **Σενάριο 5<sup>ο</sup>:** Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι μελλοντικά οι παροχές όλων των πηγαδιών θα αυξηθούν κατά 50%.

Πηγάδι Εξυγίανσης	Υφιστάμενες παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Μέγιστες Μελλοντικές παροχές (m <sup>3</sup> /day)	Βέλτιστη λύση (m <sup>3</sup> /day)
1	-1440	-2160	-2160
2	-240	-360	-360
3	-1200	-1800	-1800
4	-720	-1080	-1080
5	-1440	-2160	-2160
6	-1200	-1800	-1445
7	-960	-1440	-1440
<b>Συνολική απαίτηση ύδατος (m<sup>3</sup>/day)</b>	<b>-7200</b>		<b>-10445</b>
<i>Κόστος Λειτουργίας (€)</i>			<i>417829</i>

**Πίνακας 8.5:** Σενάριο 5<sup>ο</sup>

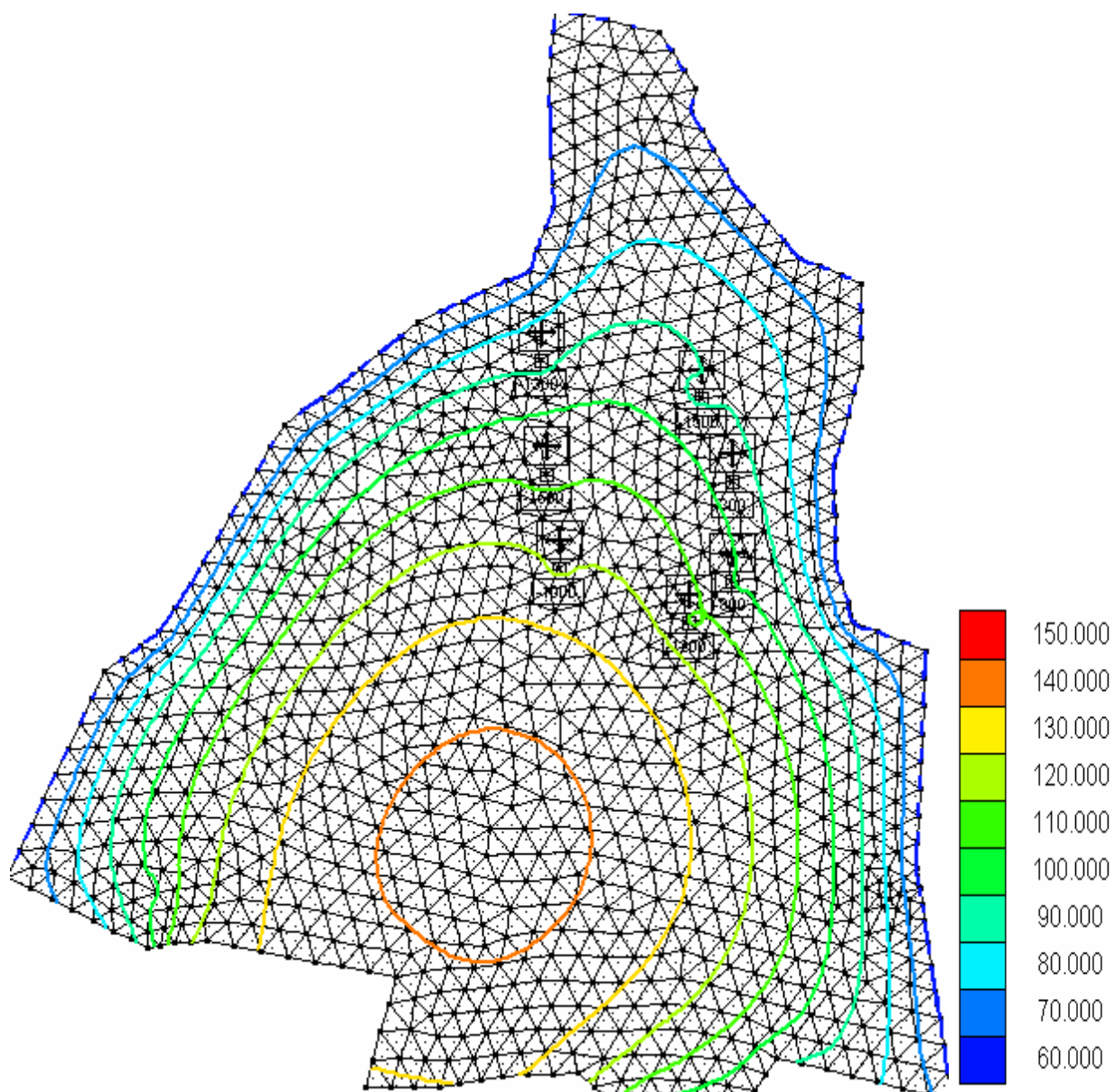
## 8.4 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στο Βόρειο τμήμα της νήσου Ρόδου και την πλήρη αποκατάσταση του υπόγειου υδροφορέα απαιτείται η εγκατάσταση νέων πηγαδιών εμπλουτισμού, τα οποία θα κατευθύνουν την υφάλμυρη ζώνη προς τα παραλιακά όρια της περιοχής. Όμως λόγω του ότι δεν υπάρχει επαρκής ποσότητα νερού που να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον εμπλουτισμό, στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας των υφιστάμενων πηγαδιών άντλησης, ώστε να αποτραπεί η περαιτέρω εξάπλωση του μετώπου της υφαλμύρωσης.

Από τα σενάρια που έγιναν παραπάνω φαίνεται ότι το μοντέλο βελτιστοποίησης, ανάλογα κάθε φορά με τις μέγιστες επιτρεπτές παροχές που ορίζουμε στα πηγάδια εξυγίανσης, τροποποιεί τον βέλτιστο διαχειριστικό συνδυασμό τους.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι κάποια πηγάδια, εξαιτίας του ότι βρίσκονται πιο μακριά από τη ζώνη υφαλμύρωσης (πηγάδια 5 και 7), έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν με αρκετά αυξημένες τις παροχές τους χωρίς να προκαλούν μεγαλύτερη διείσδυση του υφάλμυρου νερού. Επίσης, στα τρία από τα πέντε σενάρια το μοντέλο επιλέγει να καταργήσει τη λειτουργία του πηγαδιού 2, του οποίου η υφιστάμενη παροχή άντλησης είναι πολύ χαμηλότερη από των υπολοίπων.

Η επιλογή ενός από τους συνδυασμούς που προέκυψαν από τα πέντε σενάρια ως τελική βέλτιστη λύση δεν έχει πρακτική σημασία, αφού ο σχεδιασμός εξαρτάται κάθε φορά από τις ανάγκες σε κατανάλωση ύδατος που πρέπει να καλυφθούν. Στο σημείο αυτό όμως είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι η άντληση του ύδατος του υπόγειου υδροφορέα της Ρόδου δεν πρέπει να είναι ανεξέλεγκτη, διότι ήδη τα αποθέματα νερού είναι λιγοστά και η υπεράντληση θα οδηγήσει στη σημαντική μείωση του υδραυλικού ύψους (Γράφημα 8.3, 8.4).



**Γράφημα 8.3:** Υδραυλικά ύψη (Υφιστάμενες Παροχές άντλησης  $\approx 7000 \text{ m}^3/\text{d}$ )



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1]. Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, *Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου*, 2003.
- [2]. Καρατζάς Γεώργιος Π., Σημειώσεις του μαθήματος «*Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων*» του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, 2004.
- [3]. Τσακίρης Γ., *Υδατικοί Πόροι: Ι Τεχνική Υδρολογία*, 1995.
- [4]. Τσούτσος Θ., Σημειώσεις του μαθήματος «*Αειφόρος Ανάπτυξη*» του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.
- [5]. Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Γεωργικών Διαρθρώσεων, Δ/ση Γεωλογίας – Υδρολογίας, Τμήμα Υδρογεωλογίας, Γεωτρήσεων και Μαθηματικών Ομοιωμάτων, *Υδρογεωλογική Μελέτη νήσου Ρόδου και σύνταξη μαθηματικού μοντέλου*, 1999.
- [6]. Anderson Mary P., Woessner William W., *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Adjective Transport*, 1992.
- [7]. Babu D. K., Pinder G. F., Niemi A., Ahlfeld D. P., Stothoff S.A., *Chemical Transport by Three – Dimensional Groundwater Flows*, 1997.
- [8]. Freeze Allan R., Cherry Jonh A., *Groundwater*, 1979.
- [9]. Karatzas George P., *Introduction to Groundwater Optimal Design*, Dept. of Environmental Engineering, Technical University of Crete, 2000.
- [10]. Rail Chester D., *Groundwater Contamination*, 1989.

---

### **Διπλωματικές εργασίες**

[11]. Στεργιάδη Μαρία, *Υδρογεωλογική Μελέτη του Βορείου Τμήματος της Νήσου Ρόδου – Προσομοίωση Υπόγειας Ροής με χρήση του Τρισδιάστατου Μοντέλου Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων "PTC", 2004.*

### **Δημοσιεύσεις**

[12]. Karatzas G. P. and Pinder G. F., *Groundwater Management Using Numerical Simulation and the Outer Approximation Method for Global Optimization*, Water Resources Research, Vol. 29, N<sup>o</sup> 10, 3371 – 3378, 1993.

[13]. Papadopoulou M. P, Pinder G. F., and Karatzas G. P., *Enhancement of the Outer Approximation Method for the solution of Concentration – Constrained Optimal Design Groundwater – Remediation Problems*, Water Resources Research, Vol. 39, N<sup>o</sup> 7, 1185, 2003.

### **Ιστοσελίδες**

[14]. [www.ando.gr](http://www.ando.gr)

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