



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Τομέας Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής (III) –  
Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής**

---

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

SCHOOL of ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Division III: Environmental Hydraulics and Geoenvironmental Engineering – Geoenvironmental  
Engineering Laboratory

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΕ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ**

**ΓΙΔΑΣ Κ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)

Βαρουχάκης Εμμανουήλ, Καθηγητής Π.Κ

Πανυχιανάκης Γεώργιος, Καθηγητής Π.Κ

**ΧΑΝΙΑ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2015**

Στην οικογένειά μου,  
και ιδιαίτερα στην μικρή μου αδερφή  
Αγγελική

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Μετά το πέρας της διαδικασίας συγγραφής και ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Καρατζά Γεώργιο, κοσμήτορα της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και υπεύθυνο του τομέα Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής και Περιβαλλοντικής Υδραυλικής (III) , για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης και την βοήθεια την οποία έλαβα κατά την διάρκεια της φοίτησής μου στην Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Στην όλη πορεία μου μέχρι να φτάσω σε αυτό το σημείο, καθοριστικός παράγοντας ήταν ο Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκης, μέλος του εργαστηρίου του τομέα Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ο οποίος σε οποιαδήποτε απορία και βοήθεια ήταν παρών και έτοιμος να συνεισφέρει με προσωπικό κόπο και γνώσεις, ώστε να έρθει εις πέρας οποιοδήποτε πρόβλημα τόσο στην διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής όσο και στην όλη πορεία της φοίτησής μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου, οι οποίοι με βοήθησαν και με στηριξαν σε όλη την πορεία της φοίτησής μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον συνάδελφο κ. Κανέλλο Παναγιώτη , κ. Βατικιώτη Γιάννη και κ. Ξυλά Δημήτριο για την πολύτιμη βοήθειά τους σε ότι και αν χρειάστηκα ανά πάσα ώρα και στιγμή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εφαρμογή του μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας SEAWAT στην προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρισης σε πιλοτική εργαστηριακή μονάδα με την βοήθεια του προγράμματος Visual – MODFLOW.

Όπως είναι γνωστό το αλμυρό νερό αποτελεί έναν τύπο και μια κατηγορία ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Αρχικά πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στο φαινόμενο της υφαλμύρισης στον Ελλάδικό χώρο. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο θεωρητικό μέρος της υφαλμύρισης με τις μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο αυτό συναρτήσει των εξισώσεων ροής για τα υπόγεια ύδατα σε ελεύθερο υδροφορέα.

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε σε δεξαμενή (πιλοτική εργαστηριακή μονάδα) η οποία αποτελούταν από πορώδες μέσο τριών στρωμάτων διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας και κοκκομετρίας.

Ακολούθως οι εργαστηριακές ρυθμίσεις εισήχθησαν στον πρόγραμμα Visual MODFLOW, ούτως ώστε να αναπαραστηθούν όσον το δυνατόν πιο ρεαλιστικά οι πραγματικές συνθήκες του πειράματος. Χρησιμοποιώντας τον κώδικα SEAWAT του ίδιου προγράμματος μελετήκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης στο υπό εξέταση πορώδες μέσο. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν μετά από διαδοχικά πειράματα σύγκριθηκαν με αυτά της μοτελοποίησης για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν τη χρονική μεταβολή της σφήνας της υφαλμύσης.

Εν κατακλείδι, διαπιστώνεται ότι οι ισοδυναμικές καμπύλες που περιγράφουν το φαινόμενο της υφαλμύρισης και εκείνες της προσομοίωσης συμπίπτουν αναφορικά με τον πόδα της σφήνας. Οπότε η πειραματική διάταξη αποτελεί μια πολύ καλή βάση για μελλοντική και περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρισης με διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ.....</b>	<b>6</b>
1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ.....	10
1.3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	12
1.4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ.....</b>	<b>17</b>
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	17
2.2. ΑΙΤΙΑ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ .....	20
2.3. ΕΙΔΗ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ .....	22
2.4. ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	23
2.5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ.....	27
2.6. ΛΗΦΘΕΝΤΑ ΜΕΤΡΑ.....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....</b>	<b>30</b>
3.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ .....	30
3.2. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ HUBERT.....	34
3.3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ .....	38
3.4. Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	39
3.5. «ΑΝΥΨΩΣΗ» ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΕΡΓΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ .....	42
3.6. ΤΟ «ΠΟΔΙ» ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....</b>	<b>49</b>
4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ .....	49
4.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ .....	50
4.3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>54</b>
5.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	54

5.2. ΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ .....	56
5.3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ .....	60
5.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MODFLOW .....</b>	<b>70</b>
6.1. ΧΡΗΣΗ MODFLOW .....	70
6.2. ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ SEAWAT .....	71
6.5. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ – ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	72
6.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ .....	74
<b>6.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ .....</b>	<b>74</b>
<b>6.2.2. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ MODFLOW .....</b>	<b>74</b>
6.3. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	76
<b>6.3.1. ΤΜΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ .....</b>	<b>76</b>
<b>6.3.2. ΤΜΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>	<b>79</b>
<b>6.3.3. ΤΜΗΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>83</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>89</b>
<b>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ .....</b>	<b>90</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>91</b>

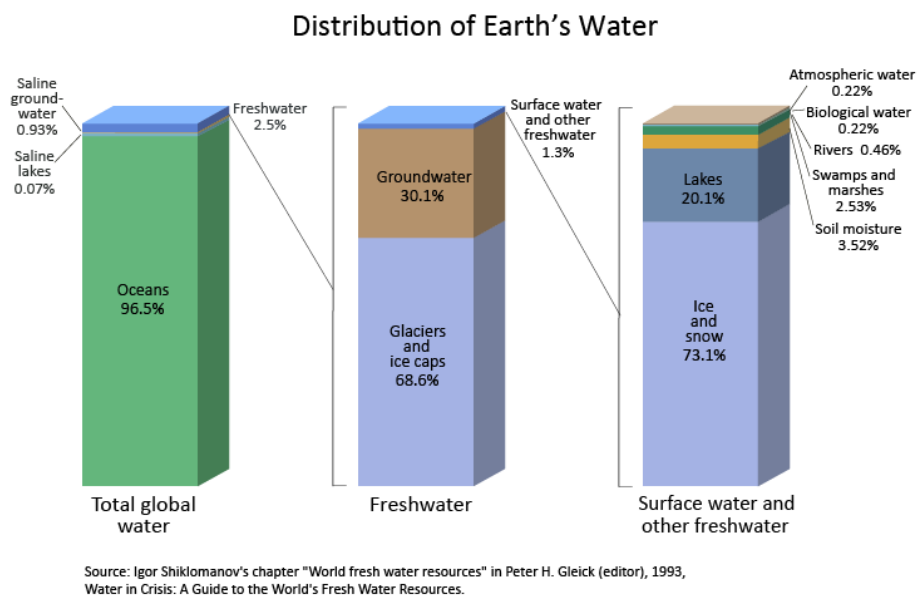
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

### 1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί την πιο γνωστή χημική ένωση πάνω στην Γη και η οποία θεωρείται «φυσικό αγαθό» και σημαντικός «οικονομικός παράγοντας». Δύο από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι υδατικοί πόροι είναι η διαθεσιμότητα και η ποιότητα τους. Η υπεράντληση και η ρύπανση του νερού αποτελούν σημαντικά προβλήματα που χρίζουν αντιμετώπισης. Το 96,5% του νερού της Γης βρίσκεται στους ωκεανούς (και τις θάλασσες), το 1,7% στα υπόλοιπα επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια, έλη κ.τ.λ.), 1,7% είναι υπό μορφή πάγων στους Πόλους της Γης, και το υπόλοιπο 0,1% βρίσκεται ως υγρασία της ατμόσφαιρας και στα νέφη. Μόνο το 2,5% του νερού της Γης είναι «γλυκό» ενώ το 98,8% του πόσιμου νερού βρίσκεται στους πάγους και στα υπόγεια ύδατα. Λιγότερο από 0,3% του γλυκού νερού της Γης βρίσκεται σε ποτάμια, λίμνες και

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
στην ατμόσφαιρα, ενώ ακόμα μικρότερο ποσοστό (0,003%) περιέχεται στα σώματα των βιολογικών όντων και σε ανθρώπινης παραγωγής προϊόντα. Όπως είναι λοιπόν αντιληπτό οι πάγοι και το νερό που βρίσκεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες δεν είναι εκμεταλλεύσιμο από τον άνθρωπο μειώνοντας τις ποσότητες του νερού που είναι διαθέσιμο για τον άνθρωπο στο 0,6 % του γλυκού νερού (περίπου)  $8,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  νερού)

Από τις διαθέσιμες ποσότητες γλυκού νερού μόνο το 12% αποτελεί επιφανειακό νερό ενώ το υπόλοιπο είναι υπόγειο, περίπου  $7 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . Οι μεγαλύτερες ποσότητες των υπόγειων υδάτων βρίσκονται σε μεγάλα βάθη 700m από την επιφάνεια, κάνοντας την εκμετάλλευση του από τον άνθρωπο σχεδόν αδύνατη. Αυτό σημαίνει ότι το ποσοστό του νερού για χρήση στις καθημερινές δραστηριότητες περίπου  $0,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  και  $3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  από επιφανειακά και υπόγεια ύδατα αντίστοιχα.



Εικόνα 1.1: Κατανομή των υδάτων της Γής

Πίνακας 1.1: Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού

<b>Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού</b>			
<b>Μορφή Νερού</b>	<b>Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα</b>	<b>Ποσοστό γλυκού νερού</b>	<b>Ποσοστό συνολικού νερού</b>
<b>Ωκεανοί, Θάλασσες</b>	1.338.000.000	--	96,5
<b>Παγόβουνα, Παγετώνες &amp; Μόνιμο χιόνι</b>	24.064.000	68,7	1,74
<b>Υπόγειο Νερό</b>	23.400.000	--	1,7
<b>Γλυκό</b>	10.530.000	30,1	0,76
<b>Αλμυρό</b>	12.870.000	--	0,94
<b>Εδαφική Υγρασία</b>	16.500	0,05	0,001
<b>Εδαφικός πάγος &amp; Μόνιμα παγωμένο έδαφος</b>	300.000	0,86	0,022
<b>Λίμνες</b>	176.400	--	0,013
<b>Γλυκές</b>	91.000	0,26	0,007
<b>Αλμυρές</b>	85.400	--	0,006



<b>Ατμόσφαιρα</b>	12.900	0,04	0,001
<b>Έλη</b>	11.470	0,03	0,0008
<b>Ποταμοί</b>	2.120	0,006	0,0002
<b>Βιολογικό Νερό</b>	1.120	0,003	0,0001
<b>Σύνολο</b>	1.386.000.000	-	100

**Πηγή:** Gleick, P. H., 1996: *Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.

Οι επιφανειακοί υδάτινοι πόροι είναι εύκολα διακριτοί και με την βοήθεια ενός τοπογραφικού χάρτη μπορούμε να χαράξουμε τα όρια τους και να βρούμε τις λεκάνες απορροής τους. Το νερό ρέει ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους. Όπως είναι φυσικό τα επιφανειακά υδάτινα ρεύματα δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα όρια από τις λεκάνες απορροής του παρά μόνο σε κάποιες περιπτώσεις γεγονότων μεγάλης πλημμύρας.

Αντιθέτως, οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι δεν είναι ευδιάκριτοι. Δεν έχουν τοπογραφικά όρια αλλά φυσικαλά ενώ σε μια συγκεκριμένη περιοχή υπάρχει η πιθανότητα να βρίσκονται περισσότεροι του ενός υδροφορείς. Όπως προαναφέρθηκε, τμήμα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διηθείται και εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς. Από το νερό που εισχωρεί στο έδαφος, ένα μέρος κινείται κοντά στην επιφάνεια και ξαναβγαίνει γρήγορα με τη μορφή απορροής προς τα υδατορεύματα. Όμως ένα άλλο μεγάλο μέρος συνεχίζει τη πορεία του προς βαθύτερα στρώματα. Όπως δείχνει το διάγραμμα της εικόνας 1.2, η κατεύθυνση και η ταχύτητα του υπόγειου νερού καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων και των στρωμάτων περιορισμού (υπεδάφια στρώματα, τα οποία διαπερνά το νερό πολύ δύσκολα ή σχεδόν καθόλου). Η υπόγεια κίνηση του νερού εξαρτάται από τη διαπερατότητα (σε τι βαθμό επιτρέπεται η διέλευση του ύδατος διαμέσου των γεωλογικών στρωμάτων) και από το πορώδες (την ποσότητα των κενών μέσα στο εδαφικό υλικό) των στρώσεων. Αν το υπεδάφιο στρώμα επιτρέπει στο νερό να κινείται σχετικά εύκολα, αυτό μπορεί να διανύσει μεγάλες αποστάσεις σε διάρκεια μερικών ημερών. Μπορεί όμως επίσης να βυθιστεί προς βαθύτερους υδροφορείς γεγονός που το καθιστά πρακτικά μη διαθέσιμο.



Εικόνα 1.2: Κύκλος Νερού

Πηγή: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>

Ένα υδροφόρο σύστημα λοιπόν βρίσκεται σε μια δυναμική ισορροπία η οποία όμως μεταβάλλεται στο χρόνο. Οι διακυμάνσεις οφείλονται στις βροχοπτώσεις, στην εξατμισοδιαπνοή, στην ταχύτητα εκτόνωσης του υδροφόρου ορίζοντα, από τυχόν υπάρχουσες τροφοδοσίες από υποκείμενο υδροφόρο ή επιφανειακή απορροή, από τεχνικά έργα, από τεχνητό εμπλουτισμό. Κύριοι παράγοντες, όπως είναι αντιληπτό, από τους οποίους εξαρτάται η στάθμη των υδροφορέων είναι:

- Γεωμορφολογικές και τεκτονικές συνθήκες που καθορίζουν τη στάθμη και την πιεζομετρική επιφάνεια, τον τύπο του υδροφόρου και το προφίλ ταπεινώσεως
- Χαρακτηριστικά του υδροφορέα (λιθολογία, στεγανό υπόβαθρο)
- Συνθήκες τροφοδοσίας και αποστράγγισης

## 1.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου. Ουσιαστικά ο υδρολογικός κύκλος όπως αναπαρίσταται στην εικόνα 1.3 είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό στις διάφορες μορφές του διανέμεται στο οικοσύστημα..



Εικόνα 1.3: Ο υδρολογικός κύκλος

Από τις ποσότητες των υδάτων που πέφτουν στηγήνη επιφάνεια, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους υδάτινους αποδέκτεςρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια,μέσω υδατορευμάτων. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού.

Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτιση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς της επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
με τη πάροδο του χρόνου μέρος του ξαναπαίρνει στους ωκεανούς όπου ο κύκλος του νερού "τελειώνει" ... και "ξεκινάει".

### **1.3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.**

Οι υδροφορείς μπορεί να παίζουν πολλούς ρόλους στη συνολική ανάπτυξη των υδατικών πόρων μιας περιοχής. Οι πιο προφανείς ρόλοι ή καλύτερα λειτουργίες των υδροφόρων συστημάτων είναι (Καλλεργης Γ.2000):

- Η λειτουργία τροφοδοσίας των έργων απόληψης (supply function),
- Η λειτουργία διοχέτευσης (piping function) νερού από μια περιοχή σε μια άλλη (Kazmann, 1956). Η λειτουργία εξόρυξης νερού (mining function) στην περίπτωση που η απόληψη ξεπερνά την αναπλήρωση, που οδηγεί όμως στην εξάντληση του υδροφόρου.
- Η λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας (filter plant function) μεταχειρισμένων νερών (Hordon, 1977) στην ακόρεστη ζώνη.
- Η λειτουργία παραγωγής ενέργειας (energy-source function) με την κατασκευή και εγκατάσταση των αντλιών θερμότητας που αξιοποιούν τη θερμική ενέργεια του υδροφόρου (Gass-Lehr, 1997, Andrews, 1978).
- Η λειτουργία αποθήκευσης νερού (storage function) με την υπόγεια αποθήκευση της περίσσειας νερού (χειμερινής, υγρών περιόδων, πλημμυρικών απορροών αλλά και επεξεργασμένων λυμάτων).

#### **1.4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

Τέσσερις βασικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας νερού σε ένα υδραυλικό σύστημα.

- I. Η μέση ετήσια επιφανειακή και υπόγεια απορροή, καθώς και η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού
- II. Η τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησης του υπόγειου νερού .
- III. Η ποιότητα του νερού, υπόγειου ή επιφανειακού, στην υδρολογική λεκάνη και κοντά σε αυτήν.
- IV. Η νομοθεσία για τα νερά, υπόγεια και επιφανειακά, μέσα και κοντά στην υδρολογική λεκάνη.

Η πρώτη αρχή αναφέρεται στη μεγιστοποίηση της “ασφαλούς απόδοσης” (safe yield) σε μακροχρόνια κλίμακα. Το έλλειμμα οδηγεί στην εξάντληση των υδατικών πόρων και στην αύξηση μελλοντικά του κόστους της κάλυψης των αναγκών σε νερό που θα κληθούν να αντιμετωπίσουν, οι μελλοντικές γενιές.

Η συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών, η ανακύκλωση - επαναχρησιμοποίηση και ο τεχνητός εμπλουτισμός αποτελούν τις βασικές τεχνικές ικανοποίησης της πρώτης αρχής.

Η δεύτερη αρχή αποβλέπει στην ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων των διαφόρων δραστηριοτήτων του ανθρώπου πάνω στην ποιότητα του υπόγειου νερού, όπως είναι η υπεράντληση, ιδιαίτερα των παράκτιων υδροφορέων, η διάνομιξη γεωτρήσεων μεγαλύτερου βάθους από το υδρογεωλογικά επιτρεπτό, η χρησιμοποίηση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και βελτιωτικών του εδάφους και η διάθεση στο έδαφος και το υπέδαφος στερεών και υγρών αποβλήτων.

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
Τέλος, η τρίτη αρχή προϋποθέτει την ανάπτυξη κριτηρίων προτεραιοτήτων για τη μελλοντική χρήση του υπόγειου νερού, δοθέντος ότι οι περίοδοι ξηρασίας σε συνδυασμό με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση νερού από τη γεωργία, τη βιομηχανία και την ύδρευση, συνιστούν σημαντικά προβλήματα της “σοφής χρήσης”.

Από την άλλη μεριά η χρησιμοποίηση κριτηρίων προτεραιότητας οδηγεί στον περιορισμό του διατιθέμενου για άρδευση νερού υπέρ του διατιθέμενου για ύδρευση, γεγονός που έχει δυσμενείς οικονομικές επιπτώσεις.

Η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού, σε συνδυασμό με την τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησής του, αποτελούν στην πράξη μια άλλη έκφραση της «ασφαλούς απόδοσης» των υδροφόρων συστημάτων. Αλλά ακόμα και ο καθορισμός της απόδοσης αυτής υπόκειται σε μεταβολές που ελέγχονται, εκτός των άλλων, από την ενέργεια που απαιτείται για την άντληση του νερού και το σχετικό κόστος, τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της διάτρησης και άντλησης και, βασικά, τις εναλλακτικές λύσεις που έχει στην διάθεσή του, για την ικανοποίηση ενός καταναλωτή νερού, ο υπεύθυνος για αυτό. Το βασικό κριτήριο για την αξιοποίηση των επιφανειακών ή υπογείων νερών, καθορίζεται κάθε φορά σε συνάρτηση με τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε υδρολογική λεκάνη (Καλλέργης, 2001).

Η έννοια όμως της άντλησης υπόγειου νερού που προκαλεί βλάβη στο περιβάλλον απαιτεί περαιτέρω διευκρίνηση. Η υπεράντληση υδροφόρων μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της επιφανειακής απορροής και την ξήρανση υγρότοπων ή ανεπιθύμητη πτώση της στάθμης λιμνών. Δεδομένου ότι οι λίμνες και οι υγρότοποι είναι ευαίσθητες περιοχές, ο κίνδυνος περιβαλλοντικών βλαβών είναι υπαρκτός. Η άντληση υπόγειου νερού μπορεί επίσης να οδηγήσει στη δημιουργία καθιζήσεων με αποτέλεσμα την πρόκληση βλαβών σε κατασκευές, στο οδικό δίκτυο, σε αγωγούς, φράγματα και σήραγγες. Η υπεράντληση παράκτιων υδροφόρων μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση τους από τη διείσδυση θαλάσσιων υδάτων. Έτσι υπό τη γενική έννοια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν οικολογικές, οικονομικές, κοινωνικές, πολιτισμικές και πολιτικές συνιστώσες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Η έλλειψη συνδυασμένης ανάπτυξης και χρήσης τόσο των επιφανειακών όσο και υπόγειων νερών

–Η αδυναμία αξιόπιστης ποσοτικοποίησης από πλευράς των υδρογεωλόγων της έννοιας της ασφαλούς ή αειφόρου απόδοσης ενός υδροφόρου συστήματος, οποιοδήποτε κι αν

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
είναι το περιεχόμενό της, μια και δεν είναι μετρήσιμες πάντα όλες οι παράμετροι της πιο πάνω απόδοσης και η αδυναμία των διαχειριστών συνήθως μηχανικών να κατανοήσουν το πρόβλημα

- Η μη αποτελεσματική εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού αλλά και κυκλικής αποθήκευσης/χρήσης της περίσσειας (πλημμυρικών) απορροών,
- Ο μη συνδυασμός της χρήσης φυσικού νερού με αναγεννημένα ή αφαλατωμένα ή ακόμη και υφάλμυρα νερά. Κλειδί για την αειφόρο ανάπτυξη του υδατικού τομέα αποτελεί η δημιουργία κατάλληλης υποδομής (Capacity Building) που περιλαμβάνει:
  - τη δημιουργία κατάλληλου θεσμικού περιβάλλοντος
  - την ανάπτυξη κατάλληλης εργαστηριακής υποδομής με εξασφάλιση της αποδοχής των κοινωνικών φορέων και τη συμμετοχή των εξειδικευμένων ακαδημαϊκών μονάδων
  - την ανάπτυξη εξειδικευμένων ανθρώπινων πόρων και ενίσχυση των συστημάτων επιχειρησιακής διαχείρισης.
  - την ακριβή και αδιάκοπη γνώση των παραμέτρων εκείνων που έχουν άμεση σχέση με την χωροχρονική κατανομή της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων νερών μέσα από την συνεχή συλλογή πρωτογενών στοιχείων.

Δεδομένου ότι οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, τρωτοί σε εξωτερική ρύπανση, ανομοιόμορφα κατανεμημένοι χωροχρονικά, ασυνεχώς ανανεούμενοι, στενά εξαρτώμενοι από ακραίες συχνά μεταβολές του υδρολογικού καθεστώτος αλλά και απολύτως απαραίτητοι για την συντήρηση της ζωής, της ανάπτυξης και του περιβάλλοντος, ο στρατηγικός σχεδιασμός της “σοφής χρήσης” τους απαιτεί: (Καλλεργής Γ.2000)

- τη συνδιαχείρισή τους με τα επιφανειακά νερά

- χωρική κατανομή των μονάδων που διαθέτουν υψηλού επιπέδου τεχνογνωσία και θα καλύπτουν όλες τις συνιστώσες της συνδιαχείρισης του συνόλου των υδατικών πόρων (δημιουργία κατάλληλου δικτύου ακαδημαϊκών και άλλων εξειδικευμένων εργαστηρίων)
- .(<http://www.waterinfo.gr/eedyp/papers/GKallergis.html>)

Συγκρίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων διαπιστώνεται ότι (Καρτερακης, 2005):

1. Η άντληση νερού από πηγάδια απαιτεί σχετικά μικρό κόστος κατασκευής και εγκαταστάσεων (γεωτρήσεις, αντλητικά συστήματα) ενώ έχει σημαντικό κόστος λειτουργίας, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα. Από την άλλη πλευρά η χρήση επιφανειακών νερών, που αποθηκεύονται σε ταμιευτήρες, μπορεί να έχει ασήμαντα έξοδα λειτουργίας όμως το αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο (υδραυλικές κατασκευές, αγωγοί μεταφοράς, φράγματα) είναι τόσο μεγάλο, ώστε αν αναχθεί σε ετήσια βάση είναι πολύ πιθανό να δώσει ένα ευνοϊκό για τα υπόγεια νερά οικονομικό ισοζύγιο.

2. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων, εξαιτίας των πολύ μικρών ταχυτήτων κίνησης των υπόγειων νερών - σε αντίθεση με τα επιφανειακά νερά - θα απαιτούσε μακροχρόνια δειγματοληψία, που συνήθως δεν είναι πρακτικά εφικτή. Όμως εξαιτίας αυτής της αργής κίνησης του νερού αλλά και της πολύ μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας των υδροφορέων ένα περιορισμένης χρονικής κλίμακας δείγμα δεδομένων είναι δυνατό να δώσει μια σαφή εικόνα των αθροιστικών επιπτώσεων από μακροχρόνιες μεταβολές. Αντίθετα, μετρήσεις επιφανειακών νερών, όπου οι μεταβολές είναι πολύ πιο συχνές και απότομες –συνήθως ακολουθούν τον εποχιακό κύκλο- δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία παρά μόνο αν καλύπτουν ένα πολυετές διάστημα δειγματοληψιών.

3. Ακριβώς επειδή όλες οι μεταβολές και γενικά τα στοιχεία τα σχετικά με τα υπόγεια υδατικά αποθέματα είναι πιο δύσκολο να μελετηθούν με επιτόπου έρευνα από ότι τα αντίστοιχα για τα επιφανειακά, παλιότερα υπήρχε μια διστακτικότητα στο σχεδιασμό διαχείρισης των υπόγειων πόρων. Ένα επιπλέον εμπόδιο ήταν και η έλλειψη ειδικών επιστημόνων και ειδικευμένου προσωπικού. Σήμερα όμως τόσο η θεωρητική υποδομή

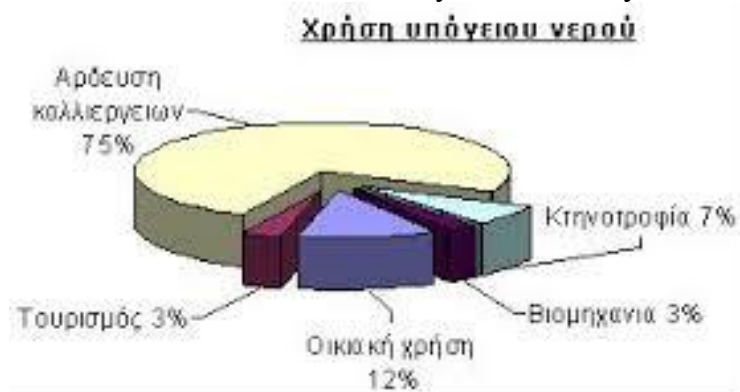


Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
όσο και οι τεχνολογικές δυνατότητες για επιτόπου μετρήσεις έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην υπάρχει ιδιαίτερη πρακτική δυσκολία στην κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας των υπόγειων υδατικών συστημάτων καθώς και πρόγνωσης μελλοντικών καταστάσεων. Σημαντικό ρόλο βέβαια στην περίπτωση αυτή έχουν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Συνολικά η άποψη που επικρατεί δεν είναι ότι οι υπόγειοι υδατικοί πόροι πλεονεκτούν απόλυτα απέναντι στους επιφανειακούς, αλλά ότι αν σε μια περιοχή συνυπάρχουν τότε η βέλτιστη λύση θα προέλθει από έναν ορθολογικό συνδυασμό και των δυο (Καρτεράκης , 2005)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ**

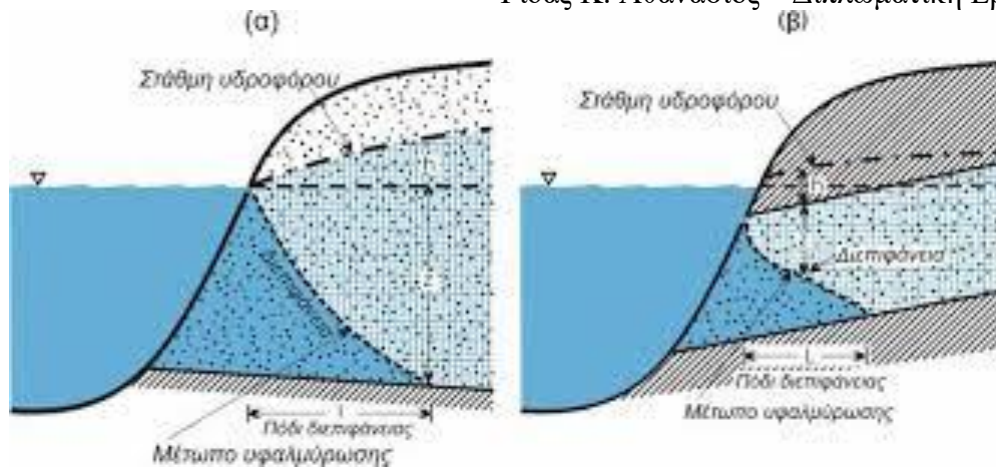
### **2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

Ως υφαλμύριση ορίζεται η ανάμιξη των υπογείων υδάτων με θαλασσινό νερό. Συνέπειες της υφαλμύρισης είναι η αύξηση του διαλυμένου άλατος (NaCl), στα υπόγεια νερά και εντέλει της υποβάθμισης της ποιότητας των "καθαρών" υδάτων. Η υφαλμύριση αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές ανά τον Πλανήτη. Οι διαστάσεις του προβλήματος είναι ορατές, δεδομένου ότι το 60 με 70 % του παγκοσμίου πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές. Ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων. Ο κίνδυνος της υφαλμύρισης εξ άλλου είναι άμεσα συνδεδεμένος με την μείωση των ποσοτήτων των φρέσκων υδάτων. Η αύξηση του πληθυσμού και η οικονομική ανάπτυξη έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των αναγκών σε αποθέματα φρέσκου νερού. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων είναι έντονο και στην Ελλάδα, ενώ υπάρχουν ενδείξεις ότι θα οξυνθεί στο άμεσο μέλλον. Στην Ελλάδα, η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια ύδατα. Η χρήση του νερού γίνεται κυρίως για πόση και άρδευση καθώς επίσης και για κάλυψη των τουριστικών και βιομηχανικών αναγκών.

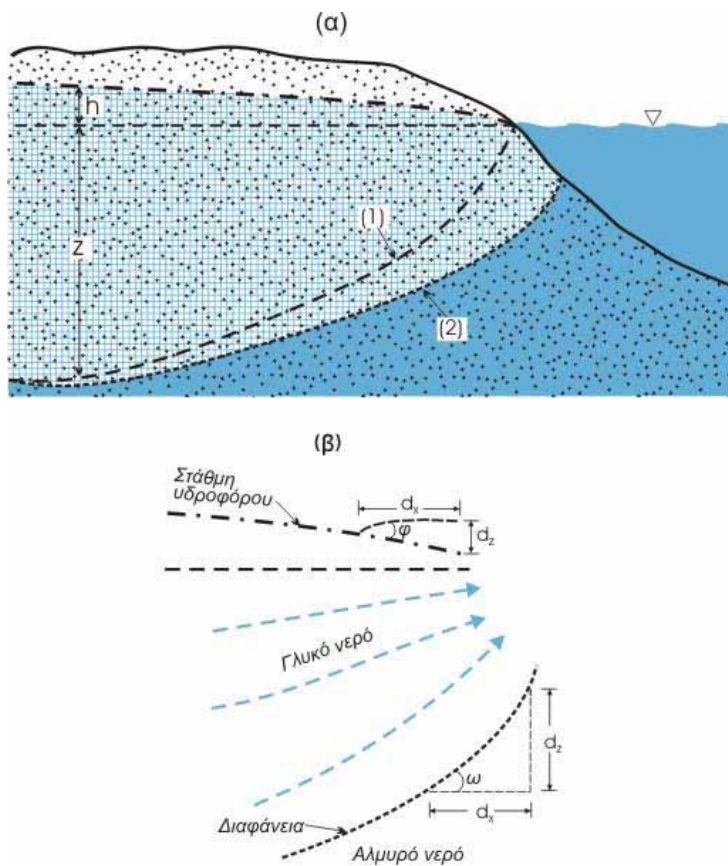


Εικόνα 2.1: Χρήση υπόγειου νερού

Στις περισσότερες παράκτιες περιοχές η οικονομία βασίζεται κυρίως στον τουρισμό και τη γεωργία. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες οι απαιτήσεις σε νερό είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την υφαλμύριση των υδροφόρων στρωμάτων και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση. Σε πολλές παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας αλλά κυρίως στα νησιά είναι γεγονός ότι η στάθμη στους υπόγειους υδροφορείς μειώνεται κατά 5m ετησίως (200m τα τελευταία 40 χρόνια), ενώ το βάθος άντλησης του νερού φτάνει και τα 300m. Στην ουσία η υφαλμύριση είναι απτή απόδειξη της άναρχης και ανορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού. Είναι λοιπόν φανερό, ότι η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων είναι πολύ σημαντική για την Ελλάδα λόγω της μεγάλης ακτογραμμής και των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων στις παράκτιες περιοχές.



Εικόνα 2.2: Υφαλμύριση σε ελεύθερο (α) και περιορισμένο (β) υδροφορέα (Νάνου – Γιάνναρου, 2001)



Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση ζώνης διεπιφάνειας (Νάνου – Γιάνναρου, 2001)

## 2.2. ΑΙΤΙΑ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας επέφερε καταλυτικές αλλαγές στο βιοτικό επίπεδο του ανθρώπου. Αν και η ποιότητα της ζωής αυξήθηκε, η ασύστολη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, η οποία γινόταν και γίνεται ακόμη, με γνώμονα την ευημερία αλλά και το οικονομικό κέρδος οδήγησε στη σταδιακή υποβάθμιση της φύσης και σε πληθώρα περιβαλλοντικών προβλημάτων. Από την υποβάθμιση του περιβάλλοντος επηρεάστηκε και ένα από τα πιο πολύτιμα αγαθά επάνω στον πλανήτη, το νερό. Παρόλο που το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του πλανήτη καλύπτεται από νερό, η διατήρηση της ζωής κάθε έμβιου οργανισμού επάνω στη Γη οφείλεται αποκλειστικά στα αποθέματα του γλυκού νερού, τα οποία αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του υδατικού συνόλου. Η σταδιακή ρύπανση των υδατικών πόρων μπορεί να αποβεί μοιραία για την εξέλιξη της ζωής. Η ρύπανση των υδάτων δεν οφείλεται όμως μόνο στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αν και μπορεί να θεωρείται παράδοξο, παρόλα αυτά το θαλασσίνο νερό θεωρείται ως πηγή ρύπανσης για το γλυκό νερό, όταν έρχεται σε επαφή με αυτό. Στις παράκτιες περιοχές, η θάλασσα έρχεται σε επαφή με τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Υπό φυσικές συνθήκες οι υπόγειοι υδροφορείς αποστραγγίζονται προς τη θάλασσα, όμως σε περίπτωση που η στάθμη του γλυκού νερού μειωθεί τότε μπορεί να αντιστραφεί η κατάσταση αυτή. Το αποτέλεσμα είναι η διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς και πρόκειται στην πραγματικότητα για ένα ιδιαίτερα σοβαρό φυσικό φαινόμενο, το οποίο είναι γνωστό με τον όρο «διείσδυση αλμυρού νερού» (saline water intrusion) ή απλά ως «υφαλμύριση».

Η σοβαρότητα του φαινομένου έγκειται στο γεγονός πως ταυτόχρονα αποτελεί και ένα ιδιαίτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα, από τη στιγμή που η ανάμειξη του αλμυρού νερού με το γλυκό, το καθιστά ακατάλληλο για κάθε χρήση. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης εντείνεται από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες με κύρια την υπεράντληση των υδάτων. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η στάθμη του γλυκού νερού και εάν τα αποθέματά του δεν ανανεωθούν σύντομα, τότε το υπόγειο νερό υφαλμυρώνεται. Στην Εικόνα φαίνεται η υφαλμύριση του γλυκού νερού που οφείλεται σε υπεράντληση στη στεριά, κατά τα διάφορα στάδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αλμυρό νερό να εισχωρεί όλο και περισσότερο στη στεριά, οπότε και σε συνδυασμό με την άνοδο της θάλασσας.

Η υφαλμύριση έχει αρνητικές επιπτώσεις στις περιοχές τις οποίες εμφανίζεται. Η ρύπανση των υδάτων τα καθιστά ακατάλληλα για κάθε χρήση από τον άνθρωπο, με συνέπεια κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα. Πλήττονται άμεσα ο τουρισμός, η γεωργία και η βιομηχανία, με αποτέλεσμα το μαρασμό των περιοχών αυτών. Επίσης, το φαινόμενο της ερημοποίησης ως φυσικό αποτέλεσμα της υφαλμύρισης των υπόγειων νερών καθιστά τις περιοχές ακατάλληλες για διαβίωση. Σημαντικό είναι επίσης και το γεγονός πως για την πλήρη απορρύπανση του γλυκού νερού, για την οριστική αντιστροφή δηλαδή του φαινομένου της υφαλμύρισης απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό διάστημα. Η υφαλμύριση, αν και είναι ένα φυσικό φαινόμενο τείνει να γίνει ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα και στην Ελλάδα, με άμεσο κίνδυνο για την ανάπτυξη των παράκτιων περιοχών της.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά του Ελλαδικού χώρου. Η ηπειρωτική Ελλάδα χαρακτηρίζεται από την παρουσία οροσειρών, ενώ εμφανές είναι και το υδρογραφικό δίκτυο. Οι ορεινοί αυτοί όγκοι στην ενδοχώρα, ως αποτέλεσμα της γεωτεκτονικής εξέλιξης του Ελλαδικού χώρου ευνοούν τις έντονες βροχοπτώσεις, κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η κατάσταση αυτή όμως αντιστρέφεται στις παράκτιες περιοχές, οι οποίες είναι πεδινές και προσφέρονται για καλλιέργειες. Εδώ το κλίμα είναι πιο ήπιο και το ύψος βροχής είναι χαμηλότερο συγκριτικά με τα ορεινά.

Τέλος, οι νησιωτικές περιοχές της χώρας είναι αυτές στις οποίες παρουσιάζονται τα χαμηλότερα ποσοστά ύψους βροχής, συγκριτικά με κάθε άλλη περιοχή στην Ελλάδα. Η ανισοκατανομή αυτή των υδατικών πόρων σχετίζεται με περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν το νερό και φυσικά με το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Ο λόγος που το πρόβλημα αποκτά ιδιαίτερα σημαντικές διαστάσεις στην Ελλάδα οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες.

Πρώτον, η έξαρση του φυσικού φαινομένου σχετίζεται με το μεγάλο μήκος ακτογραμμής που ξεπερνά τα 15.000 km.

Δεύτερον, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες εντείνουν το πρόβλημα καθώς ο τουρισμός και οι εντατικές καλλιέργειες στις παραθαλάσσιες περιοχές σχετίζονται άμεσα με την υπεράντληση των υδάτων και συνεπώς με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες. Ο κυριότερος όμως ανθρωπογενής παράγοντας που οφείλεται για τη μεγάλη έκταση του προβλήματος στην Ελλάδα είναι η άναρχη

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας και η ανεξέλεγκτη σπατάλη όγκων νερού, είτε για παράδειγμα στον αγροτικό τομέα, είτε σε παράνομες γεωτρήσεις. Οι επερχόμενες κλιματικές αλλαγές που τονίζουν οι επιστήμονες ότι θα επέλθουν λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου θα επηρεάσουν αρνητικά την υπάρχουσα κατάσταση. Τα περισσότερα κλιματολογικά μοντέλα προβλέπουν για την Ελλάδα και γενικά για το χώρο της Μεσογείου περισσότερα ακραία καιρικά φαινόμενα, με έντονες περιόδους ξηρασίας και ερημοποίηση των περισσότερων παράκτιων εκτάσεων. Η κατάσταση αυτή σε συνδυασμό με την αύξηση της στάθμης της θάλασσας θα σημαίνει πως η ζωή στις παράκτιες περιοχές δε θα είναι εφικτή καθώς θα εκλείψει είτε λόγω ρύπανσης, είτε λόγω μείωσης των αποθεμάτων, ο σημαντικότερος φυσικός πόρος που είναι το νερό. Οι κοινωνικές και οι οικονομικές επιπτώσεις θα είναι δραματικές για τη χώρα και η αντιμετώπιση του προβλήματος ίσως να μην είναι εφικτή.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως είναι ανάγκη να αντιμετωπιστεί η υφαλμύριση άμεσα, καθώς λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του προβλήματος, όσο δε γίνονται ενέργειες για τη λύση του, τόσο πιο δύσκολη καθίσταται η αντιμετώπισή του.

Η καταγραφή όλων των υφάλμυρων περιοχών της χώρας, σε συνδυασμό με τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων του τόπου είναι ίσως το πρώτο αλλά απαραίτητο βήμα προς τη διαχείριση του προβλήματος.

### **2.3. ΕΙΔΗ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ**

Η φυσική ισορροπία των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να ανατραπεί, όταν η ροή του γλυκού νερού μειώνεται εξαιτίας των υπεραντλήσεων ή της μείωσης στην τροφοδοσία (φυσικό εμπλουτισμό) των υδροφορέων. Έτσι η διείσδυση του αλμυρού νερού μπορεί να χαρακτηριστεί παθητική αν με οποιοδήποτε τρόπο αλλάζουν οι ποσότητες νερού που φυσικά τροφοδοτούν τα υπόγεια στρώματα. Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν άμεσα τη θέση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού η οποία μετατοπίζεται προς την ενδοχώρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι μικρές αλλαγές θέσης της διεπιφάνειας σημειώνονται με τις εποχιακές ή ετήσιες διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, όπως επίσης και μετά από μακροχρόνιες αλλαγές στον κλιματικό τύπο ή στη σχετική θέση του επιπέδου της θάλασσας.

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία

Χαρακτηρίζεται όμως και ενεργή όταν προκύπτει μετά από τεχνητή παρέμβαση στις διακινούμενες ποσότητες (περίπτωση υπεραντλήσεων). Αυτό οφείλεται κυρίως στη σημειακή εξαγωγή (άντληση) υπόγειου νερού που δημιουργεί ένα βαθύ κώνο κατάπτωσης. Η ζώνη τότε του ορίου, σε αντίθεση με την περίπτωση της παθητικής διείσδυσης, μετακινείται πολύ γρηγορότερα προς την ενδοχώρα και με αλλαγή της υδραυλικής κλίσης. Επιπλέον η μετακίνηση αυτή δεν θα σταματήσει παρά μόνο όταν φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης στο κέντρο της άντλησης. Βέλτιστη διαχείριση παράκτιου. Δηλαδή οι υπερβολικές αντλήσεις υπόγειων νερών σε παράκτιους υδροφορείς, σε πολλές περιοχές, προκαλούν μια ανάστροφη ροή των υπόγειων νερών με αποτέλεσμα μια αξιοσημείωτη θαλάσσια διείσδυση στην αντλούμενη περιοχή, όταν η στάθμη υποβιβάζεται κάτω από το επίπεδο της υποθαλάσσιας εμφάνισης της αντλούμενης ενότητας ή εάν η μεταβατική ζώνη ανάμεσα στο γλυκό και στο αλμυρό νερό αποτελεί μέρος του κώνου κατάπτωσης.

## **2.4. ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

Στην ηπειρωτική Ελλάδα η υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων διαπιστώθηκε για πρώτη φορά στο Αργολικό πεδίο στα τέλη της δεκαετίας του '50. Από τότε μέχρι και σήμερα η κατάσταση δεν έχει αντιμετωπιστεί ούτε καλυτερεύσει, καθώς το φαινόμενο αυτό συναντάται στις περισσότερες παράκτιες περιοχές της χώρας και απειλεί με ερημοποίηση την καλλιεργούμενη γη. Σε μία συνοπτική καταγραφή των υφάλμυρων περιοχών φαίνεται η πραγματική διάσταση του φαινομένου, που είναι ιδιαίτερα έντονο στις ανατολικές ακτές της Ελλάδας. Η αναφορά στις υφάλμυρες περιοχές γίνεται ξεχωριστά για κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα. Στη Θράκη και τη Μακεδονία, από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ως προβληματικές περιοχές χαρακτηρίζονται τα Δέλτα των ποταμών Έβρου, Νέστου και Λίσσου, γενικά η παράκτια περιοχή ανάμεσα στο Νέστο ως τη λίμνη Μητρικού και οι παράκτιες περιοχές της Νέας Καρβάλης, της Ελευθερούπολης και της Νέας Περάμου.

Στη συνέχεια, ιδιαίτερα προβλήματα εμφανίζονται σχεδόν σε όλες τις ακτές της Χαλκιδικής, που παρουσιάζουν έντονη τουριστική ανάπτυξη. Όσον αφορά τη λεκάνη του Ανθεμούντα, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της Αναπτυξιακής Εταιρείας Ανατολικής Θεσσαλονίκης «Ανατολική Α.Ε.» η στάθμη των υπόγειων νερών έχει κατέβει την τελευταία δεκαετία περισσότερο από δέκα μέτρα, ενώ το έλλειμμα νερού

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία που παρουσιάζεται κάθε χρόνο είναι της τάξης των 17.400.000 m<sup>3</sup> . Σύμφωνα με έρευνες του ΙΓΜΕ η υφαλμύριση έχει εισχωρήσει στο υπέδαφος του δρόμου Θεσσαλονίκης - Χαλκιδικής, ενώ ταυτόχρονα οι περιοχές πλησίον του δρόμου αναπτύσσονται ιδιαίτερα στο γεωργικό και τον κτηνοτροφικό τομέα και η οικιστική ανάπτυξη αυξάνεται επίσης ραγδαία. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η υπεράντληση των υδάτων, με φυσικό επακόλουθο, τα υδατικά προβλήματα, τα οποία αποτελούν τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτή. Στην Πιερία, η υπεράντληση των υδάτων εικάζεται ότι επιδεινώνει τις καχιζήσεις του εδάφους που συμβαίνουν εκεί τα τελευταία χρόνια. Φαινόμενα υφαλμύρισης των υδροφόρων στρωμάτων παρατηρούνται και στη δυτική πλευρά του Νομού Θεσσαλονίκης, στις βιομηχανικές περιοχές Σίνδου. Ο ποταμός Αξιός, εκτός από τη ρύπανση εξαιτίας υψηλών συγκεντρώσεων σιδήρου, ψευδαργύρου, μολύβδου, καδμίου, βαρίου, νικελίου, ουρανίου και αρσενικού εμφανίζει και ρύπανση λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αλάτων.

Τέλος, προβλήματα εμφανίζονται και στην παράκτια ζώνη του Νομού Πιερίας. Στη Θεσσαλία, τα πλέον σοβαρά προβλήματα εμφανίζονται στο δέλτα του Πηνειού, στην περιοχή Ριζόμυλου Μαγνησίας και επεκτείνονται προς τη Λάρισα, στην πεδιάδα του Αλμυρού και στην περιοχή του Βόλου.

Στη Στερεά Ελλάδα, φαινόμενα υφαλμύρισης παρατηρήθηκαν στη λεκάνη του Σπερχειού και στην περιοχή Πελασγίας στη Φθιώτιδα, ενώ σοβαρότατο πρόβλημα αντιμετωπίζει το λεκανοπέδιο της Αττικής. Στην Αττική προβληματικές περιοχές θεωρούνται οι ακόλουθες: Άγιοι Απόστολοι, Κάλαμος, κάμπος Μαραθώνα, περιοχή Μαρκόπουλου, Σπάτα, Βραυρώνα, Πόρτο Ράφτη, παραλιακή ζώνη από Σούνιο μέχρι Κορωπί, Αγία Μαρίνα, Βάρη, Βάρκιζα, Βουλιαγμένη, Βούλα. Επίσης οι περιοχές Γλυφάδα, Φάληρο, Καλλιθέα, Πειραιάς, Δραπετσώνα, Κερατσίνι, Ασπρόπυργος, Ελευσίνα, Θριάσιο, Νέα Πέραμος και Μέγαρα. Οι περιοχές της Πελοποννήσου που έχουν υποστεί υφαλμύριση εκτός από το Αργολικό πεδίο είναι οι βόρειες παραλιακές ακτές της από την Κορινθία ως την Αχαΐα και ιδίως η βόρεια και βορειοανατολική Κορινθία και η βόρεια και βορειοδυτική Αχαΐα. Επίσης συναντώνται προβλήματα στην περιοχή της Ερμιόνης και το Πόρτο Χέλι. Στην Καλαμάτα το πρόβλημα είναι υπαρκτό αλλά όχι τόσο έντονο, ενώ υφαλμύριση έχει διαπιστωθεί και στην Τριφυλία.

Τέλος, ως υφάλμυρες αναφέρονται και οι περιοχές Αστέρος και Λεωνίδιο. Στη Δυτική Ελλάδα και κυρίως στην Ήπειρο υπαρκτό πρόβλημα υπάρχει στο Νομό Θεσπρωτίας,

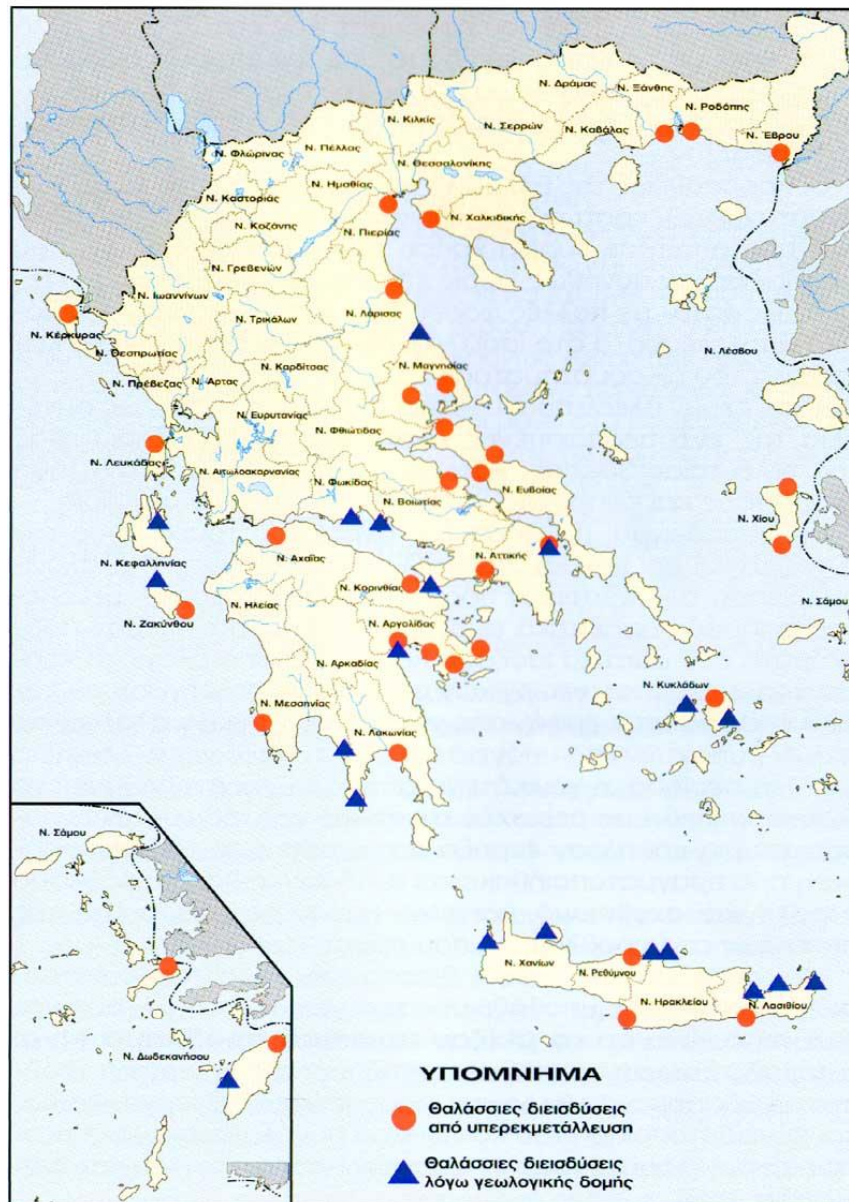


Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
στις περιοχές Σαγράδα, Πλασταριά και στα Σίβα, ενώ στο Νομό Πρέβεζας υφάλμυρες  
ακτές συναντώνται ανάμεσα στην πόλη της Πρέβεζας και τη Νικόπολη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υφάλμυρα υπόγεια και επιφανειακά νερά συναντώνται στις  
πηγές Σαντινίκου, Περάματος και Χανόπουλο και Περάνθη Άρτας, μόνο που η μεγάλη  
συγκέντρωση ιόντων χλωρίου και νατρίου οφείλεται στην επαφή των υπόγειων  
υδροφορέων με δόμους ορυκτού άλατος. Οι λόγοι που οδηγούν στην υφαλμύριση  
οφείλονται περισσότερο στην εντατική καλλιέργεια των παράκτιων πεδιάδων και στην  
υπεράντληση των υδάτων εξαιτίας των πυκνοκατοικημένων παράκτιων περιοχών. Το  
μέσο ετήσιο ύψος βροχής δεν επηρεάζει σε τόσο μεγάλο βαθμό την πτώση του  
υδροφόρου ορίζοντα.

## Χάρτης υφάλμυρων υπογείων νερών θαλάσσιας διείσδυσης

(από Παν. Περγιαλιώτη - Στ. Παπαδάκου)



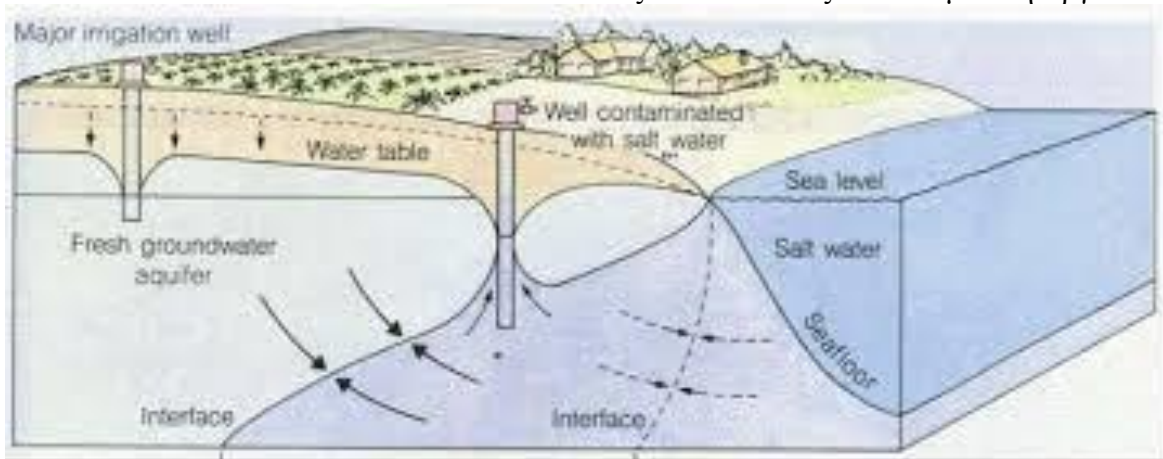
Εικόνα 2.4: Χάρτης υφάλμυρων υπόγειων νερών θαλάσσιας διείσδυσης

## **2.5. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το γλυκό νερό αποτελεί πηγή ύπαρξης και ζωής όλων των οργανισμών πάνω στη γη. Όταν αυτό όμως έρχεται σε ανάμειξη με το αλμυρό που έχει ως αποτέλεσμα την «παρασκευή» του υφάλμυρου νερού αυτό έχει σαν συνέπεια ένα ακατάλληλο προϊόν που δεν χρησιμοποιείται πουθενά. Παράλληλα σαν συνέπεια έχει και την απώλεια του υδροφορέα αυτού σαν πηγή νερού. (Τριχάκης Ι., 2004)

Μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού υπάρχει η διεπιφάνεια η οποία με την υπεράντλησή τήνει να υποχωρεί προς την ξηρά. Το αποτ'ελεσμα είναι να μειώνεται η ποιότητα του γλυκού νερού και να επιταγχύνεται η ανάμειξη του με το αλμυρό που χρονικά αυτό έχει σαν συνέπεια την ποσοτική ταπείνωση του υδροφορέα και σταδιακή εξάτληση των υπόγειων υδάτων.

Συνεπώς όλη αυτή η έλλειψη του γλυκού νερού οδηγεί μαθηματικά σε αύξηση του κόστους ζωής και επιβίωσης διότι οι δαπανηρές λύσεις για την χρήση και άντληση νερού είναι πλέον μονόδρομος. Έμμεσες επιπτώσεις θα υπάρξουν και στον τομέα της βιοποικιλότητας αφού θα μειωθεί η ζωή λόγω της έλλειψης νερού για επιβίωση. Όλοι οι κλάδοι της οικονομικής ανάπτυξης ( γεωργία, τουρισμός κτλ. ) θα εξασθενήσουν αφού τα κόστη θα είναι πολύ υψηλά. Οι αγρότες θα χρειάζονται περισσότερο νερό για να καλύψουν το υπάρχον υποβαθμισμένο νερό και έδαφος ή ακόμα την χρησιμοποίηση άλλων τρόπων αύξησης της παραγωγικότητας με την βοήθεια λιπασμάτων ή ακόμα και την μεταφορά νερού μέσω υπογείων δικτύων από μια περιοχή σε μια άλλη. Υπάρχει αυξημένο το ποσοστό εμφάνισης του φαινομένου της απερίμωσης σε ορισμένες περιοχές που είναι πολύ έντονο το πρόβλημα. Όλα τα παραπάνω λοιπόν είναι κάποιες από τις περιπτώσεις που δύναται να εμφανιστούν σε περίπτωση έντονης άντλησης υπόγειου νερού και εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης.



Εικόνα 2.5: Επιπτώσεις ανεξέλεγκτης άντλησης

Πηγή: (<http://holytrinity.faithweb.com/pon-Ecology/w03-water-B.htm>)

## 2.6. ΛΗΦΘΕΝΤΑ ΜΕΤΡΑ

Μέχρι σήμερα λοιπόν έχουν ληφθεί κάποια μέτρα τα οποία έχουν βοηθήσει σε έναν μεγάλο βαθμό την αναβάθμιση των υπογείων υδροφορέων και ταυτόχρονα την ποσοστιαία μείωση του φαινομένου της υφαλμύρινσης:

- Εξοικονόμηση νερού (άρδευση, ύδρευση)
- Δημιουργία υδατικής συνείδησης (εκστρατείες, πρόστιμα)
- Επιχορηγήσεις για χρήση τεχνολογιών εξοικονόμησης του νερού
- Εφαρμογή βελτιωμένων μεθόδων άρδευσης
- Περικοπές στην παροχή νερού
- Μερική αλλαγή διάρθρωσης καλλιεργειών
- Μερική εισαγωγή εισαγωγή μετρητών στις γεωτρήσεις
- Αύξηση παροχής νερού από άλλες πηγές (αφαλατώσεις, ανακυκλωμένο) για άρδευση και εμπλουτισμο
- Σχεδιασμός και εφαρμογή παρακολούθησης ποσοτικής/ ποιοτικής ποιοτικής κατάστασης κατάστασης υπογείων υπογείων νερών

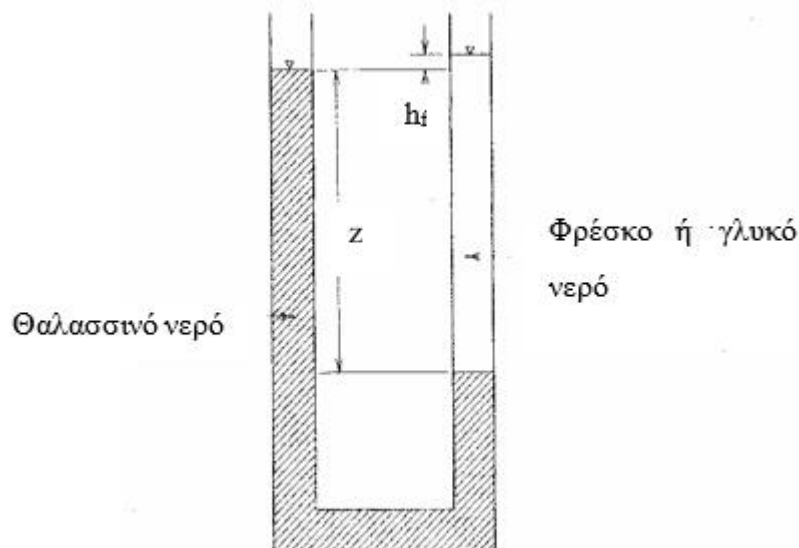
Εκτός όμως από τα παραπάνω τα οποία έχουν υλοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό μπορούμε να προσθέσουμε και κάποιες λύσεις για μελλοντική εφαρμογή. Τέτοιες λύσεις είναι:

- Περιορισμό υδροβόρων δραστηριοτήτων
- Αναδιάρθρωση της γεωργίας
- Περαιτέρω εφαρμογή βελτιωμένων συστημάτων άρδευσης
- Συντήρηση δικτύων για να μειωθούν οι απώλειες
- Ανακύκλωση γκρίζου νερού
- Αύξηση παροχής νερού από εναλλακτικές πηγές
- Αύξηση εμπλουτισμού υπογείων από επεξεργασμένα λύματα
- Αποτελεσματικός έλεγχος ανόρυξης νέων γεωτρήσεων και έλεγχος υφιστάμενων
- Αναθεώρηση πολιτικής τιμολόγησης
- Βελτιστοποίηση διαχείρισης μέσω δημιουργίας ενιαίου φορέα υδάτων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

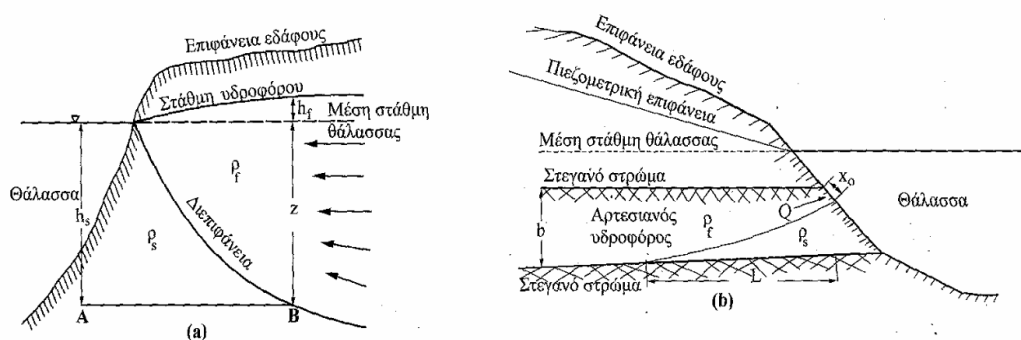
### 3.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, η οποία βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία δύο υγρών, μπορεί μελετηθεί εργαστηριακά σε διατάξεις παρόμοιες με αυτή της εικόνας 3.1. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού μπορεί να αναπαρασταθεί σε έναν σωλήνα σχήματος U στον οποίο παρέχεται στις δύο εισόδους του σωλήνα αλμυρό και γλυκό νερό, χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Οι πιέσεις σε κάθε μεριά του σωλήνα θα πρέπει να είναι ίσες.



Εικόνα 3.1: Υδροστατική ισορροπία μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αναπαριστώμενη με σωλήνα σχήματος U (Todd, 1980)

Στο πραγματικό πεδίο αν δεχθούμε ότι το γλυκό και το θαλασσινό νερό δεν αναμιγνύονται και δεδομένου ότι έχουν διαφορετικές πυκνότητες, σχηματίζεται ανάμεσά τους μια διεπιφάνεια που το σχήμα της καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο, οπουδήποτε τα δυο ρευστά βρίσκονται σε επαφή. Η εικόνα 3.2 δείχνει μια παράκτια διατομή ενός ελεύθερου υδροφόρου. Κατά τους Ghyben και Herzberg, υπάρχει ένα σημείο, όπου συναντώνται οι διατομές της ακτής, της διεπιφάνειας, της στάθμης της θάλασσας και του υδροφόρου.



Εικόνα 3.2: Κατανομή γλυκού και αλμυρού νερού σε παράκτιους ελεύθερο (a) και αρτεσιανό (b) υδροφόρους.  $x_0$ , το μέτωπο εκφόρτισης γλυκού νερού.

(Καλλέργης, 2001- Todd, 1980)

Η ολική υδροστατική πίεση στο σημείο A (εικόνα 2.2)

$$p_A = \rho_s g h_s = \rho_s g z \quad (3.1)$$

Στο σημείο B η πίεση θα είναι

$$p_B = \rho_f g (z + h) \quad (3.2)$$

Επειδή  $p_A = p_B$ , προκύπτει η σχέση Ghyben-Herzberg

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = h_f \frac{\rho_f}{\Delta\rho} \quad (3.3)$$

Και επειδή  $\rho_s = 1.025 \frac{g}{cm^3}$ ,  $\rho_f = 1 \frac{g}{cm^3}$ ,  $\Delta = \rho_s - \rho_f = 0.025$  και  $\frac{\rho_f}{\Delta\rho} = c = 40$  οπότε

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = 40h_f \quad (3.4)$$

Στη σχέση Ghyben-Herzberg, η διεπιφάνεια κλείνει προς την ακτή. Από το νόμο του Darcy:

$$\eta\mu\gamma_i = \frac{dh}{ds} = \frac{v_g}{k} \quad (3.5)$$

$\gamma_i$  = η κλίση της πιεζομετρικής επιφάνειας

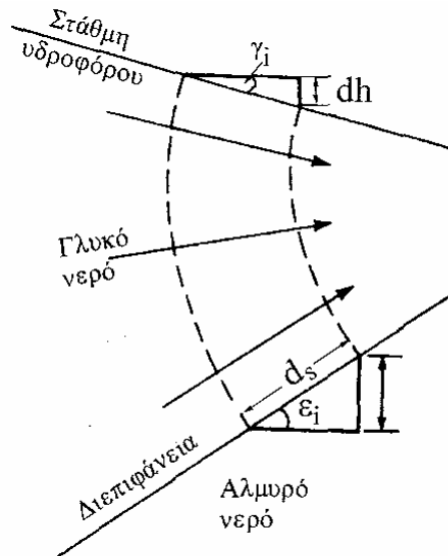
$v_g$  = η φαινόμενη ταχύτητα του υπόγειου νερού

$k$  = η υδραυλική αγωγιμότητα

Η κλίση της διεπιφάνειας, όπως φαίνεται από την εικόνα 3.3 δίνεται από την σχέση

$$\eta\mu\varepsilon_i = \frac{v_g \rho_f}{k\Delta\rho} \quad (3.6)$$





Εικόνα 3.3: Σχέση ανάμεσα στις κλίσεις της υδροστατικής επιφάνειας και της διεπιφάνειας (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980)

### 3.2. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΡΟΗΣ HUBERT

Οι περιορισμοί της θεωρίας Ghyben-Herzberg είναι οι εξής:

Εάν τα δύο ρευστά βρίσκονται σε πραγματικές στατικές συνθήκες, τότε η πιεζομετρική επιφάνεια θα έχει κλίση 0 και η διεπιφάνεια, θα είναι οριζόντια, έτσι που το γλυκό νερό να «επιπλέει» πάνω από το θαλασσινό νερό, λόγω διαφοράς πυκνότητας. Όμως το γλυκό νερό βρίσκεται σε συνεχή κίνηση λόγω μεταβολών της πιεζομετρικής του επιφάνειας, από τροφοδοσία, εξάτμιση, απόληψη ή αποχέτευση ενώ κατά κανόνα υπάρχει ροή γλυκού νερού από τον πυθμένα της θάλασσας, πέρα από την ακτή, είτε μέσω ρωγμών είτε λόγω διάχυτης ροής. Έτσι η διεπιφάνεια δεν τέμνει την υδροστατική επιφάνεια ακριβώς στην ακτή.

Ο Hubbert αναφερόμενος στη δυναμική ισορροπία γλυκού-θαλασσινού νερού, έδειξε, ότι η εξίσωση Ghyben-Herzberg, για συνθήκες ροής κοντά στην ακτή, δίνει διαφορετικά αποτελέσματα, από τα πραγματικά βάθη της διεπιφάνειας (εικόνα 3.4).

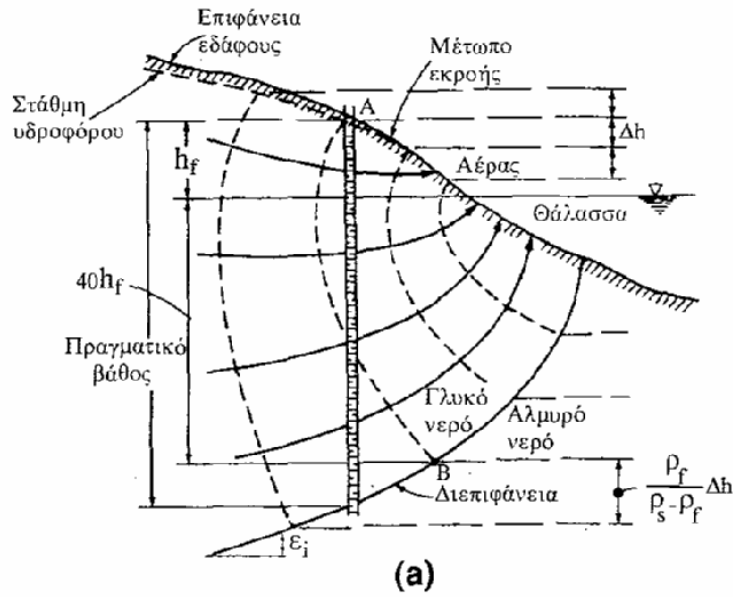
Η κλίση της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση (Hubbert, 1940):

$$\eta_{μα} = \frac{\theta_z}{\theta_s} = \left[ \left( \frac{1}{K_f} \right) c_1 v_{f,s} - \left( \frac{1}{k_s} \right) c_2 v_{s,s} \right] \quad (3.7)$$

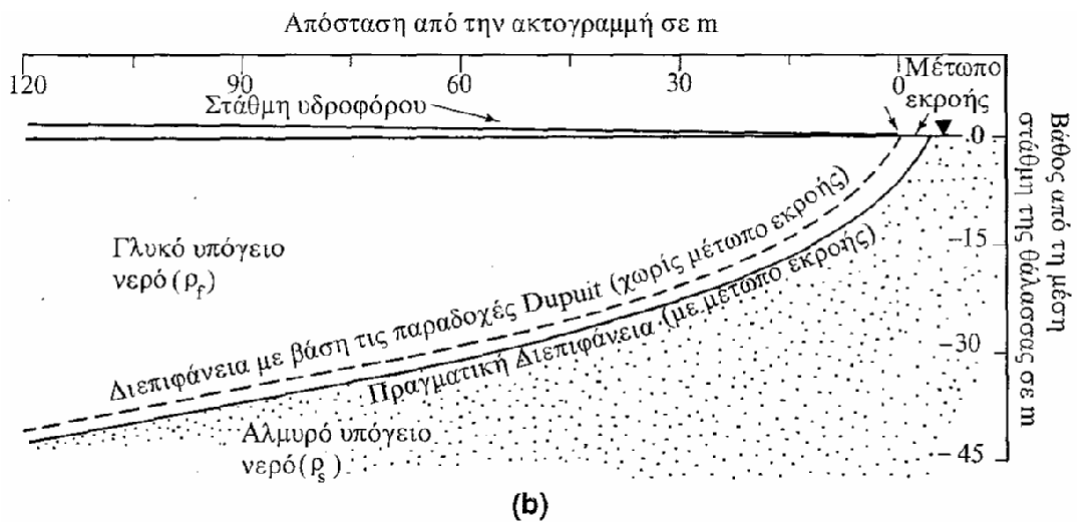
Οι δείχτες f και s αναφέρονται αντίστοιχα στο γλυκό και στο θαλασσινό νερό

$$c_1 = \frac{\rho_f}{\Delta\rho} \quad \text{και} \quad c_2 = \frac{\rho_s}{\Delta\rho} \quad \text{και} \quad v_{f,s}, \quad v_{s,s} \quad (3.8) \quad \text{και οι συνιστώσες της ειδικής παροχής}$$

γλυκού και θαλασσινού νερού κατά μήκος του ίχνους της διεπιφάνειας (εικ. 3.4 και 3.5 ).



Εικόνα 3.4: Η θέση της διεπιφάνειας κατά Ghyben – Herzberg και κατά Hubbert. (a)  
Η διαφορά στο βάθος, (Καλλέργης 2001- Todd, 1980).



Εικόνα 3.5: Η θέση της διεπιφάνειας κατά Ghyben – Herzberg και κατά Hubbert (b)  
η θέση της διεπιφάνειας στο Long-Island κατά Dupuit και Hubbert (Καλλέργης,  
2001- Todd, 1980).

Αν δεχτούμε ότι το θαλασσινό νερό είναι ακίνητο και το γλυκό νερό ρέει πάνω σε αυτό,  $v_{s,s} = 0$  και  $v_{f,s} \neq 0$ , τότε  $\eta_{\text{μα}} > 0$  (γιατί  $\rho_f > \rho_s$  τόσο αυξάνει η γωνία  $\alpha$ ).

$< \rho_s$ ). Όσο αυξάνεται η τιμή της

Η εξίσωση 3.7 ισχύει, όπως έδειξε ο Hubbert, για κάθε σημείο, που βρίσκεται ανάμεσα στα σημεία τομής οποιασδήποτε ισοδυναμικής γραμμής του ρέοντος γλυκού νερού με την ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου και τη διεπιφάνεια, όπως δείχνουν τα σημεία Α και Β της εικόνας 3.4. Τα σημεία αυτά δε βρίσκονται σε μια κατακόρυφη γραμμή και επειδή η ισοδυναμική γραμμή είναι κυρτή, η κατακόρυφη απόσταση ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια και στη διεπιφάνεια, θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη της εξίσωσης 3.3. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι, αν σαν επίπεδο αναφοράς για το  $z$  παρθεί η μέση στάθμη της θάλασσας, η εξίσωση 3.3 έχει τη μορφή

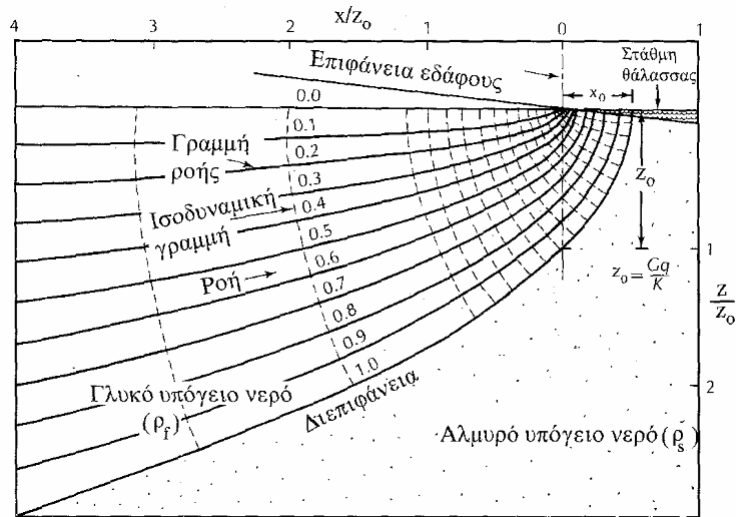
$$z_{(x,y)} = h_{(x,y)} \frac{\rho_f}{\Delta\rho} \quad (3.9)$$

Ή για  $c = \frac{\rho_f}{\Delta\rho}$  τότε  $z_{(x,y)} = h_{(x,y)}c$  όπου όλες οι τιμές του  $z$  πάνω από το επίπεδο αναφοράς θα είναι θετικές.

Επισημαίνεται ότι όταν μετρίεται το φορτίο παράκτιων υδροφόρων, πρέπει απαραίτητα να υπολογίζεται η περιεκτικότητα των χλωριόντων. Όταν αυτή ξεπερνά τα κανονικά όρια θα πρέπει το μετρούμενο φορτίο να διορθώνεται ως προς την πυκνότητα της μετρούμενης στήλης του νερού, με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.5.

Κατά Dupuit- Ghyben-Herzberg, το βάθος  $z$  της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση

$$(\text{εικόνα 2.5}) : \sqrt{\frac{2qxc_z}{L}} = \quad . \quad (3.10)$$

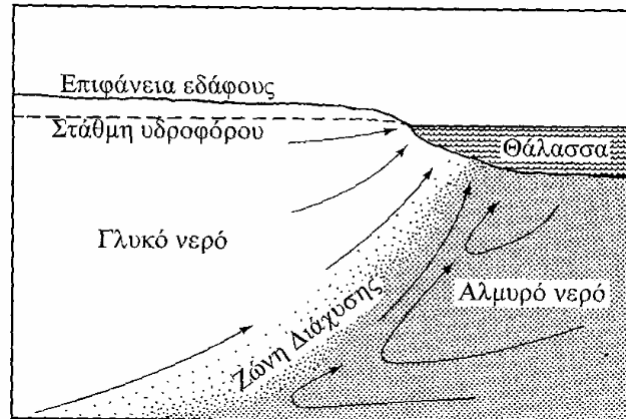


Εικόνα 3.6: Διάγραμμα ροής κατά Glover, με βάση την εξίσωση, (Καλλέργης, 2001-Todd, 1980)

Το μοντέλο Dupuit- Ghyben-Herzberg δέχεται ότι η διεπιφάνεια τέμνει την υδροστατική επιφάνεια στη γραμμή της ακτής. Τούτο όμως δεν είναι σωστό όπως έδειξαν οι Hubbert (1940), Glover(1964). Για το λόγο αυτό τη σωστή λύση δίνει η παρακάτω εξίσωση:

$$z = \frac{cq}{k} = \sqrt{\frac{2cq x}{k}} \quad (3.11)$$

Ο Cooper επέκτεινε την υπόθεση, ότι, κάτω από δυναμικές συνθήκες, το θαλασσινό νερό δεν είναι στατικό, αλλά ρέει από τον πυθμένα της θάλασσας σε μια ζώνη διάχυσης –η οποία έχει σημαντικό πάχος και σε αυτή υπάρχει πλήρης διαβάθμιση της αλμυρότητας από εκείνη του γλυκού νερού σε αυτή του θαλασσινού-και από αυτή πίσω στη θάλασσα. Αυτή η ροή τείνει να μειώσει την έκταση, που καταλαμβάνει στον υδροφόρο το νερό. Υπάρχει μια συνεχής ροή αλμυρού νερού από τη ζώνη της διάχυσης προς τη θάλασσα.(εικ.3.6)



Εικόνα 3.7: Κυκλοφορία του θαλασσινού νερού από τη θάλασσα στη ζώνη διάχυσης και πίσω στη θάλασσα (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980).

Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, η οποία βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία δύο υγρών, μπορεί μελετηθεί εργαστηριακά σε διατάξεις παρόμοιες με αυτή της εικόνας 3.1. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού μπορεί να αναπαρασταθεί σε έναν σωλήνα σχήματος U (εικόνα 3.1) στον οποίο παρέχεται στις δύο εισόδους του σωλήνα αλμυρό και γλυκό νερό, χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Οι πιέσεις σε κάθε μεριά του σωλήνα θα πρέπει να είναι ίσες.

### 3.3. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

Ένας εναλλακτικός τρόπος μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι η θεώρηση της μεταβλητής πυκνότητας σύμφωνα με την οποία η πυκνότητα και το ιξώδες ενός αναμίξιμου υγρού, μέσα στο οποίο μεταφέρεται μια διαλυτή ουσία, επηρεάζονται από αυτήν. Για την επίλυση αυτή της θεώρησης για την υφαλμύριση απαιτούνται οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας του νερού και του αλατιού που θεωρείται η διαλυμένη ουσία που είναι ο ρυπαντής.

Η διατήρησης της μάζας του νερού δίνεται από την εξίσωση (3.12)

$$\left(\rho S_{op}\right) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial C}\right) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\rho k}{\mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho g) \right] = Q$$

Όπου :

- P = η πίεση  
 C = η συγκέντρωση  
 S<sub>op</sub> = η αποθηκευτικότητα ειδικής πίεσης  
 μ = το ιξώδες  
 ρ = η πυκνότητα

Η διατήρηση της μάζας του αλατιού δίνεται από την εξίσωση (3.13)

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho C)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\varepsilon \rho v C) + \nabla [\varepsilon \rho (D_m I + D) \cdot \nabla C] + Q C^*$$

Όπου

D<sub>m</sub> = είναι η φαινομενική μοριακή διάχυση των διαλυμένων ουσιών σε διάλυμα μέσα σε πορώδες μέσο που περιλαμβάνει στρεβλότητα

I = τανυστής ταυτότητας

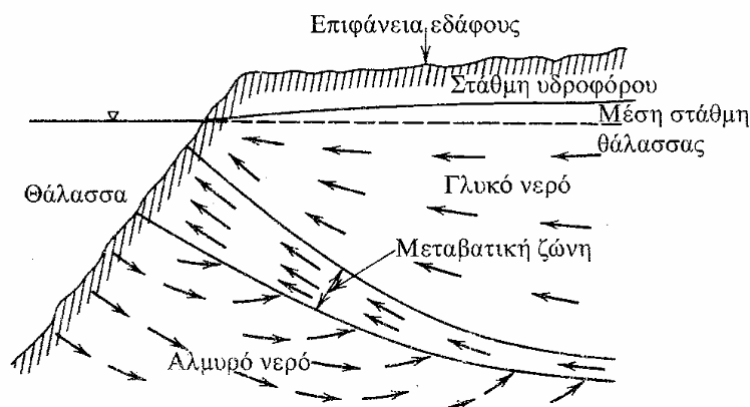
D = τανυστής διασποράς

C = το κλάσμα μάζας του διαλύτη

C\* = η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας

v = μέση ταχύτητα συμμεταφοράς της διαλυμένης ουσίας στο υγρό

### 3.4. Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα ροής γλυκού και αλμυρού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980)

Στην εικόνα 3.7, όπου φαίνεται η κίνηση του αλμυρού νερού προς τη στεριά, το πάχος της μεταβατικής ζώνης γλυκού-αλμυρού νερού και η ροή στις τρεις υπόγειες ζώνες (γλυκού, αλμυρού και υφάλμυρου νερού). Το πάχος της μεταβατικής ζώνης («διεπιφάνειας») γίνεται μεγαλύτερο κοντά στην ακτή, εκεί όπου τα παλιρροιακά φαινόμενα είναι έντονα. Μέσα στη «διεπιφάνεια», η αλατότητα αυξάνει προοδευτικά με το βάθος, από το γλυκό στο αλμυρό νερό (εικ 3.8<sup>α</sup>). Έτσι, είναι προτιμότερο να υπολογίζεται η σχετική αλατότητα  $S_R$ , σαν ποσοστό, από τη σχέση:

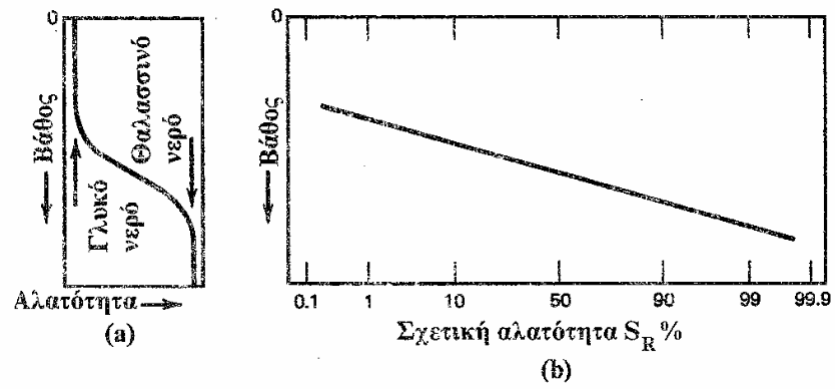
$$S_R = 100 * \frac{C - C_f}{C_s - C_f}$$

$C$  = η αλατότητα (μετρημένη σαν T.D.S. ή περιεκτικότητα σε χλωριόντα ή σαν ηλεκτρική αγωγιμότητα) σε ένα ορισμένο βάθος μέσα στη «διεπιφάνεια»

$C_f$  = η αλατότητα του γλυκού νερού

$C_s$  = η αλατότητα του αλμυρού νερού





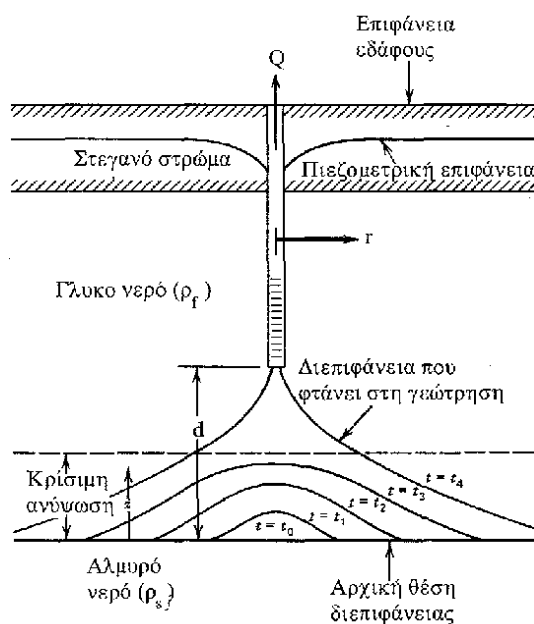
Εικόνα 3.9: Αύξηση της αλατότητας με το βάθος, στη μεταβατική ζώνη: (α) γραμμική κλίμακα (β) κλίμακα πιθανοτήτων (Καλλέργης, 2001)

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία

Αν προβληθούν οι τιμές  $S_R$  συναρτήσει του βάθους σε χαρτί πιθανοτήτων, θα προκύψει ευθεία γραμμή (εικ.3.8b). Δεδομένου ότι είναι δύσκολη η συλλογή λεπτομερών στοιχείων στο πεδίο, για τη μορφή της «διεπιφάνειας», η πιο πάνω γραφική απεικόνιση, επιτρέπει να εκτιμηθεί η θέση της «διεπιφάνειας» από δύο τυχόντα σημεία μέτρησης της αλμυρότητας. Η τιμή 50% της  $S_R$ , που αντιστοιχεί στη μέση θέση (γραμμή) της «διεπιφάνειας», καθορίζει τη θέση της χωρίς ανάμιξη.

### 3.5. «ΑΝΥΨΩΣΗ» ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΕΡΓΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

Όταν ένας υδροφορέας περιέχει ένα υποκείμενο στρώμα αλμυρού νερού και αντλείται από μια υδρογεώτρηση που εισχωρεί μόνο στο ανώτερο μέρος του, το οποίο περιέχει γλυκό νερό, τότε παρατηρείται μια τοπική «ανύψωση» της διεπιφάνειας, κάτω από την υδρογεώτρηση (εικ.3.9), με τη μορφή ενός ανεστραμμένου «κώνου κατάπτωσης» (upconing), δηλαδή ενός κώνου ανόδου της διεπιφάνειας. Στην περίπτωση της εικόνας 3.9 η διεπιφάνεια είναι, τη στιγμή έναρξης της άντλησης ( $t = t_0$ ), οριζόντια. Με τη συνεχιζόμενη άντληση, η διεπιφάνεια ανεβαίνει σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα, μέχρι ενδεχόμενα να φτάσει στην υδρογεώτρηση.



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα της «ανύψωσης» (upconing) αλμυρού νερού, σε αντλούμενη υδρογεώτρηση (Schmorak – Mercado, 1969).

Αυτό, γενικά, σημαίνει ότι θα πρέπει να διακοπεί η άντληση. Μετά τη διακοπή, το βαρύτερο, αλμυρό, νερό τείνει να επιστρέψει στην αρχική του θέση. Το φαινόμενο της «ανύψωσης» μελετήθηκε κυρίως από τους Ackermann-Chang (1971), Benett (1968), Wang (1965), Dagan-Bear (1968), Haubold (1975), προκειμένου να καθορίσουν τα κριτήρια κατασκευής και λειτουργίας υδρογεωτρήσεων άντλησης γλυκού νερού πάνω από το αλμυρό.

Οι Schmorak-Mercado (1969), προτείνουν μια προσεγγιστική αναλυτική επίλυση της «ανύψωσης», βασισμένοι στις παραδοχές του Dupuit και τη σχέση Ghyben-Herzberg, που έχει τη μορφή (εικ 3.9):

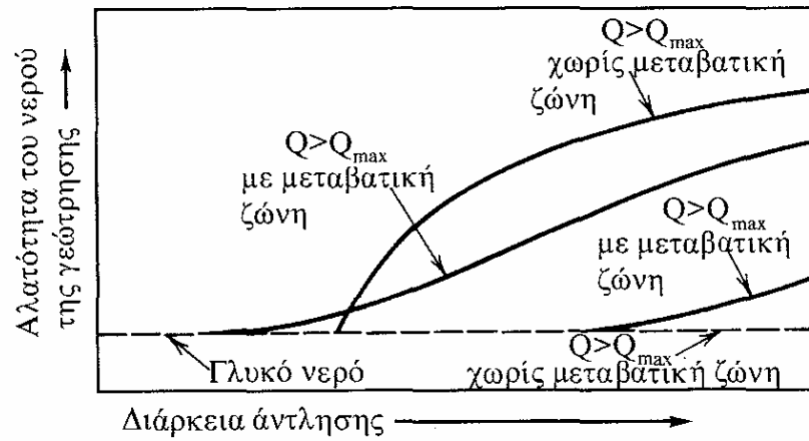
$$z = \frac{Q}{2\pi dk \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \right)} \quad (3.15)$$

Η σχέση αυτή φανερώνει μια τελική ανύψωση της διεπιφάνειας, σε μια νέα θέση ισορροπίας, που είναι ευθέως ανάλογη προς την παροχή άντλησης  $Q$ . Ο Kawabata (1965), έδειξε, με τη χρήση μαθηματικού ομοιώματος, ότι η σχέση 3.14 ισχύει μόνο για μικρές «ανυψώσεις». Όταν η «ανύψωση» ξεπεράσει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή (εικ 3.9), τότε επιταχύνεται η παραπέρα πορεία προς την υδρογεώτρηση. Η «κρίσιμη» αυτή «ανύψωση»  $z/d$  έχει εκτιμηθεί σε 0.3 έως 0.5. Έτσι, θέτοντας ένα ανώτατο όριο  $z/d = 0.3$ , προκύπτει ότι το ανώτερο όριο παροχής άντλησης  $Q$ , χωρίς αλμύριση του νερού της υδρογεώτρησης είναι:

$$Q_{\max} \leq 0.6\pi d^2 k \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \right) \quad (3.16)$$

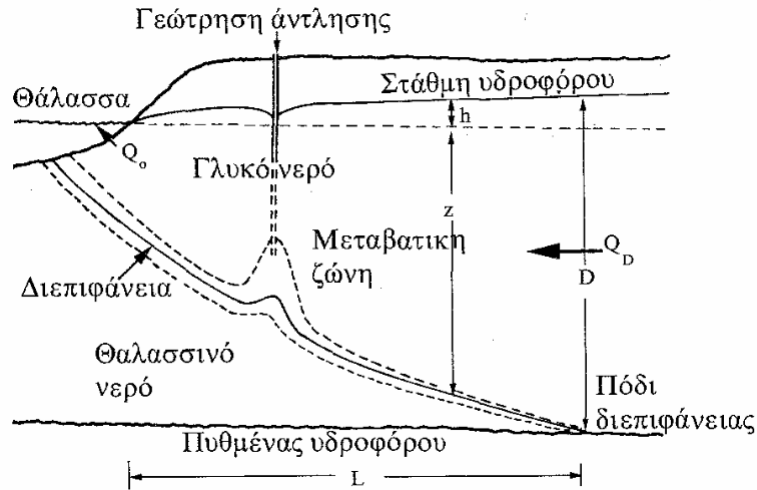
Οι Chandler-McWhorter (1975) δέχονται ότι για τους ανισότροπους υδροφορείς, όπου η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από την οριζόντια, η  $Q_{\max}$  είναι μεγαλύτερη από εκείνη που επιτρέπεται στους ισότροπους υδροφορείς. Στην πράξη, πάντως, ακόμα και με μικρές παροχές άντλησης, δεν υπάρχει οριακή κρίσιμη ανύψωση του αλμυρού νερού· η παρατεταμένη άντληση θα οδηγήσει αργά ή γρήγορα το αλμυρό νερό στην αντλούμενη υδρογεώτρηση. Αυτό φαίνεται άλλωστε και από τις εξισώσεις 3.14 και 3.15 όπου όταν  $\Delta\rho \rightarrow 0$  τότε  $z \rightarrow \infty$  και  $Q_{\max} \rightarrow 0$ .

Όπως έδειξαν οι Schmorak και Mercado (1969), σε μια διεπιφάνεια με μεγάλη κλίση (εικ.3.10), όταν  $Q > Q_{\max}$ , η αλατότητα εμφανίζεται αργότερα και αυξάνει πιο γρήγορα από ότι σε μια μεταβατική ζώνη.



Εικόνα 3.11: Καμπύλες αλατότητας νερού υδρογεωτρήσεων, σε συνθήκες «ανερχόμενου κώνου», μιας απότομης διεπιφάνειας και μιας μεταβατικής ζώνης (Schmorak – Mercado, 1969) (Καλλέργης, 2001)

### 3.6. ΤΟ «ΠΟΔΙ» ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Εικόνα 3.12: Η απόσταση  $L$  του ποδιού της διεπιφάνειας από την ακτή (Mandel- Shiftan, 1981). (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980)

Το σημείο, στο οποίο η διεπιφάνεια συναντά το στεγανό πυθμένα του παράκτιου υδροφορέα, αποτελεί το «πόδι» της διεπιφάνειας (toe of the interface), όπως δείχνει η εικ. 3.11. Το «πόδι» δηλαδή βρίσκεται εκεί, που το βάθος  $z$ , στο οποίο βρίσκεται η διεπιφάνεια, είναι ίσο με το βάθος  $D$  του στεγανού υπόβαθρου του υδροφορέα.

Ανάντι του «ποδιού», ο υδροφορέας περιέχει γλυκό νερό μόνο. Για μια λουρίδα του υδροφορέα, εύρους ίσου με τη μονάδα, έστω 1km, και πάχους όσο το πάχος του υδροφορέα, ισχύει ότι (Bear, 1979):

$$\begin{aligned}
 L &= D \sqrt{\frac{k}{cR}} \\
 Q_L &= \left( \frac{kD^2}{2cL} \right) - \left( \frac{RL}{2} \right) \\
 Q_o &= \left( \frac{kD^2}{2cL} \right) + \left( \frac{RL}{2} \right) \\
 L_{opt} &= \sqrt{\frac{kD^2}{cR}}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

όπου

- $k$  = υδροπερατότητα  
 $D$  = το βάθος του στεγανού πυθμένα, κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας  
 $L$  = η απόσταση του «ποδιού» από την ακτή  
 $R$  = ο εμπλουτισμός της μοναδιαίας λουρίδας (mm/χρόνο)  
 $Q_L$  = οι εισροές στον υδροφορέα από το ανάντη τμήμα του  
 $Q_o$  = οι εκροές του υδροφορέα προς τη θάλασσα  
 $L_{opt}$  = η απόσταση εκείνη η οποία ελαχιστοποιεί τις  $Q_o$

$$c = \frac{\rho f}{\Delta p} \tag{3.18}$$

Η μεταβολή της στάθμης του υδροφορέα έχει δύο συνέπειες

- η διεπιφάνεια αλλάζει θέση
- η ζώνη ανάμιξης (μεταβατική) διευρύνεται, λόγω υδροδυναμικής διασποράς.

Δοθέντος, ότι, όταν το υπόγειο νερό περιέχει έστω και 4% θαλασσινό νερό, είναι ακατάλληλο για τις πιο πολλές χρήσεις, η εκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων (φακών γλυκού νερού πάνω σε αλμυρό) θα πρέπει να γίνεται με τρόπο που να εξασφαλίζεται η βέλτιστη απόσταση του «ποδιού» της διεπιφάνειας από την ακτή. Οι Schmorak-Mercado (1966), όπως αναφέρθηκε, δέχονται ότι η κρίσιμη ανύψωση της

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
διεπιφάνειας, είναι περίπου ίση με το μισό της αρχικής απόστασης διεπιφάνειας-  
πυθμένα υδρογεώτρησης. Τούτο σημαίνει, ότι, στις παράκτιες υδρογεωτρήσεις, θα  
πρέπει να τοποθετείται φιλτροσωλήνας αρκετά πιο ψηλά από τη διεπιφάνεια, ενώ  
παράλληλα οι πτώσεις στάθμης θα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα (να  
είναι μικρές). Έτσι π.χ. όταν το πάχος του φακού του γλυκού νερού είναι μεγαλύτερο  
από 70m, μπορεί να επιτευχθούν αποδεκτές ακόμη παροχές. Όταν όμως το πάχος  
είναι της τάξης των 10m, τότε δεν επιτρέπονται πτώσεις στάθμης μεγαλύτερες από 10  
μέχρι μερικές δεκάδες cm.

Από τα πιο πάνω μεγέθη, ο εμπλουτισμός R σε mm/χρόνο υπολογίζεται αρκετά  
δύσκολα. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι υπολογισμού του, είναι η μέθοδος του  
υδρολογικού ισοζυγίου, η μέθοδος του ισοζυγίου αλάτων, οι ισοτοπικές μέθοδοι, τα  
λυσίμετρα, η μέθοδος του ισοζυγίου ενέργειας, η μέθοδος του καθολικού ισοζυγίου  
κ.α. (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Κατά τη διαδικασία της πειραματικής εργασίας, σκοπός είναι η κατανόηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης υπό το πρίσμα διαφόρων σεναρίων. Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρο στο εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος. Αφού γίνει αναλυτική περιγραφή των μέσων, των διαδικασιών και των τρόπων διεκπαιρέωσής της, θα υπάρξει περιγραφή και επεξήγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε γραφική μορφή.

Η άνωθεν εργαστηριακή μονάδα αποτελείται από:

- Μία δεξαμενή αποστράγγισης και διήθησης με γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μήκος 130cm, πλάτος 10cm και ύψος 65cm
- Αλατισμένο νερό
- Δείκτη μπλε χρώματος
- Δύο ηλεκτρομηχανικές αντλίες
- Άμμο και χαλίκι ευρείας κοκκομετρίας

Αρχικά, πριν την έναρξη, τοποθετήθηκαν στην πιλοτική μονάδα τα υλικά (άμμος, χαλίκι) σε στρώσεις προκειμένου να δημιουργηθεί η επιθυμητή διαστρωμάτωση. Για να επιτευχθεί αυτό τοποθετήθηκε στη βάση (πυθμένα) χαλίκια ευρείας κοκκομετρίας. Στη συνέχεια στο άνωθεν στρώμα τοποθετήθηκε λεπτόκοκκη άμμος και τέλος στο τελευταίο στρώμα ένα μίγμα από χαλίκια και άμμο, επίσης ευρείας κοκκομετρίας. Όλα τα παραπάνω έγιναν με σκοπό τη δημιουργία ελεύθερου και περιορισμένου υδροφορέα, προκειμένου να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του υπόγειου υδροφορέα. Έπειτα συνδέοντας τις δύο ηλεκτρομηχανικές αντλίες στη δεξαμενή, πραγματοποιήθηκε ένα σύντομο “πλύσιμο” του μίγματος προκειμένου να καταστεί ομοιογενές. Οι αντλίες χρησιμεύουν στη δημιουργία σταθερής υδραυλικής κλίσης με τη δεξαμενή. Ακολούθως δημιουργήθηκε το αλμυρό νερό όγκου  $V=5\text{ L}$  με αναλογία 100ml αλατιού ανά L γλυκού νερού και τοποθετήθηκε τον δείκτη μπλε χρώματος στο διάλυμα για την παρατήρηση της διείσδυσης του αλμυρού νερού στον υδροφορέα. Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκαν

Γιδάς Κ. Αθανάσιος – Διπλωματική Εργασία  
τα παραπάνω, η μονάδα τέθηκε σε λειτουργία με όσο το δυνατόν πιο σταθερή υδραυλική κλίση ούτως ώστε να καταγραφούν τόσο τα υδραυλικά ύψη όσο και η παροχή.

Τέλος από τη δεξιά πλευρά της δεξαμενής τοποθετήθηκε το αλμυρό χρωματισμένο νερό, το οποίο παρεμποδιζόταν να εισχωρήσει στον υδροφορέα από μία αλουμινένια πλάκα η οποία είχε τοποθετηθεί ανάμεσα στον υδροφορέα και στο αλμυρό διάλυμα. Η πειραματική διαδικασία ξεκινά με τράβηγμα της πλάκας καταγράφοντας τις τιμές ανά χρονικά διαστήματα των 6 min.

#### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμυρισης στην εργαστηριακή μονάδα ακουλουθήσε η διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων και στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παραμετροί του ισοζυγίου.

#### **4.2. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ**

$$I + \Delta G - E_{gr} - T_{gr} = \frac{dM}{dt} = \Delta S_{gr} \quad (4.1)$$

Οπου,

- $I$  : ο ρυθμός διήθησης
- $\Delta G = G_{in} - G_{out} = Q_{in} - Q_{out}$
- $E_{gr}$  : ρυθμός εξάτμισης
- $T_{gr}$  : ρυθμός αναπνοής
- $\Delta S_{gr}$  : ρυθμός αποθηκευσης

Το αρχικό ισοζυγίο καταληγει στην μορφή  $Q_{in} = Q_{out}$ , που σημαίνει, ο,τι ποσότητα εισέρχεται εντός του συστήματος εξέρχεται με αποτελεσματα να έχουμε σταθερή υδραυλική κλίση. Η μορφή του ισοζυγίου προκύπτει από το γεγονός ότι στο μοντέλο δεν υπάρχει η παρουσία διήθησης, εξάτμισοδιαπνοής και αποθηκευσης.

### 4.3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

**Παροχή (Q):** Για να μετρηθεί η παροχή στην εργαστηριακή μονάδα διατελέστηκαν μια σειρά από επαναλήψεις για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων.ε.

**Υδραυλικά υψη (h):** Στη συνέχεια και αφού οι δύο ηλεκτρομηχανικές αντλίες τέθηκαν σε λειτουργία επιτεύχθηκε σταθερή υδραυλική κλίση . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα έχουμε  $h_1 = 18.8 \text{ cm}$  και  $h_2 = 18 \text{ cm}$ . Συνεπώς η υδραυλική κλίση είναι  $\Delta h / \Delta L = 0,006$ .

**Υδραυλική αγωγιμότητα (K):** Ο υπολογισμός της ροής παράλληλης με τη στρώση πολλές φορές χαρακτηρίζεται και ως οριζόντια περατότητα. Χαρακτηριστικό θα είναι ότι η κλίση  $i$  θα παραμείνει ίδια σε όλα τα επιμέρους στρώματα.

Ισχύει η σχέση:

$$Q = (H * L) * K * i \quad (4.2)$$

Οπου:

- $Q$  : η ολική παροχή του υδροφορέα
- $H$  : το ύψος του υδροφορέα
- $L$  : το μήκος του υδροφορέα
- $K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα
- $i$  : η κλίση

Η συνολική παροχή όμως είναι το άθροισμα των επιμέρους παροχών του συστήματος. Δηλαδή:

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n \quad (4.3)$$

Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων έχουν βάση των μετρήσεων από τη στήλη υπολογισμού πορώδους και υδραυλικής αγωγιμότητας. (σημειώσεις Γ.Καρατζας)

Συνεπώς οι τιμές των  $K$  που προκύπτουν είναι:

- $K_1 = 8 * 10^{-3} \text{ m/s}$
- $K_2 = 7 * 10^{-6} \text{ m/s}$
- $K_3 = 1,3 * 10^{-1} \text{ m/s}$

Το ύψος του κάθε επιμέρους στρώματος είναι : 9 cm για το πρώτο στρώμα, 4,8 cm για το δεύτερο στρώμα και 5 cm για το τρίτο. Από τα δεδομένα γνωρίζουμε τις υδραυλικές αγωγιμότητες  $k$  για το κάθε στρώμα, την κλίση  $i$  και το μήκος του υδροφορέα  $L$ . Συνδυάζοντας λοιπόν τις δυο αυτές σχέσεις προκύπτει :

$$Q_1 = 1,3 \text{ m} * 0,09 \text{ m} * 8 * 10^{-3} \text{ m/s} * 0,006 \rightarrow Q_1 = 5,6 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = 1,3 \text{ m} * 0,048 \text{ m} * 7 * 10^{-6} \text{ m/s} * 0,006 \rightarrow Q_2 = 2,6 * 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = 1,3 \text{ m} * 0,05 \text{ m} * 1,3 * 10^{-1} \text{ m/s} * 0,006 \rightarrow Q_3 = 5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Προσθέτοντας τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζεται η συνολική παροχή του συστήματος.

$$Q_{ολ} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \rightarrow Q_{ολ} = 5,5 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

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

$$n = \frac{V_V}{V_0} \quad (4.4)$$

Όπου,

$V_V$ : όγκος των κενών

$V_0$ : συνολικός όγκος του δείγματος

Στο σύστημα, λόγω της ευρείας κοκκομετρίας πού είχε το υλικό πλήρωσης της δεξαμενής και της συνεχούς αναδιάταξης των πόρων εξαιτίας των συνεχών «τρεξιμάτων», δεν υπολογίστηκε η τιμή του πορώδους μέσου και επομένως η συγκεκριμένη παράμετρος δεν μετρήθηκε. Βιβλιογραφικά οι τιμές για αμμώδη εδάφη, όπως της εργαστηριακής μονάδας, κυμαίνονται μεταξύ  $n \approx 0.45 - 0.55$ , (Καρατζάς, 2011).

**Πυκνότητα αλμυρού και γλυκού νερού ( $\rho_s$  και  $\rho_f$ ):**

Η πυκνότητα του αλμυρού νερού ρs με βάση την αναλογία που χρησιμοποιήθηκε για να το δημιουργηθεί **(80 ml άλατος ανά 1L νερού)** υπολογίστηκε στα **1,030 gr/L**. Όσον αφορά το γλυκό νερό θεωρήθηκε η πυκνότητα του **ρf=1,000 gr/L**.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

### 5.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού ενός ή περισσότερων υδροφόρων συστημάτων με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων, απαιτεί την όσο το δυνατό καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων και μετρήσεων υπαίθρου όσον αφορά στα γεωλογικά, υδρογεωλογικά, υδρολογικά, κλιματολογικά, τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής έρευνας. Η αξιολόγηση όλων των δεδομένων και πληροφοριών οδηγεί στη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου. Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί δηλαδή μια αναπαράσταση του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι η γεωμετρία των υδροφόρων στρωμάτων, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους (περατότητα, μεταβιβασιμότητα) και οι ζώνες

τροφοδοσίας (υπόγειες πλευρικές εισροές, διηθήσεις, κατείσδυση, επιστροφές αρδεύσεων) και εκφόρτισης. Στόχος του εννοιολογικού μοντέλου είναι η περιγραφή των βασικών μηχανισμών υδροδυναμικής λειτουργίας και εξέλιξης του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος και η τεκμηρίωση του τρόπου ή των τρόπων μαθηματικοποίησης των μηχανισμών αυτών στο μαθηματικό ομοίωμα. Κατά τη σύνταξη του εννοιολογικού μοντέλου είναι απαραίτητο να γίνονται κάποιες παραδοχές όσον αφορά στα γεωλογικά κυρίως χαρακτηριστικά του. Εύλογο είναι ότι η προσπάθεια μετασχηματισμού του φυσικού συστήματος στο μαθηματικό μοντέλο εμπεριέχει τη σαφή αναγνώριση και καταγραφή των παραδοχών που γίνονται και των περιορισμών στην ισχύ του μοντέλου που αυτές συνεπάγονται). (Γιαννέλη, 2009)

Η θεωρία της κίνησης του νερού στα πορώδη μέσα βασίζεται στον νόμο του Darcy που διατυπώθηκε το 1856 ύστερα από σχετικά πειράματα. Η ροή του υπόγειου νερού σε υδροφόρους σχηματισμούς περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και ποικίλουν ανάλογα με το είδος του υδροφορέα και τις συνθήκες ροής.

Με τον όρο μοντέλο εννοούμε μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος που προσομοιώνει την συμπεριφορά του σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή «τάσεις». Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM (D5880-95) μοντέλο θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα.

Μαθηματικό μοντέλο κατά την ευρεία έννοια είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηρίστηκα ενός φυσικού συστήματος με μαθηματική μορφή. Σε γενικές γραμμές περιγράφεται από μια συναρτησιακή σχέση της μορφής :

Εξαρτημένη μεταβλητή =  $f$  (ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου).

Εξαρτημένες είναι οι μεταβλητές που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος (π.χ. υδραυλικό φορτίο), οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως οι διαστάσεις του χώρου και του χρόνου, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις (stresses). Στην περίπτωση των υπόγειων νερών, το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία του φυσικού συστήματος δηλαδή του υδροφόρου σχηματισμού κάνοντας διάφορες παραδοχές κατά την επίλυση του.

## 5.2. ΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη προσομοιωμάτων-μοντέλων:

- Τα παραμετρικά ομοιώματα είναι στατικά περιγράφοντας την παρούσα κατάσταση ενός συστήματος (Βουδούρης, 2004).
- Τα δυναμικά ομοιώματα δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης στο μέλλον και περιλαμβάνουν μοντέλα που ανάλογα με την μεθοδολογία δόμησής τους διακρίνονται σε φυσικά, αναλογικά και μαθηματικά.



**Φυσικά μοντέλα:** Αποτελούν πιστά αντίγραφα των φυσικών συστημάτων ροής κατασκευασμένα υπό κλίμακα, που μελετώνται σε εργαστηριακό περιβάλλον. Με αυτά γίνεται απευθείας προσομοίωση π.χ της υπόγειας ροής στο εργαστήριο. Οι πρακτικές τους εφαρμογές είναι δύσκολες εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα φυσικά συστήματα.

**Αναλογικά μοντέλα:** Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που δεν είναι εύκολη η αναλυτική επεξεργασία του φαινομένου και είναι φυσικά συστήματα που υπακούουν σε μερικές διαφορικές εξισώσεις με οριακές συνθήκες όμοιες με το πρωτότυπο. Πρόκειται στην ουσία για εργαστηριακές προσομοιώσεις των υδροφορέων με πιο γνωστά τα ηλεκτρικά ομοιώματα, τα ανάλογα άμμου, τη συσκευή Hele-Shaw, τα ανάλογα μεμβράνης, τα ομοιώματα Moire, τα θερμικά ομοιώματα, τα υβριδικά ομοιώματα, τα ηλεκτρικά ομοιώματα κ.λπ. Οι τεχνικές των μοντέλων αυτών έχασαν τη δημοτικότητα τους, εξ αιτίας της ικανοποιητικής προσαρμοστικότητας, της μεγάλης διάθεσης και των πολύ μεγάλων δυνατοτήτων εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων. Παρουσιάζουν όμως ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τα τελευταία, δηλαδή δεν απαιτούν διακριτικότητα στον χρόνο, που αποτελεί παράγοντα πιθανής δημιουργίας λαθών.

**Μαθηματικά μοντέλα:** Είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως στην υδρογεωλογία. Διακρίνονται σε μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων, καθορισμού παραμέτρων, ροής και μεταφοράς και μοντέλα διαχείρισης. Τα μαθηματικά μοντέλα έχουν ως κύριο στόχο την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού χρησιμοποιώντας διαφορικές εξισώσεις. Βασίζονται κυρίως στην επίλυση βασικών εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού όπως είναι οι εξισώσεις του Darcy, Boussinesq, Laplace, Bernoulli, εξίσωση της συνέχειας, της ροής υπογείων υδάτων και θερμότητας. Τα μαθηματικά μοντέλα είναι κατάλληλα για προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία, καθώς και χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, ρυθμό άντλησης και τροφοδοσίας. (<http://invenio.lib.auth.gr/record/115810/files/FINAL%20PhD.pdf>-Τάντος 2006)

Με τα μαθηματικά μοντέλα γίνεται δυνατή η παρουσίαση μιας τεράστιας ποσότητας πληροφοριών με έναν εκπληκτικά απλό και συνεκτικό τρόπο. Όμως το σημείο εκκίνησης είναι η σαφής και πλήρης κατανόηση των διαδικασιών που καλείται να

περιγράψει το μοντέλο.

Στην περίπτωση της ροής του υπόγειου νερού θα πρέπει να θεωρούνται ως βασικές οι εξής δυο διαδικασίες:

- η ροή του υπόγειου νερού λόγω των υδραυλικών βαθμίδων
- η αφαίρεση (άντληση) ή προσθήκη νερού (εμπλουτισμός)

Στην περίπτωση όμως των μοντέλων της μεταφοράς της ρύπανσης παρεμβαίνει ένα μεγάλο πλήθος, διαφορετικών μεταξύ τους, διαδικασιών, οι οποίες μπορούν να καταταγούν σε δυο ομάδες:

- στις διαδικασίες μεταφοράς με μοριακή διάχυση, μηχανική διασπορά και ρεύματα μεταφοράς
- στις διαδικασίες που ευθύνονται για την παραγωγή ή εξασθένηση του ρυπαντή όπως είναι οι χημικές, βιολογικές, ακόμα και πυρηνικές διαδικασίες

(ρόφηση, ιοντοανταλλαγή, οξειδοαναγωγή, ραδιενεργός θάνατος και βιοδιάσπαση).

Για την πλήρη περιγραφή του υδροφόρου συστήματος που θα παρουσιαστεί στο μοντέλο απαιτούνται πέρα από τις εξισώσεις που ελέγχουν τις διαδικασίες και

- ειδικές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις διαδικασίες καθώς και των παραμέτρων προσομοίωσης που εμπλέκονται στη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων,
- πληροφορίες για την περιοχή, το σχήμα και τις συνθήκες κατά μήκος των συνόρων του υδροφορέα.

Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου που θα προκύψει μετά τα πιο πάνω, γίνεται αναλυτικά ή αριθμητικά, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των υδρογεωλογικών συνθηκών και τον αριθμό των διαδικασιών που συμμετέχουν στο μοντέλο.

Δυστυχώς πολύ μικρός αριθμός προβλημάτων ροής ή μεταφοράς μπορεί να επιλυθεί με αξιόπιστο τρόπο με τα μαθηματικά μοντέλα. Πρόκειται για τα μοντέλα που περιγράφουν τη ροή του υπόγειου νερού ή τη μεταφορά ενός μοναδικού μη αντιδρώντα με το νερό ρυπαντή σε κορεσμένο πορώδες μέσο (U.S.N.R.C. 1990). Η αβεβαιότητα αυτή ως προς την αξιοπιστία με την οποία τα μαθηματικά μοντέλα αποδίδουν τις υδρογεωλογικές διαδικασίες, οδήγησε σε πειραματικές έρευνες μακράς διάρκειας ώστε να βελτιωθεί η κατανόηση των πιο πάνω διαδικασιών (U.S.N.R.C. 1990).

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στη σύνταξη των μαθηματικών μοντέλων είναι η ετερογένεια στην κλίμακα του πεδίου (μακροετερογένεια), με αποτέλεσμα τα στοιχεία εισόδου να προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα. Την ίδια αξιοπιστία παρουσιάζει και η προέκταση των πορισμάτων της εργαστηριακής έρευνας (μικροετερογένεια) στη φυσική κλίμακα. Ένα δεύτερο μεγάλο πρόβλημα παρουσιάζει η ροή σε μέσα με διπλό πορώδες. Είναι δύσκολη έως αδύνατη η πρόγνωση για δοσμένη θέση, εκτός αν υπάρχει εκτεταμένη

πληροφόρηση για το είδος και τη φύση του δικτύου ρωγμάτωσης ( Καλλέργης, 2001).

### **5.3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ**

Τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία έχουν πλέον ταυτιστεί με τα λογισμικά Η/Υ, αποτελούν την σύγχρονη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν προβλήματα ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά. Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν στην επίλυση των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων, την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο.

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται σε τρεις κυρίες κατηγορίες:

#### **α. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)**

Στην μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται επάνω στα κόμβους του πλέγματος που μπορεί να είναι στο κέντρο κάθε κελιού (block centered grid) ή στις κορυφές (mesh centered grid). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στα προβλήματα δυο ή τριών διαστάσεων, με τον κάνναβο να είναι ορθογωνικής μορφής. Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη.

#### **β. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method)**

Κατά την μέθοδο αυτή, το πεδίο εφαρμογής αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υποπεριοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Οι εξισώσεις επιλύονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου με την βοήθεια λογισμού των διαφορών ή με την μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων. Στην συνέχεια η σύνθεση των επιμέρους στοιχείων οδηγεί στο αλγεβρικό πρόβλημα.

Συγκρίνοντας τις δυο παραπάνω μεθόδους οι πεπερασμένες διαφορές προγραμματίζονται ευκολότερα. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή ενός καννάβου πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερα δεδομένα. Τα πεπερασμένα στοιχεία σε αντίθεση με τις πεπερασμένες διαφορές, προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, όπως ρήγματα, ενώ ακόμη μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Αντίθετα στα πεπερασμένα στοιχεία το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation functions).

#### γ. Μέθοδος των οριακών στοιχείων (boundary elements method).

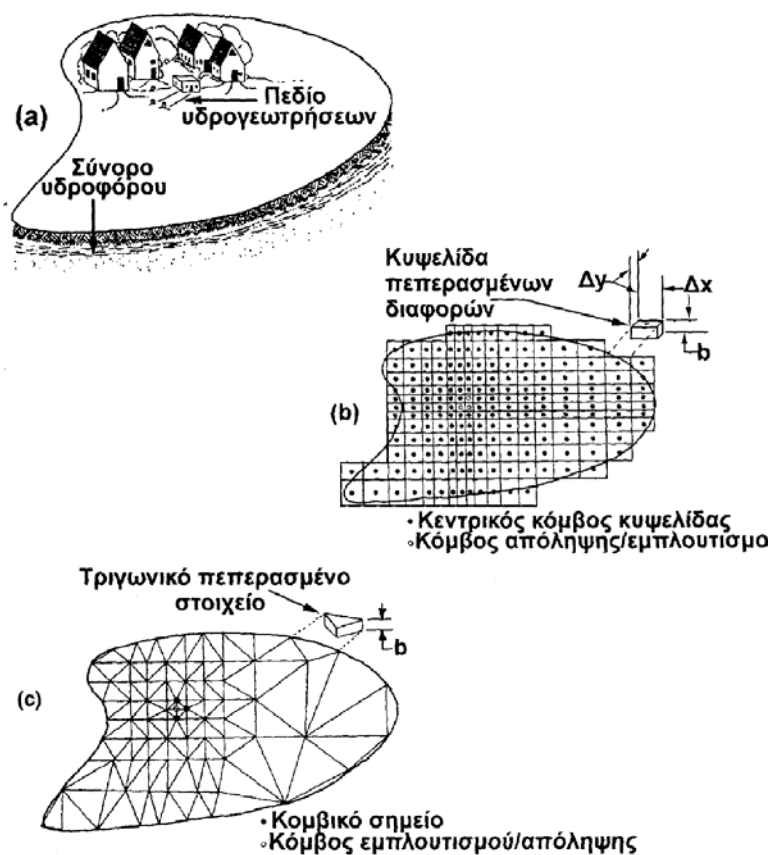
Με την μέθοδο αυτή εξετάζεται η ελεύθερη επιφάνεια ενός υδροφόρου στην περίπτωση της μόνιμης ροής. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται ως δυσδιάστατο γίνεται η παραδοχή ότι σε κάθε σημείο, με τις ίδιες οριζοντογραφικές συντεταγμένες, σε όλα τα οριζόντια επίπεδα, τα υδραυλικά στοιχεία έχουν την ίδια τιμή.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η δυσκολία περιγραφής έντονα ετερογενών πεδίων και η έλλειψη απλότητας στην επίλυση μη μονίμων ροών. Τελικά, η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εύχρηστη σε ειδικές κατηγορίες προβλημάτων και ιδιαίτερα όταν λειτουργούν συστήματα πηγαδιών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η μείωση των διαστάσεων του προβλήματος κατά μια (π.χ. δυσδιάστατο πρόβλημα λύνεται σαν μονοδιάστατο). Η μέθοδος αποτελεί την καλύτερη επιλογή σε περιπτώσεις μόνιμων φαινομένων και σε υδροφορείς που οι υδρογεωλογικές παράμετροι παρουσιάζουν ομοιογένεια σε μεγάλες εκτάσεις. (Τάντος, 2006 - Γιαννέλη, 2009)

Σχετικά με τα δύο είδη μαθηματικών μοντέλων:

- τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (εικ 4.4b)

- τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (εικ 4.4c)



Εικόνα 5.1: Δισδιάστατος κάναβος στις μεθόδους «πεπερασμένων διαφορών» και πεπερασμένων στοιχείων» με τις αντίστοιχες κυψελίδες (βρόχους) τους (Mercer-Faust, 1981, με τροποποιήσεις) (Καλλέργης, 2001)

Στην εικόνα 4.4 δίνεται μια παραστατική παρουσίαση των πιο πάνω δυο μεθόδων. Οι μεταβλητές, όπως εκφράζονται μέσα από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις, αλλάζουν συνεχώς. Έτσι, οι συνεχείς μεταβλητές αντικαθίστανται με ξεχωριστές διακριτές μεταβλητές που προσδιορίζονται σε επιλεγμένα σημεία, τους ‘κόμβους’ (nodes), που βρίσκονται μέσα στο χώρο του συστήματος που περιγράφεται από το αριθμητικό μοντέλο. Οι μεταβλητές αυτές δίνονται από έναν πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν μια συγκεκριμένη παράμετρο, όπως π.χ. το φορτίο  $h$ .

Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που συντάσσεται για κάθε ‘κόμβο’

επιλύεται με τη χρήση Η/Υ. Οι αριθμητικές αυτές λύσεις συνίστανται στην προσεγγιστική αντικατάσταση σε κάθε σημείο του συστήματος των συνεχών μερικών διαφορικών εξισώσεων, από μια σειρά διακριτών, στο χωροχρόνο, εξισώσεων. Έτσι με τη χρήση των μοντέλων μπορούν να προβλεφθούν οι επιδόσεις των υδροφόρων συστημάτων κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Τυπικές παράμετροι που μπορούν να υπολογιστούν με τα αριθμητικά μοντέλα είναι :

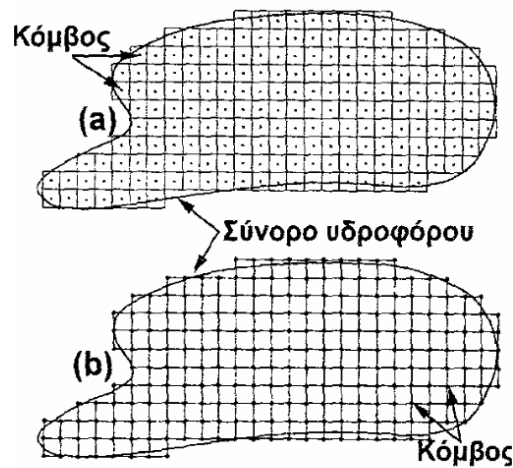
- Οι μεταβολές του ρυθμού άντλησης ή εμπλουτισμού των υδροφόρων.
- Η αλλαγή της μεταξύ των υδρογεωτρήσεων απόστασης ή της θέσης τους.
- Η μεταβολή του ρυθμού εμπλουτισμού.
- Η μεταβολή των συνοριακών συνθηκών.

Οι πιο πάνω μεταβλητές μπορούν να μεταβληθούν κατά βούληση ώστε να διαπιστωθεί η αντίστοιχη συμπεριφορά του υδροφόρου.

Απαραίτητα προϋπόθεση για τις πιο πάνω προγνώσεις είναι η ικανότητα της εκτέλεσης ‘ανάλυσης ευαισθησίας’ των παραμέτρων του υδροφόρου συστήματος και διαδοχικών δοκιμών των εναλλακτικών υποθέσεων σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες.

#### **5.4. ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ**

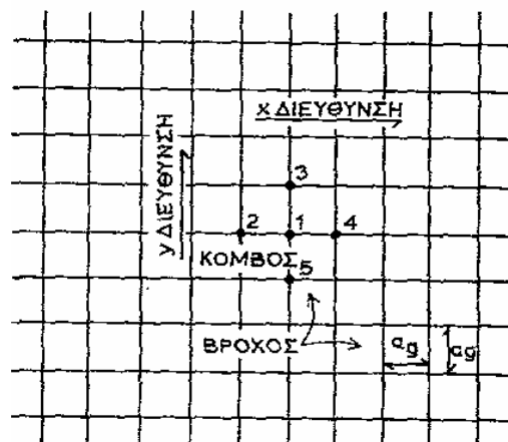
Διακρίνονται δυο διαφορετικές διατάξεις των κόμβων (εικ 4.6) στο πλέγμα (δίκτυο) των βρόχων. Οι κόμβοι στους οποίους θα υπολογιστούν οι μεταβλητές του υδροφόρου μπορεί να βρίσκονται στο κέντρο κάθε βρόχου (Block-centered grid) ή στις τέσσερις κορυφές των τετράγωνων βρόχου (mesh-center grid).



Εικόνα 5.2: «Κεντροβαρική» (a) και «κατά κορυφή» (b) διάταξη των κόμβων στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών) (Καλλέργης, 2001)

Η επιλογή ανάμεσα στις δύο διατάξεις γίνεται ανάλογα με τις οριακές συνθήκες. Όταν είναι γνωστή η παροχή εγκάρσια προς το όριο (συνθήκη Neumann) είναι πιο πρακτική η χρήση της 'κεντροβαρικής' διάταξης των κόμβων ενώ όταν είναι γνωστό το φορτίο στο όριο (συνθήκη Dirichlet) πρέπει να επιλέγεται η διάταξη 'κορυφής'. Υπάρχουν πάντως περιπτώσεις στις οποίες οι συνοριακές συνθήκες είναι μικτές.

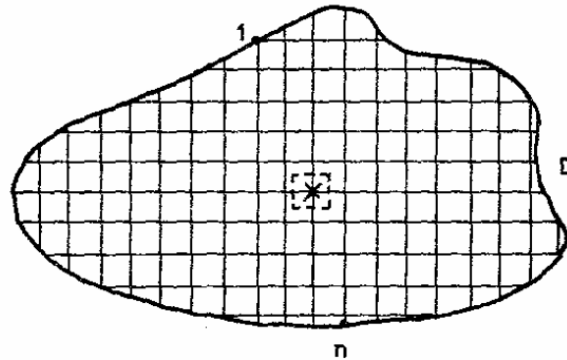
Στην εικ. 4.7 φαίνεται η ονοματολογία που χρησιμοποιείται στην αριθμητική ανάλυση με την τεχνική των πεπερασμένων διαφορών.



Εικόνα 5.3: Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται στην αριθμητική ανάλυση. Ονοματολογία. (Καλλέργης, 2001)



Στην περιοχή D που παριστάνει τον υπό μελέτη υδροφορέα, χαράσσεται ένα δίκτυο βρόχων, οι οποίοι για να γίνει πιο απλό το πρόβλημα, θεωρούνται τετράγωνα (εικ. 4.8). Αντί να προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το υδραυλικό φορτίο H σε όλα τα σημεία, περιορίζουμε τον αριθμό τους μόνο στους κόμβους του δικτύου.



Εικόνα 5.4: Πλέγμα τετράγωνων βρόχων (Καλλέργης, 2001)

Έτσι, αν  $h$  είναι η συνάρτηση του πραγματικού φορτίου στην περιοχή D, αναζητούμε μια συνάρτηση  $H$  οριζόμενη μόνο στους κόμβους του δικτύου, η οποία πρέπει:

- 1) να είναι αντιπροσωπευτική του μέσου φορτίου στο εσωτερικό ενός τετράγωνου βρόχου, που περιβάλλει το θεωρούμενο κόμβο και
- 2) να τείνει προς το πραγματικό φορτίο, στο θεωρούμενο κόμβο, όταν ο αριθμός των κόμβων αυτών αυξάνει απεριόριστα.

Συντομεύεται επίσης ο χρόνος, δεδομένου ότι μετριέται στο πεδίο το φορτίο  $H$  σε ορισμένες μόνο ημερομηνίες, κοντά σχετικά η μία από την άλλη (π.χ. 1 μέρα, 1 εβδομάδα ή 3 μήνες). Οι παράμετροι  $T$ ,  $S$  και  $q$  (παροχή της μονάδας επιφάνειας) θα υπολογιστούν μόνο στους κόμβους του δικτύου και για κάθε μια ημερομηνία θα είναι αντιπροσωπευτικές των μέσων τιμών των παραπάνω παραμέτρων στο βρόχο, που περιβάλλει το θεωρούμενο κόμβο.

Οι αρχικές συνθήκες είναι το αρχικό φορτίο  $h$  σε όλους τους κόμβους του δικτύου και οι οριακές συνθήκες του  $h$ , οι  $\frac{\partial h}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial h}{\partial y}$  στους κόμβους μόνο των ορίων. Συνεπώς

λύση του προβλήματος συνίσταται στην καταγραφή των εξισώσεων, διαδοχικά για καθένα από τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι αριθμούνται 1 έως  $n$ .

Με την προϋπόθεση μόνιμης ροής (το υδραυλικό φορτίο πρακτικά δε μεταβάλλεται με το χρόνο) έχουμε:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

Η εξίσωση της ροής υπογείων υδάτων γράφεται

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = q \quad (5.1)$$

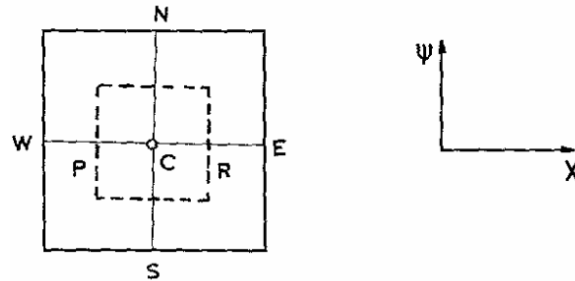
Έτσι η εξίσωση γίνεται ελλειπτικού τύπου και για τη λύση της δεν είναι απαραίτητη η γνώση των αρχικών συνθηκών παρά μόνο των συνοριακών.

Έστω  $n$  ο αριθμός των κόμβων· ο άγνωστος είναι το φορτίο  $h$  σε όλους τους κόμβους, εκτός από αυτόν που βρίσκεται στα όρια του υδροφόρου. Αν  $p$  είναι ο αριθμός των οριακών σημείων και  $m$  ο αριθμός  $n-p$ , το πρόβλημα είναι ο υπολογισμός των  $m$  άγνωστων τιμών του φορτίου  $h$  στους  $m$  κόμβους.

Μιλάμε για το «διάνυσμα», (το φορτίο  $h$  σε καθορισμένο σημείο του χώρου είναι βαθμωτό μέγεθος, όμως όταν θεωρείται σαν στήλη ή γραμμή μήτρας με στοιχεία τις τιμές του  $h$  στα διάφορα σημεία του πεδίου, αποκτά την έννοια του διανύσματος)  $h$  στις  $m$  άγνωστες συνιστώσες. Θα έχουμε επομένως ένα «διάνυσμα»  $T$  σε  $n$  συνιστώσες.

Έστω τυχαίος κόμβος (εικ 4.9) που περιβάλλεται από το βρόχο του οποίου αποτελεί

το κέντρο, και οι τέσσερις πιο κοντινοί του κόμβοι. Η μεταβιβασιμότητα  $T$  μεταξύ των σημείων  $C$  και  $W$ , κατά προσέγγιση είναι το ημιάθροισμα των  $T$  στα σημεία  $C$  και  $W$  και η μερική παράγωγος είναι ίση με τη διαφορά  $h_c - h_w$ , διαιρεμένη με την απόσταση  $CW$ , η οποία δεν είναι τίποτε άλλο παρά η διάσταση  $\Delta x$  των βρόχων.



Εικόνα 5.5: Κόμβος ( $C$ ) που περιβάλλεται από βρόχο του οποίου αποτελεί κέντρο βάρους (Καλλέργης, 2001)

$$\left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \text{ στο } P \approx \frac{T_w + T_c}{2} \frac{h_c - h_w}{\Delta x} \quad (5.2)$$

$$\text{Το ίδιο, } \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \text{ στο } R \approx \frac{T_E + T_C}{2} \frac{h_E - h_C}{\Delta x} \quad (5.3)$$

Για να πάρουμε  $\left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)$  ως προς  $x$ , πρέπει να υπολογίσουμε την διαφορά της

έκφρασης αυτής στα σημεία R και P και να τη διαιρέσουμε με την απόσταση PR, η οποία είναι επίσης  $\Delta x$ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \approx \frac{\left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\text{στο R}} - \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{\text{στο P}}}{\Delta x}$$

Η

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) \approx \frac{T_E + T_C}{2} \frac{h_E - h_C}{\Delta x} + \frac{T_W + T_C}{2} \frac{h_W - h_C}{\Delta x} \quad (5.4)$$

Έτσι, προσδιορίστηκε ο πρώτος όρος της εξίσωσης ροής κατά τη διεύθυνση WCE, κατά την οποία μεταβάλλεται το  $x$ . Μετά υπολογίζεται ο δεύτερος όρος, όπου το  $c$  μεταβάλλεται (διεύθυνση SCN), οπότε η εξίσωση γράφεται:

$$\frac{T_E + T_C}{2} (h_E - h_C) + \frac{T_W + T_C}{2} (h_W - h_C) + \frac{T_N + T_C}{2} (h_N - h_C) + \frac{T_S + T_C}{2} (h_S - h_C) = q c \Delta x^2 \quad (5.5)$$

Και επειδή όμως ισχύει ότι  $q c \Delta x^2 = Q_C$  η προηγούμενη εξίσωση γίνεται :

$$\frac{T_N + T_C}{2} h_N + \frac{T_W + T_C}{2} h_W - \frac{T_N + T_W + T_E + T_S + 4T_C}{2} h_C + \frac{T_E + T_C}{2} h_E + \frac{T_S + T_C}{2} h_S = Q_C \quad (5.6)$$

Όπως φαίνεται από τα πιο πάνω, κατά τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, παίρνεται σαν προσέγγιση μιας παραγώγου το πηλίκο της διαφοράς της τιμής της συνάρτησης ανάμεσα σε δύο, γειτονικά μεταξύ τους, σημεία, δια της απόστασης των σημείων αυτών.

Μπορεί συνεπώς να γραφτεί για τον καθένα από τους  $m$  κόμβους, όπου το φορτίο  $h$  είναι άγνωστο, μια τέτοια εξίσωση. Για καθεμιά από τις εξισώσεις αυτές παρεμβαίνει γραμμικά το φορτίο στον κόμβο  $C$  και τους τέσσερις κοντινούς κόμβους.

Το σύνολο των εξισώσεων αυτών αποτελεί ένα γραμμικό σύστημα  $m$  εξισώσεων με  $m$  αγνώστους. Ένα τέτοιο πρόβλημα δέχεται μια και μοναδική λύση, η οποία συνίσταται στον προσδιορισμό του  $h$ .

α) Μόνιμη ροή

1. Άμεση επίλυση
2. Μη επαναληπτική μέθοδο

β) Μη μόνιμη ροή

1. Άμεση μέθοδο (explicit)
2. Πεπλεγμένη μέθοδος (implicit)
3. Μέθοδος Crank – Nicholson

(Καλλεργης, 2001)

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το MODFLOW θεωρώντας ότι η πυκνότητα του υγρού παραμένει σταθερή είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \Delta V \quad (5.7)$$

όπου:

$S_s$  : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού

$Q_i$  : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα

$\Delta V$  : ο όγκος της κυψελίδας

$\Delta \Phi$  : η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα  $\Delta t$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MODFLOW

### 6.1. ΧΡΗΣΗ MODFLOW

Το MODFLOW (Modular three dimensional finite difference ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.) αποτελεί τον πιο διαδεδομένο υπολογιστικό κώδικα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού. Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του κανάβου (block-centered), που προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου (Γιαννέλη, 2009).

Σημειώνεται ότι το MODFLOW δεν είναι ένα πρόγραμμα διαχείρισης των υδατικών πόρων αλλά ένα πρόγραμμα προσομοίωσης των υδροφόρων συστημάτων, για την εφαρμογή του οποίου είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση των υδραυλικών, υδρογεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών τους.

Το λογισμικό που στηρίζεται στους κώδικες MODFLOW και που αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία αποτελεί το βασικό εργαλείο για την προσομοίωση ομοιογενών υδροφόρων συστημάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημά του είναι το πλήρες εγχειρίδιο χρήσης που το συνοδεύει και η υποστήριξή του από το U.S. Geological Survey καθώς και η συνεργασία του με το SURFER και το GIS. Παράλληλα αναπτύχθηκαν πακέτα «post-processing» που με βάση την προσομοίωση, σε μόνιμη ροή, με το MODFLOW δίνουν τρισδιάστατη παράσταση των γραμμών ροής (MODPATH) με μεγάλη εφαρμογή στην προσομοίωση της μεταφοράς της ρύπανσης και στον καθορισμό των θέσεων των γεωτρήσεων απορρύπανσης στα συστήματα «άντλησης – επεξεργασίας».

Η αξιοπιστία της προσομοίωσης που προσφέρει το MODFLOW είναι συνάρτηση της ομοιογένειας του υδροφόρου συστήματος που προσομοιώνεται αλλά κυρίως της αξιοπιστίας των στοιχείων εισόδου στο πρόγραμμα, όπως οι υδραυλικές και υδρολογικές παράμετροι, το υδραυλικό φορτίο, οι οριακές συνθήκες κλπ.

Το MODFLOW αυτό καθ' εαυτό είναι ένα πρόγραμμα που αποτελείται από διάφορα «πακέτα», δηλαδή από ανεξάρτητες «υπορουτίνες» που εκτελούν ειδικές λειτουργίες προσομοίωσης, στηριζόμενες στην τεχνική των «πεπερασμένων διαφορών». Η ενδεχόμενη κατά συνέπεια αναξιοπιστία ενός στοιχείου εισόδου είναι αρκετή για να δώσει συνολικά αναξιόπιστα αποτελέσματα.

Το δίκτυο που κατασκευάζεται με το MODFLOW στηρίζεται στην παραδοχή ότι ο υδροφορέας είναι άπειρης έκτασης ή ότι έχει καθορισμένα και πλήρως γνωστά σύνορα. Για την αντιμετώπιση είτε της ανεπάρκειας είτε της ετερογένειας πρωτογενών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφορα γεωστατιστικά εργαλεία στηριζόμενα στη γραμμική παρεμβολή. Η πιο δημοφιλής από τις τεχνικές αυτές είναι η τεχνική («kriging»), η οποία αποτελεί υπορουτίνα αρκετών προγραμμάτων σύνταξης χαρτών ισοπληθών (ισοπιεζομετρικών κλπ), όπως το Surfer, το Grapher κ.α. Πέρα από την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται επίσης η ανάλυση τάσης επιφανειών (Trend surface analysis) κ.α.

## 6.2. ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ SEAWAT

Το πρόγραμμα SEAWAT αναπτύχθηκε για να αναπαραστήσει την τρισδιάστατη ροή υπόγειων νερών με μεταβλητή πυκνότητα στα πορώδη μέσα. Ο κώδικας για SEAWAT αναπτύχθηκε με το συνδυασμό MODFLOW και MT3DMS σε ένα ενιαίο πρόγραμμα που λύνει ένα συνδυασμό των εξισώσεων ροής και μεταφοράς μάζας. Οι νέες ικανότητες μπορούν να προστεθούν με μόνο τις δευτερεύουσες τροποποιήσεις στο κύριο πρόγραμμα χάρη στην δομή του κώδικα SEAWAT. Το SEAWAT διαβάζει τα σύνολα τυποποιημένων στοιχείων MODFLOW και MT3DMS, αν και κάποια πρόσθετη εισαγωγή μπορεί να απαιτηθεί για μερικές προσομοιώσεις SEAWAT.

Η εξίσωση μεταφοράς – υδροδυναμικής διασποράς που επιλύεται αριθμητικά από τον παραπάνω κώδικα έχει την ακόλουθη μορφή, (User's Guide to SEAWAT):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} * \left( D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} * (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} * C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (6.3)$$

όπου,

- C: η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας,  $[ML^{-3}]$
- t: ο χρόνος,  $[T]$
- xj: η απόσταση κατά μήκος των καρτεσιανών συντεταγμένων,  $[L]$
- Dij: ο συντελεστής της υδροδυναμικής διασποράς,  $[L^2T^{-1}]$
- vi: η ταχύτητα διήθησης (seepage velocity),  $[LT^{-1}]$
- qs: η συνιστώσα ροής (παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα) που περιγράφει τις πηγές και τις καταβόθρες (source/sink term),  $[T^{-1}]$
- θ: ενεργό πορώδες (αδιάστατο)
- ο όρος χημικών αντιδράσεων,  $[ML^{-3}T^{-1}]$

Το δεξιό τμήμα της παραπάνω εξίσωσης περιλαμβάνει τέσσερις όρους που από αριστερά προς τα δεξιά περιγράφουν αντίστοιχα τους μηχανισμούς της

υδροδυναμικής διασποράς, της μεταφοράς της πηγής - καταβόθρας και των χημικών αντιδράσεων. Σε ότι αφορά στην αριθμητική του επίλυση ο σχετικός κώδικας χρησιμοποιεί για τον όρο της μεταφοράς την προσέγγιση κατά ‘Lagrange’ (πεπερασμένες διαφορές), ενώ οι υπόλοιποι όροι προσεγγίζονται αριθμητικά με μεθόδους ‘Euler’, (User’s Guide to SEAWAT).

## 6.5. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ – ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα H/Y το οποίο περιέχει αλγόριθμους που επιλύουν το μαθηματικό μοντέλο αριθμητικά. Η εξίσωση καθώς και τα αποτελέσματα πρέπει πρώτα να επαληθευτούν. Η επαλήθευση της εξίσωσης αποδεικνύει ότι αυτή περιγράφει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την αριθμητική τους λύση



με την αντίστοιχη αναλυτική, αν υπάρχει, για να αποδειχθεί έτσι ότι επιλύει ορθά τις σχετικές εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.

#### Ρύθμιση (Calibration):

Στόχος της ρύθμισης είναι να καταδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις πραγματικές ροές και τις μεταβλητές κατάστασης. Κατά τη διαδικασία της ρύθμισης, αναζητείται ένα σύνολο παραμέτρων και τάσεων που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά υδραυλικά φορτία και τις διάφορες ροές. Η ρύθμιση γίνεται, είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error), είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μεθόδων.

Στην συγκεκριμένη εργασία η ρύθμιση του μοντέλου έγινε μέσω της μεθόδου της δοκιμής και αποτυχίας. Συνεπώς πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές έως ότου ο πόδας της υφαλμύρινης να βρίσκεται κάτω από την τιμή των 80.6cm (0,806m), την τιμή δηλαδή του μετώπου της υφαλμύρινης με βάση τα δεδομένα που εξήχθησαν από τις μετρήσεις που έγιναν κατά την πειραματική διαδικασία στην πιλοτική εργαστηριακή μονάδα.

Επομένως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε αυτό το κεφάλαιο, οι παράμετροι της υδραυλικής αγωγιμότητας και της διασποράς παραμετροποιήθηκαν και ρυθμίστηκαν με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και το ποσοστό της διάχυσης το οποίο δεν μπορούσε να μετρηθεί στην πειραματική διαδικασία. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται εκτενέστερα η διαδικασία σύγκρισης της πειραματικής διαδικασίας με την μοντελοποίηση με τη χρήση του προγράμματος Visual MODFLOW και του κώδικα προσομοίωσης Seawat.

## 6.2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

### 6.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

- Το υδρογεωλογικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση (steady case)
- Το μαθηματικό υπόβαθρο στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κυψελίδας (cell) του μοντέλου.
- Δεν υπάρχει ροή έξω από τα όρια του μοντέλου.
- Το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ομοιογενές ή ανισότροπο.
- Το σύστημα ροής μπορεί να έχει ακανόνιστο σχήμα και να περικλείει συνδυασμούς υδροφόρων στρωμάτων, δηλαδή ελεύθερα, ημι-ελεύθερα και υπό πίεση. Στην περίπτωση συνδυασμού υδροφόρων στρωμάτων, το ανώτερο στρώμα συνήθως σχεδιάζεται ως ελεύθερο.
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τρισδιάστατη μορφή ή απεικόνιση.

### 6.2.2. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ MODFLOW

- Η πυκνότητα του νερού θεωρείται σταθερή.
- Η κίνηση του υπόγειου νερού γίνεται σε τρεις διαστάσεις (x,y,z).
- Οι ιδιότητες της κάθε κυψελίδας κατανέμονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς.

Για την εφαρμογή του κώδικα MODFLOW σε μία περιοχή πρέπει να γίνει εισαγωγή κάποιων απαραίτητων **δεδομένων**, τα οποία είναι τα εξής:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.
- Οι αρχικές συνθήκες (initial heads), δηλαδή οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του κανάβου.
- Οι οριακές συνθήκες, είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του κανάβου.
- Οι υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας).
- Οι παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Ρυθμός τροφοδοσίας από κατείσδυση βροχόπτωσης.
- Οι διηθήσεις από ποταμοχειμάρρους ή οι εκφορτίσεις του υδροφόρου συστήματος προς αυτούς.
- Οι επιστροφές άρδευσης.

Η τρισδιάστατη κίνηση υπογείου ύδατος, υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου, περιγράφεται από τη μερική διαφορική εξίσωση (Anderson and Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

(6.1)

όπου:

$T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}$  : οι τιμές της μεταβιβασιμότητας κατά τον  $x, y, z$   
αντίστοιχα ( $L^2/T$ )  $h$  : το υδραυλικό φορτίο (L)

$W$  : παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή

εκροές του νερού ( $T^{-1}$ )

Ss : ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου ( $L^{-1}$ )

t : ο χρόνος (T)

## 6.3. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

### 6.3.1. ΤΜΗΜΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Όπως αναφέραμε το πρόγραμμα Visual MODFLOW είναι ένα εύχρηστο πρόγραμμα το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει με ευκολία :

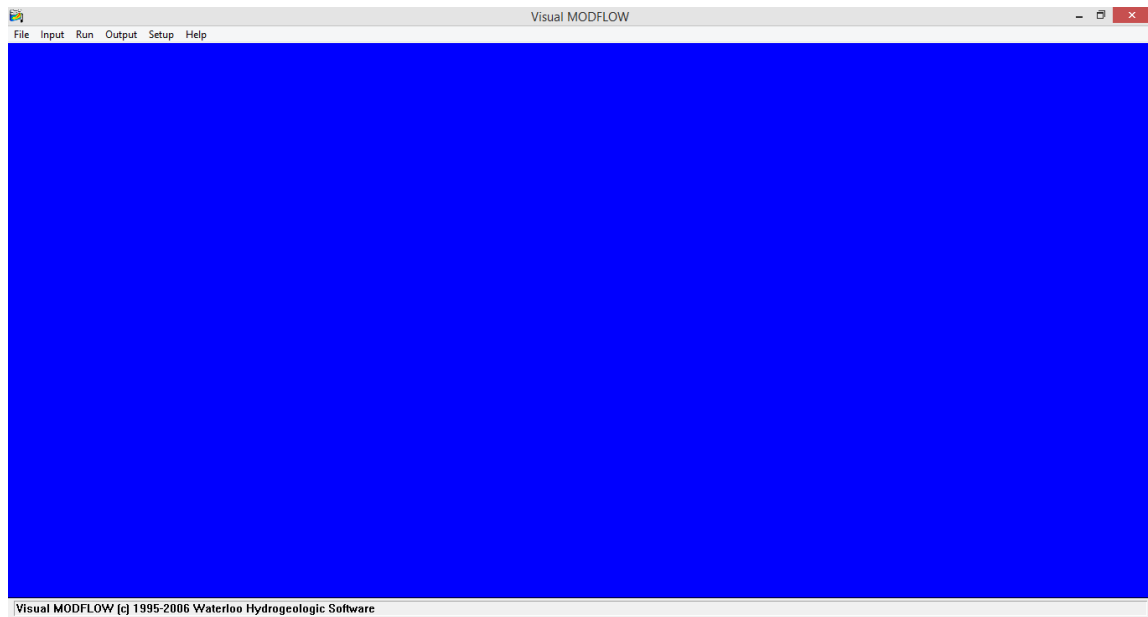
- Την χωροθέτηση μιας περιοχής
- Τον προσδιορισμό οριακών συνθηκών
- Την βαθμονόμηση του προγράμματος είτε μέσω χειροκίνητων είτε μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών.
- Την απεικόνιση των αποτελεσμάτων είτε σε δισδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη γραφική παράσταση.

Πιο συγκεκριμένα το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τις συνθήκες ροής και μεταφοράς ρύπων σε τρισδιάστατη μορφή.

Το Visual MODFLOW αποτελείται:

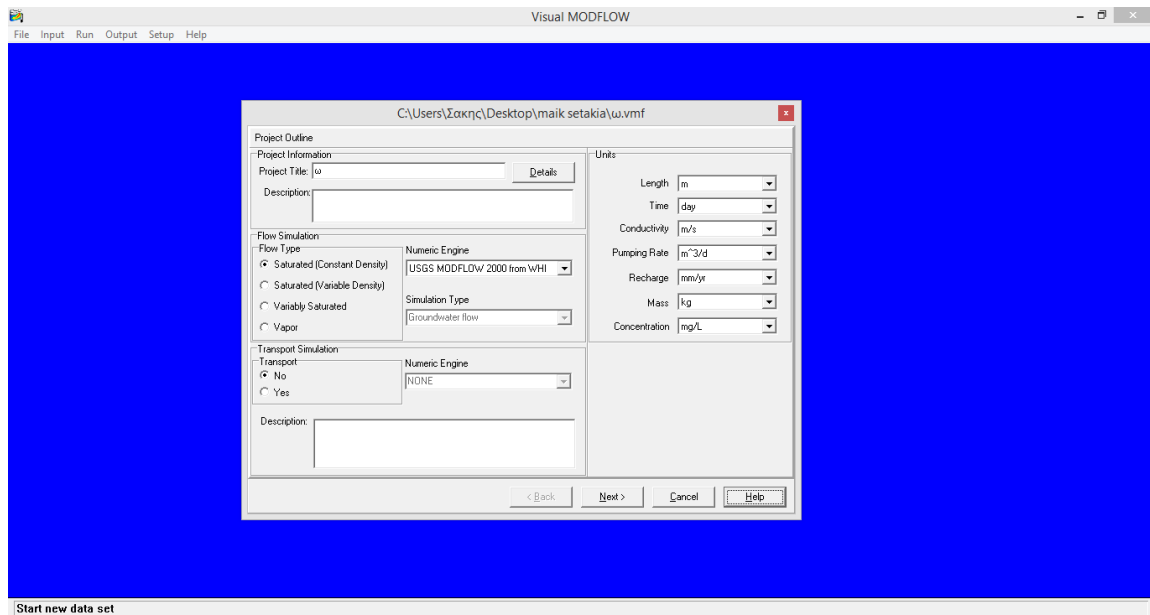
- Το τμήμα εισαγωγής δεδομένων: παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει όλες τις παραμέτρους ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει το πρόγραμμα.
- Το τμήμα επεξεργασίας των δεδομένων: παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να τροποποιήσει και να αλλάξει τις διάφορες τιμές τις οποίες έχει ορίσει τις μεταβλητές για την εκτέλεση του προγράμματος.
- Το τμήμα αποτελεσμάτων: ο χρήστης είναι σε θέση πλέον αφού έχει πραγματοποιήσει τις ανώτερες ενέργειες να παρουσιάσει και να καταθέσει τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.

Σε κάθε ενότητα υπάρχει το ίδιο προεπιλεγμένο φόντο και σχεδιάγραμμα οθόνης.



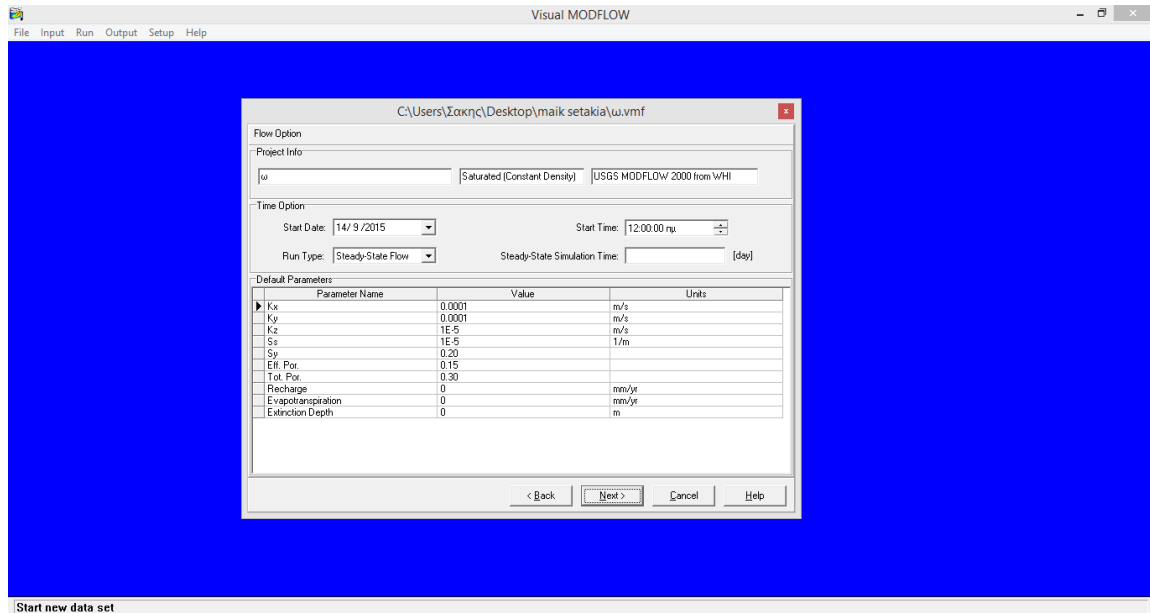
Εικόνα 6.1: Αρχική οθόνη προγράμματος

Στην συνέχεια και αφού επιλέξουμε την δημιουργία ενός νέου αρχείου ξεκινάει η εισαγωγή των δεδομένων. Στο αρχικό σημείο αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ορίσει τις υδραυλικές αγωγιμότητες, τον χρόνο προσομοίωσης, τις συνθήκες του φαινομένου και τον ρύπο με την συγκέντρωσή του ή τους ρύπους που θα προσομοιώσουν το φαινόμενο στο πρόγραμμα Visual MODFLOW.



Εικόνα 6.2: Νέου τύπου αρχείο

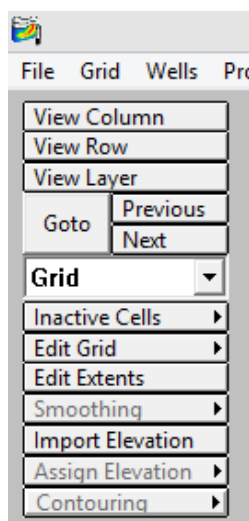
Στο σημείο αυτό ο χρήστης ορίζει το είδος τις ροής και αλλάζει αν επιθυμεί τις μονάδες στις οποίες θα τρέξει το πρόγραμμα και τα αποτελέσματά του.



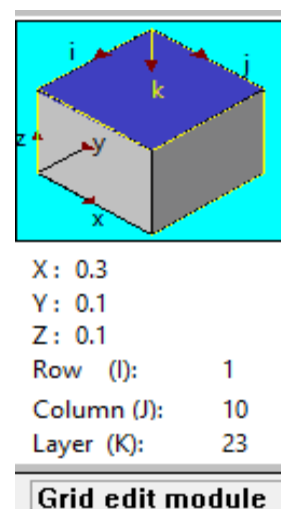
Εικόνα 6.3: Εισαγωγή παραμέτρων

Δίνοντας την επιθυμητή υδραυλική αγωγιμότητα και τον χρόνο προσομοίωσης του προγράμματος είμαστε σε θέση πλέον να οριστικοποιήσουμε τις συνθήκες και τις μεταβλητές του προγράμματος. Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα x και στον άξονα y είναι ίδια, ενώ στον άξονα z είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη σύμφωνα με το εχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

### 6.3.2. ΤΜΗΜΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ



Εικόνα 6.4: Κουμπιά ελέγχου επίδειξης

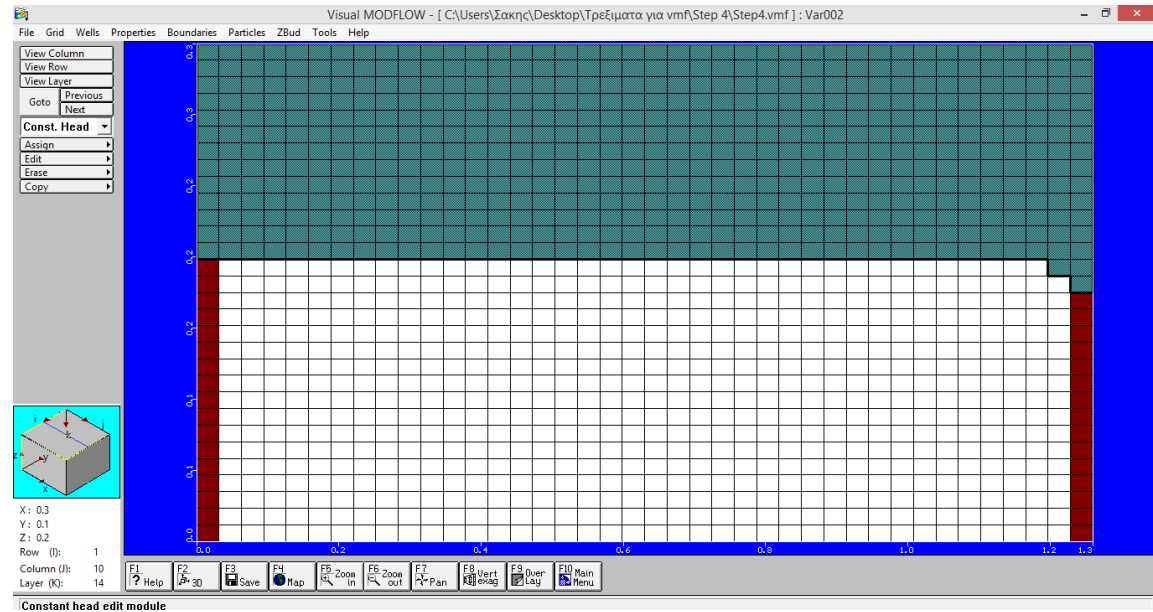


Εικόνα 6.5: Κύβος

Δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα να αλλάξει κατηγορίες και ενότητες μέσα στο πρόγραμμα ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται τα δεδομένα και τις μεταβλητές στο πρόγραμμα. Επιπλέον του δίνεται η δυνατότητα γρήγορης οπτικής αναφοράς της θέσης μέσα σε μια περιοχή.

## ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Στο σημείο αυτό τοποθετήσαμε τα συνολικό ύψος του υδροφορέα και στις δυο άκρες του στα όρια του οποίου θα προσομοιάσουμε την ροή του υπογείου υδροφορέα. Με πράσινο χρώμα είναι το μέρος (άνωθεν) που δεν λαμβάνει μέρος στην προσομοίωση αφού είναι το κομμάτι του υδροφορέα το οποίο είναι ελεύθερο χωρίς να καλύπτεται από νερό.



Εικόνα 6.6: Αρχικό ύψος

Οι στήλες με το κόκκινο χρώμα αποτελούν τα αρχικά ύψη των δυο ρευστών που θα λάβουν μέρος στην προσομοίωση.

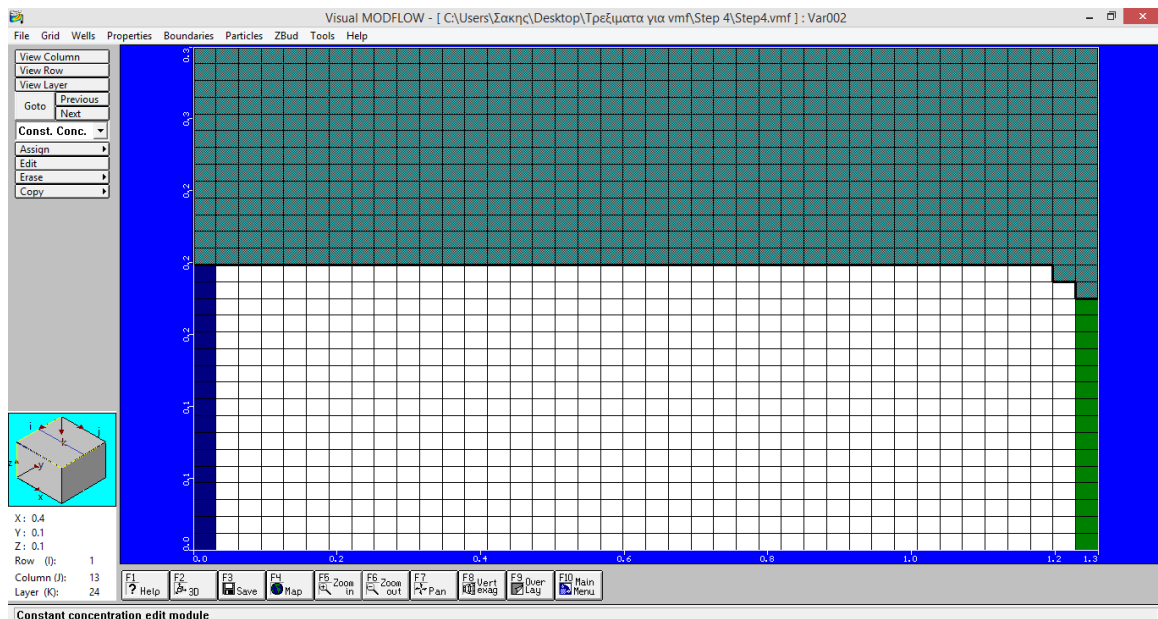
$$h_f = \frac{(\rho_s)}{\rho_f} * h_2 - \left( \left( \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) * h_{top\ cell} \right) \quad (6.2)$$

Η παραπάνω εξίσωση επιλύει τις τιμές για τις αρχικές στάθμες των ρευστών, όπου :

- $h_f$  : το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος

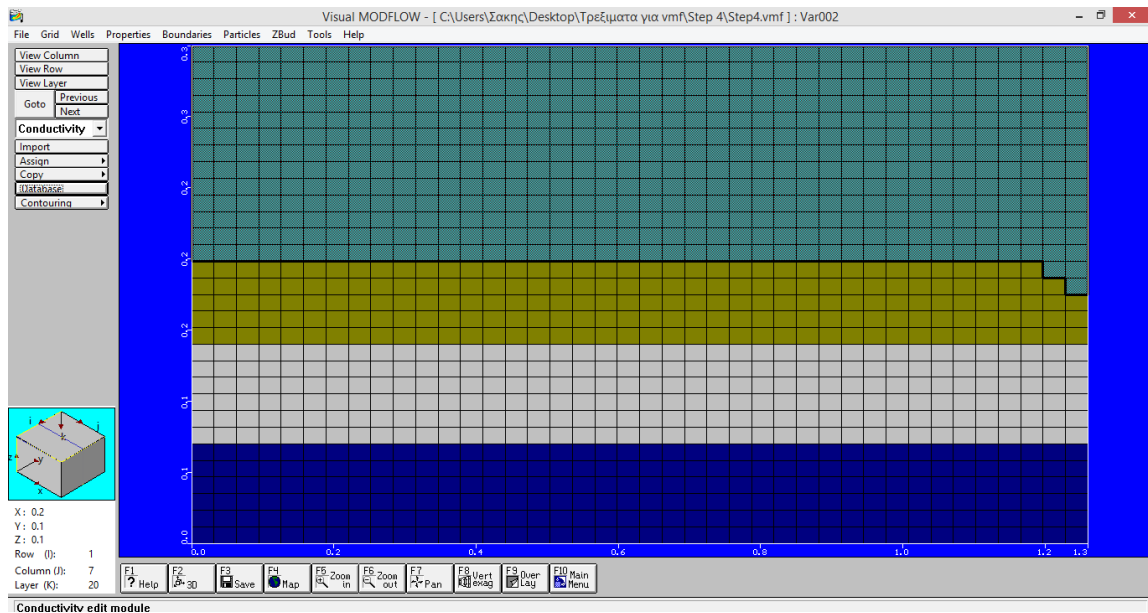


- $\rho_s$  : η πυκνότητα του αλμυρού νερού
- $\rho_f$  : η πυκνότητα του γλυκού νερού
- $h_2$  : το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού
- $h_{topcell}$  : το υψόμετρο κάθε κελιού.



Εικόνα 6.7: Συγκέντρωση ρευστών

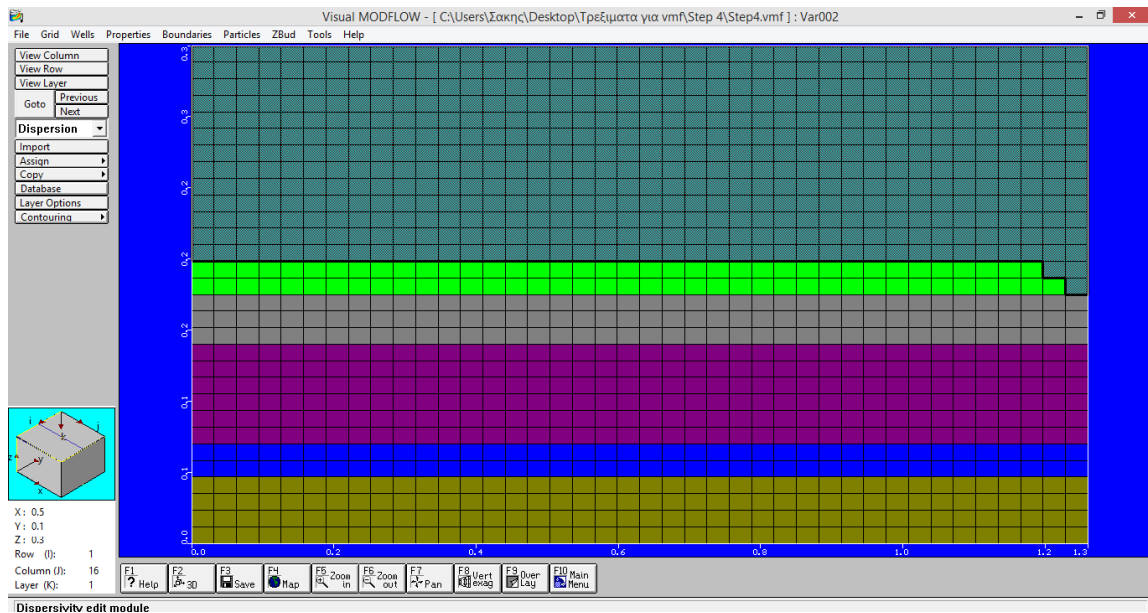
Στην καρτέλα αυτή εισάγουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων των 2 ρευστών που θα μοντελοποιηθούν. Στην αριστερή ( μπλε ) στήλη εισάγουμε την συγκέντρωση του γλυκού – πόσιμου νερού και στην δεξιά ( πράσινη ) στήλη την συγκέντρωση του αλμυρού νερού.



Εικόνα 6.8: Υδραυλικές αγωγιμότητες

Αφού λοιπόν έχουμε υπολογίσει τις υδραυλικές αγωγιμότητες για τον υδροφορέα ο οποίος αποτελείται από τρία στρώματα ευρείας κοκκομετρίας εισάγαμε τις υδραυλικές αγωγιμότητες για το κάθε στρώμα για την διαδικασία της μοντελοποίησης. Έτσι λοιπόν όπως έχουμε υπολογίσει οι υδραυλικές αγωγιμότητες:

- Για το 1<sup>ο</sup> στρώμα (μπλε):  $K_1 : 8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
- Για το 2<sup>ο</sup> στρώμα (γκρι) :  $K_2 : 7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$
- Για το 3<sup>ο</sup> στρώμα (κίτρινο) :  $K_3 : 1,3 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$



Εικόνα 6.9: Διασπορά

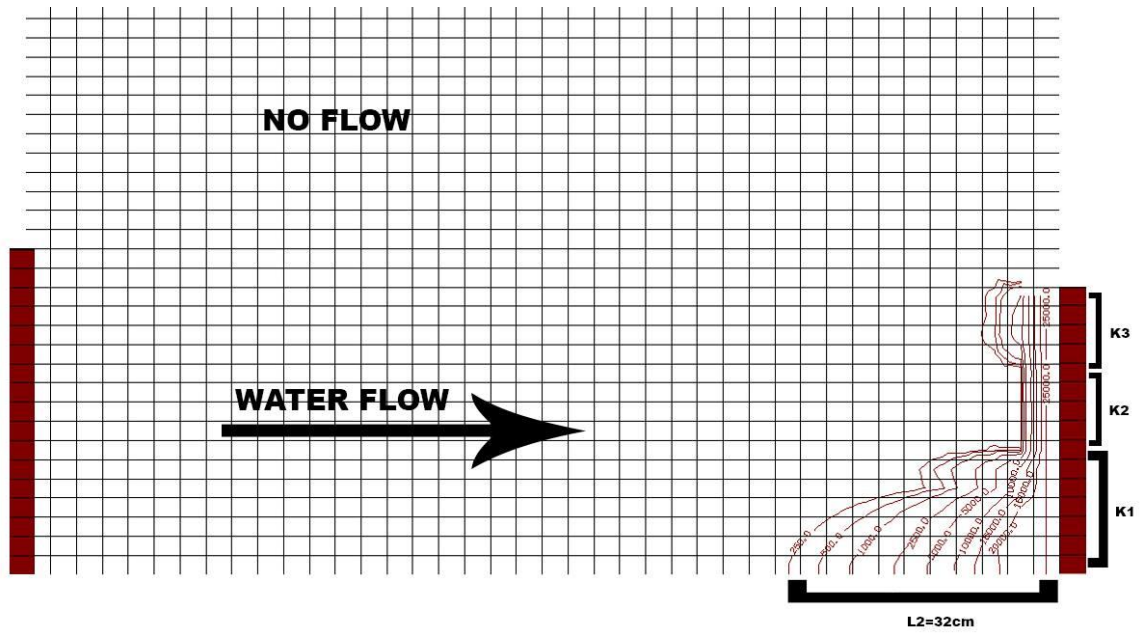
Στην καρτέλα αυτή ο χρήστης ρυθμίζει την επιμήκης διασπορά του μοντέλου για να μπορέσουμε να πλησιάσουμε όσον τον δυνατόν πιο ρεαλιστικά την σφήνα του αλμυρού νερού. Σαφώς έπρεπε να πραγματοποιηθούν κάποιες χειροκίνητες ρυθμίσεις ώστε να μπορέσουμε να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι λοιπόν οι τιμές που εισήχθησαν είναι οι εξής :

- Κίτρινο χρώμα :  $D = 0.8 \text{ m}$
- Γαλάζιο χρώμα :  $D = 0.1 \text{ m}$
- Μωβ χρώμα :  $D = 0.001 \text{ m}$
- Γκρι χρώμα :  $D = 0.02 \text{ m}$
- Λαχανί χρώμα :  $D = 0.01 \text{ m}$

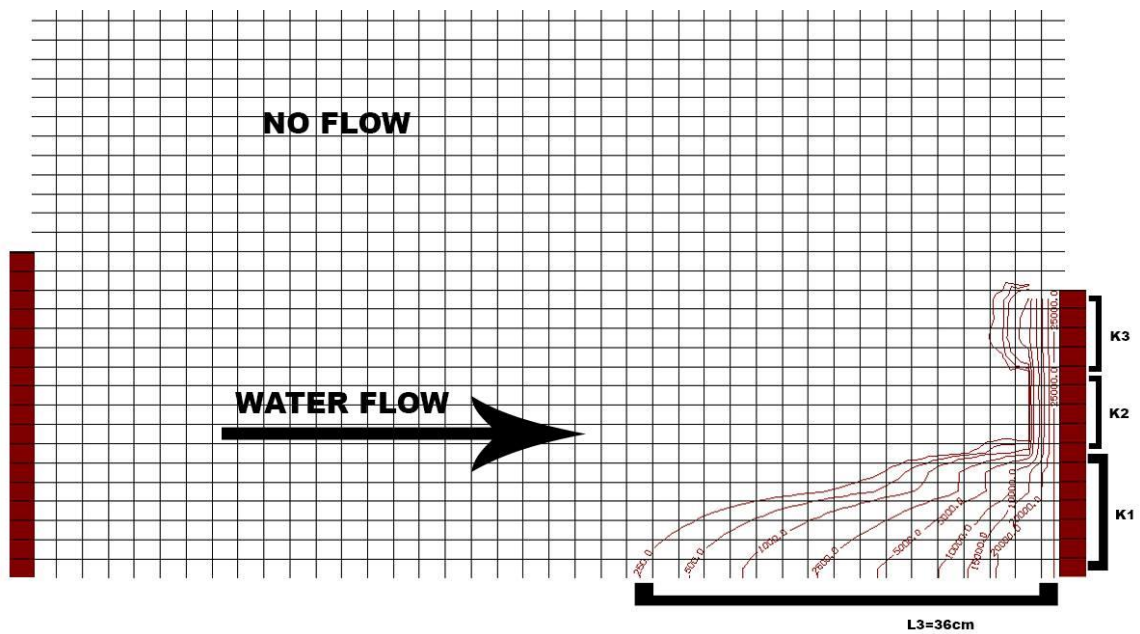
### 6.3.3. ΤΜΗΜΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το τμήμα αποτελεσμάτων του προγράμματος έχει την ικανότητα να μας δώσει τα τελικά στοιχεία και χρήσιμα εργαλεία ούτως ώστε να διαπιστώσουμε και να συγκρίνουμε με τα πειραματικά δεδομένα μας. Βάση της γραφικής απεικόνισης

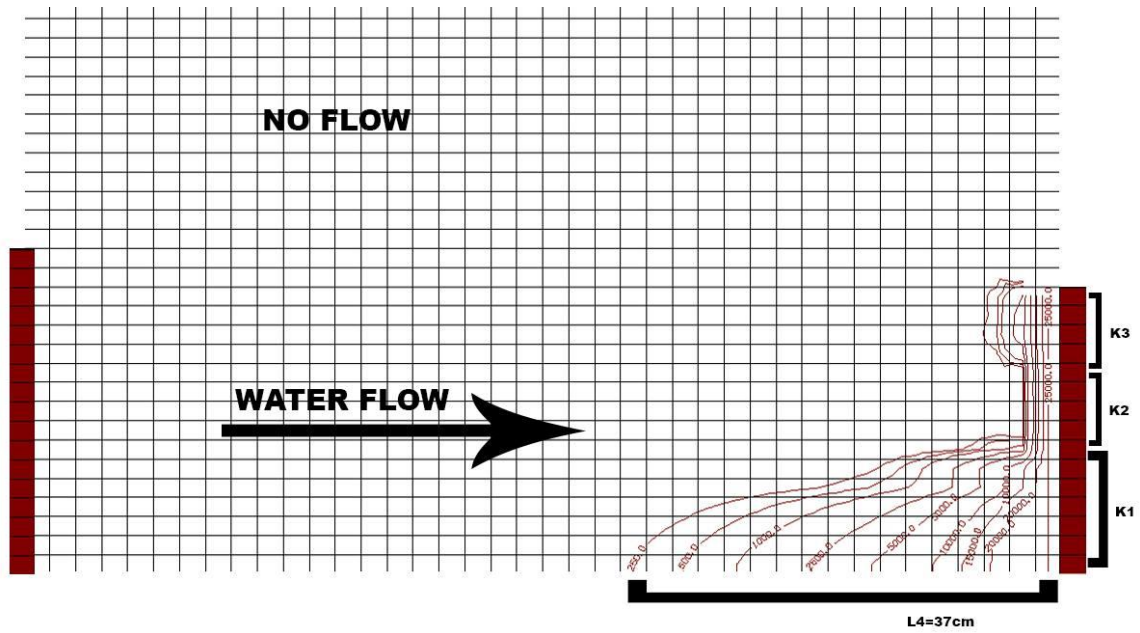
84



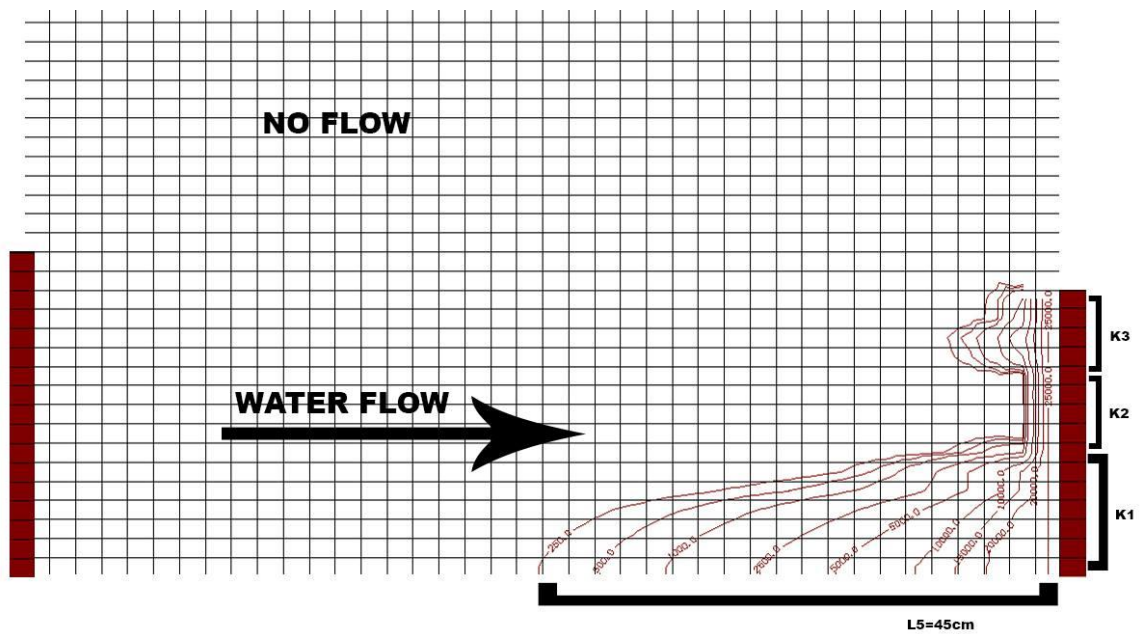
Step 2 ( 12 min )



Step 3( 18 min )



Step 4 ( 24 min )



Step 5 ( 30 min )

Τα άνωθεν γραφικά διαγράμματα είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προγράμματος Visual MODFLOW. Στη συνέχεια παραθέτουμε και της ρεαλιστικές

φωτογραφίες οι οποίες τραβήχτηκαν στο πειραματικό κομμάτι σε χρόνους: 6 min, 18 min και στα 30 min.

#### Φωτογραφίες Τρεξιματος



6 min





18min



30 min



**ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Παρακάτω παραθέτουμε τον πίνακα με τις επιμήκεις διασπορές άνα time step που έχουμε ορίσει. Έτσι έχουμε:

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα

STEP	TIME(min)	Μοντελοποίηση L(cm)	Πειραματικά L(cm)
<b>1</b>	0 -6	28	25
<b>2</b>	6-12	32	30
<b>3</b>	12-18	36	34
<b>4</b>	18-24	37	35
<b>5</b>	24-30	45	42

Έτσι λοιπόν η αντιστοίχιση την οποία είμαστε σε θέση να κάνουμε είναι:

- Ρεαλιστική Φωτό 1 → Step 1
- Ρεαλιστική Φωτό 2 → Step 2
- Ρεαλιστική Φωτό 2 → Step 4

Πρέπει να ομολογήσουμε ότι οι όποιες διαφοροποιήσεις και αποκλίσεις υπάρχουν μεταξύ της μονελοποίησης και του πειράματος είναι διότι στο πείραμα είμαστε σε θέση να διακρίνουμε το χρώμα του δείκτη ανάμεσα στους κόκκους του υλικού που μεταφέρεται το νερό και το αλάτι και όχι την πραγματική εξάπλωση της σφήνας.

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Έχοντας λοιπόν ολοκληρώσει την παρούσα πειραματική διαδικασία, αναλύοντας όσο το δυνατόν καλύτερα το θεωρητικό υπόβαθρο είμαστε σε θέση να παραθέσουμε κάποια χρήσιμα ρεαλιστικά συμπεράσματα. Βάση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο της υφαλμύρινσης και των αποτελέσμάτων όπου εξήχθησαν η πιλοτική εργαστηριακή μονάδα παρέχει την δυνατότητα να μελετηθεί το φαινόμενο της υφαλμύρινσης σε πραγματικό πεδίο, με ρεαλιστικά εδαφικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.

Επιπλέον χρησιμοποιώντας την εξίσωση Ghyben – Herzberg ως παραδοχή για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων μπορέσαμε με την βοήθεια του προγράμματος MODFLOW-SEAWAT να προσδιορίσουμε με ακρίβεια το μέτωπο εξελιγής της υφαλμύρινης. Ακόμα, το συγκεκριμένο πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα της προσομοίωσης και μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρινης σε διάφορους χρόνους που δεν θα ήταν δυνατά σε εργαστηριακή κλίμακα.

Συμπεραίνοντας, με την βοήθεια του προγράμματος Visual MODFLOW – SEAWAT και τις αναλύσεις από τα εργαστηριακά πειράματα που έχουν διεξαχθεί, μας δίνεται η δυνατότητα μελλοντικής μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρινης βάση διαφορετικών δεδομένων και πληροφοριών, με στόχο να διεξαχθούν αποτελέσματα και συμπεράσματα ώστε να εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες πεδίου για την μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινης.

## **ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ**

Γενικά με την βοήθεια του προγράμματος Visual-MODFLOW έχουμε την δυνατότητα να προσομοιώσουμε πολλά και διαφορετικά σενάρια του φαινομένου της υφαλμύρινης ώστε να το μελετήσουμε σε βάθος το φαινόμενο αυτό. Είμαστε σε θέση λοιπόν πλέον να παραθέσουμε κάποια άλλα σενάρια και περιπτώσεις:

- Χρήση διαφορετικού υλικού για τα στρώματα και διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας.
- Εναλλαγή της διάταξης των στρωμάτων από οριζόντια σε κάθετη διάταξη.
- Εισαγωγή και άλλων στρωμάτων στο πείραμα και μελέτη της συμπεριφοράς της σφήνας.

- Τοποθέτηση μια γεώτρησης – αντλίας και ταυτόχρονα μπορεί να γίνει και συνδυασμός των ανωτέρων περιπτώσεων.
- Εισαγωγή μιας γεώτρησης εμπλουτισμού αυτή την φορά και δυνατότητα συνύπαρξης με την γεώτρηση άντλησης και την διαφορετική διάταξη των στρωμάτων
- Συνδυασμός όλων των παραπάνω και μελέτη του φαινομένου σε ρεαλιστικό επίπεδο πλέον μιας και κάτι τέτοιο είναι το σύνηθες φαινόμενο σε παράκτιες περιοχές στην Ελλάδα.
- Εισαγωγή μιας γεωτρησης εμπλουτισμου αυτή την φορά και δυνατοτητα συνυπαρξης με την γεωτρηση αντλησης και την διαφορετικη διαταξη των στρωματων
- Συνδυασμος ολων των παραπανω και μελετη του φαινουμενου σε ρεαλιστικο επιπεδο πλεον μιας και κατι τετοιο είναι το συνηθες φαινομενο σε παρακτιες περιοχες στην Ελλάδα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

- 1) Αρέτος Α., 2011. Επίδραση των ρηγμάτων στη μοντελοποίηση ρηγματομένων υδροφορέων – Εφαρμογή πεδίου στην περιοχή Χερσονήσου Ηρακλείου.
- 2) Βουδούρης Κ. 2003, "Υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων από διείσδυση θαλασσινού νερού", Θεσσαλονίκη.
- 3) Βροντάκη Ευαγγελία, 2001. Υφαλμύρωση σε παράκτιους υδροφορείς – Τρόποι ανίχνευσης με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων.
- 4) 4.Γιαννόπουλος Γεώργιος, 2011.Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προσχωματική λεκάνη Βιάννου Ηρακλείου Κρήτης και εξέταση σεναρίων μεταβολής υδροληπτικών και βροχομετρικών συνθηκών με χρήση του μοντέλου Visual Modflow.

- 5) Καλλέργης Γ.Α. (1986) "Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία", Έκδοση ΤΕΕ.
- 6) Καλλέργης Γ., Εφαρμοσμένη - Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία , Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2001
- 7) Καλλιάνης Γ. – Χατζηθεοχάρους Κ. Χανιά, 2004. Θεωρία υφάλμυρης διεύθυνσης – Μέθοδοι αποκατάστασης.
- 8) Καρατζάς Γ., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2011
- 9) Καρτεράκης Σ. , Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, Χανιά, 2005.
- 10) Λατινόπουλος Π.Δ. (2004) "Προστασία και εξυγίανση των υπόγειων νερών", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Α.Π.Θ.
- 11) Λατινόπουλος Π. 2007, "Προστασία και εξυγίανση των υπογείων νερών". Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Θεσσαλονίκη.
- 12) Λεονταρίτης, Ι. 1985. Συνδυασμένη διαχείριση και επιφανειακών υδατικών πόρων αναφορά στον υδροφορέα Θεσσαλίας. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης.
- 13) Μαριολάκος Η. 1998, Γεωοικολογική Αντιμετώπιση της Υφαλμύρινσης των Υπόγειων Υδροφορέων, Ημερίδα "Υφαλμύριση Υπόγειων Υδάτων" Αθήνα.
- 14) Νάνου - Γιάνναρου Α. 2001, Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος 6-7 Ιουλίου 2001.
- 15) Παππά Α., 2010. Βέλτιστη διαχείριση παράκτιου υδροφορέα με χρήση μοντέλου προσομοίωσης και του μοντέλου βελτιστοποίησης GWM, (Ground Water Management).
- 16) Σούλιος Γ. 2004, "Γενική Υδρογεωλογία" Τρίτος τόμος, Θεσσαλονίκη.
- 17) Τάντος Β, 2006, "Περιβαλλοντική Υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου - Κορίνθου. Κατασκευή Μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής", Διπλωματική, Πάτρα.

#### Διεθνής Βιβλιογραφία

- 1) Bobba A.G. 1993, Mathematical models for saltwater intrusion in coastal aquifers. Water resources management, Vol. 7, p.3.
- 2) Bowen R. 1986, "Groundwater", Elsevier Applied Science Publishers Ltd.

- 3) Bear, J. & Dagan, G. (1964) Moving interface in coastal aquifers. /. Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, 90 (HY4), 193-216.
- 4) 82
- 5) Gass – Lehr, 1997. Handbook of Complex Environmental Remediation Problems.
- 6) Ela, Wendell P., Introduction to Environmental Engineering and Science, Prentice Hall, 3rd ed. 2007.
- 7) Kaiser Engineers, California, Final Report to the State of California, San Francisco Bay-Delta Water Quality Control Program, State of California, Sacramento, CA (1969).
- 8) Mualem, Y. & Bear, J. (1974) The shape of the interface in steady flow in stratified aquifer. Wat. Resour. Res. 10, no. 6, 1207-1215.
- 9) Mc Donald M., and Harbaugh A., 1988. A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, Tech. Water-Resources Inv., Bk. 6, Chap. A1, Washington, USGS.
- 10) Papadopoulou M.P., G.P. Karatzas, M.A. Koukadaki, Y. Trichakis (2005) “Modeling the saltwater intrusion phenomenon in coastal aquifers – A case study in the industrial zone of Heraklio in Crete” Global NEST Journal, Vol. 7, No 2, pp 197-203.
- 11) Papadopoulou M.P., Varouchakis A.E, Karatzas G. P. (2008). Environmental Modeling and Assessments. Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer.
- 12) Papadopoulou M., Varouchakis E., Karatzas G., Simulation of complex aquifer behavior using numerical and geostatistical methodologies, Desalination v.237, pg 4253, 2009.
- 13) Position Paper on Total Dissolved Solids, State of Iowa, IAC 567 61.3 (2)g et sequitur updated March 27, 2003.
- 14) Reilly T.E. and A.S. Goodman. 1985. Quantitative analysis of saltwater – freshwater relationships in groundwater systems-a historical perspective. J. Hydrology, v. 89, pp. 125-160.
- 15) Tulipano L, Fidelibus M.D, Panagopoulos A (2005). Ground water management of coastal - karstic aquifers. Final report, Luxemburg.

- 16) Visual Modflow v.4.2 User's Manual, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, 2006.