



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

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

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

SCHOOL of ENVIRONMENTAL ENGINEERING

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕΑΩΑΤ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ
ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΕ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

ΧΡΗΣΤΟΣ Χ. ΣΚΟΡΔΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος, Καθηγητής Π.Κ

Παρανυχιανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής Π.Κ

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2013

Στους γονείς μου, Χρήστο & Άννα

και τον αδερφό μου

Γιάννη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω των επιβλέποντα καθηγητή μου, 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 εργασίας, καθώς επίσης για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την πορεία της φοιτητικής μου διαδρομής, αλλά και κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερώς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη, μέλος του εργαστηρίου του τομέα Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, για την συνεισφορά του στην πραγμάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση και συμβουλευτική βοήθεια του.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Ιωάννη Τριχάκη, επιστημονικό συνεργάτη του τομέα Περιβαλλοντικής Υδραυλικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, για την βοήθεια του στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Νικολαΐδη Ν, Καθηγητή του τμήματος, κ. Παρανυχιανάκη Ν, Επίκουρο καθηγητή και τον κ. Τσάνη Καθηγητή επίσης του τμήματος, ως αναπληρωματικό μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υπομονή και την πολύτιμη υποστήριξη τους σε όλη μου τη φοιτητική διαδρομή. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους αδερφικούς φίλους και συναδέλφους κ. Κανέλλο Παναγιώτη και κ. Σαμιωτάκη Αντώνη για την ανιδιοτελή υποστήριξη τους, την φιλοξενία όποτε τη χρειάστηκα και την υπερπολύτιμη βοήθεια τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφεται η εφαρμογή του μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας SEAWAT στην προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρινης σε πιλοτική εργαστηριακή μονάδα με τη βοήθεια του προγράμματος Visual MODFLOW. Σκοπός της εργασίας είναι η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της μοντελοποίησης και η επαλήθευσή τους με τη χρήση της εξίσωσης της απότομης διεπιφάνειας των Ghyben – Herzberg.

Αρχικά γίνεται αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου της υφαλμύρινης, στις μαθηματικές εξισώσεις που το διέπουν συναρτήσει των εξισώσεων ροής για υπόγεια νερά σε ελεύθερο υδροφορέα, καθώς επίσης και στα προβλήματα που δημιουργεί στο φυσικό περιβάλλον, καθότι το αλμυρό νερό αποτελεί ένα είδος ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Επίσης γίνεται μία σύντομη αναφορά στην επικρατούσα κατάσταση στην Ελλάδα, κυρίως στο κομμάτι που αφορά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της χώρας.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης του φαινομένου και συγκεκριμένα στην πιλοτική εργαστηριακή μονάδα διήθησης και αποστράγγισης. Στη μονάδα αυτή προσομοιώθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρινης σε πορώδες μέσο αποτελούμενο από άμμο και χαλίκι ευρείας κοκκομετρίας δημιουργώντας παράλληλα συνθήκες ελεύθερου υδροφορέα. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές μετρήσεις συλλέγοντας τα απαραίτητα δεδομένα για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.

Έπειτα, τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης εισήχθησαν στο πρόγραμμα Visual MODFLOW, ρυθμίζοντας και βαθμονομώντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα και ακριβέστερα στις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος. Ακολούθως χρησιμοποιώντας τον κώδικα προσομοίωσης μεταβλητής πυκνότητας SEAWAT, μοντελοποιήθηκε η εξέλιξη του φαινομένου της υφαλμύρινης στο υπό εξέταση πορώδες μέσο.

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα και αυτά της μοντελοποίησης συγκρίθηκαν γραφικά ώστε να παρατηρηθεί η χρονική εξέλιξη του πόδα της σφήνας του υφάλμυρου νερού.

Στη συνέχεια επαληθεύεται μαθηματικά η θέση του πόδα της σφήνας με τη βοήθεια της εξίσωσης των Ghyben – Herzberg και της εξίσωσης Dupuit.

Συμπερασματικά, έχοντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης, παρατηρείται ότι οι εργαστηριακές καμπύλες που περιγράφουν το φαινόμενο της υφαλμύρινσης και εκείνες της προσομοίωσης αναφορικά με τη θέση του πόδα της σφήνας, σχεδόν συμπίπτουν. Το γεγονός αυτό επαληθεύτηκε και μαθηματικά. Επομένως τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν μια καλή βάση για περαιτέρω δοκιμές σε πορώδη μέσα πολύπλοκων γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών.

ABSTRACT

This thesis describes the application of Visual MODFLOW model and of SEAWAT variable density code, in simulating the saltwater intrusion phenomenon in a pilot facility. The study aims to compare the experimental with the modeled part and to verify the results using the Ghyben – Herzberg equation.

At first the theoretical background of the saltwater intrusion phenomenon is described, the governing mathematical equations and the problems caused to the natural environment, since salt water is a type of ground water pollution. There is also a brief review of the situation in Greece, based on the geomorphological characteristics of the country.

Then, the features and the functionality of the experimental pilot facility are described. The saltwater intrusion phenomenon was simulated experimentally for an unconfined aquifer consisting of medium to large sand and gravel particle sizes. Several measurement sets were conducted, in order to collect the necessary data for the comparison with the modeling results.

Subsequently, the experimental settings were simulated with the Visual MODFLOW model, adjusting and calibrating all the important flow and transport parameters, in order to respond as accurately as possible to the experimental data. . Next, the SEAWAT code via the Visual MODFLOW model was applied to simulate the evolution of the salt water intrusion phenomenon in the specific porous medium.

The results obtained from the laboratory process and the modeling part, were graphically compared in order to observe whether the salt water toe of the wedge in both processes have similar behavior. Additionally the toe of the wedge was mathematically verified by using the Ghyben – Herzberg's approach and the Dupuit's equation.

In conclusion the comparison results showed that the saltwater intrusion curves almost coincide in terms of the toe of the wedge, while this fact is also mathematically verified. Consequently, these results provide a base for future tests in complex porous media under different scenarios.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	1
1.1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ.....	1
1.2 ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ.....	2
1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	3
1.4 ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ	9
2.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	9
2.2 ΑΙΤΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	11
2.3 Η ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	14
2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ.....	14
2.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	17
2.5.1 Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΑΝΑΜΙΞΙΜΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....	17
<i>Ο νόμος Ghyben – Herzberg</i>	17
2.5.2 Απόκλιση προσέγγισης.....	20
2.5.3 Υδροδυναμική προσέγγιση – Συνθήκη μόνιμης ροής – Μαθηματικό υπόβαθρο	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ	24
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	24
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	24
3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	26
3.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	29
3.3.1 1 ^ο σετ μετρήσεων 15/10/2012.....	30
3.3.2 2 ^ο σετ μετρήσεων 5/12/2012	31
3.3.3 3 ^ο σετ μετρήσεων 13/5/2013.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	35
4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ	35
4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	36
4.3 ΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	37
4.4 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ VISUAL MODFLOW	39

4.4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο προγράμματος	40
4.5 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....	42
4.5.1 Το τμήμα εισαγωγής.....	45
4.5.2 Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων.....	51
4.5.3 Το τμήμα αποτελεσμάτων.....	51
4.6 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ SEAWAT.....	54
4.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ – ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΩΝ GHYBEN – HERZBERG.....	57
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	57
5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΩΝ GHYBEN – HERZBERG	58
5.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.	59
5.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 2 ^ο χρονικά βήμα (10min).....	61
5.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 5 ^ο χρονικά βήμα (25min).....	63
5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 8 ^ο και τελευταίο χρονικά βήμα (40min).....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	68
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

1.1 ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

Το νερό είτε αντιμετωπίζεται ως «φυσικός πόρος» ή «οικονομικό αγαθό», είτε ως «περιβαλλοντικό στοιχείο» είναι βασικό και αναντικατάστατο, απαραίτητο όχι μόνο για την ανάπτυξη, αλλά και για την επιβίωση της ανθρωπότητας. Όμως ως περιβαλλοντική παράμετρος είναι η πλέον ευαίσθητη και πρώτα βαλλόμενη από τα δύο σύνδρομα της σύγχρονης κοινωνίας που είναι η υπερκατανάλωση και η ρύπανση.

Η ποσότητα του νερού στον πλανήτη παραμένει πρακτικά σταθερή και ανέρχεται στα $1600 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Έτσι η ποσότητα του νερού που απαντάται ελεύθερο στην επιφάνεια του πλανήτη ανέρχεται σε $1,370 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Από την ποσότητα αυτή του ελεύθερου νερού ποσοστό 97,2% είναι αλμυρό (θαλασσινό) και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για ύδρευση, άρδευση ή βιομηχανική χρήση. Ανεκμετάλλευτη παραμένει επίσης και η ποσότητα του νερού που είναι υπό μορφή χιονιού ή πάγου, αντιπροσωπεύοντας το 2,1% στο σύνολο του νερού, καθώς και ατμοσφαιρικοί υδρατμοί που αντιστοιχούν στο 0.001% της ποσότητας αυτού. Κατά συνέπεια από τις τεράστιες υγρές ποσότητες του πλανήτη, μόνο 0,6% είναι διαθέσιμο στον άνθρωπο αντιπροσωπεύοντας $8.2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ νερού.

Από την ποσότητα αυτή ποσοστό 12% αντιπροσωπεύεται από το επιφανειακό νερό (ποταμοί - λίμνες), ενώ το υπόλοιπο ποσό, περίπου $7,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ νερού είναι υπόγειο νερό. Όμως το μισό από αυτήν την ποσότητα δεν είναι άμεσα διαθέσιμο στον άνθρωπο, γιατί βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 800m., ενώ πρέπει να αφαιρεθεί ποσοστό 0,6% της συνολικής ποσότητας του υπόγειου νερού, που αποτελούν η υγρασία και οι διάφορες απώλειες. Από τα παραπάνω προκύπτει τελικά ότι ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του $0,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ επιφανειακού νερού και $3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ υπόγειου νερού. Συνολικά το ποσό των χρησιμοποιούμενων υδατικών πόρων (γλυκό νερό πλην των παγετώνων) αποτελείται κατά 95% από το υπόγειο νερό, (Καλλέργης, 2001).

Από τους υδατικούς πόρους οι επιφανειακοί είναι απολύτως διακριτοί, μιας και συγκεντρώνονται στις λεκάνες απορροής. Τα όριά τους είναι τοπογραφικά και μπορούν να χαραχτούν με τη βοήθεια τοπογραφικών χαρτών. Το νερό ρέει προς την κατεύθυνση που κλίνει τοπογραφικά η μορφολογία. Τα επιφανειακά νερά δεν μπορούν να διασχίσουν τους τοπογραφικούς υδροκρίτες (εκτός των περιπτώσεων μεγάλων πλημμυρών) και οι θέσεις των υδροκριτών αυτών είναι σταθερές, τουλάχιστον στην χρονική κλίμακα του μηχανικού.

Από την άλλη μεριά, οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δεν είναι ευδιάκριτοι και συχνά ούτε διακριτοί μεταξύ τους. Τα όρια των υδροφορέων είναι φυσικά και όχι τοπογραφικά, ενώ σε δοσμένο σημείο μπορεί να υπόκεινται της επιφάνειας του εδάφους περισσότεροι υδροφορείς. Καθένας υδροφορέας μπορεί να έχει διαφορετικά χημικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, να έχει διαφορετική πηγή ή περιοχή εμπλουτισμού και διαφορετική περιοχή εκφόρτισης. Επιπλέον, οι υπόγειοι υδροκρίτες δεν συμπίπτουν κατά κανόνα με τους επιφανειακούς.

Κάτω από φυσικές συνθήκες, ένα υδροφόρο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας. Ένας μεταβλητός όγκος νερού εμπλουτίζει τον υδροφορέα και ένας ομοίως μεταβλητός όγκος νερού εκφορτίζεται από το υδροφόρο σύστημα. Ο ρυθμός εμπλουτισμού καθορίζεται από το ποσό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που δε χάνονται με την εξατμισοδιαπνοή και την απορροή (ελεύθεροι υδροφορείς), την κατακόρυφη υδροπερατότητα και τις λιθοφάσεις της ακόρεστης ζώνης και τέλος από τη μεταβασιμότητα και την πιεζομετρία στο υδροφόρο σύστημα.

1.2 ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΚΥΚΛΟ

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου της γης. Ολόκληρη σχεδόν η ποσότητα του υπόγειου νερού μπορεί να θεωρηθεί μέρος του υδρολογικού κύκλου που περιλαμβάνει τα επιφανειακά και μετεωρικά-ατμοσφαιρικά νερά. Πρακτικά όλα τα νερά που καταλαμβάνουν μέρος του ανθρώπινου περιβάλλοντος ανακυκλώνονται συνεχώς εξαιτίας των δυνάμεων που ασκούνται πρωταρχικά από την ηλιακή ενέργεια και τη βαρύτητα της γης.

Οι υδροφόροι σχηματισμοί του φλοιού της γης δρουν σαν αγωγοί για τη μεταβίβαση και σαν αποθήκες για την αποθήκευση του νερού. Το νερό εισέρχεται σε αυτούς τους σχηματισμούς είτε άμεσα με τις βροχοπτώσεις από την επιφάνεια του εδάφους (κατείσδυση) είτε έμμεσα, από σώματα επιφανειακού νερού, όπως τα ποτάμια και οι λίμνες (διήθηση) και μετά ταξιδεύει αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια είτε με φυσική ροή (πηγές), είτε με την παρέμβαση των φυτών (διαπνοή) ή του ανθρώπου (υδροληπτικά έργα) (Καλλέργης, 2001).

Πρακτικά, όλες οι ποσότητες του υπόγειου νερού είναι επιφανειακής προέλευσης. Οι κύριες πηγές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών περιλαμβάνουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την επιφανειακή απορροή και τις φυσικές και τεχνητές λίμνες. Ένα μέρος της αναπλήρωσης των υδροφόρων οριζόντων, που αναφέρεται σαν τεχνητός εμπλουτισμός, προέρχεται από το πλεόνασμα του αρδευτικού νερού, τις διαρροές και διηθήσεις από τα κανάλια μεταφοράς και από τα έργα τεχνητού εμπλουτισμού. Το νερό στο υπέδαφος κινείται στην ακόρεστη ζώνη προς τα κάτω υπό την επίδραση της βαρύτητας, ενώ στην κορεσμένη ζώνη κάτω από την επίδραση των τοπικών υδραυλικών συνθηκών.

Εκροή του υπόγειου νερού γίνεται όταν το νερό αναδύεται από το υπέδαφος. Το μεγαλύτερο μέρος της φυσικής εκροής έχει τη μορφή εκφόρτισης σε σώματα επιφανειακού νερού όπως π.χ. τα υδατορεύματα, η θάλασσα και οι λίμνες. Η ροή του υπόγειου νερού στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται με τη μορφή πηγών, οι οποίες αποτελούν εκφορτίσεις των υδροφορέων. Το υπόγειο νερό κοντά στην επιφάνεια είναι δυνατόν να επιστρέψει άμεσα στην ατμόσφαιρα με τη διαδικασία της εξάτμισης από το έδαφος και της διαπνοής από τα φυτά. Οι σημαντικότερες τεχνητές «εκροές» υπόγειου νερού είναι οι αντλούμενες ποσότητες του, από υδροληπτικά έργα, (Καλλέργης, 2001).

1.3 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

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

- Η λειτουργία τροφοδοσίας των έργων απόληψης (supply function).
- Η λειτουργία διοχέτευσης νερού από μία περιοχή σε μία άλλη (piping function).
- Η λειτουργία εξόρυξης νερού στην περίπτωση που η απόληψη ξεπερνά την αναπλήρωση, οδηγώντας όμως στην εξάντληση του υδροφορέα, (mining function).
- Η λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας χρησιμοποιημένων ποσοτήτων ύδατος στην ακόρεστη ζώνη, (filter plant function).
- Η λειτουργία παραγωγής ενέργειας με την κατασκευή και εγκατάσταση αντλιών θερμότητας αξιοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη θερμική ενέργεια του υδροφόρου, (energy – source function).
- Η λειτουργία αποθήκευσης νερού με την υπόγεια αποθήκευση της περίσσειας νερού (χειμερινής, πλημμυρικών απορροών και επεξεργασμένων λυμάτων), (storage function).

Η εκμετάλλευση, λοιπόν, των υδατικών πόρων δεν μπορεί παρά να στηρίζεται σε προχωρημένη γνώση των ποιοτικών και ποσοτικών χωροχρονικών μεταβολών τους. Τέσσερις βασικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας νερού σε ένα υδραυλικό σύστημα.

- A. Η μέση ετήσια επιφανειακή και υπόγεια απορροή, καθώς και η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού.
- B. Η τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησης του υπόγειου νερού .
- C. Η ποιότητα του νερού, υπόγειου ή επιφανειακού, στην υδρολογική λεκάνη και κοντά σε αυτήν.
- D. Η νομοθεσία για το νερό, υπόγειο ή επιφανειακό, μέσα και κοντά στην υδρολογική λεκάνη.

Επομένως, 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 διευκρίνιση. Η υπεράντληση υδροφόρων μπορεί να οδηγήσει στη

μείωση της επιφανειακής απορροής και την ξήρανση υγροτόπων ή ανεπιθύμητη πτώση της στάθμης λιμνών. Δοθέντος 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, οδικό δίκτυο, αγωγούς, φράγματα και σήραγγες. Η υπεράντληση παράκτιων υδροφόρων μπορεί να οδηγήσει στη μόλυνσή τους από τη διείσδυση της θάλασσας. Έτσι υπό τη γενική έννοια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν οικολογικές, οικονομικές, κοινωνικές, πολιτισμικές και πολιτικές συνιστώσες. Τα μεγαλύτερα προβλήματα στη διαχείριση των υδατικών πόρων είναι:

- 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 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.
- 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, (Καλλέργης Γ., 2000):

- 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 (monitoring).

Γνωρίζοντας 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 τη συντήρηση της ζωής, της ανάπτυξης και του περιβάλλοντος, ο στρατηγικός σχεδιασμός της ορθής χρήσης τους απαιτεί, (Καλλέργης 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 συνδιαχείρισής του συνόλου των υδατικών πόρων (δημιουργία κατάλληλου δικτύου ακαδημαϊκών και άλλων εξειδικευμένων εργαστηρίων)

Συγκρίνοντας, επομένως, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων διαπιστώνεται ότι (Καρτεράκης, 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 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.

Συνεπώς, η άποψη που επικρατεί συνολικά 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).

1.4 ΡΥΠΑΝΣΗ ΥΔΑΤΩΝ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το νερό αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη, καθότι δύναται να ανανεώνει τα αποθέματά του στην επιφάνεια της γης και τους υπόγειους υδροφορείς διαμέσου του υδρολογικού κύκλου. Παρόλα αυτά ο συγκεκριμένος πόρος θεωρείται περιορισμένος λόγω της ποσότητας του, αλλά και της άνισης κατανομής του στον χώρο και το χρόνο. Επίσης περιοριστικό παράγοντα αποτελεί και η ποιότητα του νερού με τη ρύπανση να επηρεάζει άμεσα τις διαθέσιμες ποσότητες του. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να μην διαθέτουμε όποτε το χρειαζόμαστε την ποσότητα και την ποιότητα του νερού που θέλουμε, (Υ.ΠΕ.Κ.Α., 2013).

Το νερό ως άριστος διαλύτης που είναι έχει την ικανότητα να μεταφέρει την ρύπανση. Για παράδειγμα, η διάβρωση που προκαλεί στα πετρώματα διαμορφώνει το ανάγλυφο της γης καθώς διαλύει και μεταφέρει τους όποιους ρύπους συναντά στην πορεία του. Δυστυχώς όμως τα ποτάμια, οι λίμνες και οι θάλασσες δεν έχουν την

πλήρη ικανότητα αυτοκαθαρισμού, γεγονός που οδηγεί τα οικοσυστήματα αυτά σε κατάρρευση και στη μετατροπή τους σε υπαίθριους υπονόμους με τα νερά αυτά να καθίστανται ακατάλληλα για χρήση και επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία.

Η έλλειψη υδάτινων αποθεμάτων αποτελεί ένα ακόμα παράγοντα ο οποίος συντελεί στην διόγκωση του προβλήματος της ρύπανσης των υδάτων. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαρκούς αυξανόμενης ανάγκης για νερό που έχουν οι κάτοικοι των πόλεων, οι βιομηχανίες και οι τομείς της γεωργίας και του τουρισμού. Οπότε το νερό που επιστρέφει στη φύση, δηλαδή στα ποτάμια, τις λίμνες, τα υπόγεια νερά και τους υπόλοιπους υδατικούς αποδέκτες, είναι συνήθως μολυσμένο ή ρυπασμένο με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας των επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Επίσης δεν πρέπει να παραλείψουμε και το ζήτημα του εμπλουτισμού των ανωτέρω υδατικών αποδεκτών, καθότι όσο λιγότερο αυτοί ανανεώνονται, εξαιτίας των μειωμένων βροχοπτώσεων για παράδειγμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση των ρύπων.

Ακόμα οφείλουμε να κατανοήσουμε ότι τα υδάτινα αποθέματα δεν προορίζονται μόνο για το ανθρώπινο είδος, οπότε είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρηθούν οι υδάτινοι αποδέκτες απαλλαγμένοι από ρυπασμένες εκροές για να υπάρχουν οι απαραίτητες ποσότητες καλής οικολογικής ποιότητας νερού για τη διατήρησή της άγριας πανίδας και χλωρίδας, καθώς επίσης και για τον πολύ σημαντικό ρόλο που παίζουν στην υδρολογική ισορροπία, την τροφοδότηση των υπόγειων νερών και τον καθαρισμό των νερών.

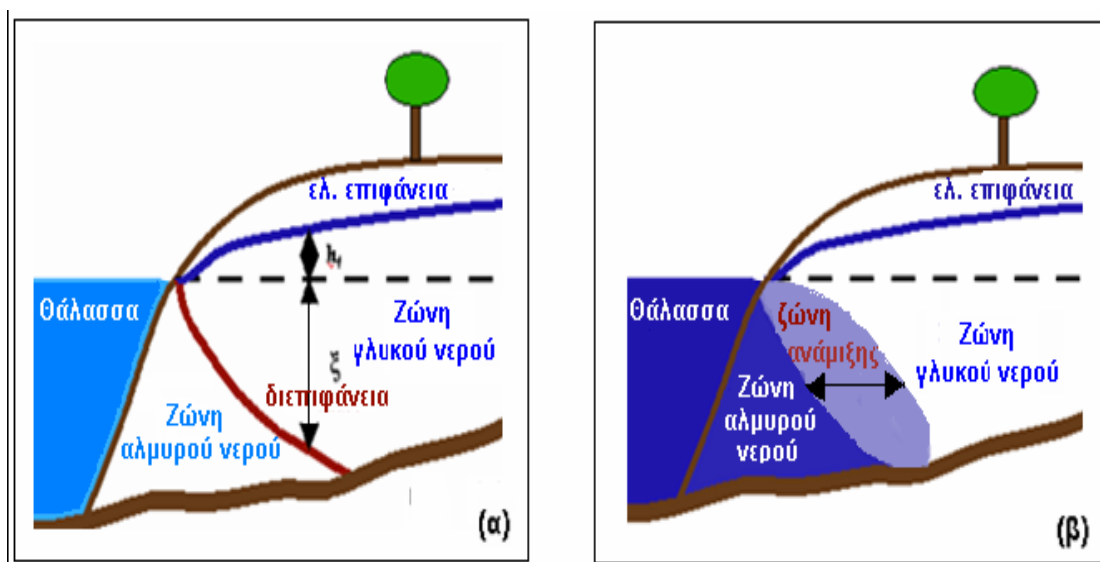
Τέλος, οι αυξανόμενες ανάγκες σε ποσότητα νερού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερους ρυθμούς άντλησης και επομένως στην διείσδυση του αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης, η οποία αποτελεί την συνηθέστερη αιτία μόλυνσης του γλυκού νερού, καθώς επίσης και σοβαρότατο περιβαλλοντικό ζήτημα των παράκτιων περιοχών ανά τον κόσμο. Το γεγονός αυτό καθιστά την διερεύνηση του φαινομένου αυτού ιδιαίτερως σημαντική και είναι άμεση η ανάγκη να βρεθούν λύσεις αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος, (Βροντάκη, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ

2.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μελέτη της υπόγειας ροής σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι η περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρινης που συναντάται σε όλες τις παράκτιες ζώνες. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε παράκτιους υδροφορείς και προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ποιότητα του υπόγειου νερού. Το γεγονός αυτό ανάγει τη μελέτη της υφάλμυρης διείσδυσης σε μείζονος σημασίας διαδικασία, επειδή αποτελεί τον κοινότερο ίσως ρύπο στο γλυκό νερό, το οποίο μπορεί να εκτοπίζει ή με το οποίο δύναται να αναμιχθεί.

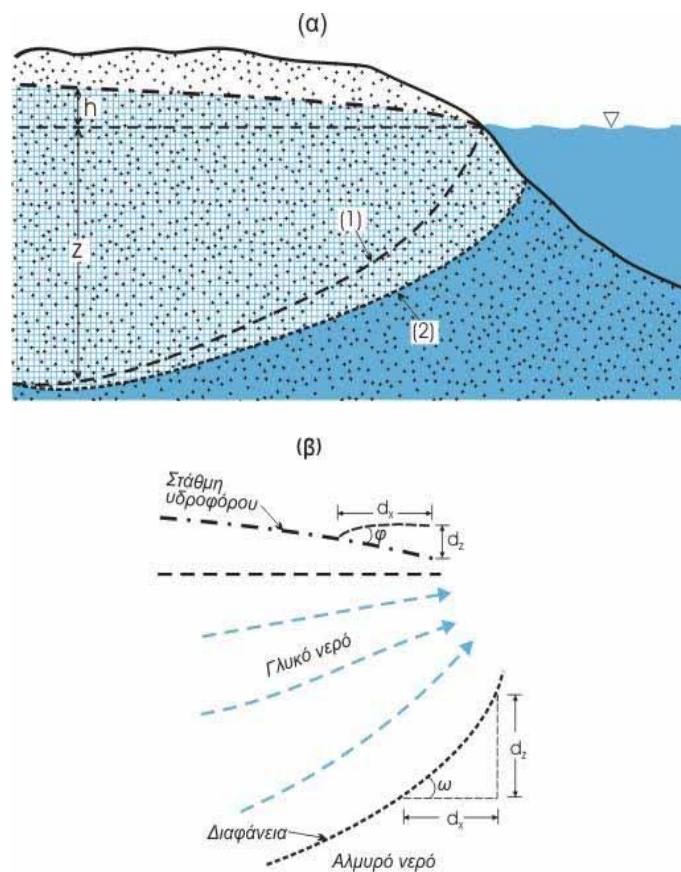
Όταν ένα υδροφόρο στρώμα βρίσκεται σε υδραυλική σύνδεση με θαλασσινό νερό τότε κάποια μέρη του υδροφόρου στρώματος μπορούν να περιέχουν αλμυρό νερό, ενώ άλλα να περιέχουν γλυκό, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1 : α) Διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού. β) Ζώνη ανάμιξης γλυκού – αλμυρού νερού, (Papadopoulou, Karatzas, Koukadaki, Trichakis, (2005))

Το γλυκό νερό όντας ελαφρύτερο του αλμυρού, εξαιτίας της μικρότερης πυκνότητάς του, έχει την τάση να επιπλέει πάνω από το αλμυρό όταν και τα δύο αυτά ρευστά είναι παρόντα σε ένα υδροφόρο στρώμα.

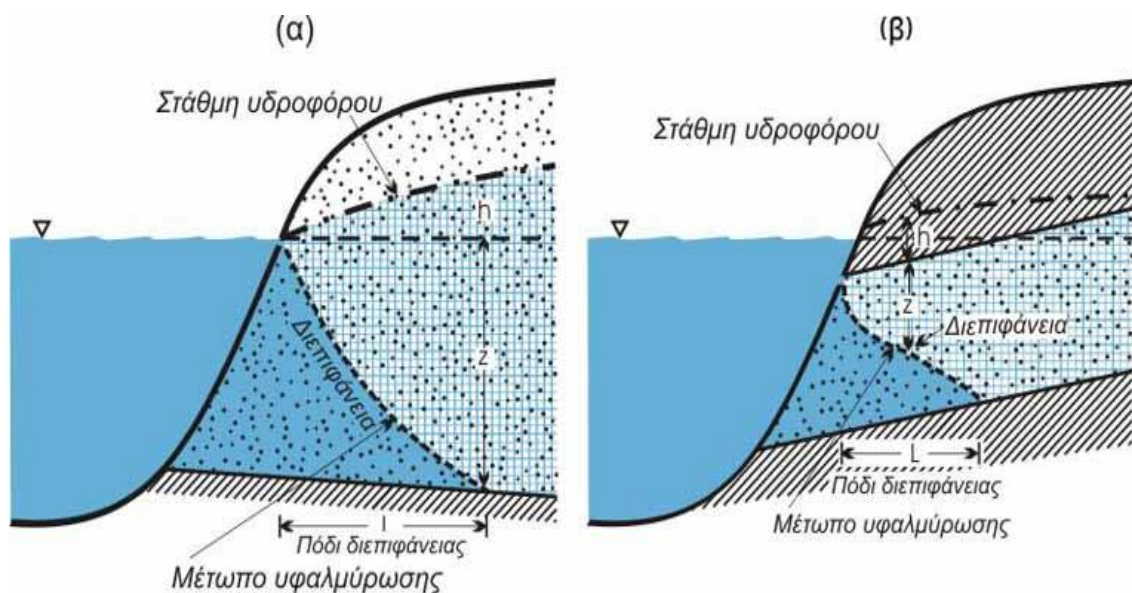
Επομένως, και επειδή στους παράκτιους υδροφορείς η υδραυλική κλίση του υπόγειου νερού έχει συνήθως κατεύθυνση προς τη θάλασσα, στο τμήμα του υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σχηματίζεται μία ζώνη επαφής μεταξύ του ελαφρύτερου γλυκού νερού του υδροφορέα και του υποκείμενου βαρύτερου αλμυρού νερού, μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους που είναι ευρέως γνωστή με τον όρο «διεπιφάνεια», (Εικόνα 2.2). Ο όγκος του αλμυρού νερού κάτω από το γλυκό λόγω της χαρακτηριστικής του μορφής ονομάζεται «σφήνα», (Εικόνα 2.3), (Καλλέργης, 1986). Το φαινόμενο αυτό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξαιτίας της μεγάλης του έντασης στους παράκτιους υδροφορείς προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ποιότητα του υπογείου νερού.



Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση ζώνης διεπιφάνειας (Νάνου – Γιάνναρου, 2001)

Η απομάκρυνση του υφάλμυρου νερού από τους υπόγειους υδροφορείς αποτελεί μια αρκετά δύσκολη διαδικασία, όπως επίσης και η ποσοτικοποίηση του προβλήματος λόγω της έλλειψης στοιχείων. Αυτό συμβαίνει, καθότι το φαινόμενο της υφαλμύρινσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την πρόληψη, δηλαδή με την λήψη

απαραίτητων μέτρων που αφορούν την ορθή διαχείριση των αποθεμάτων, πριν την εμφάνιση ή επιδείνωση του προβλήματος. Η λήψη όμως των απαιτούμενων μέτρων δεν πραγματοποιείται εγκαίρως, καθώς απαιτεί το συνδυασμό πολιτικών, οικονομικών, νομικών και κοινωνικών παραγόντων. Οπότε η μελέτη του φαινομένου γίνεται με χρήση μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης οι οποίες λειτουργούν βοηθητικά ως προς τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και μας παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των υδροφορέων υπό το πρίσμα διαφόρων υποθετικών σεναρίων, (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).



Εικόνα 2.3: Υφαλμύριση σε ελεύθερο (α) και περιορισμένο (β) υδροφορέα (Νάνου – Γιάνναρου, 2001)

2.2 ΑΙΤΙΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης συναντάται συνήθως σε παράκτιες περιοχές όπου η υπερεκμετάλλευση των υπογείων υδάτων προκάλεσε τη διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υπόγειους υδροφορείς.

Σε ρηχούς υδροφορείς στην ενδοχώρα, το φαινόμενο της υφαλμύρισης παρουσιάζεται κυρίως από εκκενώσεις αποβλήτων στην επιφάνεια, αλλά στην περίπτωση των παράκτιων υδροφορέων προκαλείται από την εισβολή του θαλάσσιου ύδατος.

Σε βαθείς υδροφορείς από την άλλη δύναται να προκληθεί από την άνοδο των αλμυρών υδάτων διαμέσου μιας γεωλογικής προέλευσης σε μεγαλύτερο βάθος. Για παράδειγμα, η εμφάνιση καρστικοποιημένων υδροφορέων σε αρκετές παράκτιες περιοχές της Ελλάδας, που συνδέεται με την ύπαρξη ανθρακικών πετρωμάτων σε αυτές, ευνοεί σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης. Το κυριότερο χαρακτηριστικό των ανωτέρω υδροφορέων είναι η στενή υδραυλική τους σχέση με το αλμυρό νερό και η άμεση επαφή του γλυκού με το υφάλμυρο νερό. Η εμφάνιση του συγκεκριμένου φαινομένου μπορεί να προκληθεί και από κανάλια που καταλήγουν στον πυθμένα της θάλασσας ακόμα και σε μεγάλη απόσταση από την ακτή.

Ωστόσο θα πρέπει να επισημάνουμε πως η επέμβαση του ανθρώπου, μέσω διαφόρων δραστηριοτήτων του, τον καθιστά υπεύθυνο για ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες έχουμε διείσδυση του υφάλμυρου ύδατος. Παρόλα αυτά το φαινόμενο αυτό έχει ορισμένες φορές θετική επίδραση. Αυτό δύναται να συμβεί σε άνυδρες περιοχές για τις οποίες μπορεί να αποτελέσει έναν χρήσιμο πόρο, καθότι τέτοιας μορφής νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές διαδικασίες όπως η ψύξη και η αφαλάτωση, (Καλλιάνης Γ. - Χατζηθεοχάρους Κ., 2004).

Γενικά, το υφάλμυρο νερό που παρατηρείται σε υδροφορείς μπορεί να προέρχεται από τις ακόλουθες πηγές, (Μαριολάκος, 1998):

- 1) Θαλάσσιο νερό σε παράκτιους υδροφορείς.
- 2) Θαλάσσιο νερό που διείσδυσε στους υδροφορείς κατά τους παρελθόντες γεωλογικούς χρόνους.
- 3) Αλάτι από δόμους αλατιού ή λεπτές στρώσεις αλατιού ή από διασπορά σε γεωλογικούς σχηματισμούς.
- 4) Υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες, κοιλάδες, κ.τ.λ.
- 5) Νερό επαναφοράς από αρδευόμενη γη σε χείμαρρους.
- 6) Νερό υφάλμυρο που προέρχεται από απόβλητα βιομηχανιών και ορυχείων ή που έχει χρησιμοποιηθεί για έκπλυση δρόμου.
- 7) Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης όπως για παράδειγμα το αλάτι που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου.
- 8) Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ή καθοδικές κινήσεις της ξηράς.

Η υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων σε περιοχές που συνορεύουν με τη θάλασσα οφείλεται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς παράγοντες, (Μαριολάκος, 1998).

- Οι πρωτογενείς παράγοντες σχετίζονται με τη μεταβολή του φυσικού εμπλουτισμού του υδροφορέα και συνήθως συνδέονται με την ελάττωση των ποσοτήτων υδάτων που φτάνουν στους υδροφορείς. Αυτές οι περιπτώσεις αφορούν κυρίως καρστικούς υδροφορείς και πρόκειται για περιοδική αλμυρότητα λόγω βροχοπτώσεων.
- Οι δευτερογενείς παράγοντες σχετίζονται με την υπερβολική άντληση. Το φαινόμενο αυτό είναι σύνηθες στην Ελλάδα, συγκεκριμένα παρατηρείται στις εντατικά καλλιεργούμενες παράκτιες πεδινές εκτάσεις, και λαμβάνει χώρα τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς.

Στην περίπτωση της υπερβολικής άντλησης παρατηρείται και ένα φαινόμενο που οφείλεται στο μηχανισμό της εξατμισοδιαπνοής. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου η υγρασία της ανώτερης εδαφικής ζώνης, η οποία αποτελείται από λεπτόκοκκο υλικό, παρασύρει το αλάτι που δεν αποπλένεται επαρκώς κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, (Καλλιάνης Γ. - Χατζηθεοχάρους Κ., 2004). Με την πάροδο των χρόνων το άλας συσσωρεύεται με διάφορους ρυθμούς που εξαρτώνται από το έδαφος και το κλίμα, προκαλώντας κατ' αυτόν τον τρόπο υποβάθμιση του εδάφους. Η συσσώρευση άλατος στα υψηλότερα τμήματα του εδάφους μπορεί να παρατηρηθεί σε ξηρές, αλλά και ημίξηρες περιοχές. Όμως, το φαινόμενο αυτό δύναται στο μέλλον να επεκταθεί και σε άλλες παράκτιες περιοχές στην περίπτωση που το πρόβλημα της διείσδυσης υφάλμυρου νερού επιδεινωθεί και δεν αντιμετωπιστεί κατάλληλα, γεγονός που συμβαίνει λόγω του ότι η κατείσδυση την περίοδο των βροχοπτώσεων δεν είναι ικανή να διαλύσει και να παρασύρει την απαιτούμενη ποσότητα άλατος κάτω από την ζώνη των τριχοειδών φαινομένων.

2.3 Η ΕΠΙΚΡΑΤΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Λόγω της πλειάδας ακτών, η Ελλάδα παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία στη θαλάσσια διείσδυση η οποία προκύπτει από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Υπεράντληση
- Από διαταραχές στην ισορροπία του συστήματος γλυκού-θαλασσινού νερού, εξαιτίας διαφόρων ανθρωπογενών παρεμβάσεων σε λεκάνες κοκκωδών ή καρστικών παράκτιων σχηματισμών.
- Από ιδιαιτερότητες της γεωλογικής δομής (καρστική διεργασία – επίπεδο βάσης του κάρστ)

Οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες δύναται να υφαλμυριστούν αν ληφθούν υπ' όψιν τα ακόλουθα σενάρια, (Καλλέργης, 1986):

- Καρστικοί αγωγοί να βρίσκονται σε όλο τους το μήκος σε υδραυλική επαφή με τη θάλασσα.
- Το στεγανό διάφραγμα ανάμεσα στο καρστικό σύστημα και τη θάλασσα να διαταραχθεί κατά θέσεις λόγω διάβρωσης ή τεκτονισμού.
- Το στεγανό διάφραγμα να είναι πολύ ρηχό με συνέπεια η κυκλοφορία να γίνεται κάτω από αυτό.

Οι ανωτέρω μηχανισμοί μπορεί να οδηγήσουν και σε αυτογενή υφαλμύριση χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη ανθρώπινης δραστηριότητας.

2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Είναι γνωστό, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας της γης καλύπτεται από νερό. Παρόλα αυτά όμως, για να μπορέσει να διατηρηθεί η οποιαδήποτε μορφή ζωής επάνω στον πλανήτη αναγκαία συνθήκη αποτελεί η ύπαρξη γλυκού νερού, τα αποθέματα του οποίου, δυστυχώς, λαμβάνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό στο γενικότερο υδατικό σύνολο.

Το θαλασσινό νερό θεωρείται πηγή ρύπανσης για το γλυκό νερό και αυτό συμβαίνει όταν τα δύο αυτά ρευστά έρχονται σε επαφή, καθώς η ανάμειξη τους καθιστά το υφάλμυρο νερό ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο η υφαλμύριση ενός υδροφορέα γλυκού νερού σημαίνει ταυτόχρονα την απώλεια του υδροφορέα αυτού ως πηγή νερού, (Τριχάκης Ι., 2004).

Η άντληση του υπόγειου νερού σε παραθαλάσσιες περιοχές μετακινεί τη διεπιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ του υπόγειου γλυκού νερού και του νερού της θάλασσας. Το υπόγειο μέτωπο του θαλασσινού νερού μετακινείται προς την ξηρά και ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό ή ακόμα και θαλασσινό νερό. Οπότε η υφαλμύριση έχει αρνητικές επιπτώσεις στις περιοχές που εμφανίζεται, εξαιτίας της προβλήματος της ρύπανσης, η οποία καθιστά τα νερά ακατάλληλα για κάθε χρήση από τον άνθρωπο με συνέπειες τόσο στον κοινωνικό τομέα όσο και στον οικονομικό.

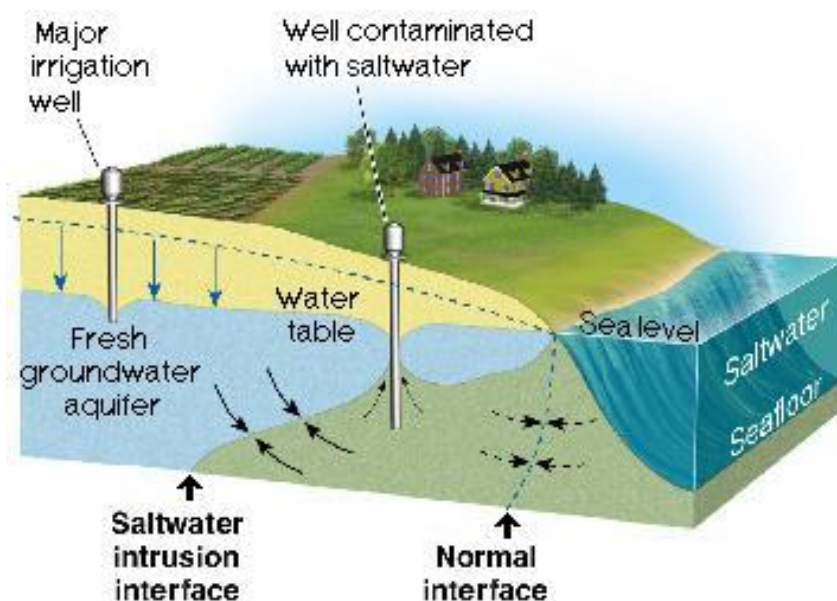
Συνεπώς η έλλειψη γλυκού νερού οδηγεί μαθηματικά στην αύξηση του κόστους ζωής εξαιτίας των δαπανηρών λύσεων που απαιτούνται (αγορά εμποιασμένου νερού, μεταφορά γλυκού νερού από άλλη περιοχή, έργα υδροδότησης, κ.ά.) ή στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Επομένως ο τουρισμός, η γεωργία και η βιομηχανία είναι τρεις τομείς που πλήττονται άμεσα, αφενός γιατί η αλατότητα είναι άκρως επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων και επειδή καταστρέφει τις καλλιέργειες αχρηστεύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα χωράφια και αφετέρου γιατί διαβρώνει τους σωλήνες και τους λέβητες σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής τους, τη μείωση της παροχετευτικής ικανότητας των αγωγών, την αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, καθώς επίσης και την αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας του νερού, (Τριχάκης Ι., 2004). Δηλαδή, οι καλλιεργητές αναγκάζονται να αντισταθμίσουν ποσοτικά την ποιοτική υποβάθμιση του νερού χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό ή να χρησιμοποιήσουν δραστικότερα λιπάσματα, εξαιτίας της μείωσης της παραγωγικότητας των εδαφών. Αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των κερδών.

Οπότε τα ανωτέρω παραδείγματα συντελούν στη σημαντική συρρίκνωση του ποσοστού της καλλιεργούμενης γης, τα οποία σε συνδυασμό με την αναγκαστική

στροφή των κατοίκων στην τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους, όσον αφορά την εργασιακή τους απασχόληση, οδηγούν στην επικράτηση της εποχικής απασχόλησης.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί, ότι η υφαλμύριση δύναται να προκαλέσει την εξάντληση ενός υδροφορέα από έναν κάτοχο γεώτρησης, (Εικόνα 2.4). Συνεπώς, οι αβαθέστερες γειτονικές γεωτρήσεις είναι πολύ πιθανό να οδηγηθούν σε αστοχία με αποτέλεσμα τη δημιουργία ουσιαστικών και νομικών ζητημάτων εκτός από τη μείωση της εκροής του υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα προκαλώντας την ίδια στιγμή δυσμενείς συνέπειες στα παραθαλάσσια οικοσυστήματα.

Άρα, όταν σ' έναν υδροφορέα εισχωρήσει υφάλμυρο νερό μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσκολεύοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία αναστροφής και αντιμετώπισης του υδροφορέα. Η αργή αυτή κίνηση του υπόγειου νερού αυξάνει επίσης το χρόνο αποκατάστασης του υδροφορέα. Επομένως, ακόμα και αν υποθέσουμε ότι σταματάνε όλες οι γεωτρήσεις άντλησης σε μία περιοχή, η πιθανότητα να οπισθοχωρήσει η σφήνα της υφαλμύρισης είναι σχεδόν ανύπαρκτη.



Εικόνα 2.4: Επιπτώσεις ανεξέλεγκτης άντλησης, (<http://holytrinity.faithweb.com/p-on-Ecology/w03-water-B.htm>)

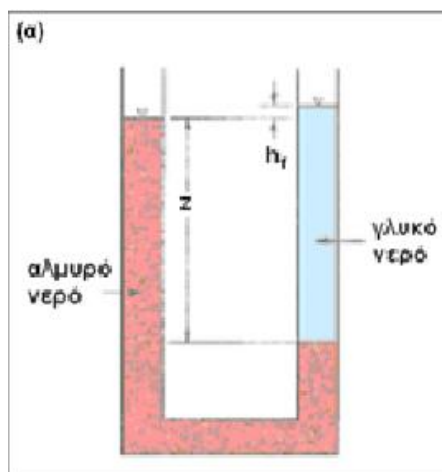
2.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

2.5.1 Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΑΝΑΜΙΞΙΜΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Στην προσέγγιση αυτή θεωρείται ότι τα δύο ρευστά είναι μη αναμίξιμα και εξαιτίας των διαφορετικών πυκνοτήτων τους, σχηματίζεται ανάμεσα τους μία διαχωριστική διεπιφάνεια της οποίας το σχήμα καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο, σε κάθε σημείο επαφής των δύο ρευστών. Το υφάλμυρο νερό τείνει να κινηθεί κάτω από το γλυκό νερό, το οποίο έχει μικρότερη πυκνότητα. Με την παραπάνω παραδοχή επιτυγχάνουμε απλοποίηση του προβλήματος με συνέπεια η μαθηματική του διατύπωση να γίνεται ευκολότερη, (Bobba A.G, 1993)

Ο νόμος Ghyben – Herzberg

Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό αποτελεί μία ζώνη και όχι μία απλή επιφάνεια. Την επαφή αυτή μελέτησαν πρώτοι ο Ολλανδός Ghyben και ο Γερμανός Herzberg στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η αρχή που αναπτύχθηκε από τους ανωτέρω επιστήμονες είναι το πρώτο βήμα στη μελέτη του φαινομένου της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους υδροφορείς, με σκοπό τον προσδιορισμό του βάθους της διεπιφάνειας μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού. Η αρχή αυτή βασίζεται στην ισότητα των πιέσεων των δύο στηλών ενός σωλήνα σχήματος U, ο οποίος έχει πληρωθεί με δύο ρευστά διαφορετικής πυκνότητας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: Η αρχή των Ghyben-Herzberg: Σχηματική απεικόνιση ενός σωλήνα U πληρωμένου με δύο ρευστά διαφορετικής πυκνότητας (Reilly και Goodman, 1985)

Γενικά, γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- Ο υδροφορέας θεωρείται ισότροπος και ομογενής, ασυμπίεστος και περιορισμένος στη ζώνη του γλυκού νερού.
- Η ροή θεωρείται δισδιάστατη.
- Οι συνθήκες είναι μόνιμης ροής.
- Ισχύει η θεώρηση του Dupuit για μη κάθετη υδραυλική κλίση στο γλυκό νερό.
- Το σύστημα του αλμυρού νερού είναι σε υδροστατική ισορροπία.

Η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού, σε έναν μη περιορισμένο υδροφορέα σε υδροστατική ισορροπία, έχει άμεση σχέση με το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα σε αυτόν. Επομένως παρατηρείται ότι η εξίσωση των Ghyben και Herzberg βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία ανάμεσα σε μη αναμειγνύόμενα υγρά, διαφορετικής πυκνότητας (τα οποία σχηματίζουν περισσότερες από μία φάσεις όταν βρεθούν σε επαφή) και συσχετίζει το δυναμικό του γλυκού νερού (h), πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας, με το βάθος της διεπιφάνειας (ξ).

Έτσι διατυπώνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\xi = \alpha h_f \quad (2.1)$$

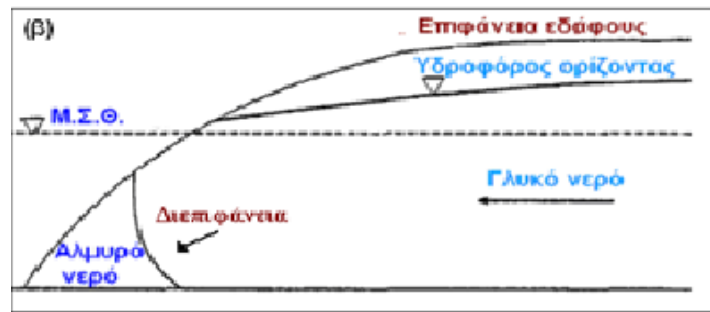
όπου:

$$\alpha = \frac{\gamma_f}{(\gamma_s - \gamma_f)} \quad (2.2), \text{ είναι συνάρτηση της διαφοράς του ειδικού βάρους μεταξύ}$$

γλυκού νερού (γ_f) και αλμυρού νερού (γ_s).

Οι συνηθέστερες τιμές για τις πυκνότητες των δύο μέσων είναι **1,025 gr/cm³** για το θαλασσινό νερό και **1,000 gr/cm³** για το γλυκό νερό, (Καλλέργης, 1986).

Η φυσική σημασία της εξίσωσης των Ghyben και Herzberg είναι πως το γλυκό νερό επιπλέει πάνω στο θαλασσινό νερό με συγκεκριμένο βάθος. Εφόσον είναι γνωστό το ύψος h της στάθμης του υδροφόρου στρώματος μπορεί εύκολα να υπολογισθεί το βάθος ξ του γλυκού νερού στο σημείο αυτό, καθώς θα είναι 25 με 40 φορές μεγαλύτερο από το h , (Λατινόπουλος, 2007) (Σούλιος, 2004)



Εικόνα 2.6: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg για τη διατομή ενός υδροφορέα (L.Tulipano, M.D.Fidelibus, A.Panagopoulos 2005)

Η εξίσωση των Ghyben και Herzberg μπορεί εναλλακτικά να γραφεί και ως εξής, (Tulipano, Fidelibus, A.Panagopoulos 2005):

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (2.3)$$

Όπου:

ξ : το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας (m)

h_f : υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (m)

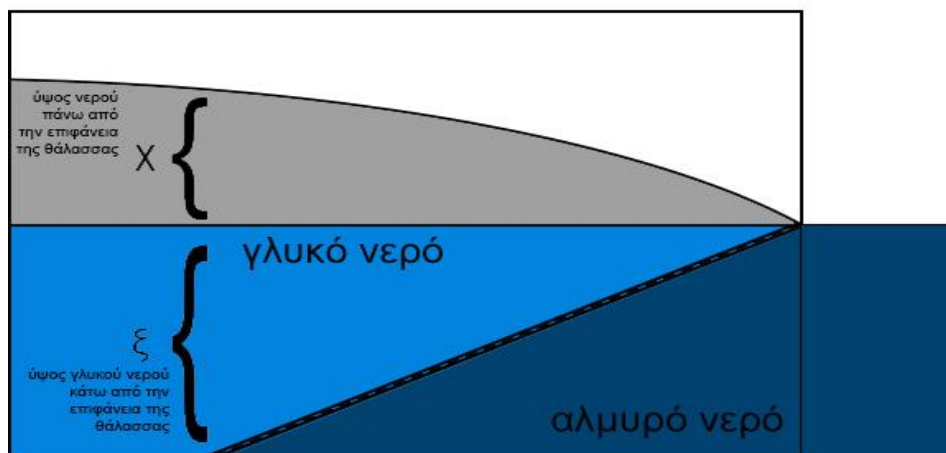
ρ_f : πυκνότητα γλυκού νερού (gr/cm^3)

ρ_s : πυκνότητα αλμυρού νερού (gr/cm^3)

Για πυκνότητα γλυκού νερού $\rho_f = 1 \text{ gr}/\text{cm}^3$ και πυκνότητα αλμυρού νερού $\rho_s = 1,025 \text{ gr}/\text{cm}^3$ προκύπτει ο ακόλουθος τύπος:

$$\xi = 40 h_f \quad (2.4),$$

ο οποίος μας δείχνει ότι η ανύψωση της υδραυλικής στάθμης του υδροφορέα κατά ένα μέτρο ισοδυναμεί με τη μετακίνηση της διεπιφάνειας στο σημείο αυτό βαθύτερα και συγκεκριμένα κατά 40 μέτρα. (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

2.5.2 Απόκλιση προσέγγισης

Η παραπάνω προσέγγιση των Ghyben – Herzberg μας δίνει τη δυνατότητα να εξάγουμε γρήγορα και αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα, όμως δεν αποτελεί παρά μία απλουστευμένη θεώρηση. Μια ακριβέστερη προσέγγιση θα απαιτούσε να ληφθεί υπ' όψιν η δυναμική κίνηση της υπόγειας ροής όπως επίσης και η μεταφορά μάζας του άλατος. Επίσης η θεώρηση αυτή παραβλέπει τη συνεισφορά της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, όσον αφορά την επιφάνεια διαστάλλαξης του γλυκού νερού προς τη μεριά της θάλασσας, (Βουδούρης, 2003).

Συνεπώς, η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας διαφέρει σημαντικά από την προσέγγιση Ghyben – Herzberg. Αυτό συμβαίνει, επειδή οι παραδοχές που γίνονται, δηλαδή ότι η υφάλμυρη σφήνα είναι ακίνητη και η ροή είναι οριζόντια, δεν ισχύουν καθώς η διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού κινείται προς την ξηρά. Ακόμα, η προσέγγιση των Ghyben – Herzberg δεν υπολογίζει την επιφάνεια διαμέσου της οποίας πραγματοποιείται η εκροή του γλυκού νερού προς τη θάλασσα και στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων δεν μπορεί να υπολογίσει την επιφάνεια διήθησης.

Στην διαδικασία προσέγγισης του φαινομένου δύναται ακόμα να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αριθμητικές λύσεις για τα φαινόμενα μεταφοράς και διασποράς,

(Λατινόπουλος, 2007). Τέλος δεν αποκλείονται και περιπτώσεις στις οποίες πράγματι η μεταβατική ζώνη είναι πολύ στενή και επομένως θα ήταν δυνατή η χρήση του πιο απλουστευμένου μοντέλου της απότομης διεπιφάνειας.

Στην περίπτωση που λάβουμε υπ' όψιν μόνο την πυκνότητα, χωρίς την ύπαρξη ροής, θα είχαμε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας οριζόντιας διεπιφάνειας με το γλυκό νερό να βρίσκεται πάνω από το υφάλμυρο. Στην περίπτωση ωστόσο που η ροή είναι σχεδόν οριζόντια, η σχέση Ghyben – Herzberg παρέχει αποδεκτά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά σημαντικά λάθη μπορεί να προκύψουν κοντά σε ακτογραμμές όπου παρεμβαίνουν οι συνισταμένες της κάθετης ροής.

Αν η ροή στο στρώμα του γλυκού νερού έχει μία προς τα κάτω συνιστώσα, όπως στην περίπτωση τροφοδοσίας (recharge), το βάθος της διεπιφάνειας είναι μικρότερο από εκείνο της σχέσης Ghyben – Herzberg. Αντιθέτως το βάθος της διεπιφάνειας είναι μεγαλύτερο από εκείνο της σχέσης Ghyben – Herzberg όταν η ροή στο στρώμα του γλυκού νερού έχει μία προς τα πάνω συνιστώσα. Αυτό συμβαίνει συνήθως σε παράκτιες περιπτώσεις αποφόρτισης νερού στη θάλασσα.

Το παραπάνω επιχείρημα περιγράφει ουσιαστικά έναν απεριοριστο, παράκτιο υδροφορέα, αλλά δύναται να επεκταθεί και στην περίπτωση ενός περιορισμένου υδροφορέα σε παρόμοια τοποθεσία με την αντικατάσταση της πιεζομετρικής επιφάνειας με τον υδροφόρο ορίζοντα. Επομένως η προσέγγιση Ghyben – Herzberg για να ικανοποιεί τις ανάγκες ισορροπίας γλυκού-αλμυρού νερού, απαιτεί και στις δύο περιπτώσεις, την κατάλληλη επιφάνεια (είτε είναι ο υδροφόρος ορίζοντας είτε η πιεζομετρική επιφάνεια) ώστε να είναι πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και να κλίνουν προς τον ωκεανό.

2.5.3 Υδροδυναμική προσέγγιση – Συνθήκη μόνιμης ροής – Μαθηματικό υπόβαθρο

Μία από τις υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν από τους Ghyben και Herzberg ήταν εκείνη της υδροστατικής ισορροπίας. Στην υδροδυναμική προσέγγιση λαμβάνονται υπ' όψιν, τόσο η κίνηση όσο και η εκροή του γλυκού νερού στη θάλασσα.

Ο Μ.Κ. Hubbert (1940) πραγματεύθηκε την θεωρία της κίνησης του υπογείου ύδατος και αποτέλεσε τη βάση από την οποία οι Ν.Ι. Luszynski και W.V. Swarzenski παρήγαγαν την προσέγγιση Ghyben – Herzberg για να καλύψουν περιπτώσεις όπου το υποκείμενο αλμυρό νερό βρίσκεται σε κίνηση με ύψη είτε πάνω είτε κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της ακόλουθης σχέσης για συνθήκες μη ισορροπίας, (Muallem και Bear 1974).

$$\xi = \frac{\rho_f h_f - \rho_s h_s}{\rho_s - \rho_f} \quad (2.5)$$

όπου το h_f είναι το υψόμετρο του επιπέδου του νερού σε ένα πηγάδι πλήρες με γλυκό νερό πυκνότητας ρ_f το οποίο καταλήγει σε ένα βάθος ξ και h_s είναι το υψόμετρο του επιπέδου του νερού σε ένα πηγάδι πλήρες με αλμυρό νερό πυκνότητας ρ_s το οποίο καταλήγει στο ίδιο βάθος ξ .

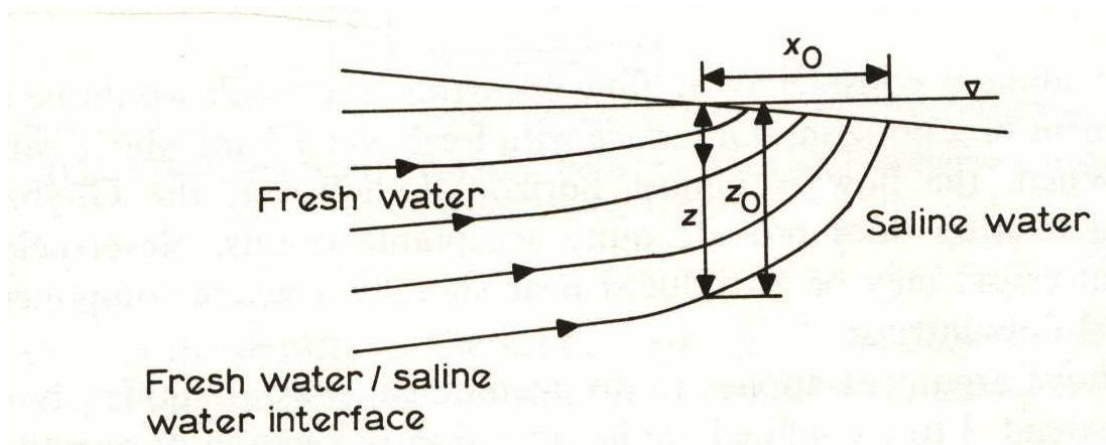
Όταν το $h_s = 0$, τότε το αλμυρό νερό βρίσκεται σε ισορροπία με τη θάλασσα και ισχύει:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (2.6)$$

Περισσότερο ακριβείς επιλύσεις για το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού έχουν προταθεί και μία από αυτές αποτελεί και η εξίσωση που ακολουθεί:

$$\xi^2 = \frac{2qx}{\Delta p K} + \left(\frac{q}{\Delta p K} \right)^2 \quad (2.7)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση το ξ και το x απεικονίζονται σχηματικά στην εικόνα 2.8, όπου το Δp προκύπτει ως αποτέλεσμα της διαφοράς ($\rho_s - \rho_f$), το K συμβολίζει την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και το q είναι η ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους της ακτογραμμής.



Εικόνα 2.8: Το σχέδιο ροής που αναπτύσσεται από γλυκό νερό σε έναν απεριόριστο παράκτιο υδροφόρο (Νάνου – Γιάνναρου Α. 2001)

Το αντίστοιχο σχήμα του υδροφόρου ορίζοντα είναι:

$$h_f = \left(\frac{2\Delta p q x}{K} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Το πλάτος x_0 της υποθαλάσσιας ζώνης μέσω της οποίας το γλυκό νερό απορρέει στη θάλασσα μπορεί να εξαχθεί για $\xi=0$ δίνοντας:

$$x_0 = - \frac{q}{\Delta p K} \quad (2.9)$$

Το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από την ακτογραμμή ξ_0 προκύπτει όταν $x=0$ και κατά συνέπεια έχουμε:

$$\xi_0 = \frac{q}{\Delta p K} \quad (2.10)$$

Για την αποδοτικότερη και ακριβέστερη απεικόνιση του μετώπου της υφαλμύρινης στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Visual Modflow σε συνδυασμό με το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας Seawat των οποίων τα αποτελέσματα θα βαθμονομηθούν με βάση την προσέγγιση των Ghyben-Herzberg.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΟΝΑΔΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της πιλοτικής μονάδας που στήθηκε στο εργαστήριο του τομέα Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης με αφορμή την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς επίσης και την μετέπειτα χρήση της σε περαιτέρω ερευνητικές εργασίες και ως εργαλείο του εργαστηρίου για την αναπαράσταση του φαινομένου της υφαλμύρινσης υπό το πρίσμα διαφόρων σεναρίων. Τέλος θα παρουσιαστούν γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που εξήχθησαν κατά την διάρκεια λειτουργίας της μονάδας.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση πιλοτικής εργαστηριακής μονάδας

Η εργαστηριακή μονάδα, Εικόνα 3.1, αποτελείται από:

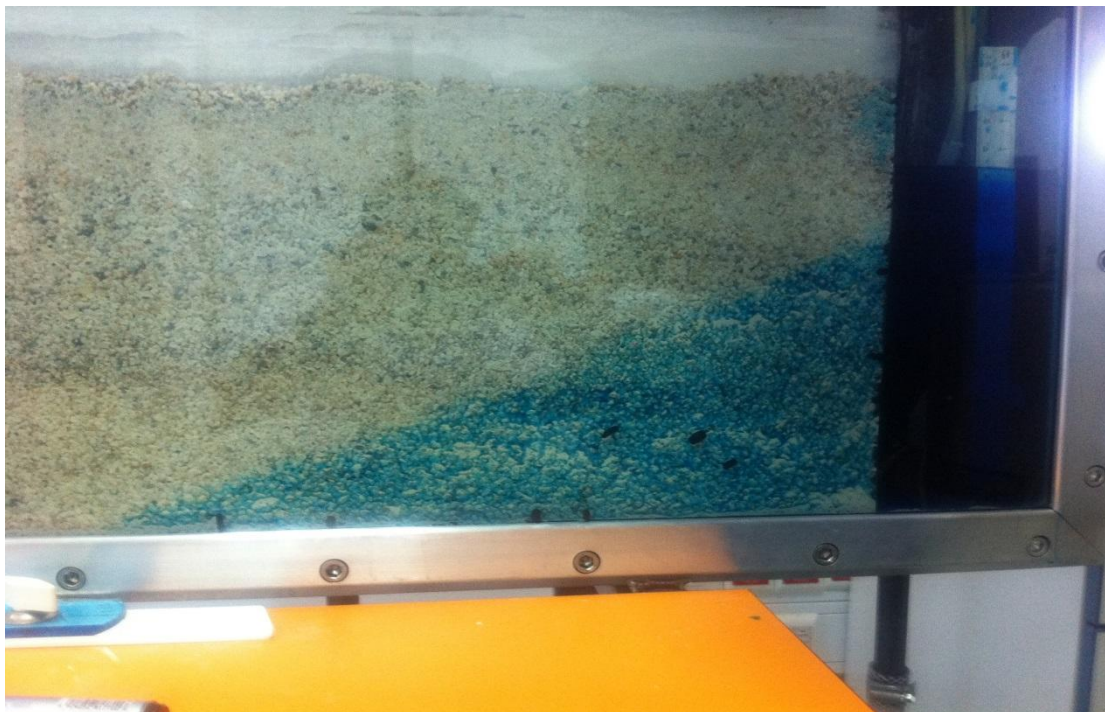
- Μία δεξαμενή διήθησης και αποστράγγισης μήκους 130 cm, πλάτους 10.5cm και ύψους 66cm
- Άμμο και χαλίκι ευρείας κοκκομετρίας
- Δύο ηλεκτρομηχανικές αντλίες
- Αλατισμένο νερό
- Δείκτη χρώματος μπλε.

Αρχικά, πριν τεθεί σε λειτουργία ολόκληρη η μονάδα, έπρεπε να γεμίσει η δεξαμενή με το υλικό που θα αποτελούσε τη βάση για την προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρισης. Έπρεπε, δηλαδή, να δημιουργηθεί ο ελεύθερος υδροφορέας με συγκεκριμένα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Αυτό επετεύχθη με τη χρήση άμμου και χαλικιού (sand and gravel), τα οποία και κοσκινίστηκαν με τη βοήθεια ενός συρμάτινου πλέγματος, ώστε να απομακρυνθούν οι χονδρόκοκκοι σχηματισμοί. Αυτό είχε ως συνέπεια την δημιουργία μίγματος άμμου και χαλικιού ευρείας κοκκομετρίας, καθώς εισχώρησε και ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκης άμμου (πούδρα).

Στη συνέχεια και αφού ξεπλύθηκε καλά το μίγμα άμμου και χαλικιού, ώστε να είναι όσο πιο ομοιογενές γινόταν, τοποθετήθηκε στη δεξαμενή, σχηματίζοντας έτσι τον απαιτούμενο υπόγειο υδροφορέα με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά. Το επόμενο βήμα αφορούσε τη σύνδεση δύο ηλεκτρομηχανικών αντλιών με την κεντρική δεξαμενή, με σκοπό τη δημιουργία σταθερής υδραυλικής κλίσης. Ακολούθως το υφάλμυρο νερό τοποθετήθηκε μέσα σ' ένα δοχείου όγκου $V=5\text{ L}$, το οποίο περιείχε 80 ml αλατιού ανά 1 L γλυκού νερού, καθώς επίσης και δείκτη χρώματος μπλε, του οποίου η χρησιμότητα αφορούσε την παρατήρηση της υφάλμυρης διείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα.

Εφόσον πραγματοποιήθηκαν τα παραπάνω βήματα ετέθη η μονάδα σε λειτουργία με σκοπό να δημιουργηθεί σταθερή υδραυλική κλίση, ώστε να καταγραφούν οι τιμές των δύο υδραυλικών υψών, και κατ' επέκταση η κλίση τους, αλλά και η τιμή της παροχής του συστήματος. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε μία πλάκα στο δεξί τμήμα της δεξαμενής, η χρήση της οποίας ήταν να συγκρατήσει το υφάλμυρο νερό μέχρι να ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία και να καταγραφεί σε βήματα των πέντε (5) λεπτών η μετακίνηση του μετώπου της υφαλμύρισης.

Τέλος τοποθετήθηκε γυρισμένο ανάποδα το δοχείο με το αλμυρό νερό στο άνω δεξί τμήμα της δεξαμενής και αφού αφέθηκε για λίγα λεπτά να αδειάσει αρκετή ποσότητα, η πλάκα που το συγκρατούσε τραβήχτηκε και ξεκίνησε η καταγραφή των απαραίτητων μετρήσεων, (Εικόνα 3.2). Η συγκεκριμένη διαδικασία επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.2: Χαρακτηριστικό παράδειγμα «τρεξίματος» κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Μετά από το στήσιμο της εργαστηριακής μονάδας διαμέσου της οποίας πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρινσης ακολούθησε η διαδικασία καταγραφής των μετρήσεων αφότου ρυθμίστηκαν και υπολογίστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι βασιζόμενοι στο ακόλουθο υδραυλικό ισοζύγιο:

Υδρολογικό Ισοζύγιο: Υποκάτω της επιφάνειας, (Καρατζάς, 2011).

$$I + \Delta G - E_{gr} - T_{gr} = \frac{dM}{dt} = \Delta S_{gr} \quad (3.1)$$

Όπου,

I: ρυθμός διήθησης

$$\Delta G = G_{in} - G_{out} = Q_{in} - Q_{out}$$

E_{gr} : ρυθμός εξάτμισης

T_{gr} : ρυθμός αναπνοής

ΔS_{gr} : ρυθμός αποθήκευσης

Στην παρούσα εργασία όπου δεν υπάρχει παρουσία εξατμισοδιαπνοής, διήθησης και αποθήκευσης το αρχικό ισοζύγιο καταλήγει στην ακόλουθη μορφή:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (3.2)$$

Επομένως ότι ποσότητα εισέρχεται εντός του συστήματος, η ίδια ακριβώς εξέρχεται με αποτέλεσμα τη δημιουργία σταθερής υδραυλικής κλίσης.

Παροχή Q: Η παροχή στην εργαστηριακή μας μονάδα μετρήθηκε με χρήση δοκιμαστικών σωλήνων στην έξοδο αρκετές φορές για να πετύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και υπολογίστηκε **$Q=100 \text{ ml}/322 \text{ sec}$** .

Υδραυλικά ύψη και υδραυλική κλίση: Αφού τέθηκε σε λειτουργία η μονάδα με τη βοήθεια των δύο ηλεκτρομηχανικών αντλιών επετεύχθη σταθερή υδραυλική κλίση, ώστε να μπορέσει να «τρέξει» η πειραματική διαδικασία. Κατ' αυτόν τον τρόπο μετρήθηκαν τα δύο υδραυλικά ύψη h_1 και h_2 τα οποία υπολογίστηκαν **$h_1=18.8 \text{ cm}$ (0.188 m) και $h_2=18 \text{ cm}$ (0.18m)**. Επομένως υπολογίστηκε και η υδραυλική κλίση **$\Delta h/\Delta L=0.006$** .

Υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) (K): Έχοντας υπολογισμένη την παροχή και τα υδραυλικά ύψη και γνωρίζοντας το μήκος του υδροφορέα έγινε χρήση της μαθηματικής εξίσωσης του Dupuit για ελεύθερο υδροφορέα, ώστε να

υπολογιστεί η υδραυλική αγωγιμότητα. Η εξίσωση είναι της μορφής, (Καρατζάς, 2011):

$$q'_x = \frac{1}{2} K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right) \quad (3.3)$$

Όπου:

q'_x : η ροή ανά μονάδα πλάτους σε απόσταση x (L^2/T)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

h_1, h_2 : τα υδραυλικά ύψη (L/T)

L : το μήκος του υδροφορέα

Λύνοντας ως προς την υδραυλική αγωγιμότητα (K) η εξίσωση 3.1 γίνεται:

$$K = \frac{2q'_x L}{h_1^2 - h_2^2} \quad (3.4)$$

Και επειδή:

$$q'_x = \frac{Q}{w} \quad (3.5)$$

Η αρχική εξίσωση παίρνει την τελική μορφή:

$$K = \frac{Q * 2 * L}{w * (h_1^2 - h_2^2)} \quad (3.6)$$

Επομένως, με τις κατάλληλες μετατροπές μονάδων και την αριθμητική αντικατάσταση από την εξίσωση 3.4 έχουμε:

$$K = \frac{3.105 * 10^{-7} m^3/sec * 2 * 1.2m}{0.105m * (0.188^2 - 0.18^2)m^2} = 2.41 * 10^{-3} m/sec$$

Συνεπώς, σύμφωνα και με βιβλιογραφικές πηγές, παρατηρείται ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για άμμο και χαλίκι ευρείας κοκκομετρίας, γεωλογικό χαρακτηριστικό του υδροφορέα στην πιλοτική εργαστηριακή μονάδα, κυμαίνονται μεταξύ των 10^{-4} m/sec και 10^{-2} m/sec. Έχουμε δηλαδή $10^{-4} \leq K \leq 10^{-2}$. Επομένως

η υπολογισθείσα τιμή για την υδραυλική αγωγιμότητα του συστήματος, βρίσκεται εντός των απαιτούμενων ορίων.

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

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad (3.7)$$

Όπου,

V_v: όγκος των κενών

V_o: συνολικός όγκος του δείγματος

Στο σύστημα, λόγω της ευρείας κοκκομετρίας που 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 (ρ_s και ρ_f): Η πυκνότητα του αλμυρού νερού ρ_s 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 $\rho_f = 1,000 \text{ gr/L}$.

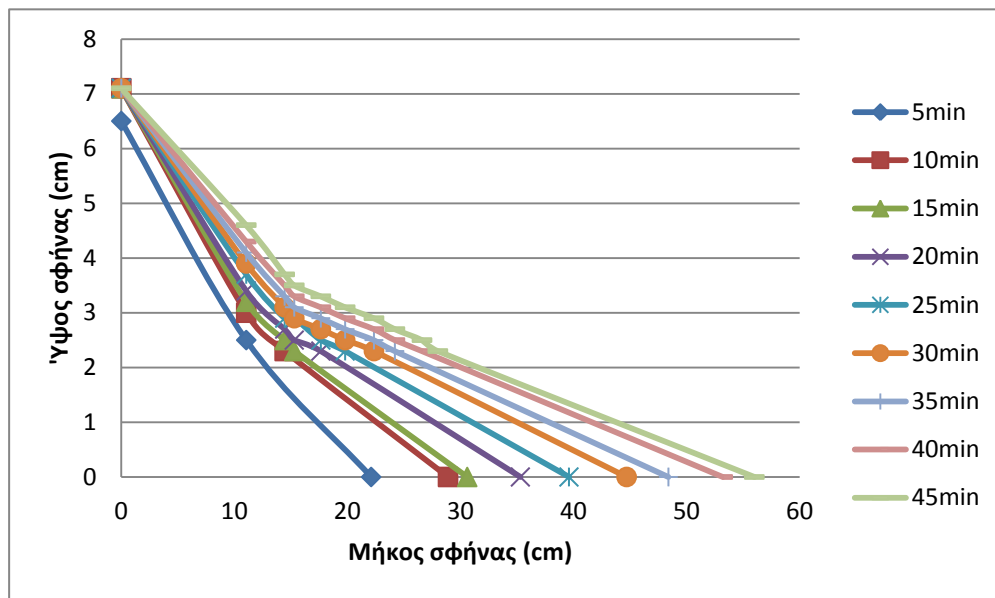
3.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ-ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Αφού ολοκληρώθηκαν οι υπολογισμοί των χρήσιμων, για την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου, παραμέτρων ελευθερώθηκε το αλμυρό νερό το οποίο και συγκρατούνταν με μία πλάκα υπό τη μορφή φράγματος, ξεκινώντας έτσι την πειραματική διαδικασία και καταγράφοντας τις μετρήσεις ανά πέντε (5) λεπτά (min) και σημειώνοντας στην δεξαμενή το αντίστοιχο ύψος και μέσο ύψος της υφάλμυρης διείσδυσης, αλλά και την κατά μήκος μετατόπιση της σφήνας της υφαλμύρισης. Παρακάτω παρατίθενται γραφικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η μεταβολή της καμπύλης της

υφαλμύρινης. Οι πίνακες των αποτελεσμάτων βάση των οποίων παρουσιάζονται οι κάτωθι γραφικές παραστάσεις βρίσκονται στο παράρτημα.

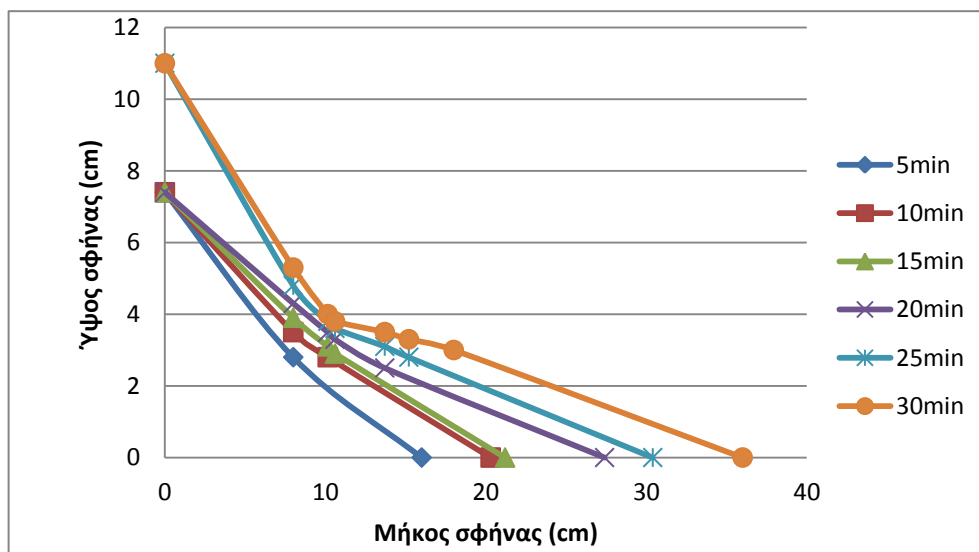
3.3.1 1^ο σετ μετρήσεων 15/10/2012

1^Η ΜΕΤΡΗΣΗ



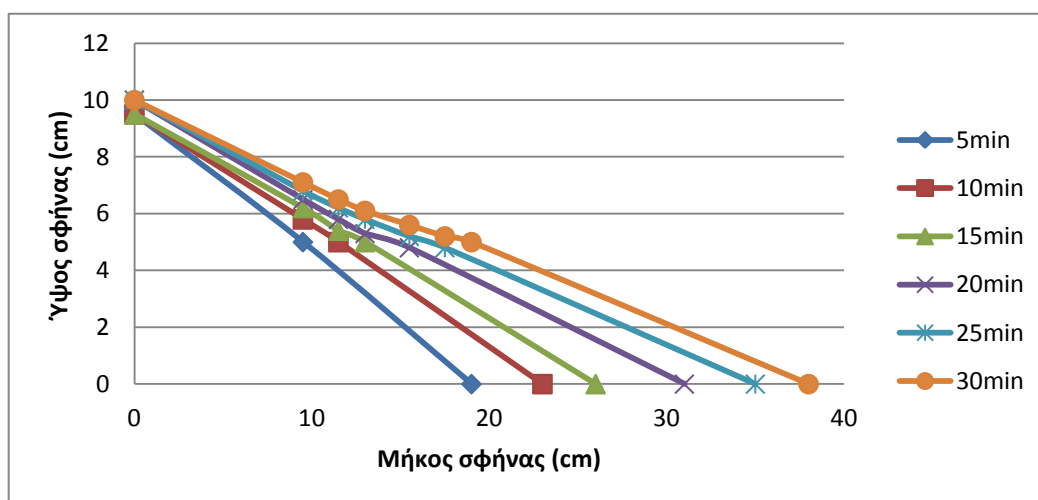
Διάγραμμα 3.1: Γραφική απεικόνιση 1^{ης} Μέτρησης, 1^{ου} σετ μετρήσεων

2^Η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.2: Γραφική απεικόνιση 2^{ης} Μέτρησης, 1^{ου} σετ μετρήσεων

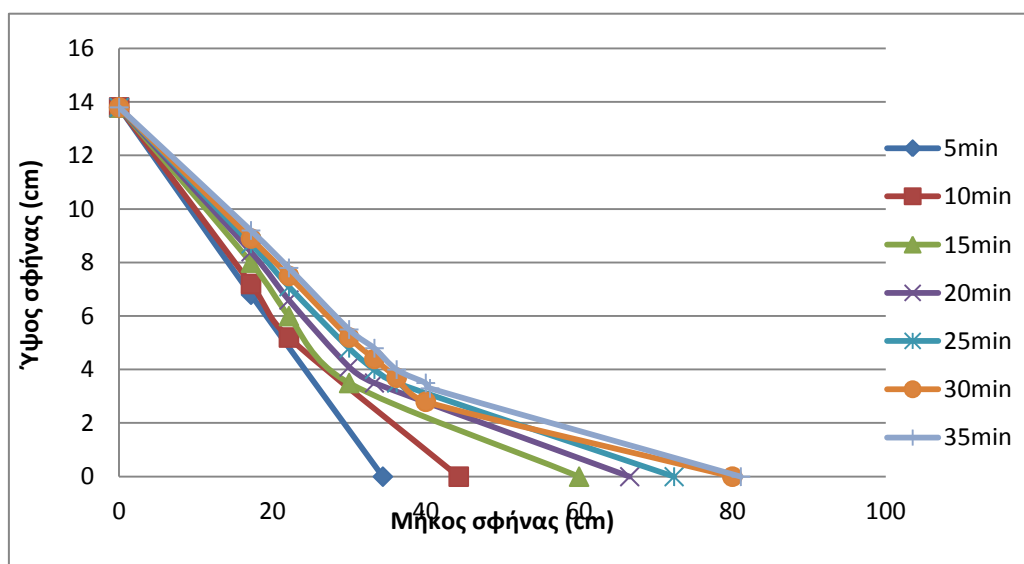
3^η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.3: Γραφική απεικόνιση 3^{ης} μέτρησης, 1^{ου} σετ μετρήσεων

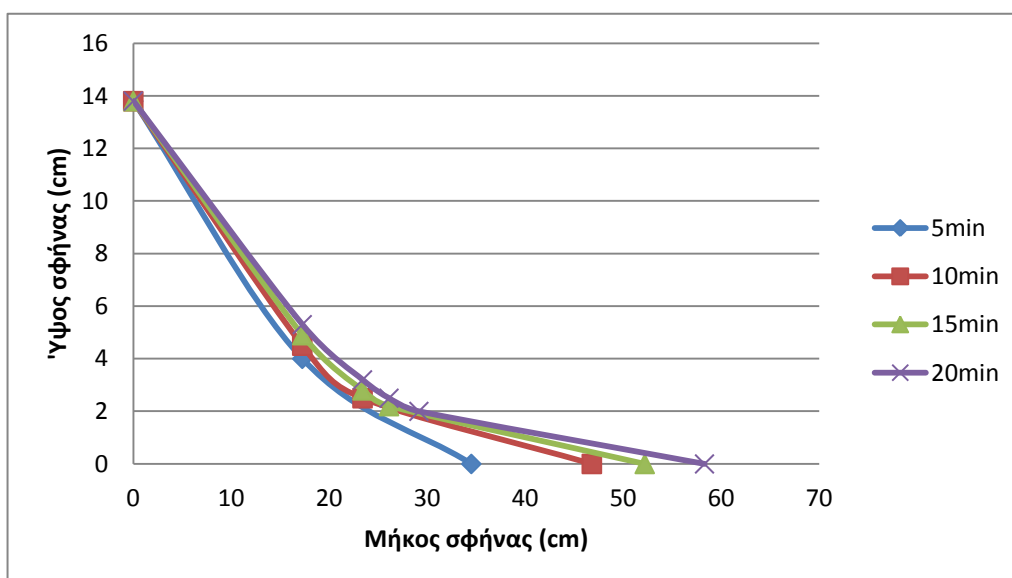
3.3.2 2^ο σετ μετρήσεων 5/12/2012

1^η ΜΕΤΡΗΣΗ



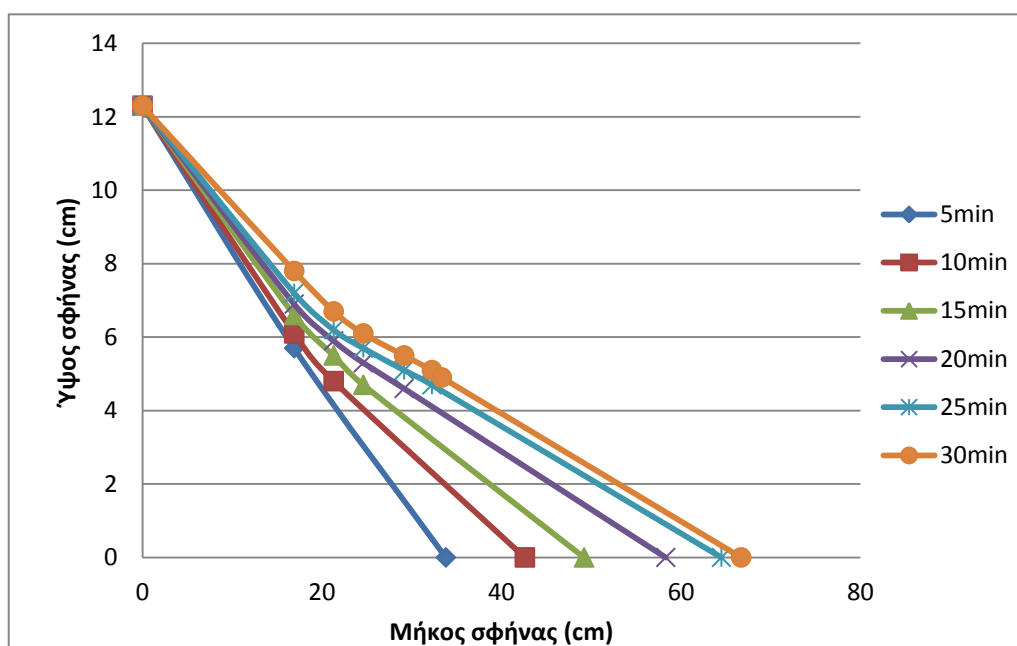
Διάγραμμα 3.4: Γραφική απεικόνιση 1^{ης} Μέτρησης, 2^{ου} σετ μετρήσεων

2^Η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.5: Γραφική απεικόνιση 2^{ης} Μέτρησης, 2^{ου} σετ μετρήσεων

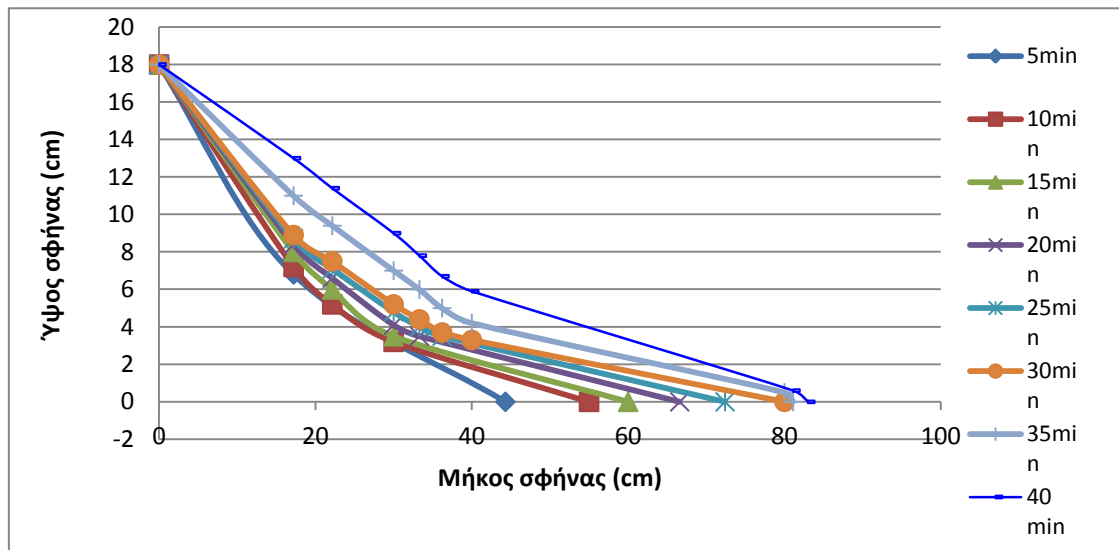
3^Η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.6: Γραφική απεικόνιση 3^{ης} Μέτρησης, 2^{ου} σετ μετρήσεων

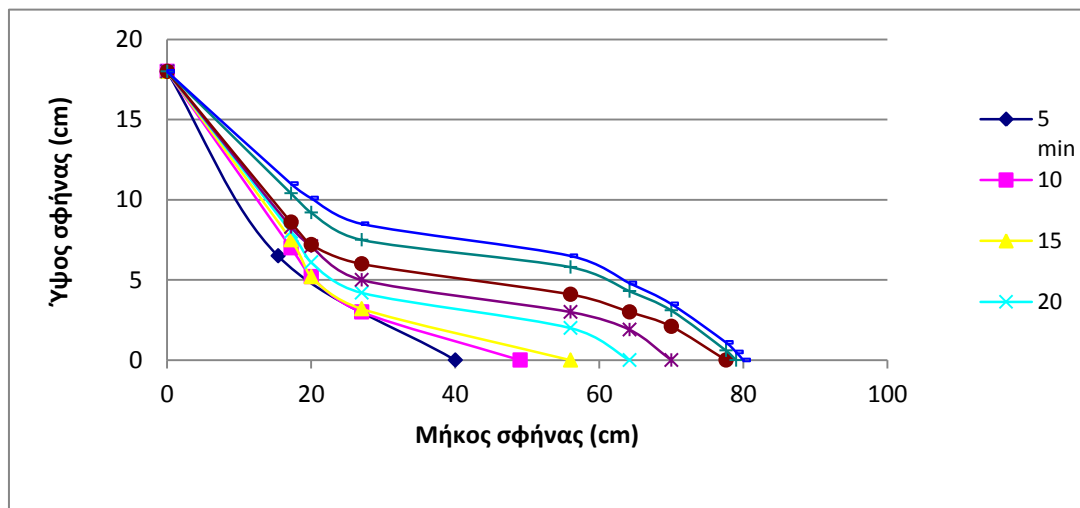
3.3.3 3^ο σετ μετρήσεων 13/5/2013

1^η ΜΕΤΡΗΣΗ



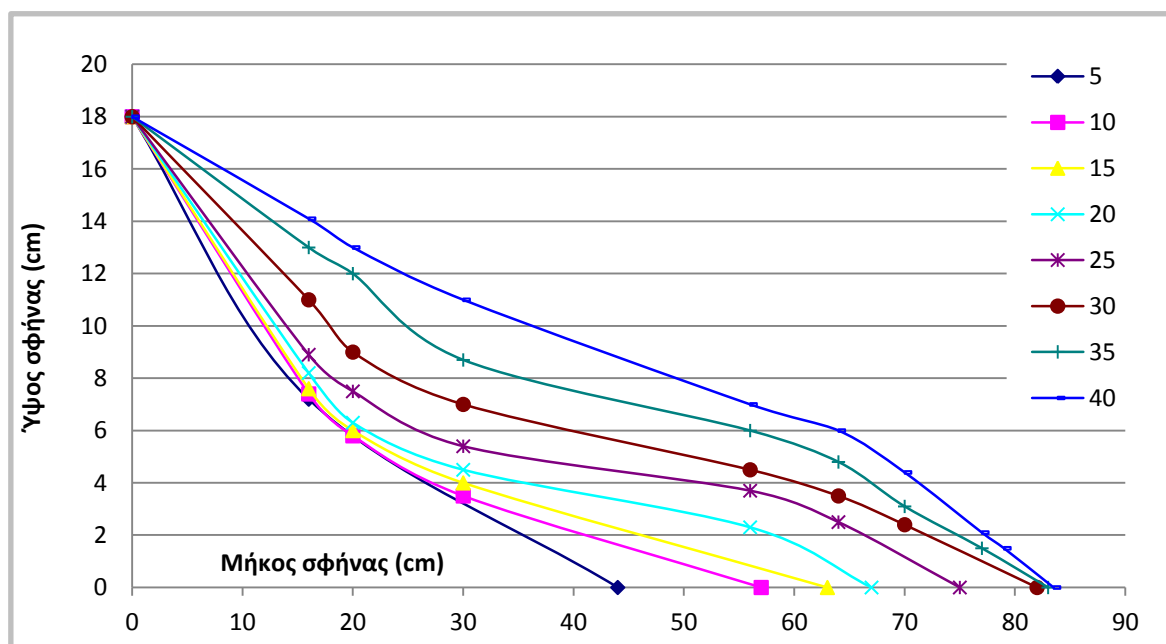
Διάγραμμα 3.7: Γραφική απεικόνιση 1^{ης} Μέτρησης, 3^{ου} σετ μετρήσεων

2^η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.8: Γραφική απεικόνιση 2^{ης} Μέτρησης, 3^{ου} σετ μετρήσεων

3^η ΜΕΤΡΗΣΗ



Διάγραμμα 3.9: Γραφική απεικόνιση 3^{ης} Μέτρησης, 3^{ου} σετ μετρήσεων

Οι παραπάνω γραφικές παραστάσεις αποτελούν προϊόν των μετρήσεων που καταγράφηκαν την περίοδο 2011-2013 και η διαφοροποίηση τους οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια αναπαράστασης του φαινομένου της υφαλμύρινσης. Είναι γεγονός ότι η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε αρκετές φορές, σε κάποιες από τις οποίες παρατηρήθηκε ολοκλήρωση του φαινομένου πιο γρήγορα απ' ό,τι σε άλλες, καταγράφοντας συνεπώς διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά την μετακίνηση της σφήνας της υφαλμύρινσης και το ύψος εισόδου του υφάλμυρου νερού, καταλήγοντας έτσι στις παραπάνω εννιά (9) μετρήσεις.

Παρόλα αυτά όμως και λόγω του ότι στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία, βλ. 4^ο Κεφάλαιο, έπρεπε να επιλεγούν οι καλύτερες δυνατές μετρήσεις σε σχέση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Γι' αυτό και τελικώς επελέγησαν οι τρεις τελευταίες μετρήσεις και οι αντίστοιχες γραφικές τους παραστάσεις, ώστε να καταλήξει αποτελεσματικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των απαραίτητων για την έρευνα συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για την προσομοίωση του μετώπου της υφαλμύρινσης στην πιλοτική εργαστηριακή μονάδα έγινε χρήση του προγράμματος Visual MODFLOW σε συνεργασία με το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας Seawat. Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να δειχθεί, στο μέτρο του δυνατού, ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος, καθώς επίσης και ο τρόπος χρήσης του.

4.1 ΜΟΝΤΕΛΑ

Γενικά, μαθηματικό μοντέλο κατά την ευρεία έννοια, θεωρείται μία σχέση ή μία εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος με μαθηματική μορφή. Συνήθως περιγράφεται από μία συναρτησιακή σχέση της ακόλουθης μορφής:

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

Εξαρτημένες μεταβλητές είναι αυτές που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος, για παράδειγμα το υδραυλικό φορτίο, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως διάστασης χώρου και χρόνου, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις (stresses).

Με τον όρο μοντέλο λοιπόν, εννοούμε μία απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή «τάσεις».

Επομένως τα μαθηματικά ομοιώματα αποτελούν ένα δυναμικό, αξιόπιστο και διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο που παρέχει σημαντική βοήθεια στην υδρογεωλογική μελέτη και συγκεκριμένα στη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής, (Mc Donald and Harbaugh, 1998).

4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Όσον αφορά στα υπόγεια νερά, το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του φυσικού συστήματος, δηλαδή του υδροφόρου σχηματισμού, κάνοντας διάφορες παραδοχές κατά την επίλυσή του.

Τα μοντέλα μας δίνουν τη δυνατότητα γρήγορης, ευέλικτης, ακριβούς αναπαράστασης και μελέτης ενός φυσικού συστήματος και συντελούν στη διερεύνηση και μελέτη προβλημάτων, στην αποκωδικοποίηση των μηχανισμών λειτουργίας, στο σχεδιασμό επανορθωτικών μέτρων, στην παροχή πληροφοριών που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων και στον εντοπισμό των ελλειπόντων και ταυτόχρονα απαραίτητων δεδομένων με αποτέλεσμα τον ορθολογικότερο σχεδιασμό συλλογής τους. Η θεωρία της κίνησης του νερού στα πορώδη μέσα έγκειται στον νόμο του Darcy που διατυπώθηκε το 1856 ύστερα από συνεχή και σχετικά πειράματα. Η ροή του υπογείου νερού σε υδροφόρους σχηματισμούς περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και ποικίλουν ανάλογα με το είδος του υδροφόρου και με τις συνθήκες ροής, (Τάντος, 2006).

Για την επίλυση των εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων, δηλαδή των διαφορικών εξισώσεων, χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές μέθοδοι, γι' αυτό και στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος αριθμητικό μοντέλο αντί της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου. Ταυτόχρονα, με το αριθμητικό μοντέλο εισάγεται ένα σύνολο σεναρίων και παραδοχών πρόσθετων σε αυτά που εισήχθησαν στο μαθηματικό. Επιπλέον, τα μαθηματικά μοντέλα έχουν ταυτιστεί πια με τα λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών, αποτελώντας κατ' αυτόν τον τρόπο την πιο σύγχρονη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν προβλήματα ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά.

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών μοντέλων έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον όχι μόνο των επιστημόνων, αλλά και πολλών υπηρεσιών, φορέων που ασχολούνται με ζητήματα διαχείρισης φυσικών πόρων. Τα μοντέλα αυτά των υπογείων νερών εφαρμόζονται συνήθως στα πλαίσια λήψης αποφάσεων σχετικών με τη διαχείριση των φυσικών αυτών πόρων. Τέτοια πρότυπα και κανόνες εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων στα υπόγεια νερά έχουν ήδη θεσπιστεί από τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας του '90 από το (U.S.) National Research Council.

4.3 ΟΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

A. Μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method).

Στη μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής με την επίλυση των εξισώσεων να γίνεται πάνω στους κόμβους του πλέγματος οι οποίοι μπορεί να είναι στο κέντρο κάθε κελιού ή στις κορυφές. Η μέθοδος αυτή βρίσκει επιτυχή εφαρμογή στα προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων. Σε γενικότερα πλαίσια θεωρείται η καλύτερη μέθοδος εξαιτίας της δέσμευσης που θέλει τον κάνναβο να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και της δυσκολίας σε ορισμένες περιπτώσεις να διακριτοποιήσει μαθηματικά με ακρίβεια τις εξισώσεις. Όσον αφορά στην αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη μέθοδος, αυτή καθίσταται κατανοητή και από υπολογιστικής άποψης άμεσα εφαρμόσιμη.

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

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Delta V \quad (4.1)$$

Όπου,

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού (m^{-1}).

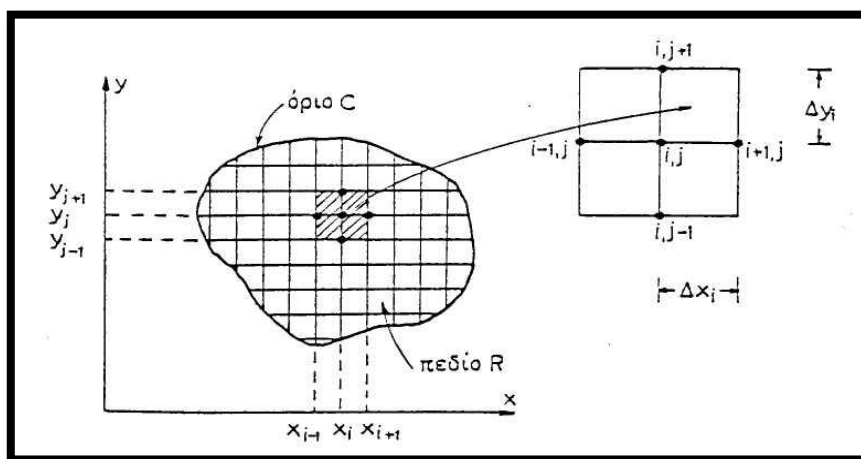
Q_i : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα (m^3/sec).

ΔV : ο όγκος της κυψελίδας (m^3).

$\Delta\Phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt (m).

Επιπλέον στην απλοποιημένη περίπτωση ενός μονοδιάστατου προβλήματος και εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση του, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το ανάπτυγμα της σειράς Taylor για την εξαρτημένη μεταβλητή. Συγκεκριμένα εάν θεωρήσουμε τη συνάρτηση $f = f(x)$, με ανεξάρτητη

μεταβλητή το x και εξαρτημένη το f , ο κάνναβος των πεπερασμένων διαφορών διαμορφώνεται ως έχει παρακάτω:



Εικόνα 4.1: Τυπική μορφή καννάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος και Θεοδοσίου, 2007)

Το ανάπτυγμα της f σε σειρά Taylor για τον κάνναβο πεπερασμένων διαφορών, θα είναι το παρακάτω, (Abramowitz, Milton, Stegun, Irene A., 1970):

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} * \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \dots \quad (4.2)$$

B. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method).

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

Συγκρίνοντας λοιπόν τις δύο παραπάνω μεθόδους συμπεραίνουμε ότι οι πεπερασμένες διαφορές προγραμματίζονται ευκολότερα. Γενικά όμως η κατασκευή ενός καννάβου πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερα δεδομένα.

Τα πεπερασμένα στοιχεία αντίθετα με τις πεπερασμένες διαφορές προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, ενώ δύνονται ακόμα

και να προσομοιώνουν καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη επιφάνεια του υπογείου νερού.

Θεμελιώδη διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους αποτελεί το γεγονός ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο αντιπροσωπεύοντας τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Αντιθέτως, στα πεπερασμένα στοιχεία, το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου κάνοντας χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation functions) (Pinder, 1997).

Γ. Μέθοδος των οριακών στοιχείων (boundary elements method).

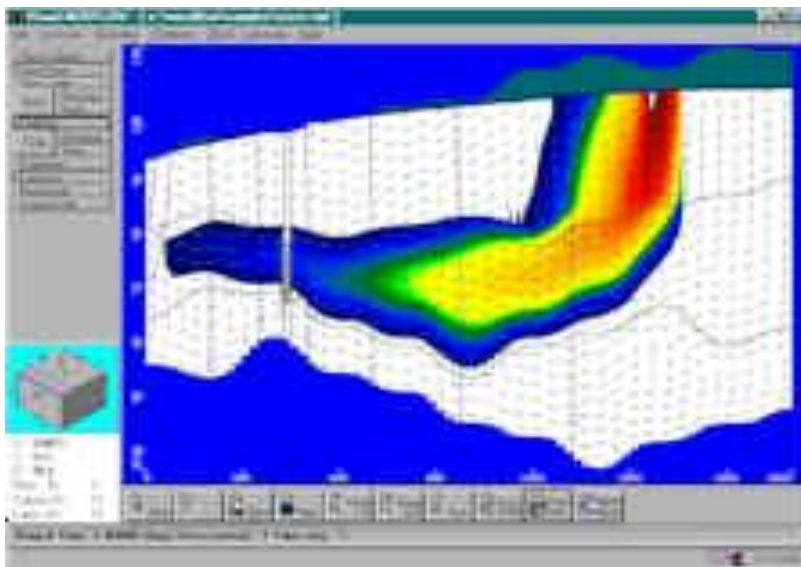
Στη μέθοδο αυτή εξετάζεται η ελεύθερη επιφάνεια ενός υδροφόρου στην περίπτωση της μόνιμης ροής. Το πρόβλημα, αντιμετωπίζεται ως δισδιάστατο και γίνεται η παραδοχή ότι σε κάθε σημείο, με τις ίδιες οριζοντογραφικές συντεταγμένες, σε όλα τα οριζόντια επίπεδα, τα υδραυλικά στοιχεία έχουν την ίδια τιμή, (Λεονταρίτης, 1985).

4.4 TO MONTEΛΟ VISUAL MODFLOW

Για την προσομοίωση ενός εξ' ολοκλήρου πορώδους σχηματισμού απαιτείται η επιλογή ενός κώδικα προσομοίωσης που να βασίζεται όπως είναι φυσικό στο νόμο του Darcy. Ο πιο γνωστός κώδικας προσομοίωσης που βασίζεται στον νόμο Darcy και έχει εφαρμοστεί σε πολυάριθμες μελέτες προβλημάτων ροής υπογείων νερών τόσο στο διεθνή όσο και στον Ελλαδικό χώρο είναι ο κώδικας MODFLOW, (Mc Donald and Harbaugh, 1998).

Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει επιχειρηθεί η εφαρμογή του κώδικα σε πορώδη μέσα (Papadopoulou, Varouchakis, Karatzas, 2009) και σε κερματισμένους (fractured aquifers) και καρστικούς (karst aquifers) υδροφόρους που η συμπεριφορά τους αποκλίνει σημαντικά από τον νόμο του Darcy, με την παραδοχή ότι ο καρστικός αποτελεί ένα ισοδύναμο πορώδες μέσο (EPM, Equivalent Porous Medium) και η εφαρμογή του οποίου υπήρξε επιτυχής, (Παναγόπουλος, 2004).

Το MODFLOW αποτελεί έναν από τους πλέον τεκμηριωμένους κώδικες μαθηματικής προσομοίωσης της ροής, διάχυσης/διασποράς και αποδόμησης ρύπων σε κορεσμένη ζώνη πορώδους μέσου χωρίς διαφορές πυκνότητας.



Εικόνα 4.2: Προσομοίωση υπόγειας ροής με το πρόγραμμα Visual MODFLOW, (<http://igwmc.mines.edu/software/igwmcsoft/visualmf.htm?CMSPAGE=igwmc/software/igwmcsoft/visualmf.htm>)

4.4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο προγράμματος

Το Visual MODFLOW επιλύει αριθμητικά τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής, βλ. εξίσωση 4.3, με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM), σε τρεις διαστάσεις και σε συνθήκες μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής. Αυτό έχει την δυνατότητα της προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών και οριακών συνθηκών.

Οι τύποι των υδροφόρων σχηματισμών που μπορούν να προσομοιωθούν μπορεί να είναι υπό πίεση (confined), ελεύθεροι (unconfined) ή μερικώς υπό πίεση υδροφόροι. Το MODFLOW έχει ελεγχθεί για την αριθμητική του ακρίβεια έχοντας χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε ένα ευρύ φάσμα υδραυλικών και υδρογεωλογικών

εφαρμογών και τείνει να γίνει ένα από τα πλέον αποδεκτά μέσα από όλα τα διαθέσιμα ανάλογα προγράμματα.

Η εξίσωση 4.3 μαζί με τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης και των συνθηκών στα όρια του υδροφόρου συστήματος, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Με την αριθμητική μέθοδο FDM, το συνεχές χωρικό και χρονικό πεδίο μελέτης αντικαθίσταται από μια πεπερασμένη σειρά διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο και οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται από διαφορές στις τιμές της στάθμης στα σημεία αυτά.

Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων, των οποίων η επίλυση παρέχει τιμές του υδραυλικού φορτίου σε ορισμένα σημεία και χρόνους. Έτσι οι τιμές αποτελούν μια προσέγγιση της διακύμανσης της στάθμης του υδροφόρου σε σχέση με το χρόνο που θα μπορούσε να δοθεί με μια αναλυτική επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης της ροής.

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφόρου συστήματος είναι απαραίτητη και πραγματοποιείται με την μορφή ενός δικτύου από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κυψελίδες (cells), η θέση των οποίων περιγράφεται με την μορφή γραμμών στηλών και στρωμάτων. Η στάθμη του υπόγειου νερού υπολογίζεται σε ένα σημείο της κυψελίδας που ονομάζεται κόμβος, (Τάντος, 2006).

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιεί το MODFLOW είναι η ακόλουθη, (Mc Donald and Harbaugh, 1998):

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.3)$$

Όπου:

- **H:** το υδραυλικό φορτίο.
- **K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}:** οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των διευθύνσεων x, y, z.
- **W:** ο ρυθμός εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα.
- **S_s:** η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου.
- **t:** ο χρόνος.

4.5 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το Visual MODFLOW είναι το πληρέστερο και πιο εύχρηστο περιβάλλον μοντελοποίησης για τις πρακτικές εφαρμογές σε τρισδιάστατες προσομοιώσεις ροής και μεταφορά ρύπων σε υπόγεια νερά.

Η απλή δομή των επιλογών και τα εύχρηστα γραφικά εργαλεία μας επιτρέπουν:

- Την εύκολη διαστασιολόγηση της περιοχής.
- Τον ευκολότερο ορισμό ιδιοτήτων και οριακών συνθηκών.
- Τη βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένες τεχνικές ή από τον χρήστη χειροκίνητα.
- Τη βελτιστοποίηση των τιμών άντλησης των πηγαδιών και των θέσεων τους.
- Την απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας δισδιάστατη ή τρισδιάστατη γραφική παράσταση.

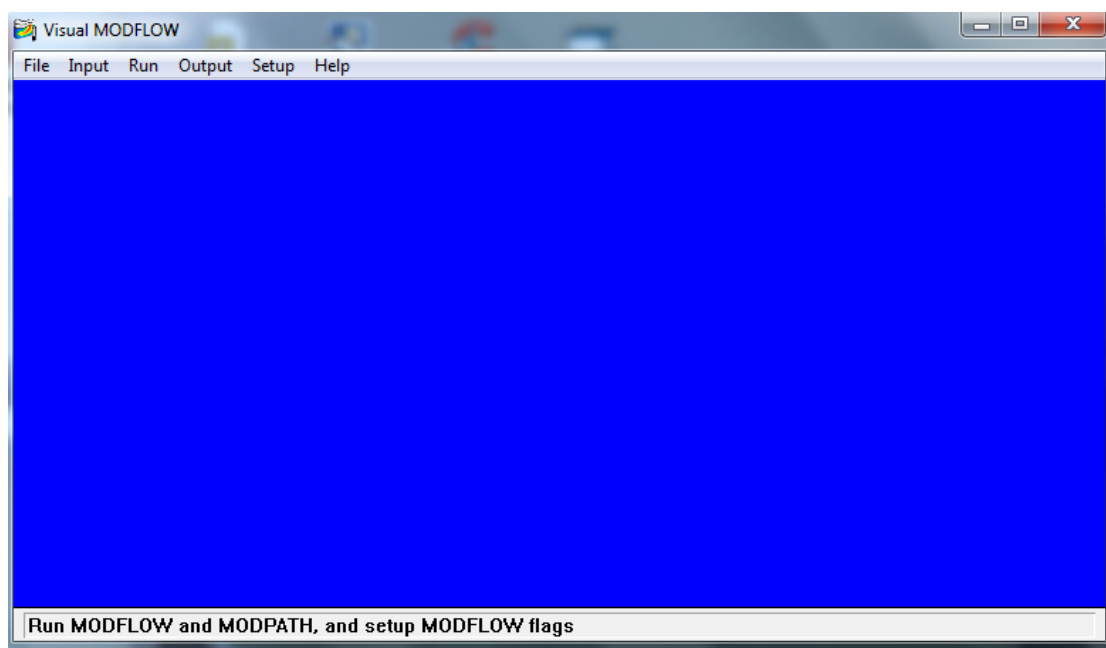
Το Visual MODFLOW έχει σχεδιαστεί ειδικά για να αυξήσει την παραγωγικότητα διαμόρφωσης και να μειώσει τις περιπλοκές στις προσομοιώσεις ροής και μεταφοράς ρύπων σε υπόγεια νερά, που σχετίζονται χαρακτηριστικά με τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων.

Το Visual MODFLOW χωρίζεται στις ακόλουθες τρεις ενότητες:

- **Το τμήμα εισαγωγής:** η συγκεκριμένη ενότητα δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει γραφικά όλες τις απαραίτητες παραμέτρους εισαγωγής για την δόμηση του μοντέλου.
- **Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων:** στην ενότητα αυτή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να τροποποιήσει τις διάφορες παραμέτρους που συνδέονται με την εκτέλεση του μοντέλου. Αυτές περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, την επιλογή των αρχικών τιμών στάθμης, τον τρόπο επίλυσης κ.ά.

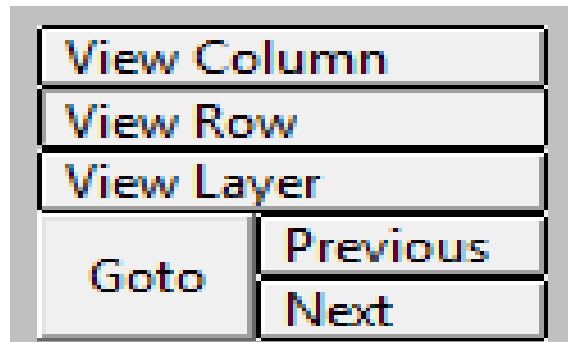
- **Το τμήμα αποτελεσμάτων:** η ενότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να παρουσιάσει όλα τ' αποτελέσματα του μοντέλου. Οι επιλογές παραγωγής μας επιτρέπουν να επιλέξουμε, να προσαρμόσουμε και να επιστρώσουμε τις διάφορες επιλογές παρουσίασης και τις εικόνες εξαγωγής για την επίδειξη των αποτελεσμάτων διαμόρφωσης.

Κάθε ενότητα, από τις παραπάνω, διαθέτει το ίδιο βασικό σχεδιάγραμμα οθόνης όταν ο χρήστης βρίσκεται στην αρχική οθόνη αμέσως μετά το άνοιγμα του προγράμματος, βλ. Εικόνα 4.3.



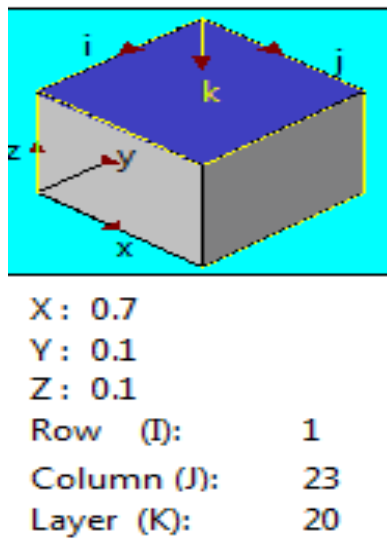
Εικόνα 4.3: Αρχική οθόνη προγράμματος

Έπειτα και αφού ο χρήστης εισάγει κάποιο αρχείο ή δημιουργήσει κάποιο καινούριο έρχεται σε επαφή με τα κουμπιά ελέγχου επίδειξης, βλ. Εικόνα 4.4. Τα συγκεκριμένα κουμπιά παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα να εναλλάσσεται εύκολα και προπάντων γρήγορα μεταξύ κάτοψης και τομής επιτρέποντάς του να κερδίσει μία καλύτερη προοπτική στις τρισδιάστατες πτυχές των παραμέτρων εισαγωγής και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.



Εικόνα 4.4: Κουμπιά ελέγχου επίδειξης

Τέλος, αφού ο χρήστης έχει εισάγει όσα δεδομένα χρειάζεται, ώστε να μελετήσει το οποιοδήποτε θέμα, μπορεί να ανατρέχει στον κύβο πλοήγησης, βλ. Εικόνα 4.5. Ο κύβος πλοήγησης παρέχει στο χρήστη μία τρισδιάστατη σχηματική αναπαράσταση του πλέγματος και των στρωμάτων. Αυτός ο κύβος δίνει στο χρήστη την δυνατότητα μιας γρήγορης οπτικής αναφοράς της θέσης μέσα σε μια περιοχή.

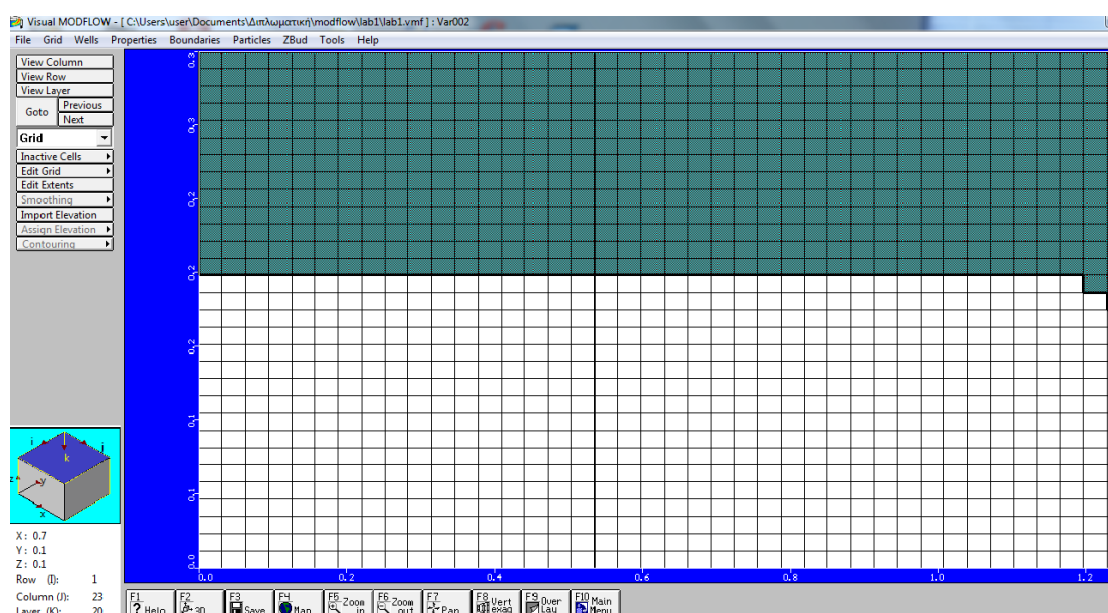


Εικόνα 4.5: Κύβος πλοήγησης

4.5.1 Το τμήμα εισαγωγής

Στο συγκεκριμένο τμήμα περιγράφεται η ακολουθία των οθονών εισαγωγής δεδομένων του MODFLOW και τα εργαλεία δόμησης που παρέχονται για τη δημιουργία των δεδομένων εισόδου. Ακολούθως παρουσιάζονται οι οθόνες εισαγωγής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δόμηση της παρούσας εργασίας και για τη μοντελοποίηση των δεδομένων που εξήχθησαν από την πιλοτική εργαστηριακή μονάδα.

Το Visual MODFLOW επιτρέπει την περιστροφή της περιοχής που δημιουργείται πάνω από την πιλοτική εργαστηριακή μονάδα για να ευθυγραμμίσει το πλέγμα με τα χαρακτηριστικά της εργαστηριακής μονάδας και την κατεύθυνση ροής του υπογείου νερού μέσω της επιλογής σχέδιο πλέγματος (Grid), βλ. Εικόνα 4.6 . Στην συγκεκριμένη περίπτωση βαθμονομήσαμε το πλέγμα με υδραυλικό ύψος $h_1=0.2\text{m}$ αντί για 0.188m , ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να διορθώσουμε τα μεταβαλλόμενα, από τα συνεχή «τρεξίματα» του πειραματικού μοντέλου, υδραυλικά ύψη. Ακολούθως απεικονίζεται χαρακτηριστικά το σχέδιο πλέγματος του ελεύθερου υδροφορέα που προσομοιώθηκε στην εργαστηριακή μονάδα κατά την πειραματική διαδικασία.



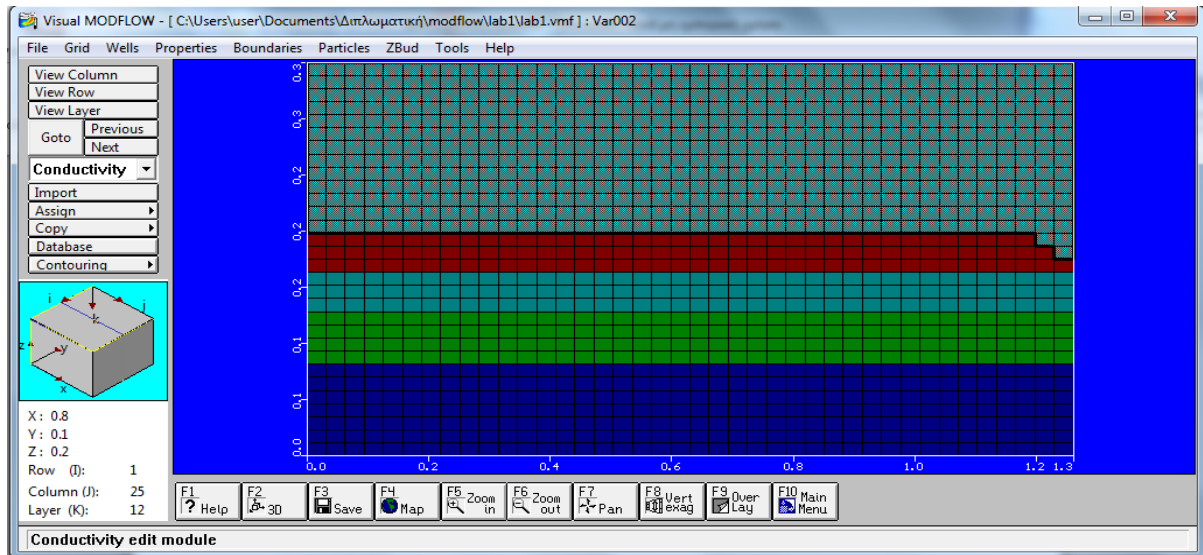
Εικόνα 4.6: Σχέδιο πλέγματος

Ακολουθώντας το Visual MODFLOW επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων όσον αφορά τις ιδιότητες - παραμέτρους του μοντέλου, τις οποίες και χωρίζει στις κάτωθι κατηγορίες.

1.Ιδιότητες ροής:

Είναι εκείνες οι φυσικές ιδιότητες που έχουν επιπτώσεις στην προσομοίωση ροής των υπογείων νερών. Οι ιδιότητες αυτές, καθεμία από τις οποίες πρέπει να καθοριστεί για κάθε κελί της περιοχής, περιλαμβάνουν:

- Την υδραυλική αγωγιμότητα (K_x , K_y και K_z): Γι' αυτήν την περίπτωση, κατά τη δημιουργία του μοντέλου, ορίσαμε δεκαεφτά (17) επίπεδα (layers) ώστε να έχουμε τη δυνατότητα ρύθμισης της υδραυλικής αγωγιμότητας και προς την κατεύθυνση K_z . Ακολουθώντας ορίσαμε στο μοντέλο την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που υπολογίσαμε στο πειραματικό μέρος με τη χρήση της εξίσωσης Dupuit, την τιμή δηλαδή $K_1=2.41 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Η τιμή αυτή αφορά μία χαρακτηριστική τιμή για ολόκληρο τον πιλοτικό υδροφορέα. Η παρουσία ωστόσο συνεχών λεπτοκόκκων φακών στα ανώτερα στρώματα και η καθίζηση των βαρύτερων κόκκων στα κατώτερα αντίστοιχα δημιουργούν μια ανομοιομορφία στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας όσο ανεβαίνουμε στο ανώτερο τμήμα του υδροφορέα. Επομένως, το μοντέλο βαθμονομήθηκε κατάλληλα και ορίστηκαν, εκτός της υπολογισμένης, οι ακόλουθες τρεις τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας: α) με πράσινο χρώμα: $K_2=1.45 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, β) με κυανό χρώμα: $K_3=1.12 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ και γ) με κόκκινο χρώμα: $K_4=1.03 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Η ισοδύναμη οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα για ένα πορώδες μέσο με n στρώματα, αντιστοιχεί στην τιμή $1,51 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ **πολύ κοντά δηλαδή στην χαρακτηριστική τιμή του υδροφορέα.** Οι ακόλουθες τιμές ανήκουν στο φάσμα των επιτρεπόμενων τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας για άμμο και χαλίκι και απεικονίζονται στην κάτωθι εικόνα. Οι παραπάνω τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας δόθηκαν για τις κατευθύνσεις K_x , K_y , ενώ για την K_z μια τάξη μεγέθους μικρότερη κατόπιν υπόδειξης του εγχειριδίου χρήσης του μοντέλου Visual Modflow.



Εικόνα 4.7: Υδραυλική αγωγιμότητα

- Τις αρχικές τιμές στάθμης – Constant Head: Στην περίπτωση αυτή εισήχθησαν στο πρόγραμμα οι τιμές για τα ισοδύναμα υδραυλικά ύψη ($h_{equivalent}$) στο δεξί άκρο του πλέγματος, για κάθε κελί από τα 0m έως τα 0.18m, βλ. Εικόνα 4.8, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$h_f = \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right) * h_2 - \left(\left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) * h_{top\ cell} \right) \quad (4.4)$$

όπου,

h_f : το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος.

ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού με $\rho_s = 1,030 \text{ gr/L}$.

ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού με $\rho_f = 1,000 \text{ gr/L}$.

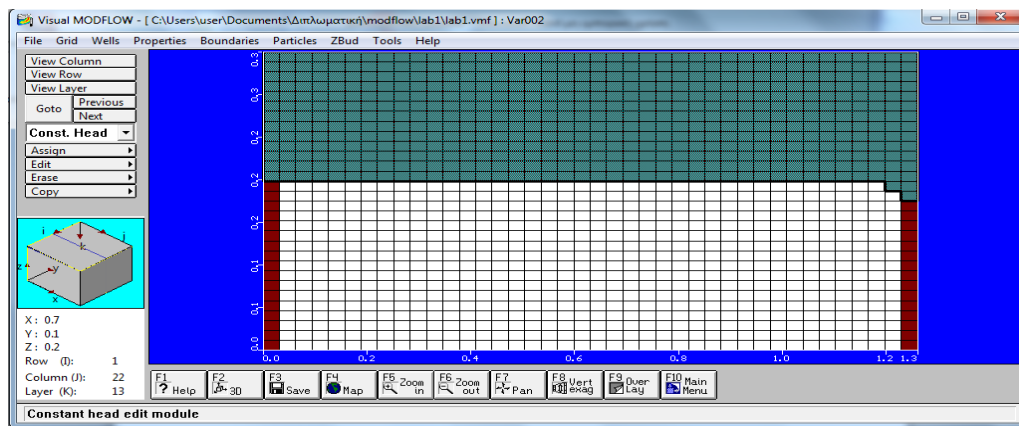
h_2 : το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού, $h_2 = 0.18 \text{ m}$.

$h_{top\ cell}$: το υψόμετρο του κάθε κελιού.

Τα αποτελέσματα για το κάθε κελί παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, πίνακας 4.1 και απεικονίζονται με κόκκινο χρωματισμό στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.8) από την αντίστοιχη οθόνη του προγράμματος.

ΚΕΛΙΑ (Cells)	$h_{top\ cell}$	Ισοδύναμο Ύψος – h_f
1.	0.18	0.18
2.	0.163	0.18051
3.	0.152	0.18084
4.	0.14	0.1812
5.	0.128	0.18156
6.	0.117	0.18189
7.	0.105	0.18225
8.	0.093	0.18261
9.	0.082	0.18294
10.	0.07	0.1833
11.	0.058	0.18366
12.	0.047	0.18399
13.	0.035	0.18435
14.	0.023	0.18471
15.	0.012	0.18504

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα ισοδύναμου ύψους ($h_{equivalent}$) για κάθε κελί, ξεκινώντας την αρίθμηση από το υψηλότερο προς το χαμηλότερο υδραυλικό ύψος, βάση της εξίσωσης 4.4.

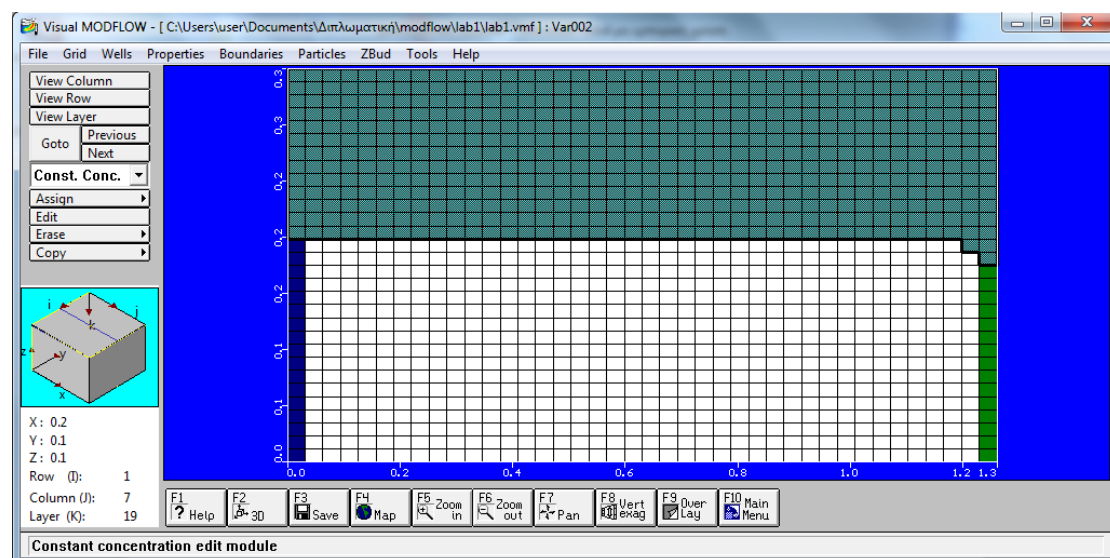


Εικόνα 4.8: Constant Head – h Equivalent

2. Ιδιότητες μεταφοράς:

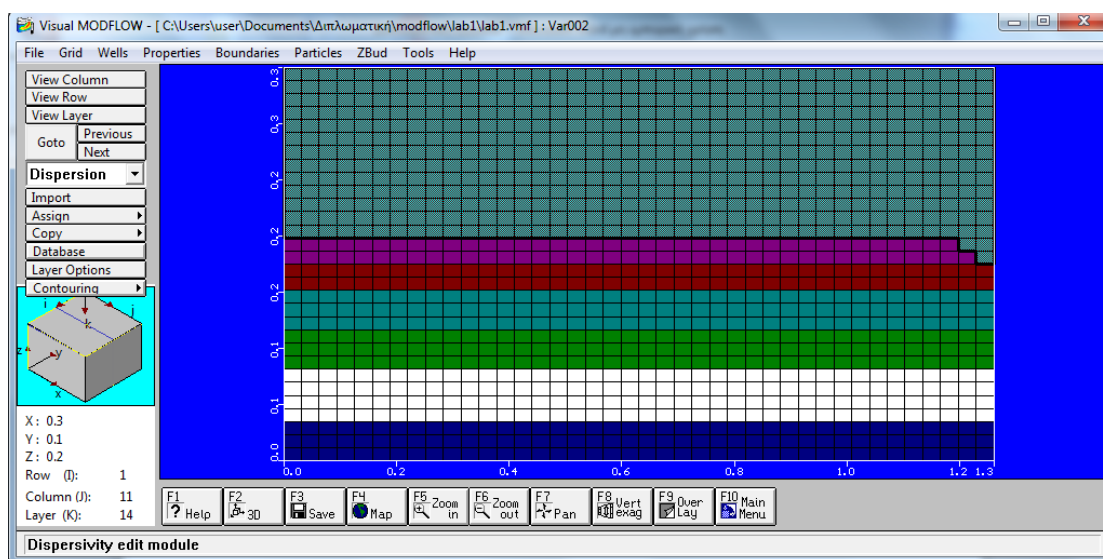
Είναι οι φυσικές και χημικές ιδιότητες που έχουν επιπτώσεις στη θέση που θα κατευθυνθεί και στον χώρο που θα καταλάβει ένας ρύπος στα υπόγεια νερά. Οι ιδιότητες μεταφοράς περιλαμβάνουν:

- Τις αρχικές συγκεντρώσεις: στην περίπτωση αυτή η τιμή της αρχικής συγκέντρωσης που εισήχθη στο πρόγραμμα, ανέρχεται στην τιμή $C_0=25.000$ mg/L, και αφορά τη τυπική συγκέντρωση αλάτων στο νερό η οποία και προτείνεται. στο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα SEAWAT (User's Guide to SEAWAT) για την προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρισης (εικόνα 4.9 με πράσινο χρωματισμό).



Εικόνα 4.9: Οθόνη αρχικής συγκέντρωσης

- Τη διασπορά: σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές που εισήχθησαν στο πρόγραμμα βαθμονομήθηκαν κατάλληλα, λόγω του ότι δεν μπορούσε να μετρηθεί κατά την πειραματική διαδικασία. Οι τιμές που δώσαμε στο πρόγραμμα αφορούν τη διαμήκη διασπορά (longitudinal dispersion) και ορίστηκαν ως εξής: α) στρώμα μπλε χρώματος $D=12m$, β) στρώμα λευκού χρώματος $D=10m$, γ) στρώμα πράσινου χρώματος $D=8m$, δ) στρώμα κυανού χρώματος $D=5m$, ε) στρώμα κόκκινου χρώματος $D=1m$ και στ) στρώμα μωβ χρώματος $D=0.5m$. τα δεδομένα αυτά απεικονίζονται στην εικόνα 4.10 παρακάτω.



Εικόνα 4.10: Διασπορά

- Την πυκνότητα: σε αυτήν την περίπτωση εισάγαμε στο πρόγραμμα τις τιμές της πυκνότητας του αλμυρού νερού που προσδιορίστηκαν κατά την εκτέλεση του πειράματος, $\rho_s=1,030gr/L$, και του γλυκού νερού $\rho_f=1,000gr/L$.

4.5.2 Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων

Το visual MODFLOW παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα προσαρμογής των διαφόρων ιδιοτήτων συμπεριλαμβάνοντας και τα εξής:

- Τις αρχικές εκτιμήσεις στάθμης.
- Τον αριθμό χρονικών βημάτων (8 βήματα των 5 λεπτών έκαστο στην παρούσα εργασία).
- Τον τρόπο επίλυσης και τις ιδιότητες σύγκλισης.
- Τις ιδιότητες επαναφόρτισης
- Τους τύπους στρώματος – ζώνης (για παράδειγμα: περιορισμένο, ελεύθερο κ.λπ.).
- Την επιλογή ανισοτροπίας.

Προηγμένες ιδιότητες

Δίνουν στο χρήστη την επιλογή ανάμεσα στο ποια αρχεία θα χρησιμοποιήσει από το Visual MODFLOW και ποια αρχεία θα αντικαταστήσουν.

Βαθμονόμηση ενός μοντέλου στο Visual MODFLOW

Το Visual MODFLOW διαθέτει μία εκτενή γκάμα επιλογής από ενσωματωμένους τρόπους βαθμονόμησης. Όλοι οι τρόποι βαθμονόμησης είναι πλήρως μετατρέψιμοι όσον αφορά τους τρόπους απεικόνισης των αξόνων.

4.5.3 Το τμήμα αποτελεσμάτων

Η δυνατότητα να απεικονιστούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης είναι σχεδόν τόσο σημαντική όσο και η δημιουργία του μοντέλου. Προκειμένου, λοιπόν, το μοντέλο να αποδώσει τα μέγιστα, είναι κρίσιμο να υπάρχουν τα απαραίτητα εργαλεία που αναλύουν και ερμηνεύουν κατάλληλα τα αποτελέσματα. Το τμήμα αποτελεσμάτων διαβάζει αυτόματα τα αρχεία αποτελεσμάτων από κάθε επιτυχή προσομοίωση και παρέχει μία ολοκληρωμένη συλλογή γραφικών σχημάτων για την επίδειξη αυτών σε έγχρωμη κάτοψη και τομή. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι ακόλουθες:

Περιγράμμα περιοχής:

Η επιλογή αυτή επιτρέπει την περιγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε κάτοψη και τομή. Οι επιλογές χάραξης περιγράμματος είναι οι εξής:

- Ύψος στάθμεων.
- Ανωψώσεις υδροφόρου ορίζοντα.
- Διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων.
- Ροή μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων.
- Ανωψώσεις στρωμάτων (κορυφή, κατώτατο σημείο και πάχος).
- Επαναφόρτιση.

Το Visual MODFLOW προσαρμόζει τα διάφορα περιγράμματα , ώστε να είναι σε θέση να συγκρίνει διάφορες περιοχές. Επιπρόσθετα, για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι επίσης διαθέσιμη και η λειτουργία σκίασης με χρώμα.

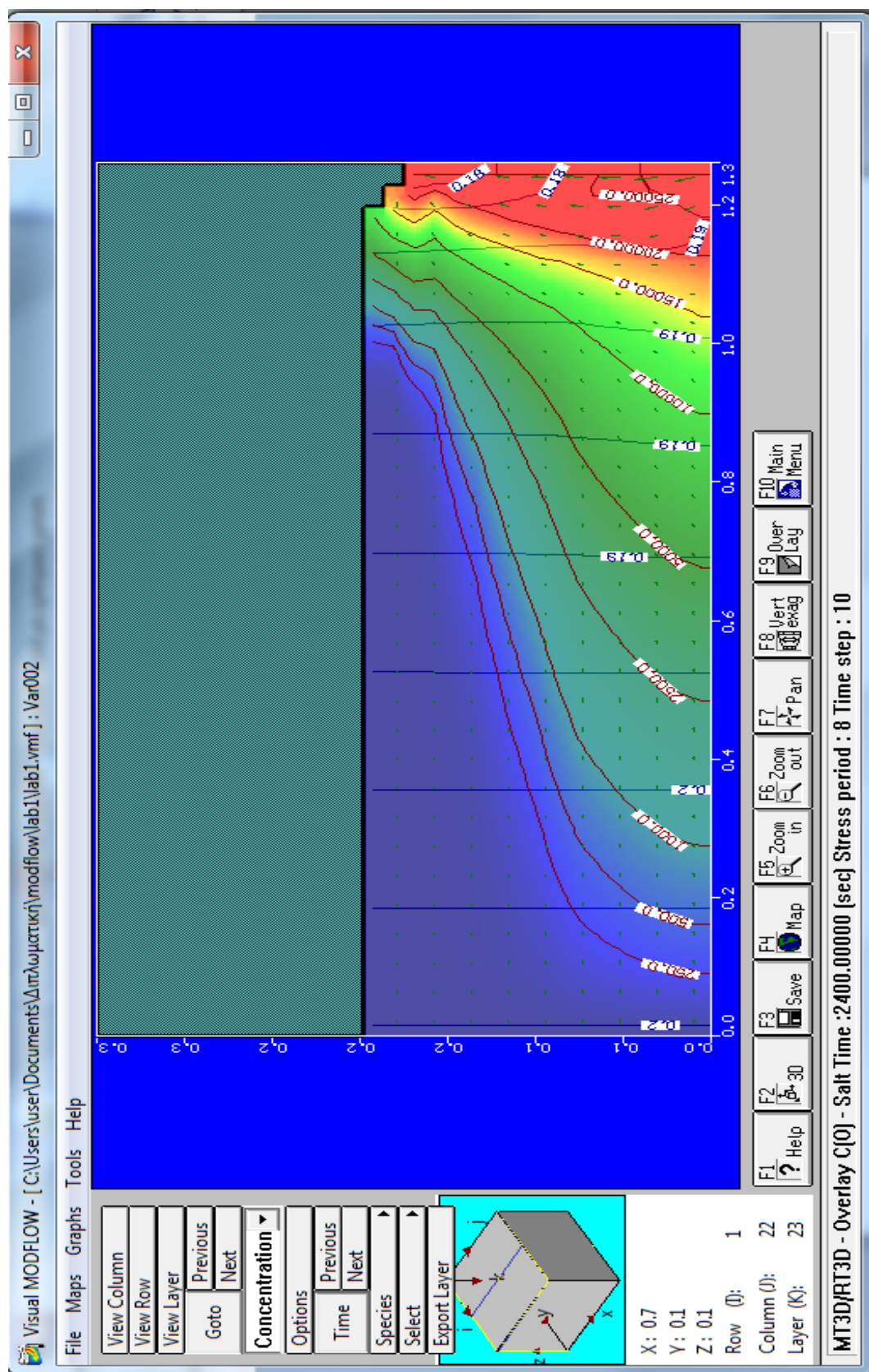
Ταχύτητες:

Τα διανύσματα ταχύτητας ροής παρέχουν μια σημαντική αναπαράσταση της κατεύθυνσης ροής υπογείων νερών μέσα σε ένα στρώμα, μία σειρά ή μία στήλη. Κάθε διάνυσμα ταχύτητας έχει το κατάλληλο χρώμα ανάλογα την κατεύθυνση της, προς το εσωτερικό ή το εξωτερικό του πεδίου ροής.

Τρισδιάστατη απεικόνιση:

Τα αρχεία του προγράμματος Visual MODFLOW μπορούν να απεικονιστούν σε τρισδιάστατο σχέδιο. Όλες οι παράμετροι εισαγωγής και τα αποτελέσματα διαμόρφωσης διαβάζονται και επιδεικνύονται χρησιμοποιώντας τη σκιασμένη χάραξη.

Στην συγκεκριμένη εργασία τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των δεδομένων από την εργαστηριακή μονάδα παρουσιάζονται σε δύο διαστάσεις (π.χ. εικόνα 4.11) μέσω γραφικής απεικόνισης της μετατόπισης των καμπυλών συγκέντρωσης κατά μήκος του υδροφορέα σε διαφορετικά χρονικά βήματα.



Εικόνα 4.11: Χαρακτηριστικό παράδειγμα γραφικής απεικόνισης αποτελεσμάτων μοντελοποίησης

4.6 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):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} * \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} * (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} * C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (4.5)$$

όπου,

- C:** η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, [ML⁻³]
- t:** ο χρόνος, [T]
- x_j:** η απόσταση κατά μήκος των καρτεσιανών συντεταγμένων, [L]
- D_{ij}:** ο συντελεστής της υδροδυναμικής διασποράς, [L²T⁻¹]
- v_i:** η ταχύτητα διήθησης (seepage velocity), [LT⁻¹]
- q_s:** 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)
- Σ_{k=1}^N R_k:** ο όρος χημικών αντιδράσεων, [ML⁻³T⁻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).

4.7 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ – ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα Η/Υ 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 υφαλμύρισης να βρίσκεται κάτω από την τιμή των 80.6cm (0,806m), την τιμή δηλαδή του μετώπου της υφαλμύρισης που ικανοποιούσε την εξίσωση των Ghyben – Herzberg, 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΜΕ ΤΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΩΝ GHYBEN – HERZBERG.

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί η σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την προσομοίωση του φαινομένου της υφαλμύρινσης με τη χρήση του προγράμματος Visual MODFLOW σε συνδυασμό με το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας SEAWAT. Ουσιαστικά θα επιχειρηθεί η ταύτιση, με ελάχιστη απόκλιση, του μετώπου της υφαλμύρινσης ανάμεσα στο εργαστηριακό πείραμα και την μοντελοποίηση του συστήματος σε συνδυασμό με την μαθηματική εξίσωση των Ghyben – Herzberg.

Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται εκτενώς η μαθηματική επίλυση της εξίσωσης Ghyben – Herzberg, βλ. εξισώσεις 2.2 και 2.3, με τη βοήθεια της εξίσωσης του Dupuit για ελεύθερο υδροφόρο, βλ. εξίσωση 3.3. Αποτέλεσμα του συνδυασμού των παραπάνω εξισώσεων αποτελεί ο υπολογισμός του μετώπου ή σφήνας της υφαλμύρινσης.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται γραφικά η σύγκριση ανάμεσα στα δεδομένα του πειράματος και της μοντελοποίησης, όπου χρησιμοποιούμε τρεις από τις οχτώ συνολικά χρονικές καμπύλες της δεύτερης και τρίτης πειραματικής μέτρησης από το τρίτο σετ εργαστηριακών μετρήσεων (τις καμπύλες των δέκα (10), είκοσι (20) και σαράντα (40) λεπτών), λόγω του ότι οι συγκεκριμένες μετρήσεις έχουν τα πιο κοντινά με την μοντελοποίηση αποτελέσματα και επειδή υπάρχει μεγάλη ταύτιση μεταξύ των καμπυλών του τελευταίου χρονικά βήματος (40min), παρόλο που δεν είναι υπολογισμένη πειραματικά η διάχυση του ρύπου. Στη συνέχεια τις αντιπαραθέτουμε στις καμπύλες που εξήχθησαν από το MODFLOW και συγκεκριμένα στην καμπύλη συγκέντρωσης $C=2.500 \text{ mg/L}$. Ο λόγος πραγματοποίησης της σύγκρισης με την συγκεκριμένη καμπύλη είναι ότι ο δείκτης

που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα ανιχνεύει και δύναται να χρωματίσει μέχρι και το 10% της αρχικής συγκέντρωσης ($C_0=25.000 \text{ mg/L}$).

5.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΩΝ GHYBEN – HERZBERG

Στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι βασικές εξισώσεις των Ghyben – Herzberg και του Dupuit για ελεύθερο υδροφορέα, όπως επίσης και οι βασικές παράμετροι που αποτελούν τις ανωτέρω εξισώσεις και οι οποίες είναι συνοπτικά οι εξής:

- Παροχή (Q) [$Q=100\text{ml}/322\text{sec}=100\text{ml}\cdot 1\text{m}^3/322\text{sec}\cdot 10^6\text{ml}=3.105\cdot 10^{-7}\text{m}^3/\text{s}$]
- Παροχή ανά μονάδα πλάτους (q'_x) [$q'_x= 2.95\cdot 10^{-6}\text{m}^2/\text{sec}$]
- Διαστάσεις δεξαμενής διήθησης και αποστράγγισης (drainage and seepage tank) [$L= 1.2\text{m}$, $w= 0.105\text{m}$]
- Υδραυλική αγωγιμότητα (K) [$K=2.41\cdot 10^{-3}\text{m}/\text{sec}$]
- Υδραυλικά ύψη – υδραυλική κλίση (h_1 , h_2 , Δh) [$h_1=0.188\text{m}$, $h_2=0.18\text{m}$]

Οπότε, το επόμενο βήμα είναι η αριθμητική αντικατάσταση, κάνοντας τις απαραίτητες μετατροπές μονάδων, ώστε να υπολογιστεί το μήκος του υφάλμυρου μετώπου. Επομένως από την εξίσωση των Ghyben – Herzberg (2.3) έχουμε:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} * h_f \Rightarrow 0.18\text{m} = \frac{1,000\text{gr/L}}{(1,030 - 1,000)\text{gr/L}} * h_f \Rightarrow$$

$$h_f = \frac{0.18\text{m}}{33.3} \Rightarrow$$

$$h_f = 0.0054\text{m} \quad (5.1)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι: $h = h_f + h_2$

Οπότε αντικαθιστώντας την 5.1 έχουμε: $h = 0.0054\text{m} + 0.18\text{m} \Rightarrow h = 0.1854\text{m}$
(5.2)

Έχοντας πλέον υπολογίσει και το απαιτούμενο υδραυλικό ύψος (h) με τη βοήθεια των Ghyben – Herzberg, απομένει να αντικαταστήσουμε την 5.2 στην εξίσωση του Dupuit, αφού πρώτα τη λύσουμε ως προς το ζητούμενο μήκος (L). Συνεπώς έχουμε:

$$q'_x = \frac{1}{2} * K * \frac{(h^2 - h_2^2)}{L} \Rightarrow L = \frac{K * (h^2 - h_2^2)}{2 * q'_x} \quad (5.3)$$

Αντικαθιστώντας, λοιπόν, την 5.2 και τα υπόλοιπα αριθμητικά δεδομένα στην εξίσωση 5.3 έχουμε:

$$L = \frac{2.41 * 10^{-3} \text{ m/sec} * (0.1854^2 \text{ m}^2 - 0.18^2 \text{ m}^2)}{2 * 2.95 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}} \Rightarrow$$

$$L = \frac{2.41 * 10^{-3} \text{ m} * (0.0343716 \text{ m}^2 - 0.0324 \text{ m}^2)}{5.9 * 10^{-6} \text{ m}^2} \Rightarrow$$

$$L = \frac{2.41 * 10^{-3} * 0.009716 \text{ m}^3}{5.9 * 10^{-6} \text{ m}^2} \Rightarrow$$

$$L = \frac{47.55 * 10^{-7} \text{ m}^3}{5.9 * 10^{-6} \text{ m}^2} \Rightarrow$$

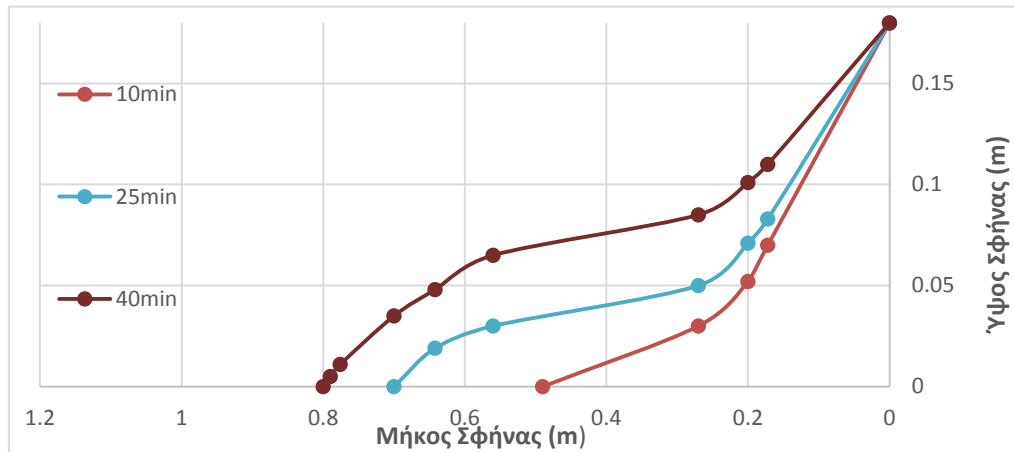
$$L = 8.06 * 10^{-1} \text{ m} = 0.806 \text{ m} \Rightarrow$$

$$L = 80.6 \text{ cm} \quad (5.4)$$

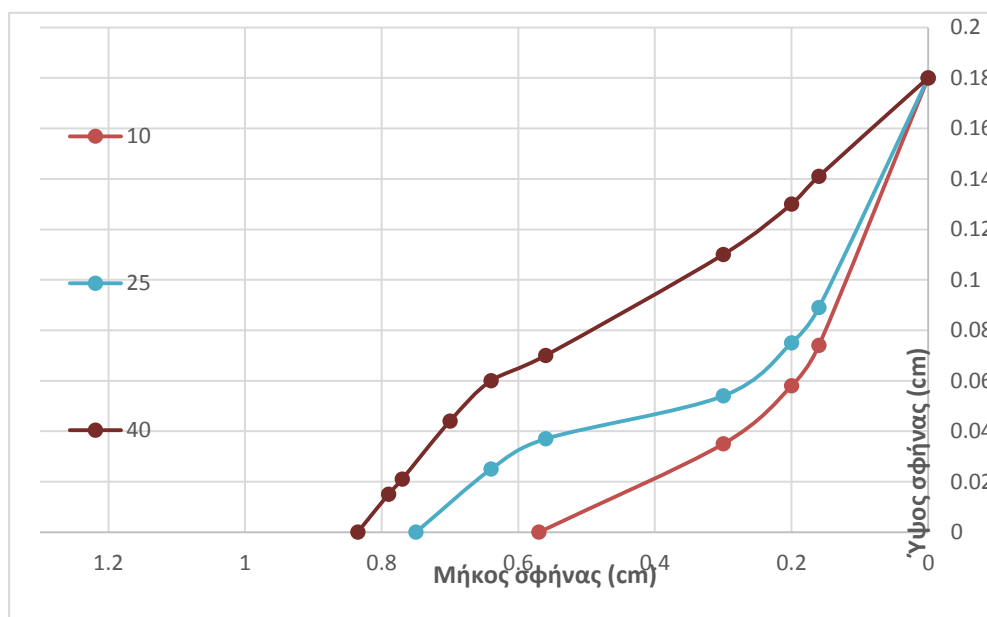
5.3 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του πειραματικού μέρους και της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της δεύτερης και της τρίτης πειραματικής μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων, η οποία προέκυψε από τα αντίστοιχα δεδομένα, βλ. παράρτημα. Από τα διαγράμματα 3.8 και 3.9 επιλέξαμε για την πραγματοποίηση της σύγκρισης με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές από την

εξέλιξη του φαινομένου π.χ. τη δεύτερη, τη μεσαία και την τελευταία χρονικά καμπύλη, οι οποίες αντιστοιχούν στα 10 λεπτά, στα 25 λεπτά και στα 40 λεπτά, όπου και ολοκληρώνεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης στο σύστημα μας. Συνεπώς τα διαγράμματα 3.8 και 3.9 μετετράπησαν για τις ανάγκες της σύγκρισης στα ακόλουθα διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.1: Γραφική απεικόνιση καμπυλών 10, 25 και 40min 2^{ης} πειραματικής μέτρησης του 3^{ου} σετ μετρήσεων

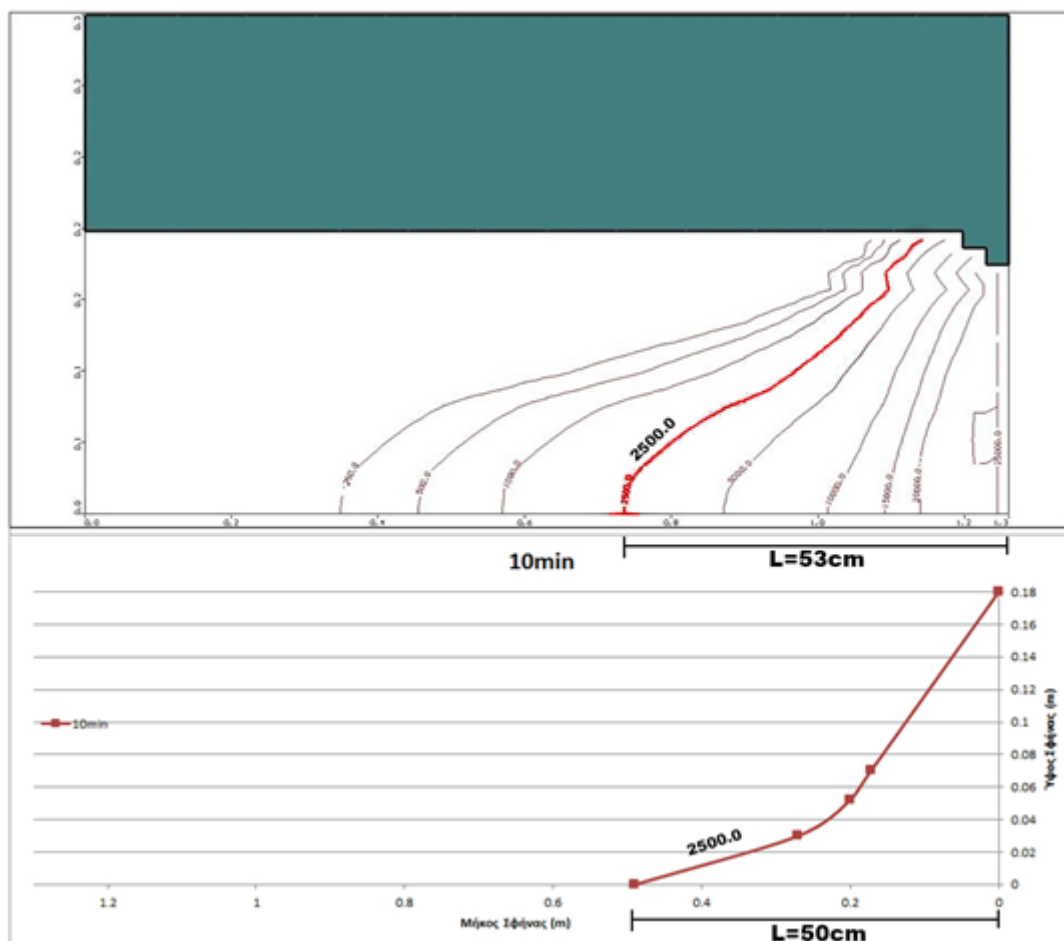


Διάγραμμα 5.2: Γραφική απεικόνιση καμπυλών 10, 25 και 40min 3^{ης} πειραματικής μέτρησης του 3^{ου} σετ μετρήσεων

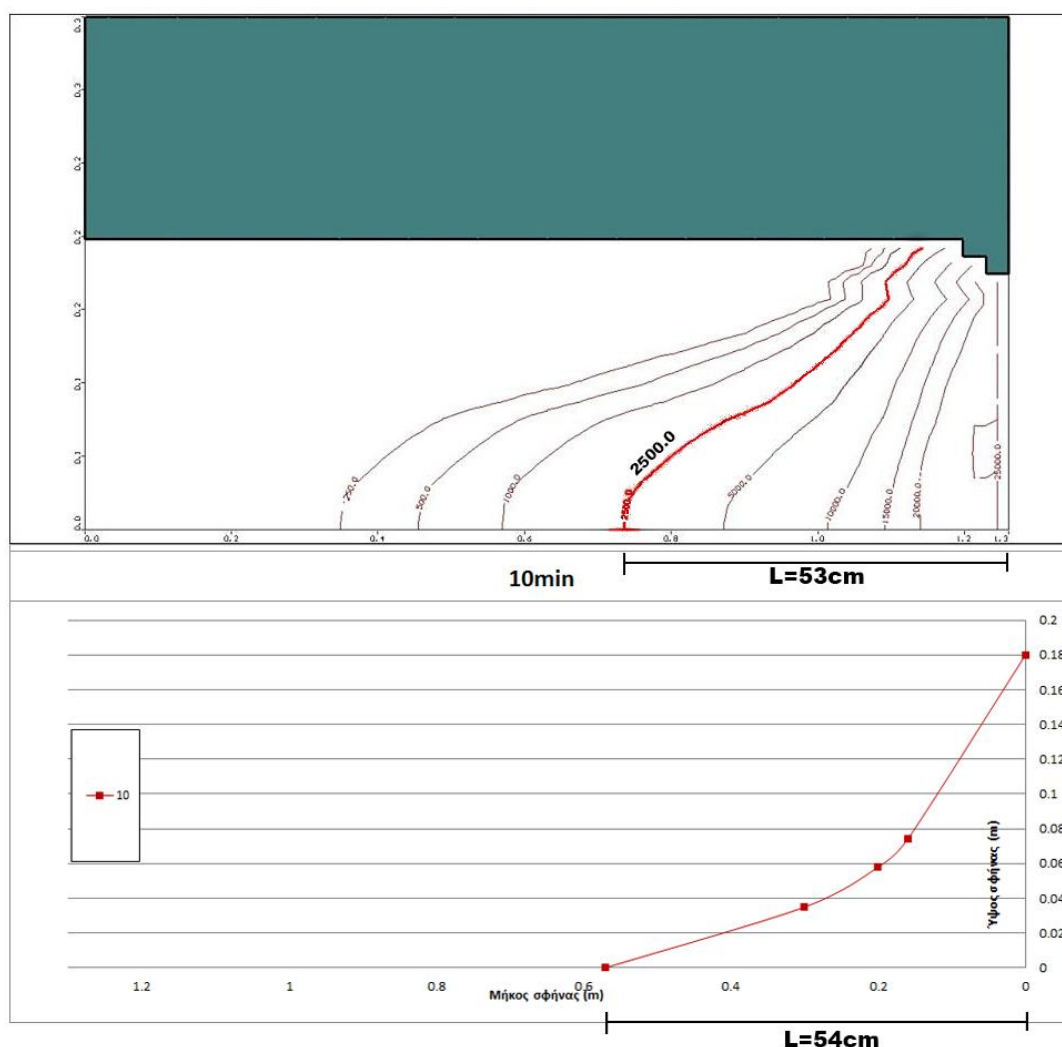
Ακολουθώς τα παραπάνω διαγράμματα τα αντιπαραθέσαμε με το γράφημα στην τομή της περιοχής που ορίσαμε στο πρόγραμμα Visual MODFLOW προσομοιώνοντας την εργαστηριακή μονάδα στα αντίστοιχα χρονικά βήματα, δηλαδή στα 10, 25 και 40 min ή διαφορετικά στο 2^ο , 5^ο και 8^ο βήμα (time step) όπου προέκυψαν τα κάτωθι αποτελέσματα.

5.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 2^ο χρονικά βήμα (10min)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους με τα αντίστοιχα της μοντελοποίησης προκύπτουν τα ακόλουθα σχήματα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι ο δείκτης που χρησιμοποιήσαμε για να χρωματίσουμε το αλμυρό νερό ανιχνεύει το 10% της αρχικής συγκέντρωσης. Το παραπάνω προέκυψε από διαφορετικά πειράματα τα οποία εξήχθησαν στο εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση καμπυλών της 2^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 2^ο χρονικά βήμα (10min)

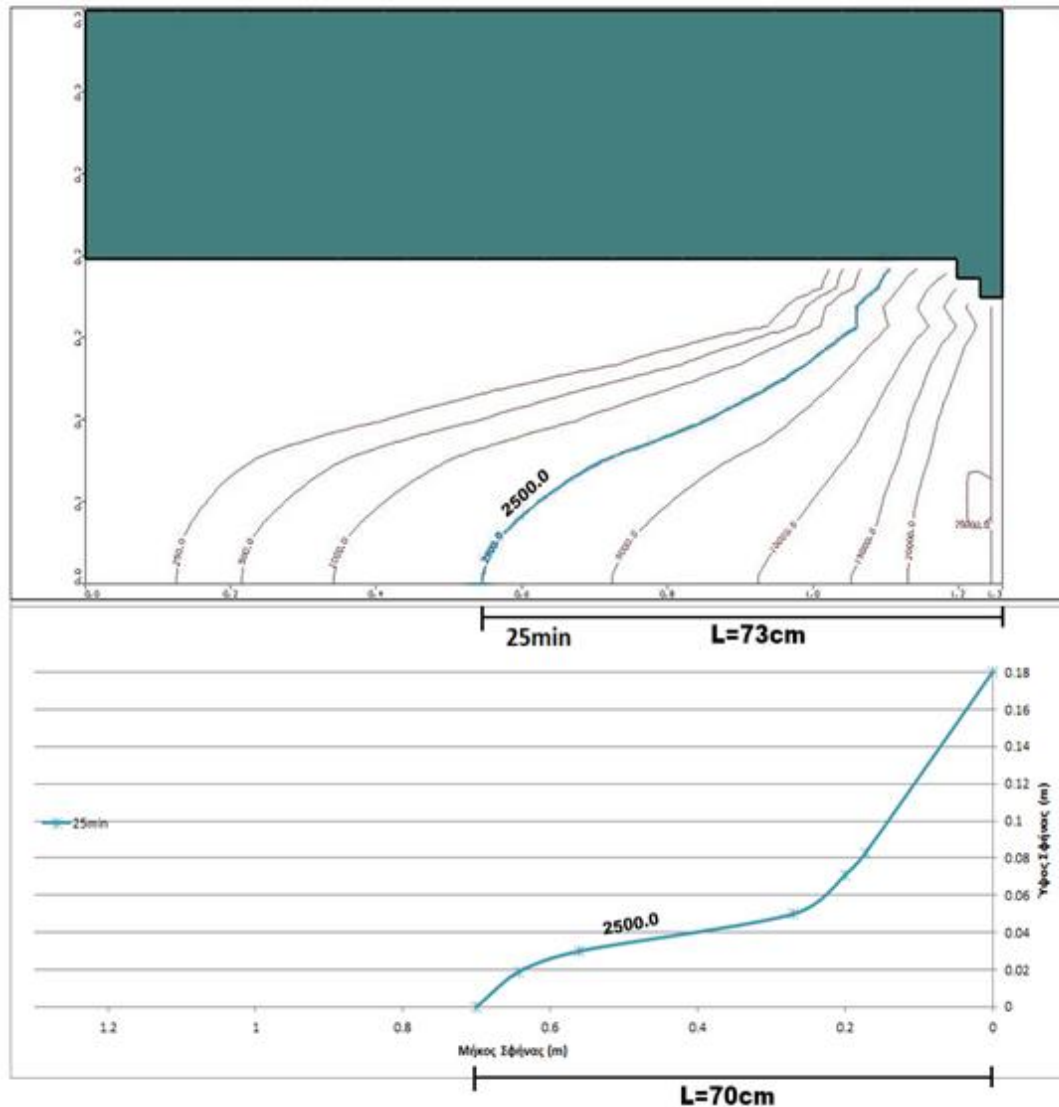


Σχήμα 5.2: Σύγκριση καμπυλών της 3^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 2^ο χρονικά βήμα (10min)

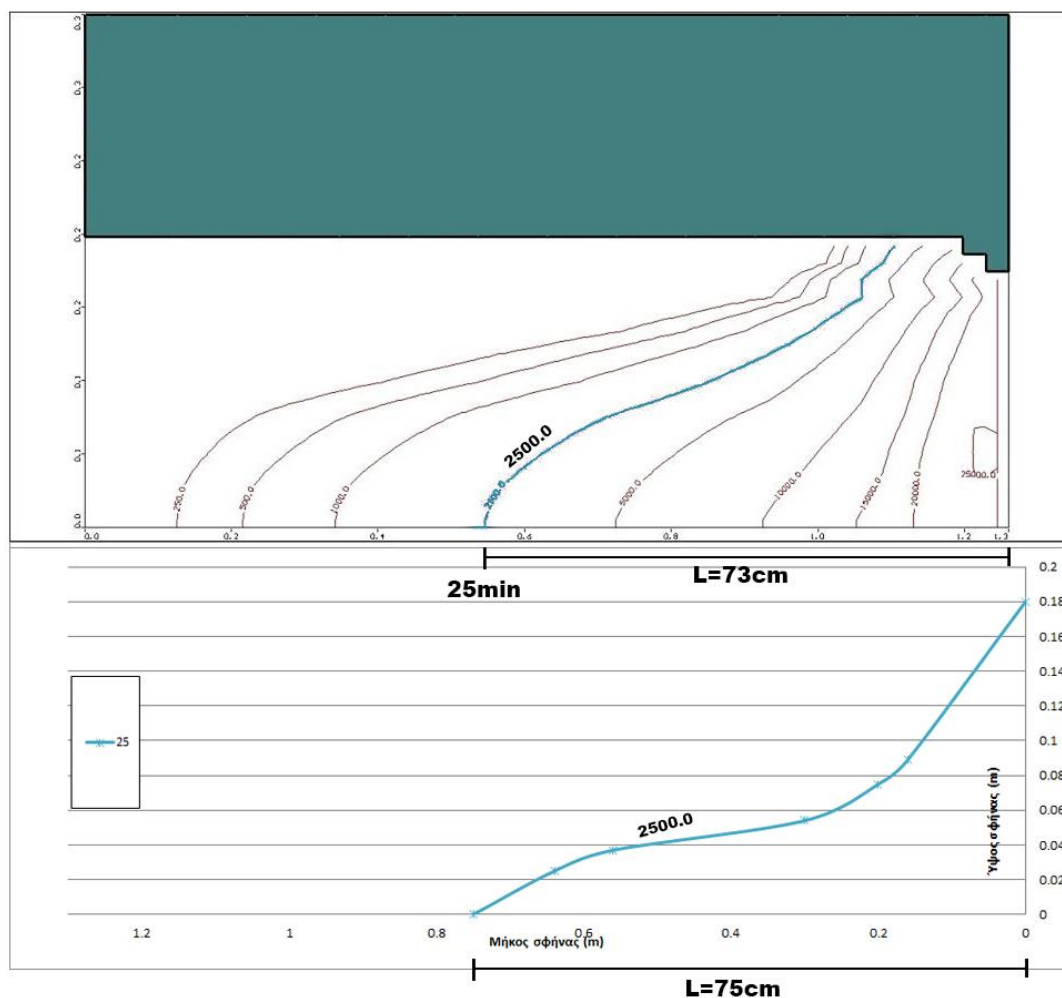
Παρατηρούμε και στις 2 περιπτώσεις ότι η σκιασμένη με κόκκινο χρώμα καμπύλη με συγκέντρωση $C=2,500 \text{ mg/L}$ (10% του $25,000 \text{ mg/L}$) από το γράφημα της μοντελοποίησης έχει εισχωρήσει σχεδόν στην ίδια απόσταση με την αντιστοίχου χρώματος καμπύλη από το πειραματικό μέρος. Δηλαδή υπάρχει σημαντική ταύτιση με τους δύο τρόπους προσομοίωσης του φαινομένου της υφαλμύρισης της θέσης του πόδα της σφήνας. Ωστόσο όπως θα παρατηρηθεί και στα παρακάτω σχήματα υπάρχει απόκλιση, του μετώπου της σφήνας λόγω του φαινομένου της διασποράς του ρύπου δηλαδή του υφάλμυρου νερού, το οποίο δεν είναι ευκρινές για την λήψη μέτρησης στην πειραματική διάταξη με γυμνό μάτι..

5.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 5^ο χρονικά βήμα (25min)

Συνεχίζοντας τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του πειραματικού μέρους και της μοντελοποίησης στο επόμενο χρονικό διάστημα προέκυψαν τα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 5.3: Σύγκριση καμπυλών της 2^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 5^ο χρονικά βήμα (25min)

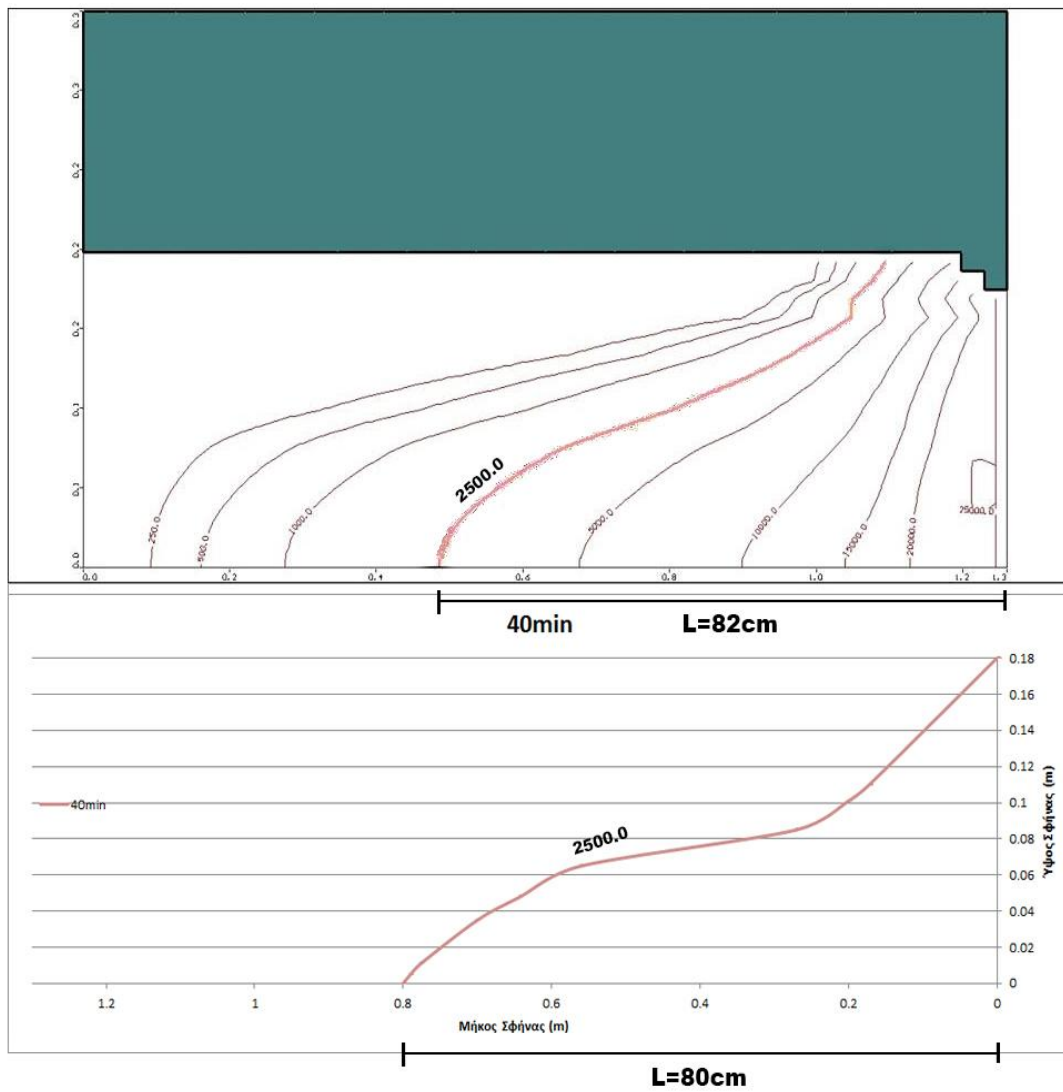


Σχήμα 5.4: Σύγκριση καμπυλών της 3^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 5^ο χρονικά βήμα (25min)

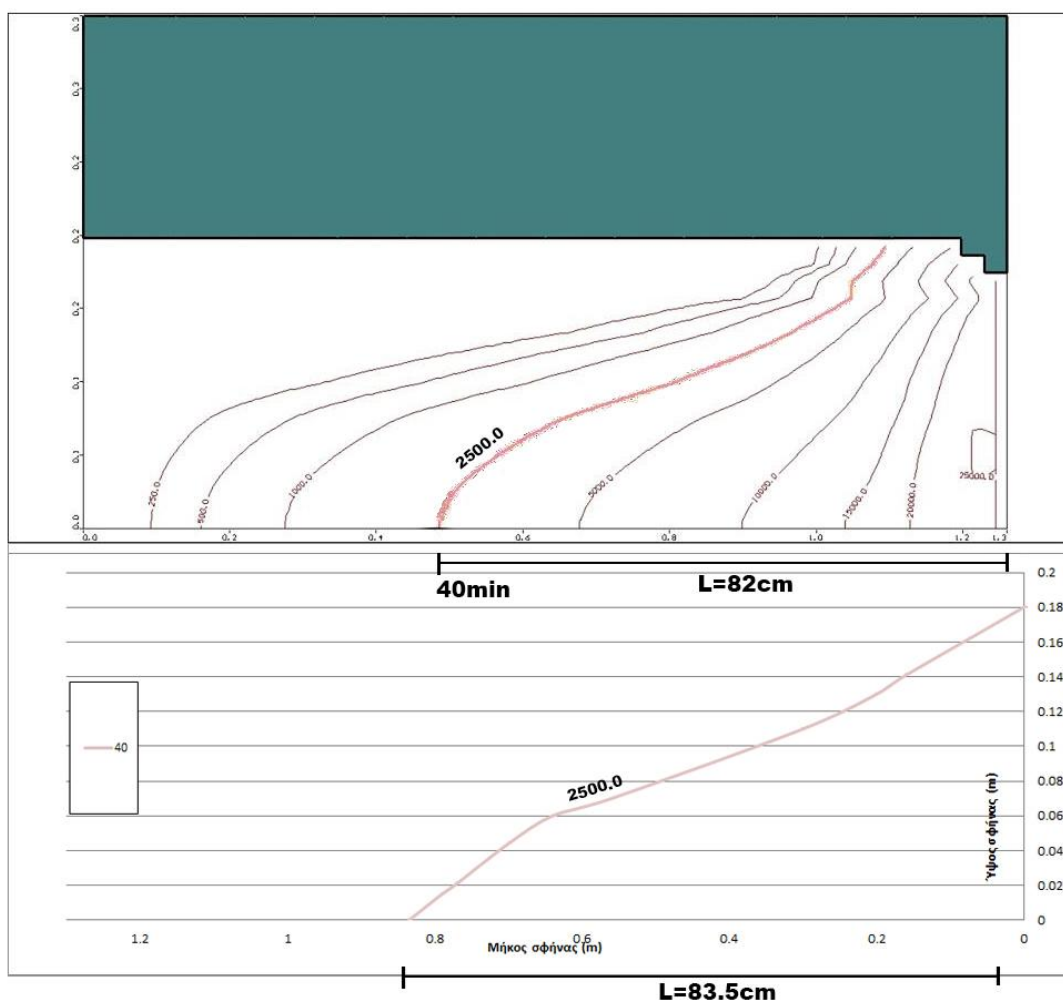
Στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις ότι ο πόδας της σφήνας της σκιασμένης με κυανό χρώμα καμπύλης υφαλμύρινσης, συγκέντρωσης $C=2,500\text{mg/L}$, από τη μοντελοποίηση έχει μία αρκετά μικρή απόκλιση της τάξεως των 2-3cm από την αντιστοίχου χρώματος καμπύλη από το πειραματικό μέρος.

5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων στο 8^ο και τελευταίο χρονικά βήμα (40min)

Στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή έχουμε την ολοκλήρωση του φαινομένου της υφαλμύρινσης στο πειραματικό στάδιο της μελέτης, λόγω εξισορρόπησης των πιέσεων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της χρονικής αυτής περιόδου προέκυψαν τα κάτωθι σχήματα:



Σχήμα 5.5: Σύγκριση καμπυλών της 2^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 8^ο και τελευταίο χρονικά βήμα (40min)



Σχήμα 5.6: Σύγκριση καμπυλών της 3^{ης} μέτρησης του 3^{ου} σετ εργαστηριακών μετρήσεων με του MODFLOW στο 8^ο και τελευταίο χρονικά βήμα (40min)

Στα δύο αντιπαραθετικά αυτά σχήματα ανάμεσα στα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους και στα αντίστοιχα της μοντελοποίησης, παρατηρούμε ότι η σκιασμένη με μωβ χρώμα καμπύλη των 2,500 mg/L έχει μικρότερη απόκλιση από την αντιστοίχου χρώματος καμπύλη που προέρχεται από το πειραματικό μέρος σε σχέση με τα προηγούμενα χρονικά βήματα. Αυτό οφείλεται στο ότι το φαινόμενο είναι σε πλήρη εξέλιξη και σε αυτό το χρονικό βήμα ο μηχανισμός της διασποράς είναι λίγο πιο ευκρινής στην πειραματική διάταξη για την πραγματοποίηση μέτρησης. Ο πόδας της σφήνας εξακολουθεί όπως σε όλα τα βήματα να προσομοιώνεται με επιτυχία. Η απόκλιση και σε αυτό το χρονικό βήμα είναι της τάξεως των 2 εκατοστών στην πρώτη περίπτωση και 1.5 εκατοστό στη δεύτερη. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι στο προηγούμενο υποκεφάλαιο χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των Ghyben –

Herzberg και του Dupuit υπολογίσαμε ότι η σφήνα της υφαλμύρινσης για υδροφορέα με τα συγκεκριμένα υδραυλικά χαρακτηριστικά εισέρχεται σε απόσταση $L=80.6\text{cm}$ (5.4).

Παρατηρώντας λοιπόν την καμπύλη με συγκέντρωση $C=2,500\text{mg/L}$, η οποία αποτελεί το 10% της αρχικής $C_0=25,000\text{mg/L}$, συμπεραίνουμε ότι έχει εισχωρήσει εντός του υδροφορέα κατά $L=82\text{cm}$, ενώ η πειραματική κατά 80 και 83.5 cm αντίστοιχα. Επομένως η μαθηματική προσέγγιση έχει μία πάρα πολύ μικρή απόκλιση σε σχέση με τα παραπάνω δύο σετ τιμών. Τα αποτελέσματα αυτά μας οδηγούν στην επαλήθευση του πειραματικού μέρους της μελέτης από την μοντελοποίηση αλλά και των δύο από την προσέγγιση των Ghyben – Herzberg.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^Ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία και έχοντας αναλύσει εκτενώς το θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου της υφαλμύρινης και παραθέσει τις εξισώσεις που το διέπουν, κρίνεται ότι με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν η εργαστηριακή πιλοτική μονάδα παρέχει τη δυνατότητα μελέτης του φαινομένου σε συνθήκες πραγματικού πεδίου εξετάζοντας ρεαλιστικά εδαφικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων.

Ακόμη, συμπεραίνεται ότι χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Visual MODFLOW-SEAWAT, το οποίο δέχεται μία πλειάδα μεταβλητών, προσδιορίζεται με ακρίβεια η εξέλιξη του μετώπου της υφαλμύρινης. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται μέσω του νόμου των Ghyben – Herzberg, η εξίσωση των οποίων χρησιμοποιήθηκε ως παραδοχή για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης και μελέτης του φαινομένου σε χρόνους και διακριτοποίηση που δεν θα ήταν δυνατά σε εργαστηριακή κλίμακα.

Εν κατακλείδι, η ανάλυση όλων των παραπάνω δεδομένων και η αποτελεσματικότητα του Visual MODFLOW σε συνδυασμό με τον κώδικα προσομοίωσης SEAWAT, δίνει την δυνατότητα για περαιτέρω εργαστηριακή μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινης υπό το πρίσμα διαφορετικών σεναρίων, βλ. επόμενη ενότητα, με σκοπό και στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων και χρήσιμων συμπερασμάτων, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν σε συνθήκες πεδίου σχετικά με τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινης.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αποτελεσματικότητα του προγράμματος Visual MODFLOW και του κώδικα προσομοίωσης SEAWAT παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής στο εργαστήριο πολλών και διαφορετικών σεναρίων, ώστε να μελετηθεί εκτενέστερα το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Τέτοια σενάρια δύναται να είναι τα κάτωθι:

Χρήση διαφορετικού υλικού προσομοίωσης εδάφους: Στην περίπτωση αυτή αναμένονται παρόμοια αποτελέσματα με την παρούσα εργασία, απλώς θα υπάρχουν διαφορετικές τιμές, λόγω, για παράδειγμα, διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας.

Χρήση δύο ή και περισσότερων υλικών προσομοίωσης υπεδάφους σημαντικής διαφοράς κοκκομετρίας σχηματίζοντας στρώματα: Σε αυτήν την περίπτωση θα έχει ενδιαφέρον η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και ιδιαίτερα η απεικόνιση της καμπύλης της υφαλμύρινσης λόγω των σημαντικά διαφορετικών υδραυλικών αγωγιμοτήτων που θα συναντά ο ρύπος στη διαδρομή του εντός του υδροφορέα.

Συνδυασμός των ανωτέρω περιπτώσεων με την τοποθέτηση μίας ή περισσότερων γεωτρήσεων άντλησης και πηγαδιών παρατήρησης: στη συγκεκριμένη περίπτωση θα έχει μεγάλο ενδιαφέρον η παρατήρηση της πειραματικής διαδικασίας, λόγω της δημιουργίας κώνων πτώσης στάθμης, αλλά και η απεικόνιση μέσω της μοντελοποίησης των αποτελεσμάτων.

Συνδυασμός των δύο παραπάνω σεναρίων με ταυτόχρονη παρουσία γεωτρήσεων εμπλουτισμού: Σε αυτό το σενάριο δύναται να προσομοιωθεί ο εμπλουτισμός του υδροφορέα μέσω βροχόπτωσης με τη δημιουργία γεωτρήσεων εμπλουτισμού, όπου θα έχει ενδιαφέρον και η παρατήρηση, αλλά και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων για τυχόν ανάσχεση του φαινομένου της υφαλμύρινσης.

Τέλος συνδυασμός όλων των ανωτέρω σεναρίων με χρήση κατάλληλου φωτογραφικού εξοπλισμού για την ακριβέστερη παρατήρηση του φαινομένου: Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να παρατηρηθεί η εξέλιξη του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις κάνοντας χρήση κατάλληλου φωτογραφικού εξοπλισμού υψηλής ευκρίνειας και λογισμικού ανάλυσης των

φωτογραφιών το οποίο και θα οδηγήσει αφενός σε μία ακριβέστατη απεικόνιση της απότομης διεπιφάνειας και του πόδα της σφήνας της υφαλμύρισης και αφετέρου στον προσδιορισμό, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, του φαινομένου της διάχυσης και της διασποράς που δεν ήταν δυνατόν να παρατηρηθεί με ευκρίνεια από τους παρατηρητές των εργαστηριακών πειραμάτων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ 1^{ΟΥ} ΣΕΤ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Αποτελέσματα 1^{ης} Μέτρησης από το 1^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min		35min		40min		45min	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	6.5	0	7.1	0	7.1	0	7.1	0	7.1	0	7.1	0	7.1	0	7.1	0	7.1
11.05	2.5	11.05	3	11.05	3.2	11.05	3.4	11.05	3.7	11.05	3.9	11.05	4.1	11.05	4.3	11.05	4.6
22.1	0	14.45	2.3	14.45	2.5	14.45	2.7	14.45	2.9	14.45	3.1	14.45	3.3	14.45	3.5	14.45	3.7
		28.9	0	15.3	2.3	15.3	2.5	15.3	2.9	15.3	2.9	15.3	3.1	15.3	3.3	15.3	3.5
				30.6	0	17.65	2.3	17.65	2.5	17.65	2.7	17.65	2.9	17.65	3.1	17.65	3.3
						35.3	0	19.8	2.3	19.8	2.5	19.8	2.7	19.8	2.9	19.8	3.1
								39.6	0	22.35	2.3	22.35	2.5	22.35	2.7	22.35	2.9
										44.7	0	24.2	2.3	24.2	2.5	24.2	2.7
												48.4	0	26.6	2.3	26.6	2.5
														53.2	0	28	2.3
																56	0

Αποτελέσματα 2^{ης} Μέτρησης από το 1^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min	
x	y	x	y	x	Y	x	y	x	y	x	y
0	7.4	0	7.4	0	7.4	0	7.4	0	11	0	11
8	2.8	8	3.5	8	3.9	8	4.3	8	4.8	8	5.3
16	0	10.15	2.8	10.15	3.1	10.15	3.5	10.15	3.8	10.15	4
		20.3	0	10.6	2.9	10.6	3.3	10.6	3.6	10.6	3.8
				21.2	0	13.7	2.5	13.7	3.1	13.7	3.5
						27.4	0	15.2	2.8	15.2	3.3
								30.4	0	18	3
										36	0

Αποτελέσματα 3^{ης} Μέτρησης από το 1^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min	
x	y	x	y	X	y	x	y	x	y	x	y
0	9.5	0	9.5	0	9.5	0	10	0	10	0	10
9.5	5	9.5	5.8	9.5	6.2	9.5	6.5	9.5	6.8	9.5	7.1
19	0	11.5	5	11.5	5.4	11.5	5.8	11.5	6.2	11.5	6.5
		23	0	13	5	13	5.3	13	5.8	13	6.1
				26	0	15.5	4.8	15.5	5.2	15.5	5.6
						31	0	17.5	4.8	17.5	5.2
								35	0	19	5
										38	0

ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ 2^{ΟΥ} ΣΕΤ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Αποτελέσματα 1^{ης} Μέτρησης από το 2^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min		35min	
x	y	x	y	x	Y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	13.8	0	13.8	0	13.8	0	13.8	0	13.8	0	13.8	0	13.8
17.2	6.8	17.2	7.2	17.2	8	17.2	8.4	17.2	8.7	17.2	8.9	17.2	9.2
34.4	0	22.15	5.2	22.15	6	22.15	6.6	22.15	7.1	22.15	7.5	22.15	7.8
		44.3	0	30	3.5	30	4.1	30	4.8	30	5.2	30	5.5
				60	0	33.3	3.5	33.3	4	33.3	4.4	33.3	4.8
						66.6	0	36.2	3.5	36.2	3.7	36.2	4
								72.4	0	40	2.8	40	3.5
										80	0	40.55	3.3
												81.1	0

Αποτελέσματα 2^{ης} Μέτρησης από το 2^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min			10min			15min			20min	
x	y		x	y		x	y		x	y
0	13.8		0	13.8		0	13.8		0	13.8
17.25	4		17.25	4.5		17.25	4.9		17.25	5.3
34.5	0		23.4	2.5		23.4	2.8		23.4	3.2
			46.8	0		26.1	2.2		26.1	2.5
						52.2	0		29.15	2
									58.3	0

Αποτελέσματα 3^{ης} Μέτρησης από το 2^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min	
x	y	x	y	X	y	x	y	x	y	x	y
0	12.3	0	12.3	0	12.3	0	12.3	0	12.3	0	12.3
16.9	5.7	16.9	6.1	16.9	6.6	16.9	6.9	16.9	7.2	16.9	7.8
33.8	0	21.3	4.8	21.3	5.5	21.3	5.9	21.3	6.2	21.3	6.7
		42.6	0	24.6	4.7	24.6	5.3	24.6	5.7	24.6	6.1
				49.2	0	29.15	4.6	29.15	5.1	29.15	5.5
						58.3	0	32.25	4.7	32.25	5.1
								64.5	0	33.35	4.9
										66.7	0

ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 3^{ΟΥ} ΣΕΤ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Αποτελέσματα 1^{ης} Μέτρησης από το 3^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min		35min		40min	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18
17.2	6.8	17.2	7.2	17.2	8	17.2	8.4	17.2	8.7	17.2	8.9	17.2	11	17.2	13
44.3	0	22.15	5.2	22.15	6	22.15	6.6	22.15	7.1	22.15	7.5	22.15	9.4	22.15	11.4
		3A0	3.2	30	3.5	30	4.1	30	4.8	30	5.2	30	7	30	9
		55	0	60	0	33.3	3.5	33.3	4	33.3	4.4	33.3	6	33.3	7.8
						66.6	0	36.2	3.5	36.2	3.7	36.2	5	36.2	6.7
								72.4	0	40	3.3	40	4.2	40	5.9
										80	0	80	0.5	81.1	0.6
												81.1	0	83	0

Αποτελέσματα 2^{ης} Μέτρησης από το 3^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min		35min		40min	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18
15.4	6.5	17.2	7	17.2	7.5	17.2	8	17.2	8.3	17.2	8.6	17.2	10.4	17.2	11
40	0	20	5.2	20	5.2	20	6.1	20	7.1	20	7.2	20	9.2	20	10.1
		27	3	27	3.2	27	4.2	27	5	27	6	27	7.5	27	8.5
		49	0	56	0	56	2	56	3	56	4.1	56	5.8	56	6.5
						64.2	0	64.2	1.9	64.2	3	64.2	4.3	64.2	4.8
								70	0	70	2.1	70	3.1	70	3.5
										77.6	0	77.6	0.6	77.6	1.1
												79	0	79	0.5
														80	0

Αποτελέσματα 3^{ης} Μέτρησης από το 3^ο εργαστηριακό σετ μετρήσεων (x,y σε cm)

5min		10min		15min		20min		25min		30min		35min		40min	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18
16	7.2	16	7.4	16	7.6	16	8.2	16	8.9	16	11	16	13	16	14.1
44	0	20	5.8	20	6	20	6.3	20	7.5	20	9	20	12	20	13
		30	3.5	30	4	30	4.5	30	5.4	30	7	30	8.7	30	11
		57	0	63	0	56	2.3	56	3.7	56	4.5	56	6	56	7
						67	0	64	2.5	64	3.5	64	4.8	64	6
								75	0	70	2.4	70	3.1	70	4.4
										82	0	77	1.5	77	2.1
												83	0	79	1.5
														83.5	0

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. 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 διείσδυσης – 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. Παναγόπουλος, Γ. Π. 2004. Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα των υδροφόρων οριζόντων της ΝΔ Τριφυλίας. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
16. Παππά Α., 2010. Βέλτιστη διαχείριση παράκτιου υδροφορέα με χρήση μοντέλου προσομοίωσης και του μοντέλου βελτιστοποίησης GWM, (Ground Water Management).
17. Σούλιος Γ. 2004, "Γενική Υδρογεωλογία" Τρίτος τόμος, Θεσσαλονίκη.
18. Τάντος Β, 2006, "Περιβαλλοντική Υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου - Κορίνθου. Κατασκευή Μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής", Διπλωματική, Πάτρα.
19. Τριχάκης Ι. 2004, "Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρινσης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ. ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης".

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Abramowitz, Milton, Stegun, Irene A. (1970), Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, New York: Dover Publications, Ninth printing
2. Bobba A.G. 1993, Mathematical models for saltwater intrusion in coastal aquifers. Water resources management, Vol. 7, p.3.
3. Bowen R. 1986, "Groundwater", Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
4. Bear, J. & Dagan, G. (1964) Moving interface in coastal aquifers. /. Hydraul. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, 90 (HY4), 193-216.

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 Assesments. 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 42-53, 2009.
13. Pinder and Gray, ‘Finite elements in water resources’, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Volume 15, Issue 4, 1997.
14. Position Paper on Total Dissolved Solids, State of Iowa, IAC 567 61.3 (2)g et sequitur updated March 27, 2003.
15. 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.

16. Todd D., Groundwater Hydrology, second edition, Wiley, New York, 1980.
17. Tulipano L, Fidelibus M.D, Panagopoulos A (2005). Ground water management of coastal - karstic aquifers. Final report, Luxenburg.
18. Visual Modflow v.4.2 User's Manual, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, 2006.
19. Weixing Guo and Christian D. Langevin, Tallahassee, Florida, 2002. User's Guide to SEAWAT. A Computer Program for Simulation of Three – Dimensional Variable – Density Ground – Water Flow.

Παγκόσμιος Ιστός

1. Stefanos Sakellaridis, 2006-2008. Water on Earth. A commodity in abundance is getting in a “state of emergency”- Part II -. <http://holytrinity.faithweb.com/p-on-Ecology/w03-water-B.htm>, 12/10/2013.
2. Ζαχαριάδη Χ.Ι., Παπαδοπούλου Μ.Π., Καρατζάς Γ.Π. Μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε καρστικοποιημένες παράκτιες περιοχές.
<http://www.etvavipe.gr/smiles/Documents/%CE%91%CE%9D%CE%91%CE%A3%CE%A7%CE%95%CE%A3%CE%97%20%CE%A5%CE%A6%CE%91%CE%9B%CE%9C%CE%A5%CE%A1%CE%99%CE%9D%CE%A3%CE%97%CE%A3.pdf>, 13/10/2013.
3. Καλλέργης Γεώργιος, 2000. “Διαχείριση» ή «Σοφή» χρήση των υπογείων νερών; Ww.waterinfo.gr/eedyp/papers/GKallergis.html, 12/10/2013.
4. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=245&language=el-GR> , τμήμα υδατικών πόρων, 12/10/2013.
5. <http://igwmc.mines.edu/software/igwmcsoft/visualmf.htm?CMSPAGE=igwmc/software/igwmcsoft/visualmf.htm>, Visual MODFLOW, Graphic MODFLOW Interface, 13/10/2013.

