

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικές Αρχές Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Η ανάγκη για όλο και μεγαλύτερη αξιοποίηση των υδατικών πόρων προκύπτει από την αύξηση του πληθυσμού και τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες σε νερό και τροφή αλλά και από την ανάπτυξη που δημιουργεί δραστηριότητες και επομένως μεγαλύτερες ποσότητες νερού.

Τα φαινόμενα αυτά αν συνδυαστούν με την εξαιρετικά περιορισμένη ποσότητα γλυκού νερού στον πλανήτη μας (περίπου 0.33% της συνολικά εκτιμωμένης ποσότητας νερού στη γη) κάνουν επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ελέγχου και διαχείρισης που αποβλέπουν στη βέλτιστη διάθεση των υδατικών πόρων, αυτό που σήμερα ονομάζεται Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ).

Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΔΥΠ) νοείται μια δυναμική διαδικασία που αποβλέπει στην πληρέστερη δυνατή κάλυψη των σημερινών και μελλοντικών αναγκών για κάθε χρήση με βάση έναν ορθολογικό προγραμματισμό που στηρίζεται σε αντικειμενικά κριτήρια και διαδικασίες. Η Δ.Υ.Π. μπορεί να χρησιμεύσει αφενός στην προετοιμασία σχεδίων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο, που να εξασφαλίζουν τη συνετή χρήση του νερού σήμερα αλλά και στο μέλλον, και αφετέρου έχει την ευθύνη της εφαρμογής των σχεδίων με διοικητικά μέτρα και κανονισμούς, καθώς και με τον συντονισμό της κατασκευής υδραυλικών έργων (Γ. Τσακίρης, 1995).

Είναι προφανές ότι η Δ.Υ.Π. είναι μια συνεχής διαδικασία με χρονικό ορίζοντα πολύ μεγαλύτερο από τη μελέτη, την κατασκευή και τη διάρκεια (ορίζοντα) ζωής ενός υδραυλικού έργου. Συνήθως η Δ.Υ.Π. αναφέρεται σε έκταση που καλύπτει περισσότερα του ενός υδραυλικά έργα. Επομένως, παρά το γεγονός ότι χρονικά προηγήθηκαν τα διάφορα υδραυλικά έργα, η Δ.Υ.Π. υπερέχει και στο χώρο των υδραυλικών έργων και επομένως είναι ιεραρχικά υψηλότερα. Σε πολλές περιπτώσεις και περιοχές του κόσμου δεν γίνεται διαχείριση υδατικών πόρων ή γίνεται υποτυπώδης διαχείριση. Συνήθως δεν εφαρμόζεται η Δ.Υ.Π. όπου υπάρχει χαμηλή επικινδυνότητα στην έλλειψη νερού και στη

ρύπανση των υδατικών πόρων. Αντίθετα, όσο η πίεση για απαιτήσεις μεγαλώνουν και η χρήση του νερού δημιουργεί και άλλα προβλήματα, η Δ.Υ.Π. αποκτά περιεχόμενο και συγκεντρώνει την προσοχή του μεγάλου κοινού (Γ. Τσακίρης ,1995).

Οι βασικοί κανόνες διαχείρισης των υδατικών πόρων στηρίζονται στη συνετή χρήση του νερού τώρα και στο μέλλον με αρχές δικαίου και στόχο την διατήρηση των πόρων.

Εντελώς επιγραμματικά οι βασικοί κανόνες διαχείρισης είναι:

- Ισομερής κατανομή μεταξύ των χρηστών με βάση αντικειμενικά κριτήρια.
- Οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού τώρα και στο μέλλον.
- Αποφυγή βλαβών και άλλων αρνητικών συνεπειών(όπως καταστροφή πόρων και περιβάλλοντος).
- Βιωσιμότητα της ανάπτυξης (long-term sustainability of the development)(Γ.Τσακίρης ,1995).

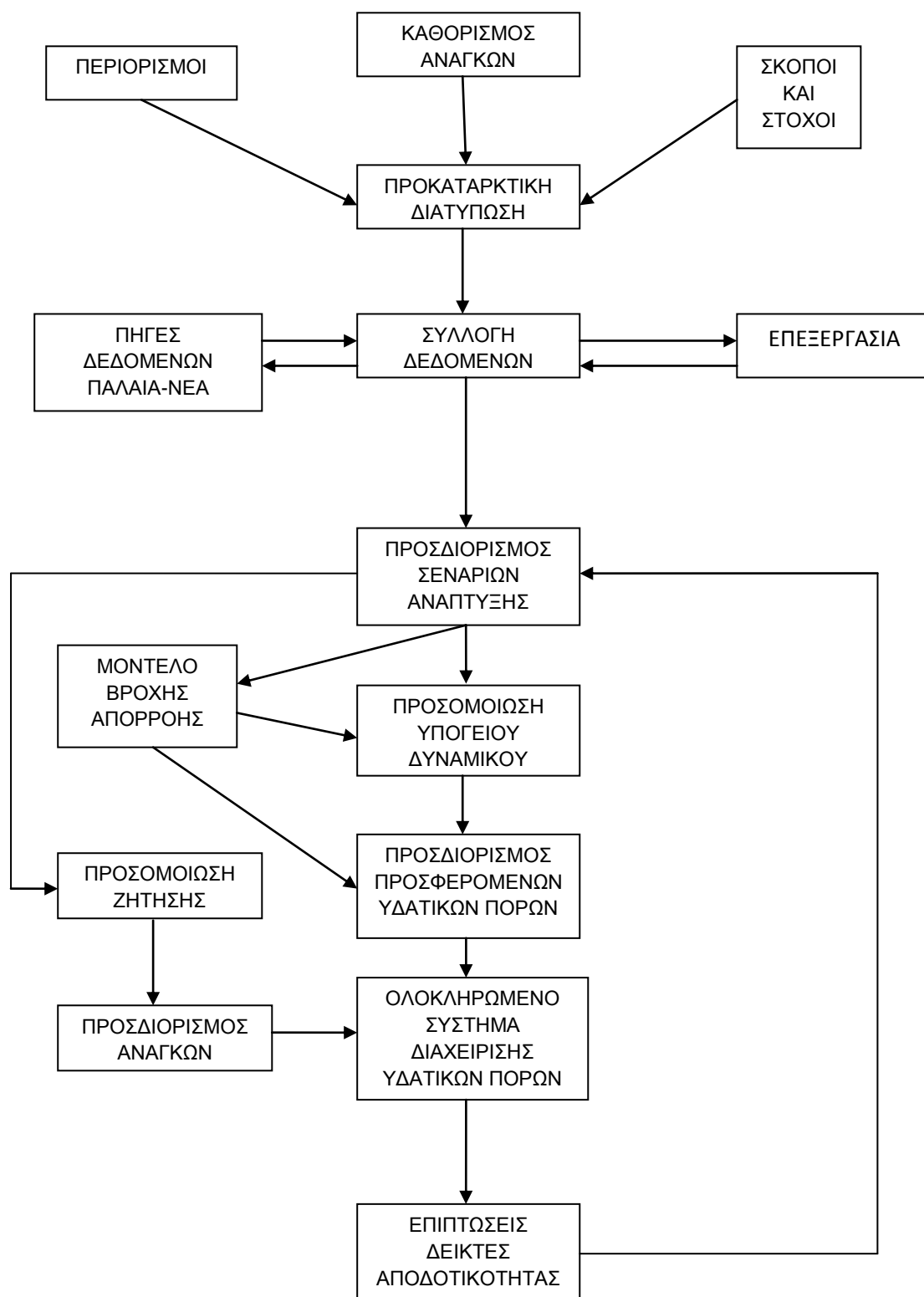
Η αξιοποίηση των υδατικών πόρων μιας περιοχής προϋποθέτει τη γνώση της ποσότητας του νερού που είναι διαθέσιμη για διάφορες χρήσεις στη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή ακριβώς η ποσότητα αποτελεί το σύνολο των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Για να εκτιμηθούν ποσοτικά οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι απαιτείται να προσδιορίζονται τα μεγέθη που εκφράζουν τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και την αβεβαιότητα τους μέσα σε έναν χρονικό και χωρικό ορίζοντα (Ι. Ναλιμπάντης – Γ. Τσακίρης, 2006).

Η διαχείριση υδατικών πόρων αναδεικνύεται σε θέμα σημαντικό για την Ελλάδα γιατί σχετίζεται άμεσα με :

- τον βέλτιστο τρόπο κάλυψης της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης νερού και
- την εξασφάλιση οικολογικής ισορροπίας στο υδατικό και φυσικό περιβάλλον.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό πώς η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου σχεδίου αξιοποίησης υδατικών πόρων αποτελεί επιτακτική ανάγκη για κάθε περιοχή

εξασφαλίζοντας έτσι κάθε φορά τις απαραίτητες ποσότητες νερού για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής με ταυτόχρονη εξασφάλιση της ανανέωσης των αποθεμάτων και της προστασίας του περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 1.1 Διάγραμμα ροής των διαφόρων σταδίων ενός συστήματος διαχείρισης υδατικών πόρων

1.2 Υπόγεια Νερά και Υδροφορείς

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις, για άρδευση πόλεων και χωριών, για άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών και για τη βιομηχανία, βρίσκεται σε δύο μορφές : ως επιφανειακό και ως υπόγειο νερό. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών, ενώ υπόγειο νερό είναι αυτό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών, που για το λόγο αυτό λέγονται και υδροφορείς.

Οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν το σημαντικότερο εκμεταλλεύσιμο υδάτινο πόρο, αφού ο όγκος των υπογείων νερών αντιστοιχεί στο 98% του συνολικού εκμεταλλεύσιμου υδάτινου όγκου και για το λόγο αυτό χρήζουν ευαίσθητης και ιδιαίτερης διαχείρισης για την ποιοτική αλλά και ποσοτική προστασία τους. Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων που χαρακτηρίζονται ως υδατοπερατά. Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών στους οποίους μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό ονομάζονται υδροφορείς ή υδροφόρα στρώματα (Π. Λατινόπουλος , 1995). Η κίνηση αυτή του νερού μπορεί να γίνει είτε κατακόρυφα στην ακόρεστη ζώνη του υδροφορέα είτε οριζόντια στην κορεσμένη ζώνη. Τα περισσότερα προβλήματα, ωστόσο, που αφορούν στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων αναφέρονται στους υδάτινους όγκους που κινούνται στη ζώνη κορεσμού και τα σχετικά φαινόμενα που παρατηρούνται στη ζώνη αυτή.

Ενώ από τους παραπάνω ορισμούς ο διαχωρισμός μεταξύ του επιφανειακού και υπόγειου νερού είναι ξεκάθαρος, στην πραγματικότητα σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει σύνδεση των δύο αυτών υδατικών πόρων. Έτσι, όταν η κοίτη μιας λίμνης ή ενός ποταμού που βρίσκεται σε επαφή με έναν υπόγειο υδροφορέα δεν είναι τελείως φραγμένη από λεπτόκοκκα υλικά, αν δηλαδή με άλλα λόγια υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ λίμνης ή ποταμού και υδροφορέα, τότε, ανάλογα με το ύψος του νερού στους δύο υδάτινους όγκους, δημιουργείται ροή από ή προς τον υδροφορέα.

Τα υπόγεια νερά έχουν ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που είναι σκόπιμο να απαριθμηθούν (Wiener, 1972):

- *Κατανομή στο χώρο.* Ενώ τα επιφανειακά νερά εμφανίζονται είτε σημειακά(πηγές) είτε ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία(ποτάμια) και η αξιοποίηση τους απαιτεί την κατασκευή των υδραυλικών εγκαταστάσεων και άρα τη δυνατότητα χρήσης του νερού μόνο σε συγκεκριμένα τμήματα αυτών των υδάτινων δρόμων, τα υπόγεια νερά, όπου υπάρχουν, καταλαμβάνουν τεράστιες εκτάσεις. Το αποτέλεσμα είναι ότι στις περιοχές ζήτησης νερού αρκεί μια σειρά γεωτρήσεων και απευθείας άντληση από τον υποκείμενο υδροφορέα, κάτι που γίνεται και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
- *Παροχές και διαθέσιμα αποθέματα.* Η χρονική μεταβλητότητα στην παροχή επιφανειακών νερών είναι μεγάλη. Μάλιστα το αξιοσημείωτο είναι ότι οι ελάχιστες τιμές των παροχών συνυπάρχουν με τις μέγιστες τιμές της ζήτησης. Αντίθετα, οι εποχιακές μεταβολές ελάχιστα επηρεάζουν τις στάθμες των υπόγειων νερών σε σύγκριση πάντα με το κορεσμένο σε νερό πάχος του υδροφορέα. Έτσι, τα υδάτινα αποθέματα που αποθηκεύονται στους υπόγειους υδροφορείς είναι τεράστια και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Ακόμα και σε περιόδους αιχμής η ρύθμιση των αποθεμάτων μπορεί να γίνει με μεταβολή των αντλούμενων παροχών των πηγαδιών άντλησης ή και φόρτισης που βρίσκονται σε λειτουργία.
- *Ετήσια και εποχιακή μεταβλητότητα.* Οι μεταβολές των επιφανειακών νερών σε ετήσια αλλά και εποχιακή βάση είναι πολύ πιο έντονες από αυτές των υπόγειων νερών. Αυτό σημαίνει ή ότι χάνονται μεγάλες ποσότητες επιφανειακών νερών στις περιόδους της μικρής ζήτησης ή ότι κατασκευάζονται πανάκριβα υδραυλικά έργα για την αποθήκευση των όγκων που πλεονάζουν για να χρησιμοποιηθούν στις εποχές της μεγάλης ζήτησης. Αντίθετα, η αποθήκευση των υπόγειων νερών γίνεται στους ίδιους τους υδροφορείς και οι ελάχιστες απώλειες από ψηλές στάθμες ελέγχονται με αντλήσεις.
- *Ενέργεια.* Το λειτουργικό κόστος των πηγαδιών είναι σημαντικό ενώ είναι πολύ χαμηλό το κόστος των εγκαταστάσεων.

- *Ποιότητα του νερού.* Σε γενικές γραμμές τα υπόγεια νερά είναι λιγότερο εκτεθειμένα στη ρύπανση ή μόλυνση από ό,τι τα επιφανειακά. Όμως, μια ρύπανση, για παράδειγμα από διαρροή σωλήνων αποχέτευσης ή από σηπτικούς βόθρους ή κάποια διαρροή πετρελαιοειδών μπορούν να δημιουργήσουν καταστάσεις που θα έλεγε κανείς ότι αφορούν μη αντιστρεπτές διαδικασίες. Με άλλα λόγια ο καθαρισμός των μολυσμένων υπόγειων νερών είναι σχεδόν αδύνατος. Εκτός όμως από την αδυναμία καθαρισμού του νερού μέσα στο έδαφος υπάρχει και ένα δεύτερο σοβαρό πρόβλημα που προκύπτει από μια συγκεκριμένη μόλυνση: το γεγονός ότι η ταχύτητα κίνησης του υπόγειου νερού είναι πολύ μικρή έχει ως συνέπεια την παραμονή των μολυσμένων όγκων νερού στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα, προτού δηλαδή αντληθούν ή καταλήξουν με φυσική ροή σε κάποιο υδατόρευμα. Τελικά λοιπόν, ενώ τα υπόγεια νερά προστατεύονται περισσότερο, αν ρυπανθούν καθαρίζονται δυσκολότερα από τα επιφανειακά. Τέλος, για ειδικές περιπτώσεις ρυπαντών που μεταφέρονται με τα υπόγεια νερά το πέρασμα από τα πορώδη εδάφη είναι ευεργετικό. Αυτό γιατί με την προσρόφηση και την ανταλλαγή ιόντων, φαινόμενα που γίνονται εξαιτίας της παρουσίας της στερεάς φάσης του εδάφους, οι μολυσματικές ουσίες παραμένουν στο έδαφος και έτσι ο υδροφορέας λειτουργεί ως ένα είδος φίλτρου. Ακόμα διάφοροι βακτηριακοί μικροοργανισμοί πεθαίνουν παραμένοντας για αρκετό διάστημα στο έδαφος, γεγονός που οφείλεται στις πολύ μικρές ταχύτητες κίνησης του υπόγειου νερού.
- *Επιπτώσεις στη στράγγιση εδαφών.* Σε εδάφη που αρδεύονται η στράγγιση του πλεονάσματος νερού είναι απαραίτητη για την προστασία των καλλιεργειών αλλά και του ίδιου του εδάφους. Έτσι, ο υποβιβασμός της στάθμης των υπόγειων νερών που προκαλείται από αντλήσεις εκμετάλλευσης ενός υδροφορέα έχει μια πρόσθετη ευεργετική επίδραση στη στράγγιση των εδαφών.
- *Καθίζηση εδαφών.* Η άντληση από έναν υδροφορέα όπου το υπόγειο νερό βρίσκεται σε πίεση αυξάνει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων. Έτσι, όταν στον υδροφορέα υπάρχουν αργιλικά ή

ιλυώδη στρώματα η συμπίεση τους γίνεται αισθητά μεγάλη και πολλές φορές προκαλεί καθίζηση του συγκεκριμένου εδάφους.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι ένας υδροφορέας είναι μία μονάδα υδατικού συστήματος, μονάδα που μπορεί να ικανοποιήσει και άλλους σκοπούς, εκτός από το να αποτελεί απλά μια πηγή παροχής νερού. Οι πολλαπλές λειτουργίες ενός υδροφορέα είναι οι εξής (Bear,1979):

- *Πηγή παροχής νερού.* Είναι η πιο βασική αλλά και προφανής λειτουργία. Σε ετήσια βάση οι βροχοπτώσεις ανανεώνουν τα νερά του υδροφορέα έτσι, ώστε τα υπόγεια νερά να μπορούν να θεωρηθούν ως ανανεώσιμοι πόροι. Η επαναπλήρωση του υδροφορέα μπορεί να γίνει ακόμα και από γειτονικά επιφανειακά νερά ποταμών ή λιμνών. Κάτω από φυσικές συνθήκες υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ εισόδου και εξόδου υδάτινων όγκων από το σύστημα του υδροφορέα. Οι αντλήσεις διαταράσσουν αυτό το ισοζύγιο, όμως καθώς ουσιαστικά αφαιρούν όγκους νερού που αλλιώς θα επαναπλήρωναν τα υδατικά αποθέματα στο τέλος έχουν ως συνέπεια τη μείωση των όγκων που βγαίνουν από το σύστημα. Δημιουργείται λοιπόν και πάλι μια ισορροπία στον υδροφορέα που λειτουργεί σαν πηγή παροχής νερού.
- *Δεξαμενή αποθήκευσης.* Οι φρεάτιοι υδροφορείς προσφέρονται θαυμάσια για τη λειτουργία αυτή εξαιτίας της μεγάλης τους έκτασης και γενικά του συνολικού όγκου των διάκενων των εδαφών. Με την τεχνική του τεχνικού εμπλουτισμού είναι δυνατό να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η αποθηκευτική ικανότητα των υδροφορέων.
- *Ο υδροφορέας σαν αγωγός μεταφοράς.* Η λειτουργία αυτή είναι δυνατή μόνο με την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα αφού προϋποθέτει τον έλεγχο της κίνησης του νερού με μεταβολή των υδραυλικών κλίσεων στον υδροφορέα. Μια τέτοια παρέμβαση είναι για παράδειγμα η εισαγωγή νερού με πηγάδια φόρτισης.
- *Ο υδροφορέας σαν φίλτρο καθαρισμού.* Διάφορες τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού μπορούν να εφαρμοστούν με αποκλειστικό στόχο τη λειτουργία υδροφορέα σαν φίλτρο καθαρισμού μολυσμένου νερού. Το κοινό στοιχείο κάθε μεθοδολογίας είναι ότι χρησιμοποιούνται οι σχετικές ιδιότητες καθαρισμού που έχουν οι υδροφορείς και που

οφείλονται τόσο στη στερεά φάση (προσρόφηση κτλ.) όσο και στις πολύ μικρές ταχύτητες ροής των μολυσμένων νερών.

- *Έλεγχος ροών υδατορευμάτων.* Αυτός γίνεται στα ποτάμια αλλά και στις πηγές με τη ρύθμιση της στάθμης των υπογείων νερών στους υδροφορείς που επικοινωνούν υδραυλικά μαζί τους.

1.2 Περιοχή μελέτης

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένας αντίστοιχος υπόγειος, παράκτιος και φρεάτιος υδροφορέας που βρίσκεται στην περιοχή των "ΙΡΙΩΝ" η οποία βρίσκεται νοτιοανατολικά του Ναυπλίου, ανήκει στο Δήμο Ασίνης του Νομού Αργολίδας και έχει έκταση 12.000 στρέμματα.



Εικόνα 1.1 Γεωγραφικός Χάρτης "ΙΡΙΩΝ"

1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η σύνθεση και επεξεργασία των διαθέσιμων υδρογεωλογικών και υδρολογικών δεδομένων και η χρήση των κατάλληλων ποσοτικών εργαλείων και μεθόδων για την προσομοίωση της

ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής με σκοπό την εκτίμηση των εκμεταλλεύσιμων υδατικών αποθεμάτων και την βέλτιστη αξιοποίηση και διαχείρισή τους (Διάγραμμα 1.1).

1.5 Φάσεις της Διπλωματικής Εργασίας

1.5.1 Καθορισμός του αντικειμένου

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον καθορισμό του αντικειμένου και του σκοπού της εργασίας με σαφήνεια έτσι ώστε να είναι κατανοητά τα στοιχεία που είναι αναγκαία για την εξέλιξή της.

1.5.2 Συλλογή στοιχείων

Στη φάση αυτή πραγματοποιείται η συλλογή των στοιχείων εκείνων, που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των παραμέτρων εκείνων που αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης. Τα στοιχεία αυτά αφορούν μετεωρολογικά στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Ε.Μ.Υ. για την εκπόνηση της εργασίας, στατιστικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από την Ε.Σ.Υ.Ε. και το Υπουργείο Γεωργίας και υδρολογικά και γεωλογικά στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τον Δρ. Υδρογεωλόγο Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο. Επίσης, αρκετά στοιχεία, καθώς και αντίστοιχη βιβλιογραφία συλλέχθηκαν από την κεντρική βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π., από διαδικτυακούς τόπους καθώς και από παλαιότερες διπλωματικές εργασίες.

1.5.3 Επεξεργασία στοιχείων

Για τον υπολογισμό του πιεζομετρικού φορτίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surfer 8, ενώ η προσομοίωση του υδροφορέα έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος SEAWAT το οποίο είναι ένας συνδυασμός του κώδικα MODFLOW και του κώδικα MT3DMS (το υδατικό ισοζύγιο πάρθηκε από παλαιότερη διπλωματική εργασία, Χατζούλη Ε., Φεβρουάριος 2005).

1.5.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο στάδιο της αξιολόγησης των στοιχείων γίνεται προσπάθεια αποτίμησης των εκτιμήσεων και υπολογισμών που προκύπτουν από το στάδιο της επεξεργασίας των στοιχείων και αφορούν την περιοχή μελέτης. Στη φάση αυτή γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την κατάσταση και συμπεριφορά του υδροφορέα στο χρονικό διάστημα που εξετάζεται και προτείνονται κάποιες εναλλακτικές λύσεις με σκοπό να γίνει πλήρως εκμεταλλεύσιμος αποφεύγοντας την ποσοτική και ποιοτική κυρίως υποβάθμιση των υδάτων του.

2. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΩΝ ΙΡΙΩΝ

2.1 Γεωγραφία των Ιρίων

Η περιοχή «Ίρια» βρίσκεται νοτιοανατολικά του Ναυπλίου ανήκει στο νομό Αργολίδας και έχει έκταση 12.000 στρέμματα, από τα οποία αρδεύονται περίπου τα 10.000 στρέμματα (83.3%). Οι εκτάσεις που αρδεύονται, διακρίνονται σε εσπεριδοειδή(πορτοκάλια, μανταρίνια κ.α.), σε κηπευτικά (μαρούλια, αγκινάρες κ.α.), καπνός. Η φυτοκάλυψη της περιοχής είναι πολύ σημαντική, λόγω της έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης που καταλαμβάνει σχεδόν ολόκληρη την πεδινή έκταση. Έτσι, η γεωργία αποτελεί το βασικό τομέα απασχόλησης των κατοίκων και ακολουθούν πολύ λιγότερο η κτηνοτροφία και η ενασχόληση με τουριστικές επιχειρήσεις τους θερινούς μήνες.



Εικόνα 2.1 Γεωγραφικός Χάρτης "ΙΡΙΩΝ"

Τα Ίρια είναι ένα μικρό παραθαλάσσιο χωριό του νομού Αργολίδας. Χαρακτηριστικό του είναι το γραφικό ψαράδικο λιμανάκι, στο οποίο αγκυροβολούν οι ψαρόβαρκες και τα πρώτα σπίτια της παραλίας των Ιρίων τα οποία ξεχωρίζουν για το παραδοσιακό τους χρώμα. Εξάλλου, ένα ακόμη γνώρισμα του χωριού είναι ότι διατηρεί ως ένα βαθμό το τοπικό του χρώμα.

Τόσο η αρχιτεκτονική του οικισμού, όσο και οι ρυθμοί της καθημερινής ζωής των κατοίκων παραπέμπουν σε περασμένες εποχές. Ο δρόμος για τα Ίρια περνά από τον εύφορο κάμφο που στο μεγαλύτερο τμήμα του καλλιεργούνται αγκινάρες. Ο κάμπος του είναι γνωστός για τη μεγάλη παραγωγή αγκινάρας όπου το πολιτιστικό κέντρο της περιοχής οργανώνει εκδηλώσεις κάθε χρόνο με παραδοσιακούς χορούς και λαϊκή ορχήστρα, όπως και φαγητό με βάση την αγκινάρα. Τα περισσότερα σπίτια του χωριού είναι κτισμένα σε ένα χαμηλό λοφίσκο.

Η παραλία των Ιρίων που βρίσκεται μετά από αυτή της Κάντιας, συγκεντρώνει πλήθος λουόμενων. Αν και δεν είναι οργανωμένη προσελκύει τους λάτρεις της κολύμβησης και κυρίως όσους προτιμούν τις βοτσαλωτές παραλίες. Κατά μήκος της παραλιακής οδού λειτουργούν πολλές ταβέρνες και μεζεδοπωλεία.

2.2 Μορφολογία της περιοχής

Η περιοχή Ίρια που διερευνείται είναι μια παράκτια περιοχή, ανοικτή προς τον κόλπο της Αργολίδας. Διαμορφώνεται ως ισοσκελές τρίγωνο, με μια κατεύθυνση από την ανατολή στη δύση, η βάση της οποίας διαμορφώνει την παράκτια ζώνη. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται μεταξύ του πρόποδα των ορεινών συγκροτημάτων Μαυροβούνι στο βορρά και Διδύμου στο νότο. Διασχίζεται από το ποταμό Καρνεζαϊκό ή Διπόταμο, το μήκος του οποίου, από την έξοδό του έως τη σύνδεση των δύο μεγάλων κλάδων προς τα πάνω, είναι 17 χλμ. Από τη σύνδεση και προς τα πάνω, ο ένας κλάδος επεκτείνεται στο Βορρά για ένα μήκος 10 χλμ. περίπου, ενώ ο άλλος επεκτείνεται στην ανατολή για ένα μήκος 9 χλμ. Στο τμήμα της πεδιάδας που διασχίζει ο ποταμός χωρίζεται σε δύο κλάδους, ο ένας Βόρεια και ο άλλος Νότια. Η περιοχή της λεκάνης απορροών είναι περίπου 200 km². Το ανάγλυφο της περιοχής διακρίνεται σε:

- Μια πεδιάδα που είναι στο σύνολο της σχεδόν επίπεδη με υψόμετρο μηδέν στην παράκτια ζώνη,
- Σε ένα ορεινό όγκο στην άκρη της λεκάνης απορροών όπου το υψόμετρο φτάνει στα 800m και περισσότερο.

Η κλίση της επιφάνειας του εδάφους στην πεδιάδα είναι της τάξης του 0.7% ενώ στα ορεινά τμήματα που περιβάλλουν την πεδιάδα, με την απότομη αύξηση του ύψους, οι κλίσεις είναι 30% ή και περισσότερο. Το δίκτυο απορροών δεν είναι ομοιόμορφο διότι αναπτύσσονται επιφάνειες οι οποίες καλύπτονται από τους διαφορετικούς πετρολογικούς τύπους (αλλουβιακά, ασβεστόλιθοι, κερατόλιθοι, διαβάσεις και τοφώδεις σχηματισμοί). Εκτός από την παράκτια περιοχή, όπου παρατηρούνται τα αλλούβια υλικά, ένα μεγάλο μέρος της λεκάνης απορροών αποτελείται από τους διαφορετικούς τύπους ασβεστόλιθων. Αυτοί οι σχηματισμοί, διακρίνονται από την περιεκτικότητά τους σε πυριτικά άλατα και παρουσιάζουν μεταβλητό βαθμό διάβρωσης και καρστικοποίησης.

2.3 Ιστορικά Στοιχεία-Αρχαιολογικά Ευρήματα

Στην περιοχή των Ιρίων υπάρχει το ναυάγιο του ακρωτηρίου των Ιρίων που το IENAE (Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών) το χρονολογεί το 1200 π.Χ. Βρέθηκε το 1962, στο βυθό κοντά στο Ακρωτήριο των Ιρίων, στη νότια ακτή της Αργολίδας. Ο Νίκος Τσούχλος εντόπισε ένα ναυαγισμένο φορτίο πήλινων αγγείων, σε απόσταση περίπου 15 μέτρων από τη βραχώδη ακτή και σε βάθος από 12 έως 27 μέτρα.

Με βάση τα δεδομένα της ανασκαφής το φορτίο ανήκε σε πλοίο που το μήκος του δεν ξεπερνούσε τα 10 μέτρα. Η ναυπήγησή του θα είχε γίνει με την «κελυφική» τεχνική, σύμφωνα με την οποία πρώτα τοποθετούνταν οι σανίδες του κελύφους και μετά συμπληρωνόταν ο σκελετός του σκάφους. Το φορτίο του αποτελούσαν πήλινα αγγεία μικτής προέλευσης, όπως συμβαίνει στα περισσότερα αρχαία ναυάγια. Διατηρήθηκαν 25 από αυτά, που θα αποτελούσαν τον κύριο όγκο του φορτίου προερχόμενα από τρεις περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου, πίθοι από την Κύπρο, αμφορείς από την Πελοπόννησο, καθώς και ψευδόστομοι αμφορείς από την Κρήτη, για την αποθήκευση και τη μεταφορά λαδιού και κρασιού. Ένα μονόξυλο δεν θα μπορούσε να μεταφέρει εμπορεύματα και ανθρώπινο δυναμικό.

Το κεραμικό σύνολο των Ιρίων αποτελεί πολύτιμη απτή μαρτυρία για το θαλάσσιο διαμετακομιστικό εμπόριο στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου στο τέλος ακριβώς του 13 ου αιώνα π.Χ. Το εμπορικό πλοίο των Ιρίων

ακολουθούσε, ίσως, με ενδιάμεσο σταθμό την Κρήτη ή άλλα νησιά του Αιγαίου, ένα δρομολόγιο από την Κύπρο προς την Αργολίδα.

Η ιδιαίτερη σημασία του ναυαγίου για την μελέτη των εμπορικών σχέσεων μεταξύ Κύπρου και Αιγαίου οδήγησε τους ανασκαφείς στην ολοκλήρωση της μελέτης και της συντήρησης του αρχαιολογικού υλικού σε τέσσερα μόλις χρόνια μετά το πέρας της ενάλιας έρευνας. Η παρουσίασή του αποτέλεσε αντικείμενο διεθνούς επιστημονικής συνάντησης που οργάνωσε το ΙΕΝΑΕ στις Σπέτσες τον Σεπτέμβριο του 1998, ενώ το φορτίο του πλοίου εκτίθεται μόνιμα στο Μουσείο Σπετσών (Πηγή: ΙΕΝΑΕ Ινστιτούτο Εναλίων Αρχαιολογικών Ερευνών).

2.4 Διοικητική Διάρθρωση

Τα Ίρια διοικητικά ανήκουν στον Νομό Αργολίδας και πιο συγκεκριμένα στο Δήμο Ασίνης του Νομού Αργολίδας. Ο Δήμος Ασίνης βρίσκεται στα δυτικά του νομού στις ανατολικές ακτές του Αργολικού κόλπου. Συνορεύει με τους Δήμους Ναυπλίου, Κρανιδίου, Επιδαύρου και Ασκληπιείου, περιλαμβάνει πέντε δημοτικά διαμερίσματα και έχει πληθυσμό 6.117 κατοίκους. Έδρα του Δήμου είναι το χωριό Δρέπανο.



Εικόνα 2.2 Δήμος Ασίνης (Πηγή Ε.Σ.Υ.Ε.)

ΔΗΜΟΣ ΑΣΙΝΗΣ	
Δ.Δ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ
Δρεπάνου	1698
Ασίνης	1279
Ιρίων	932
Καρνεζαίικων	147
Τολού	2061

Πίνακας 2.1 Πληθυσμός Δ. Ασίνης ανά Δ.Δ. (Ε.Σ.Υ.Ε., 2001)

2.5 Ανθρωπογενή Στοιχεία

2.5.1 Πληθυσμιακά Στοιχεία

Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, ο μόνιμος πληθυσμός του συνόλου των Ιρίων ανέρχεται σε 650 κατοίκους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία της απογραφής ανά δημοτικό και κοινοτικό διαμέρισμα, κοινότητα και οικισμό.

	ΔΗΜΟΣ ΑΣΙΝΗΣ	6.117
	Δ.Δ.Δρεπάνου	1.698
01	Δρέπανον,το	1.338
02	Βιβάριον,το	288
03	Καλλιθέα,η	46
04	Μαραθέα,η	4
05	Νέα Μαραθέα,η	22
	Δ.Δ.Ασίνης	1.279
01	Ασίνη,η	1.064
02	Αγία Παρασκευή,η	181
03	Παραλία Ασίνης,η	34

	Δ.Δ.Ιρίων	932
01	Ίρια,τα	650
02	Κάντια,η	235
03	Κατσιγιανναίικα,τα	40
04	Πλατειά,η (νησίς)	7
05	Ψηλή,η (νησίς)	0
	Δ.Δ.Καρνεζαίικων	147
01	Καρνεζαίικα,τα	44
02	Άνω Καρνεζαίικα,τα	36
03	Καναπίτσα,η	23
04	Σταυροπόδιον,το	44
	Δ.Δ.Τολού	2.061
01	Τολόν,το	1986
02	Άγιος Αντώνιος,ο	75
03	Δασκαλειό,το (νησίς)	0
04	Κορωνήσι,το (νησίς)	0

Πίνακας 2.2 Μόνιμος πληθυσμός, δήμοι, κοινότητες, δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα και οικισμοί Ν. Αργολίδας (Ε.Σ.Υ.Ε. , 2001)

2.5.2 Παραγωγικοί τομείς

Η οικονομία της Περιφέρειας Πελοποννήσου στηρίζεται κατά κύριο λόγο στον πρωτογενή τομέα και στον τριτογενή, ενώ μειώνεται η σημασία και ο ρόλος του δευτερογενή.

2.5.2.1 Πρωτογενής Τομέας

Γεωργία

Η συμμετοχή του Νομού στον πρωτογενή τομέα ανέρχεται στο 29,6% του ΑΕΠ και δεν διαφοροποιείται σημαντικά από την περιφέρεια, όσον αφορά στα βασικά γεωργικά προϊόντα. Με τη γεωργία ασχολούνται περίπου 16.100

οικογένειες. Από αυτές 12.230 οικογένειες ή ποσοστό 77% είναι καθαρά γεωργικές και 3.780 οικογένειες ή 23% έχουν τη γεωργία ως δεύτερο επάγγελμα.

Η καλλιεργούμενη έκταση του Νομού ανέρχεται σε 710.000 στρέμματα περίπου, εκ των οποίων 228.000 στρέμματα ή 32,1% είναι αρδευόμενα. Η μέση έκταση γεωργικής εκμετάλλευσης κυμαίνεται από 38 στρέμματα στις πεδινές περιοχές μέχρι 57,4 στρέμματα στις ορεινές, με μέσο μέγεθος για ολόκληρο το Νομό 44 στρέμματα.

Οι περισσότερες γεωργικές εκτάσεις του Νομού καταλαμβάνονται από δενδρώδεις καλλιέργειες, οι οποίες αυξάνονται διαχρονικά και κυριαρχούνται από ελιές και εσπεριδοειδή. Οι εξαγωγές εσπεριδοειδών του νομού αντιπροσωπεύουν το 50% των εξαγωγών της χώρας για το είδος αυτό. Με σημαντικό μερίδιο στο ακαθάριστο προϊόν από τη γεωργία τα τελευταία χρόνια συμμετέχουν οι θερμοκηπιακές μονάδες ανθοκομικών και κηπευτικών προϊόντων.

Κτηνοτροφία

Η συμμετοχή της κτηνοτροφίας στο συνολικό ακαθάριστο γεωργοκτηνοτροφικό εισόδημα του Νομού είναι 16,37% περίπου. Όσον αφορά στην κτηνοτροφική παραγωγή ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία σε όλα τα είδη του ζωικού κεφαλαίου, εξαιρέσεις παρατηρούνται στα πρόβατα (20%) του συνόλου της Περιφέρειας, στις αίγες (παρουσιάζονται αυξητικές τάσεις) και στη μελισσοκομία.

Αλιευτική παραγωγή

Ο Νομός συγκεντρώνει περίπου το 50% της συνολικής ακαθάριστης αξίας της αλιευτικής παραγωγής της Περιφέρειας. Η αλιεία συμμετέχει στο συνολικό ακαθάριστο εισόδημα κατά 13%. Η αλιευτική παραγωγή του Νομού προέρχεται από την ελεύθερη αλιεία, τις λιμνοθάλασσες, τα θυνεία και τις ιχθυοκαλλιέργειες ή τις υδατοκαλλιέργειες γενικότερα. Η παραγωγή αυτή ανέρχεται στους 8.500 τόνους περίπου ετησίως.

2.5.2.2 Δευτερογενής Τομέας

Η συμμετοχή του Νομού στο δευτερογενή τομέα, ανέρχεται στο 18,3%. Οι κυριότεροι κλάδοι βιομηχανίας στο Νομό είναι:

- Επεξεργασία φρούτων, χυμοποιεία, ελαιοτριβεία.
- Μηχανουργεία, κατασκευή αντλιών.
- Παραγωγή πλαστικών σωλήνων, εξαρτημάτων τεχνικών παροχών κ.α.
- Επεξεργασία μαρμάρων και ειδών λαϊκής τέχνης.

Το μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής στο συνολικό προϊόν του δευτερογενή τομέα κατέχει η μεταποίηση, η οποία όμως ακολουθεί φθίνουσα πορεία (51% το 1994). Ο κλάδος των κατασκευών συμμετέχει με ποσοστό 40% το 2000, παρουσιάζοντας μεγάλη αύξηση τα τελευταία χρόνια (έναντι 29% το 2005).

Η Αργολίδα είναι από τους κυριότερους Νομούς σε αποθέματα μαρμάρων καλής ποιότητας. Υπάρχουν περίπου πενήντα μισθωμένα λατομεία μαρμάρων στην περιοχή της Αργολίδας κυρίως στις τοποθεσίες Καρνεζαΐικα, Δίδυμα, Λυγουριό, Επίδαυρο, Ηλιόκαστρο. Απ' αυτά στα είκοσι πέντε περίπου γίνεται πλήρης εκμετάλλευση με εξαγωγική δραστηριότητα. Τα διακοσμητικά πετρώματα, σαν πρώτη ύλη στο Νομό, βρίσκονται σε μικρή πλέον ποσότητα εξ' αιτίας της μορφολογίας του εδάφους και της μεγάλης μη ορθολογικής εκμετάλλευσης που έγινε στο παρελθόν.

2.5.2.3 Τριτογενής Τομέας

Ο τριτογενής τομέας είναι αυτός με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στη διάρθρωση του ακαθάριστου προϊόντος της Περιφέρειας, η οποία κατά το 2001 ανέρχεται στο 46%. Ο τομέας παρουσιάζει αυξητική τάση από την άποψη της συμμετοχής στο προϊόν της Περιφέρειας, αν και παραμένει σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά σε επίπεδο χώρας (60% το 2001). Ο τουριστικός τομέας αποτελεί την οικονομική δραστηριότητα η οποία σχεδιάζεται να στηρίξει την αναπτυξιακή προοπτική της Περιφέρειας και του Νομού, παρέχοντας υπηρεσίες υπερτοπικού χαρακτήρα. Η συμμετοχή του Νομού στον τριτογενή τομέα, παρουσιάζει σημαντική επιτάχυνση, ειδικά μετά το 1991, με ποσοστό συμμετοχής 52,1%. Η συμβολή του τουρισμού στην

ανάπτυξη του Νομού και στην εξάλειψη των ανισοτήτων είναι σημαντική, δεδομένου ότι η πλειοψηφία της ξενοδοχειακής υποδομής της Περιφέρειας βρίσκεται στην Αργολίδα (138 μονάδες και 11.868 κλίνες).

Ο Νομός Αργολίδας συγκαταλέγεται μεταξύ των Νομών εκείνων που συγκεντρώνουν τουρισμό μαζικού κυρίως χαρακτήρα. Δηλαδή, επισκέπτες καταφτάνουν οργανωμένοι σε ομάδες με οργανωμένο πρόγραμμα διακίνησης, διαμονής και αναψυχής, για συγκεκριμένο χρόνο, σε προεπιλεγμένους τόπους, έχοντας συνήθως προπληρώσει τις διακοπές τους σε γραφείο τουρισμού. Το μήκος των ακτών του Νομού είναι 230 χιλιόμετρα (εξαιρουμένης της Τροιζηνίας). Το συνολικό μήκος των ακτών που προσφέρονται για κολύμβηση εκτιμάται σε συνολικό μήκος 56,5 χιλιόμετρα. Ήτοι το 24,7% του συνολικού μήκους ακτών του Νομού.

Η Αργολίδα είναι ιδιαίτερα πλούσια σε αρχαιολογικούς και λοιπούς πολιτιστικούς πόρους. Η γη της είναι σπαρμένη με αρχαία ερείπια, βυζαντινά και μεταβυζαντινά μνημεία, κάστρα και φρούρια, νεώτερα μνημεία, ιστορικούς τόπους, τόπους ιδιαίτερου φυσικού κάλλους και παραδοσιακούς οικισμούς, κατοικημένη από τη Μεσολιθική εποχή (8000 π.Χ.) υπήρξε σε όλη την αρχαιότητα ένα από τα σημαντικότερα κέντρα της Πελοποννήσου. Οι μείζονος εθνικής και διεθνούς εμβέλειας αρχαιολογικοί χώροι που βρίσκονται στο νομό είναι:

- Οι Μυκήνες, περίφημη μυκηναϊκή ακρόπολη με τα κυκλώπεια τείχη, το ανάκτορο και τους βασιλικούς τάφους.
- Η Επίδαυρος, όπου υπάρχει το ιερό του Θεραπευτού θεού Ασκληπιού και το φημισμένο μεγάλο θέατρο.
- Οι Μυκηναϊκές ακροπόλεις της Τίρυνθας και της Μιδέας.
- Το πρωτοελλαδικό "ανάκτορο" της Λέρνας.
- Το ιερό της Ήρας (Ηραίο) έξω από το Άργος.
- Η Αγορά και το Θέατρο του Άργους.
- Επίσης, η πόλη του Ναυπλίου έχει να επιδείξει σημαντικό πλούτο μνημείων ιστορικού, πολιτιστικού και αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, όπως είναι το Φρούριο Παλαμηδίου, η Ακροναυπλία και το Μπούρτζι.

2.6 Υφιστάμενες Υποδομές

Τα τελευταία χρόνια στο νομό Αργολίδας έχουν πραγματοποιηθεί πολύ σημαντικά έργα τόσο στην άρδευση όσο και στην ύδρευση τα οποία έχουν βοηθήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό στη σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής.

2.6.1 Άρδευση

Τα πρώτα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα κατασκευάστηκαν τη δεκαετία του '60 για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών πέριξ των πηγών Κεφαλαρίου – Λέρνης, απ' όπου αντλούσαν νερό. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν δίκτυα για την περιοχή Ασίνης – Λευκακίων που μετέφεραν νερό από την πηγή Κιβερίου, όπου και έγιναν τα πρώτα έργα σύλληψης του νερού (Ζυμής, 1990). Το 1970 στην πηγή αυτή κατασκευάστηκε ένα από τα ελάχιστα παγκοσμίως έργα σύλληψης καθαρού νερού από υποθαλάσσιες καρστικές πηγές μέσα στην ίδια τη θάλασσα, ένα ημικυκλικό φράγμα με θυρίδες που ανοιγοκλείνουν ώστε να διατηρούν τη στάθμη του νερού εντός του φράγματος υψηλότερα από τη στάθμη της θάλασσας. Για την άντληση του νερού έχουν εγκατασταθεί τέσσερις αντλίες με δυνατότητα άντλησης 40.000 m³/h, ενώ υπάρχει χώρος για τοποθέτηση και πέμπτης αντλίας με 12.000 m³/h. Σήμερα το συλλογικό αρδευτικό δίκτυο του Αναβάλου περιλαμβάνει αγωγούς μεταφοράς νερού συνολικού μήκους 80 km περίπου. Τα 35 km περίπου αποτελούνται από ανοιχτούς τσιμεντένιους αγωγούς, τραπεζοειδούς διατομής, ενώ τα υπόλοιπα από κλειστούς υπόγειους αγωγούς. Η κίνηση του νερού γίνεται με τη βοήθεια δέκα αντλιοστασίων και τεσσάρων λιμνοδεξαμενών, συνολικής χωρητικότητας 76.000 m³. Πέραν των αγωγών μεταφοράς έχουν κατασκευαστεί αρκετά χιλιόμετρα δευτερευόντων αγωγών και αρδευτικών δικτύων, αλλά και έξι λιμνοδεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 18.000 m³ για τους τελικούς χρήστες. Όπου ο αγωγός είναι ανοιχτής διατομής, η άρδευση γίνεται κατά κανόνα με την απαρχαιωμένη μέθοδο της κατάκλισης, καταναλώνοντας πολύ μεγαλύτερες ποσότητες νερού απ' όσες χρειάζονται.

Πέρα από τις εκτάσεις που εξυπηρετούνται από τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα (οι οποίες στην πλειοψηφία τους εξυπηρετούνται και από υπόγεια

ύδατα σαν εναλλακτική λύση ή για παγοπροστασία), οι υπόλοιπες εκτάσεις εξυπηρετούνται αποκλειστικά από γεωτρήσεις ή πηγάδια.

2.6.2 Ύδρευση

Από τις αρχές της δεκαετίας του '60 η πόλη του Ναυπλίου έχει εξασφαλίσει την ύδρευσή της από την πηγή Αμυμώνης, στην περιοχή του οικισμού των Μύλων. Από το 1988 χρησιμοποιείται και η πηγή της Λέρνης. Για τις ανάγκες της άντλησης και μεταφοράς έχουν κατασκευαστεί δύο αντλιοστάσια με δυνατότητα συνολικής άντλησης 600 m³/h και μεταλλικός υπόγειος αγωγός μήκους 13 km. Το όλο σύστημα διαχειρίζεται η ΔΕΥΑ Ναυπλίου. Από το 2003 και η πόλη του Άργους – που μέχρι τότε χρησιμοποιούσε γεωτρήσεις με νερό ακατάλληλο λόγω υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών – άρχισε να χρησιμοποιεί την πηγή της Λέρνης για την υδροδότησή της. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε αντλιοστάσιο με δυνατότητα άντλησης 500 m³/h και αγωγός D.I. μήκους 10km. Το όλο σύστημα διαχειρίζεται η ΔΕΥΑ Άργους. Από τις δύο ΔΕΥΑ εξυπηρετούνται σήμερα περίπου 52.000 άτομα.

2.7 Μετεωρολογικά-Κλιματολογικά στοιχεία

Οι πλησιέστεροι Μετεωρολογικοί Σταθμοί στην περιοχή μελέτης είναι της Πυργέλλας πλησίον του Άργους, του Ναυπλίου (υψόμετρο 2.00 μέτρα) που ανήκουν στην Ε.Μ.Υ και ο Βροχομετρικός Σταθμός των Ιρίων που ανήκει στο Υπουργείο Γεωργίας(υψόμετρο 15.00 μέτρα).

Το κλίμα της περιοχής μελέτης ανήκει στον Μεσογειακό υποτροπικό τύπο και σε ετήσια βάση ανήκει στον τύπο Η8Υw8a (ζώνη λεμονιάς). Το κλίμα λοιπόν της πεδινής ζώνης χαρακτηρίζεται σαν ξηροθερμικό με ήπιο χειμώνα στα παράλια, ενώ η θαλάσσια αύρα επηρεάζει τις ακραίες θερμοκρασίες. Δηλαδή το καλοκαίρι οι μέγιστες είναι χαμηλότερες και το χειμώνα οι ελάχιστες υψηλότερες. Όσο προχωρούμε στην ενδοχώρα και λόγω του ανάγλυφου της περιοχής παρατηρείται μια βαθμιαία όχι όμως σημαντική διαφοροποίηση. Περιορίζεται η ξηροθερμική περίοδος και παράλληλα αυξάνει το ετήσιο ύψος βροχής. Ο χειμώνας γίνεται ψυχρότερος, με χιόνια που μπορεί να διατηρούνται 1-2 μήνες στους ορεινούς όγκους. Η παρουσία αυτή των χιονιών και η επικράτηση το χειμώνα των Βόρειων ανέμων παρασύρει προς το

Αργολικό πεδίο ψυχρές μάζες αέρα που εγκλωβίζονται εκεί και σε συνδυασμό με έντονη ακτινοβολία της θερμότητας (κυρίως τις αίθριες νύκτες) προκαλούν παγετούς με άμεσες οικονομικές επιπτώσεις στις καλλιέργειες της περιοχής. Η πιο επικίνδυνη περίοδος είναι από τις 14/11 μέχρι τις 5/2.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΙΡΙΩΝ

3.1 Γενικά

Από τη μελέτη των γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών της περιοχής, η συλλογή όλων των διαθέσιμων στοιχείων και εκείνων που προέκυψαν από μετρήσεις στα φρεάτια κατά τη διάρκεια των ετών 1991,1992 και 1993, μπορούν να συναχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το υδροφόρο στρώμα της πεδιάδας έχει υποβαθμιστεί ποσοτικά και ποιοτικά από την ανεξέλεγκτη, μακροχρόνια και εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών.
- Η γεωλογική δομή της λεκάνης, που αποτελείται από σχηματισμούς ασβεστόλιθων "Pantokrator", καθώς επίσης και το παράκτιο τμήμα του κόλπου της Αργολίδας, επιτρέπει την παρείσφρηση του νερού της θάλασσας από το Βορρά και το Νότο.

Όπως φαίνεται δεν έχουν ληφθεί προστατευτικά μέτρα μέχρι σήμερα και αυτό το συμπεραίνουμε επειδή παρατηρείται συνεχής επιδείνωση της κακής ποιότητας νερού.

Το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής είναι ελλειμματικό όπως και η βροχόπτωση είναι σχετικά χαμηλή(σημειωτέων η βροχόπτωση πάνω από 23 χρόνια είναι 424,15 mm) και επίσης παρουσιάζει υψηλές τιμές εξάτμισης. Το αυξανόμενο ποσοστό άντλησης, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες άρδευσης της περιοχής, οδήγησε στη μείωση του υδραυλικού φορτίου του γλυκού νερού και συνεπώς στην αύξηση του υφάλμυρου νερού και φυσικά στην αντίστοιχη πρόοδο του υφάλμυρου μετώπου.

3.2 Γεωλογική δομή

Βάσει των ερευνών που εκτελούνται μέχρι τώρα και μετά από την ολοκλήρωση της γεωλογικής χαρτογράφησης με την επέκταση 22 km² (φύλλο Σπέτσες) σε κλίμακα 1:50.000, η γεωλογική δομή της περιοχής μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

Ολόκληρη η περιοχή ανήκει στη γεωτεκτονική ζώνη της ανατολικής Ελλάδας. Οι στρωματογραφικοί ορίζοντες που αντιμετωπίζονται στο μεγαλύτερο τομέα της λεκάνης Ίρια και της πετρολογικής τους σύνθεσης είναι εν συντομία οι ακόλουθοι:

- Ασβεστόλιθοι και Κερατόλιθοι στα διαδοχικά στρώματα της Τριαδικής εποχής.

Οι ασβεστόλιθοι είναι απολιθωματικοί σχηματισμοί με αμμωνίτες και κωνόδοντες, κυρίως, και αποτελούνται από ενστρώσεις κόκκινων και καφεκόκκινων κερατολίθων καθώς και από κρυπτοκρυσταλλικούς-ασβεστόλιθους.

Αυτοί οι διαφοροποιημένοι σχηματισμοί εμφανίζονται σε περιορισμένες εμφανίσεις στην ανώτερη λεκάνη του ποταμού Καρνεζαΐικου και είναι ταξινομημένοι, βάσει του απολιθώματος που περιέχουν, σε μέσο ως ανώτερο Τριαδικό (Anissian-Karnian).

Αυτοί οι σχηματισμοί είναι παλαιότερα ηφαιστειακά, τραχειτικά και τραχειτικές ηφαιστειακές τέφρες που περιέχουν, το χαλαζία και τους αστρίους καθώς επίσης και τους φακούς απολιθωματοφόρων των κόκκινων ασβεστόλιθων.

- Ακολουθεί η σειρά "Pantokrator" των ασβεστόλιθων, η οποία χαρακτηρίζει τον Ανώτερο Τριαδικό ως το χαμηλότερο Τζουρασικό (Karnio - Liasso). Το χρώμα του κυμαίνεται από ανοικτό γκρι ως το γκρίζο-λευκό. Η σειρά αυτή περιέχει τα πολύ λεπτά στρώματα του άσπρου δολομίτη και είναι πλούσια σε κλάδους χλωρίδας. Αυτοί οι βράχοι κρύβονται κάτω από διαβάσεις κερατολίθων με τόφους σχηματισμούς.
- Τοπικά, στους ασβεστόλιθους "Pantokrator", εμφανίζονται μεγάλοι φακοί των ασβεστόλιθων της φάσης Ammonitico Rosso (πετρώματα ασβεστόλιθων με αμμωνίτες), των μέσων εποχών Doggerio Liassio, οι οποίες είναι σε περιορισμένες εμφανίσεις στην ανώτερη λεκάνη του ποταμού Καρνεζαΐικου.

- Κατόπιν ακολουθεί ο σχηματισμός που αποτελείται από Διαβάσεις, Κερατόλιθους και Τοφώδη. Αυτός ο σχηματισμός χαρακτηρίζει τον ανώτερο Τζουρασικό έως τον χαμηλότερο Κρητιδικό. Αποτελείται από λατιπωπαγούς φακούς, ασβεστόλιθους με τα κομμάτια κερατόλιθων, διαβάσεις και σερπεντινίτες.
- Κόκκινοι κερατόλιθοι στις έδρες, οι οποίοι γίνονται τοπικά λίθοι των ασβεστόλιθων "Pantokrator".
- Λατιπωπαγή τοφώδη και μάζες, τα συστατικά των οποίων είναι κυρίως γυαλί και κομμάτια διαβάσεων, ηφαιστειακών τεφρών και μόρια σερπεντινίτων.
- Οι διαβάσεις, κυρίως υπό μορφή λάβας, εμφανίζονται στην ανώτερη λεκάνη του ποταμού Καρνεζαϊίκου και τοπικά σε περιορισμένες εμφανίσεις, χαμηλά στο λόφο της πεδιάδας Ίρια.
- Στις περιορισμένες εμφανίσεις, στην περιοχή Καναπίτσα προς τα πάνω της λεκάνης, παρατηρούνται στρώματα φλύσχη της ανώτερης Κρητιδικής Παλαιόκαινου εποχής, τα οποία αποτελούνται από μάζες ψαμμίτη, σχίστες αργίλου και στρώματα ασβεστόλιθων.
- Οι πιο πρόσφατες εναποθέσεις των Τεταρτογενών καλύπτουν τις κοιλάτες της ανώτερης στάθμης του ποταμού Καρνεζαϊίκου και της παράκτιας πεδιάδας. Αποτελούνται από τα διάφορα ιζήματα, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα. Χαρακτηρίζονται από τα λατιπωπαγή, στις ορεινές περιοχές κυρίως, πεζούλες με λίθους τοπικής προέλευσης και κόκκινους αργίλους και τελικά εναποθέσεις άμμου και αργίλους της Δελταϊκής μορφής στην πεδιάδα όπου, σε μερικές θέσεις, τα παράκτια ιζήματα παρεμβάλλονται.

Όλοι οι παραπάνω σχηματισμοί συμμετέχουν, λίγο ή πολύ, στη διαμόρφωση της υδρογεωλογικής κατάστασης, δεδομένου ότι εμφανίζονται σε μερικές θέσεις της λεκάνης του ποταμού Καρνεζαϊίκου.

Οι σειρές ασβεστόλιθων "Pantokrator" που περιβάλλουν την πεδιάδα και οι εναποθέσεις της άμμου και της αργίλου των τεταρτογενών, οι οποίες καλύπτουν το χαμηλότερο τμήμα ανύψωσης της λεκάνης και εν μέρει, οι

εμφανίσεις των κερατολίθων, είναι πρωταρχικής σπουδαιότητας για την υπό εξέλιξη έρευνα στην περιοχή των Ιρίων.

Ο σχηματισμός της περιοχής είναι επίσης και ένα αποτέλεσμα των δυναμικών φαινομένων, τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν και επηρεάζουν την περιοχή ακόμα και σήμερα.

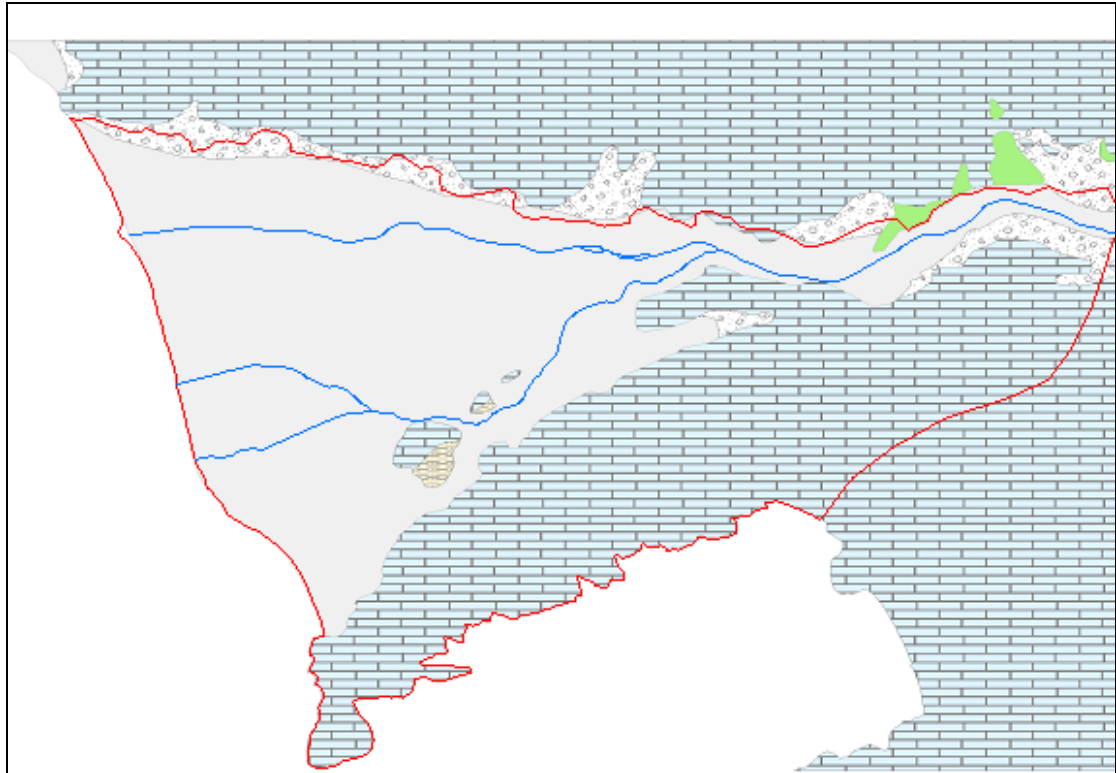
Τα βασικά στρώματα έχουν ΒΔ-ΝΑ κατεύθυνση. Τα δευτερεύοντα στρώματα, τα οποία είναι σχεδόν κάθετα στην παραπάνω διεύθυνση, παρατηρούνται στα ορεινά τμήματα, τα οποία περιβάλλουν την πεδιάδα των Ιρίων με ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ κατευθύνσεις. Αυτά τα δευτερεύοντα στρώματα οδήγησαν στη δημιουργία της λεκάνης, η οποία κατόπιν από τα πιο πρόσφατα γεγονότα γέμισε Τεταρτογενή ιζήματα.

Επιπλέον, παρατηρήσαμε στην περιοχή επωθήσεις της σειράς ασβεστόλιθων "Pantokrator" στον πρόσφατο σχηματισμό διαβάσεις-κερατόλιθοι-τοφώδη και μερικώς στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ίδιας σειράς. Μια τέτοια επώθηση είναι πλέον πιθανό να υπάρξει στους σχηματισμούς που κρύβονται κάτω από τα αλούβια της πεδιάδας, σε ένα άγνωστο βάθος, ΝΑ του χωριού Ίρια.

Οι κατευθύνσεις των στρωμάτων των ασβεστόλιθων "Pantokrator" είναι ΒΑ-ΝΔ και οι κλίσεις τους ΝΑ είναι της κλίμακας από 300 έως 800.








Στο παράκτιο τμήμα παρατηρήθηκε ένας σχηματισμός από πρόσφατες εναποθέσεις, η δημιουργία των οποίων αποδίδεται στην αργή ανύψωση του πυθμένα του κόλπου της Αργολίδας.

Ο παρακάτω υδρολιθολογικός χάρτης έχει προκύψει ύστερα από επεξεργασία στο λογισμικό ArcGis και μας δείχνει την λιθολογική δομή της περιοχής των Ιρίων.

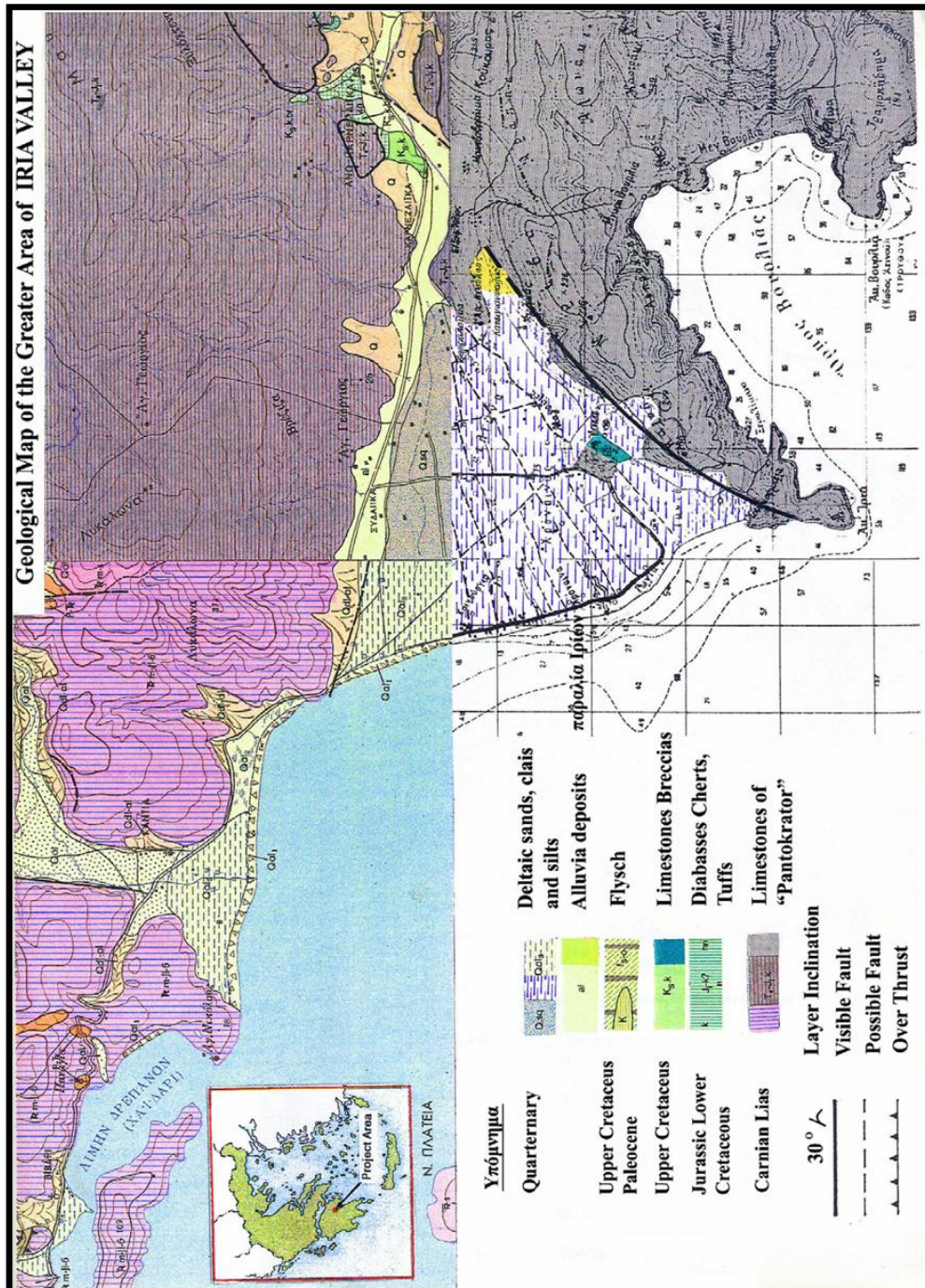


Χάρτης 3.1 Υδρολιθολογικός χάρτης Ιρίων

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Geology		
	al	Αλλουβιακές Αποθέσεις
	Q	Πλευρικά Κορήματα
	Ks.k,br	Κρητιδικός Ασβεστόλιθος
	Ji-k,δ,tf	Σχιστόλιθος
	T4-Ji.k	Τριαδικός Ασβεστόλιθος
	AQUIFER_COAST	Όρια παράκτιου Υδροφορέα
	iria_rivers	Ποτάμια

Ο παρακάτω χάρτης απεικονίζει τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής Ίρια και είναι ένα απόσπασμα της μελέτης " Validity, limit and possible trends of coastal south Mediterranean traditional ground water irrigated agriculture " (contract 8001-ct90-0012).



Χάρτης 3.2 Γεωλογικός χάρτης Ιρίων

3.3 Τεκτονική

Η ευρύτερη περιοχή έχει υποστεί από το παρελθόν διαδοχικές φάσεις τεκτονικών παραμορφώσεων. Η παλαιότερη τεκτονική περίοδος που έπληξε την ευρύτερη περιοχή και η οποία είναι διαπιστωμένη με βάση Λιθοστρωματογραφικά κριτήρια είναι η πρώιμη ορογενετική περίοδος Ανώτερου Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού (125 περίπου χρόνια πριν). Τότε σχηματίστηκαν τα ηφαιστειακά πετρώματα και επωθήθηκε το οφιολιθικό κάλυμμα.

Η επόμενη τεκτονική περίοδος ήταν στις Μεσοαλτικές ορογενέσεις της περιόδου Ανώτερο Κρητιδικό-Ηώκαινο (45-30 χρόνια πριν). Την περίοδο αυτή τεκτονίσθηκαν και διαρρήχθηκαν και τα ανωκρητιδικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι, φλύσχης), μαζί φυσικά με τους παλαιότερους σχηματισμούς που ήταν ήδη τεκτονισμένοι.

Από την επίδραση των νεότερων πτυχώσεων κατά το Μειόκαινο και μετά δημιουργήθηκαν οι μεταλτικές λεκάνες στην ευρύτερη περιοχή, γεγονός όμως που δεν μπορεί να στοιχειοθετηθεί για τις λεκάνες Κάντιας και Ιρίων, αφού σε αυτές δεν συναντώνται νεογενούς ηλικίας ιζήματα. Οι λεκάνες αυτές θα πρέπει να έχουν σχηματιστεί σε νεώτερη περίοδο, ενδεχομένως στις αρχές του Πλειστοκαίνου, όπως προκύπτει από τις αποθέσεις Διλλουβιακών κροκαλοπαγών που υπάρχουν στα ανάντη τμήματα της λεκάνης της Κάντιας.

Τα ρήγματα σχηματισμού των λεκανών Κάντιας και Ιρίων ιχνηθετούνται σήμερα σε πολλά σημεία στις παρυφές τους. Τα ρήγματα αυτά έχουν ως επί το πλείστον διευθύνσεις Β.ΒΑ-Ν.ΝΔ, έως Α-Δ. Εκτός από τις διευθύνσεις αυτές, που είναι οι κύριες ρηξιγενείς διευθύνσεις, στην περιοχή φαίνεται και μία ρηξιγενής διεύθυνση Β-Ν, η οποία είναι περισσότερο ορατή στη Λεκάνη της Κάντιας, ενώ και στην περιοχή Ιρίων σχηματίζει ορισμένες ορεινές μισγάγγειες.

Οι λεκάνες Κάντιας και Ιρίων αποτελούν τεκτονικά βυθίσματα τα οποία πληρώθηκαν στη συνέχεια από τις συνεχείς προσχώσεις των χειμάρρων που τις διαρρέουν. Η απόθεση ιζημάτων είναι συνεχής και σύγχρονη και το γεγονός αυτό αποδεικνύεται από τα πλημμυρικής προέλευσης υλικά που συναντώνται πλευρικά των χειμάρρων και κυρίως στην παράκτια ζώνη των πεδιάδων. Επομένως, από την άποψη αυτή οι πεδιάδες μπορούν να χαρακτηρισθούν ότι ευρίσκονται ακόμα σε "νεαρό" στάδιο σχηματισμού.

4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΩΝ ΙΡΙΩΝ

4.1 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Στην Αργολίδα αναπτύσσονται τέσσερις κύριες υδρογεωλογικές ενότητες. Οι ενότητες αυτές διαχωρίζονται με βάση τον κυρίως τύπο του υδροφόρου συστήματος. Διακρίνουμε: το καρστικό σύστημα της Δυτικής Αργολίδας, τους κοκκώδεις υδροφορείς που αναπτύσσονται στο βύθισμα του Αργολικού Πεδίου και στην Ασίνη, το καρστικό σύστημα του Αραχναίου Όρους και το ρωγμώδες – καρστικό σύστημα στις περιοχές Τραχειά – Ερμιονίδα. Με εξαίρεση την πρώτη υδρογεωλογική ενότητα, που σε γενικές γραμμές παρουσιάζει μεγάλα αποθέματα και καλή ποιότητα νερού, οι υπόλοιπες τρεις ενότητες παρουσιάζουν προβλήματα επάρκειας και ποιότητας (κυρίως μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικών ή/και χλωριόντων).

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής των πεδιάδων Ιρίων και Κάντιας μπορούν να διακριθούν σε δύο τομείς, στις υδρογεωλογικές συνθήκες της ορεινής ζώνης και στις υδρογεωλογικές συνθήκες των πεδινών εκτάσεων.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην ορεινή ζώνη της ευρύτερης περιοχής ρυθμίζονται από την εκτεταμένη ανάπτυξη των ανθρακικών πετρωμάτων, που είναι σχηματισμοί υδροπερατοί και έχουν τη δυνατότητα διακίνησης και αποθήκευσης μεγάλων όγκων υπόγειου νερού. Η ασβεστολιθική μάζα διασχίζεται από ένα δαιδαλώδες δίκτυο δευτερογενών διευρυμένων διακλάσεων (καρστικό δίκτυο), στο οποίο αναπτύσσεται καρσική υδροαποθεματική ζώνη με επίπεδο βάσης το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας. Το καρσικό νερό των ασβεστόλιθων διακινείται προς τα κατάντη και μεταγγίζεται πλευρικά στις πλέον αδρόκοκκες αποθέσεις των προσχωματικών ιζημάτων. Ο μεγαλύτερος όμως όγκος του διαφεύγει προς τη θάλασσα και μία τέτοια εκδήλωση της καρστικής υδροφορίας γίνεται στην παραλία, στην περιοχή μεταξύ των πεδιάδων Ιρίων και Κάντιας, όπου και παρατηρήθηκαν υποθαλάσσιες αναβλύσεις καρστικού νερού. Στην ίδια περιοχή υπάρχουν και πλευρικές μεταγγίσεις του καρστικού νερού προς τα προσχωματικά υλικά, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να απορροφηθούν από τα εδαφικά υλικά της συγκεκριμένης περιοχής λόγω της αργιλώδους σύστασης τους και δημιουργούν στην περιοχή περιοδικά ελώδεις εκτάσεις.

Φαίνεται όμως ότι καρστικό νερό διακινείται προς τη θάλασσα και σε άλλες θέσεις και συγκεκριμένα κατά μήκος του νοτίου περιθωρίου της λεκάνης των Ιρίων, όπου αναπτύσσεται η επιμήκης ασβεστολιθική ράχη του 'Ντρίβα'. Η γεωλογική δομή της περιοχής και η απουσία επιφανειακών οφιολιθικών πετρωμάτων στα νότια περιθώρια της λεκάνης συνηγορούν υπέρ της υπόγειας διακίνησης καρστικού νερού προς τη θάλασσα (περιοχή Βουρλιά). Το φαινόμενο αυτό, αν και δεν είναι απόλυτα επιβεβαιωμένο, θεωρείται πολύ πιθανό και είναι σημαντικό για τη διατύπωση σεναρίων διαχείρισης του υπόγειου νερού της περιοχής.

Η διακίνηση του καρστικού νερού των ασβεστόλιθων προς τη θάλασσα είναι διαδικασία αμφίδρομη εξαρτώμενη από το καθεστώς των βροχοπτώσεων κάθε φορά. Όταν η στάθμη του υπόγειου νερού στον ασβεστολιθικό σχηματισμό υποβιβάζεται, τότε θαλασσινό νερό μπορεί να κινηθεί προς την ενδοχώρα προκαλώντας υφαλμύρωση του νερού του υδροφορέα.

Στις πεδιάδες οι υδρογεωλογικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από την ανάπτυξη φρεατίου υδροφόρου ορίζοντα στα προσχωματικά υλικά, η δυναμικότητα του οποίου μεταβάλλεται κατά θέσεις ανάλογα με την κοκκομετρική διαταξιθέτηση του προσχωματικού σχηματισμού. Κατά μήκος της ζώνης απορροής των χειμάρρων και στην ευρεία γειτονική της ζώνη, τα προσχωματικά υλικά είναι ως επί το πλείστον κοκκώδη και οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από τις συγκριτικά καλύτερες δυνατότητες διακίνησης και αποθήκευσης υπόγειου νερού. Στις περιοχές κοντά στην ακτή και στην παράκτια ζώνη η παρουσία λεπτόκοκκων έως λεπτομερών συστατικών εμποδίζει την ευχερή διακίνηση του υπόγειου νερού, αφήνοντας όμως κάποιες "διόδους" όπου η υπόγεια κίνηση γίνεται ευχερέστερα και αυτές βρίσκονται στη ζώνη εκβολής των χειμάρρων στη θάλασσα.

Αλλουβιακοί υδροφόροι

Οι υδροφόροι αυτοί αναπτύσσονται στις Νεογενείς – Τεταρτογενείς λεκάνες του νομού και συνίστανται από λεπτομερή υλικά, όπως άμμους, αργίλους, ψηφίδες και κροκαλοπαγή, που εναλλάσσονται τόσο κατά την κατακόρυφη όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση. Στις ποικίλες μεταβολές της σύστασης (κοκκομετρίας) των σχηματισμών οφείλεται και η πολύ σημαντική διακύμανση της περατότητας αυτών, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται τεράστιες διαφορές στις παροχές των γεωτρήσεων που έχουν διανοιχθεί μέσα σ' αυτούς και κυμαίνονται από 2-3 m³/h έως >150 m³/h. Σε γενικές γραμμές αποτελούν τους περισσότερο εκμεταλλευόμενους υδροφόρους

ορίζοντες, καθώς επάνω σ' αυτούς αναπτύσσεται το μεγαλύτερο μέρος των καλλιεργειών του νομού και επομένως και η συντριπτική πλειοψηφία των ενεργών υδροληψιών (γεωτρήσεις και πηγάδια). Ενδεικτικά, το υδατικό ισοζύγιο των αλλουβιακών υδροφόρων του Αργολικού Πεδίου περιλαμβάνει μέσες ετήσιες εισροές από διάφορες πηγές (βροχόπτωση, διήθηση χειμάρρων, επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, απώλειες δικτύων άρδευσης, τεχνητό εμπλουτισμό, πλευρικές υπόγειες εισροές) της τάξης των $850 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Γιαννουλόπουλος Π., 2000).

Πηγαία Ύδατα

Στη δυτική Αργολίδα παρατηρούμε πλήθος σημείων εκφόρτισης πολύ μεγάλων ποσοτήτων νερού είτε παραθαλάσσια (Κεφαλάρι, Λέρνη, Κρόη, Αμυμώνη) είτε υποθαλάσσια (Κιβέρι, Ανάβαλος) είτε και σε ορεινές περιοχές (Δούκα Βρύση, Κεφαλόβρυσο, Αχλαδόκαμπος, Νεοχώρι, Καπαρέλι). Με εξαίρεση τις ορεινές πηγές, που είναι τοπικής σημασίας, οι σημαντικότερες πηγές από πλευράς ποιότητας, παροχής και θέσης είναι οι πηγές Κεφαλαρίου, Λέρνης, Κρόης και Κιβερίου. Η πηγή του Κεφαλαρίου παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις στην παροχή της, η οποία κυμαίνεται μεταξύ $25-140 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος (Πουλοβασίλης κ.α., 1996), ενώ στο τέλος της ξηρής περιόδου η παροχή συνήθως μηδενίζεται. Την τριετία 2006-2008 η πηγή δεν είχε καθόλου παροχή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η πηγή της Λέρνης έχει συνεχή ροή και ετήσιες παροχές ανάλογες με αυτές του Κεφαλαρίου αλλά μικρότερες διακυμάνσεις, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ $19-63,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Πουλοβασίλης κ.α., 1996). Η πηγή της Κρόης (Αμυμώνης) έχει ετήσιες παροχές που κυμαίνονται μεταξύ $3,8-11,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Πουλοβασίλης κ.α., 1996). Οι πηγές του Κιβερίου είναι μια ομάδα παράκτιων – υποθαλάσσιων καρστικών πηγών. Μετρήσεις παροχής των πηγών μπόρεσαν να πραγματοποιηθούν μετά την κατασκευή του φράγματος, αλλά κράτησαν μόνο για ένα περίπου χρόνο (Νοέμβριος '71 – Σεπτέμβριος '72) και έδειξαν μια ετήσια παροχή της τάξης των $409 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η ποιότητα του νερού που εκφορτίζεται από τις εν λόγω πηγές είναι από χημικής απόψεως εντός των ορίων ποσιμότητας, με εξαίρεση την πηγή Κιβερίου η οποία, πέραν των χλωριόντων (συνήθως $>250 \text{ mg/l}$), παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις σιδήρου, μαγγανίου και οριακές συγκεντρώσεις μολύβδου (Γιαννουλόπουλος Π., 2000, Μαραβέγιας Δ., 2008). Το νερό του Κιβερίου μπορεί γενικά να χρησιμοποιηθεί για άρδευση σε εναλλαγή όμως με καλύτερο ποιοτικά νερό, καθώς με αποκλειστική χρήση του προβλέπεται η απόθεση μεγάλων ποσοτήτων αλάτων στο καλλιεργούμενο έδαφος.

4.2 Υδρογεωλογικός χαρακτήρας των γεωλογικών σχηματισμών

Από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, που περιγράφονται στα προηγούμενα κεφάλαια, οι ασβεστόλιθοι "Pantokrator" και οι αποθέσεις της περιοχής έχουν μια σημαντική συμμετοχή στο υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής.

Από την εξέταση των συστατικών των αλλούβιων ιζημάτων, καθορίζεται ότι είναι προϊόντα των επίγειων και θαλάσσιων φάσεων εναλλαγής. Γενικά, αυτές οι καταθέσεις είναι ετερογενείς και χαρακτηρίζονται σε λεπτόκοκκα (αργίλους, χαλίκια) σε μεσοκοκκώδη (άμμος, αμμοχάλικα), χαμηλής έως μέσης διαπερατότητας ενώ σε μερικές θέσεις γίνονται πιο διαπερατοί και χονδρόκοκκα.

Σε ορισμένα μέρη της πεδιάδας και κυρίως στην κοίτη του ποταμού Καρνεζαϊίκου, παρατηρούνται τα χονδρόκοκκα υλικά, κυρίως λίθοι διαφορετικών μεγεθών και υψηλής διαπερατότητας. Αυτή η ζώνη των χονδρόκοκκων υλικών είναι η κύρια ζώνη επαναφόρτισης του υδροφόρου στρώματος.

Η μάζα των ασβεστόλιθων, ανάλογα με το βαθμό καρστικοποίησης και θραύσης, παρουσιάζει μέση με υψηλή διαπερατότητα. Σε άλλες θέσεις, όσο πιο έντονη είναι η καρστικοποίηση, παρουσιάζονται δολινά, τα οποία συνοδεύονται από καταθέσεις κρυσταλλικού ανθρακικού άλατος ασβεστίου ή terra rossa. Σε αυτές τις θέσεις η διαπερατότητα των ασβεστόλιθων είναι πολύ υψηλή.

Οι υδρογεωλογικές τοποθετήσεις των άλλων γεωλογικών σχηματισμών, που εμφανίζονται στην περιοχή, αφορούν οριζόντες κερατολίθων με τόφους, δεν παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα εκτός από κάποιες ζώνες (" Validity, limit and possible trends of coastal south Mediterranean traditional ground water irrigated agriculture " contract 8001-ct90-0012).

4.3 Πιεζομετρία Υδροφορέα

Οι διακυμάνσεις της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων που μετρούνται στους σωλήνες των γεωτρήσεων κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού εξαμήνου και ενός υδρολογικού έτους είναι ενδεικτικές του ρυθμού φυσικής αποστράγγισης και επαναπλήρωσης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως και ενδεικτικές του ρυθμού της εκμετάλλευσης αυτών από ανθρωπογενείς ενέργειες. Μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης κατά τη διάρκεια των θερινών υδρολογικών εξαμήνων δηλώνουν και υπέρμετρο βαθμό εκμετάλλευσης των υδροφορέων, πέρα από αυτόν που επιτρέπουν τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Μια τέτοια κατάσταση

παρουσιάζει συνεχή ταπείνωση της πιεζομετρικής τους στάθμης στη διάρκεια συνεχών υδρολογικών ετών, δηλωτική της αυξημένης εκμετάλλευσης και εκκένωσης του υδροφορέα σε σχέση με τη φυσική του επαναπλήρωση από τις βροχοπτώσεις. Υπάρχουν διάφορες αιτίες που προκαλούν διακυμάνσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας, είτε αυτές είναι φυσικές είτε είναι τεχνητές.

Οι φυσικές διακυμάνσεις προκαλούν είτε τυχαία αποτελέσματα, αν για παράδειγμα προκύψουν από μια φυσική καταστροφή, όπως σεισμό ή κατάρρευση ενός μεγάλου γεωλογικού σχηματισμού, είτε επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις συνηθισμένες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου (βροχόπτωση, εξάτμιση, μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης κ.α.). Αντίθετα, οι τεχνητές διακυμάνσεις προκύπτουν από ανθρωπογενείς επεμβάσεις, όπως είναι η διάνοιξη γεωτρήσεων για την άντληση των υδάτων ή η κατασκευή αποστραγγιστικών και εγγειοβελτιωτικών έργων.

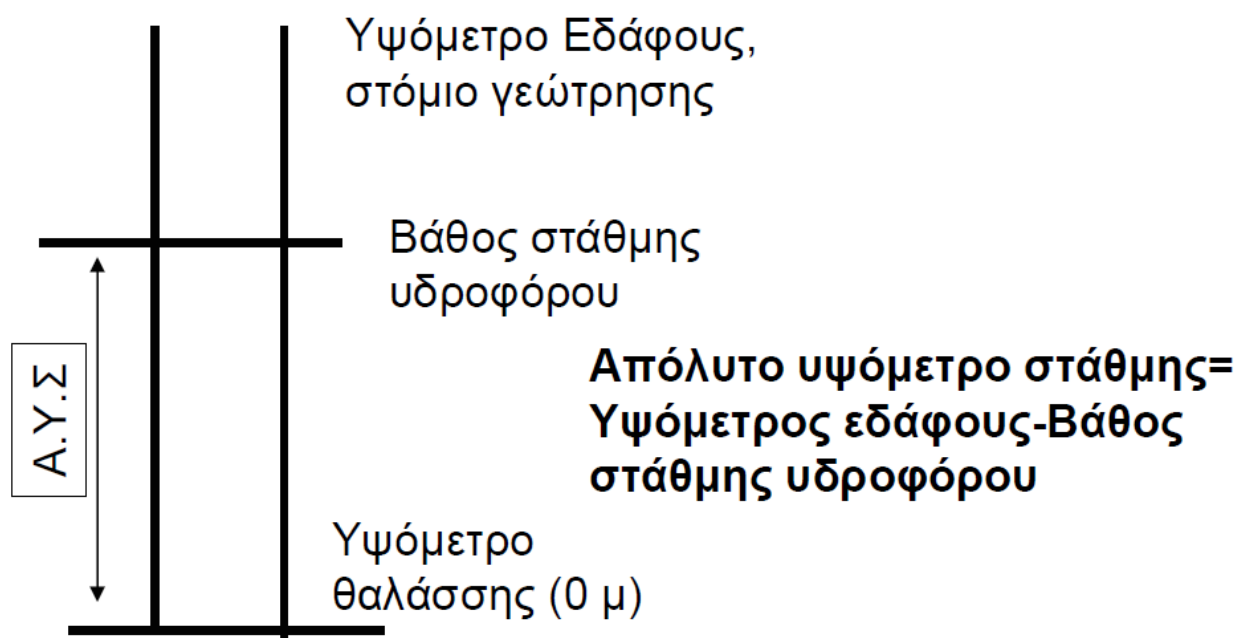
4.3.1 Υπό εξέταση υδροφορέας

Ο υδροφορέας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει τα χαρακτηριστικά ενός φρεάτιου προσχωματικού υδροφορέα, με επιπλέον χαρακτηριστικό ότι είναι παράκτιος. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι και το σημαντικότερο, αφού τέτοιοι υδροφορείς αντιμετωπίζουν προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων τους λόγω υπεράντλησης και κατ' επέκταση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο.

4.4 Πιεζομετρικοί Χάρτες

Οι πιεζομετρικοί χάρτες, μέσω των ισοπιεζομετρικών καμπυλών τους, απεικονίζουν την μορφολογία της πιεζομετρικής επιφάνειας, όπως ακριβώς οι τοπογραφικοί χάρτες με τις ισοϋψείς καμπύλες που απεικονίζουν την μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους.

Το ρόλο των ισοϋψών στους τοπογραφικούς χάρτες παίζουν οι ισοπιεζομετρικές ή ισοδυναμικές καμπύλες στους πιεζομετρικούς χάρτες. Κάθε μια πιεζομετρική καμπύλη ενώνει όλα τα σημεία που έχουν το ίδιο υδραυλικό φορτίο (Α.Υ.Σ)



Η πιεζομετρική επιφάνεια των υπογείων υδροφόρων προσδιορίζεται από τους χαρακτήρες της ροής που πραγματοποιείται μέσα σε αυτούς. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται είναι οι εξής:

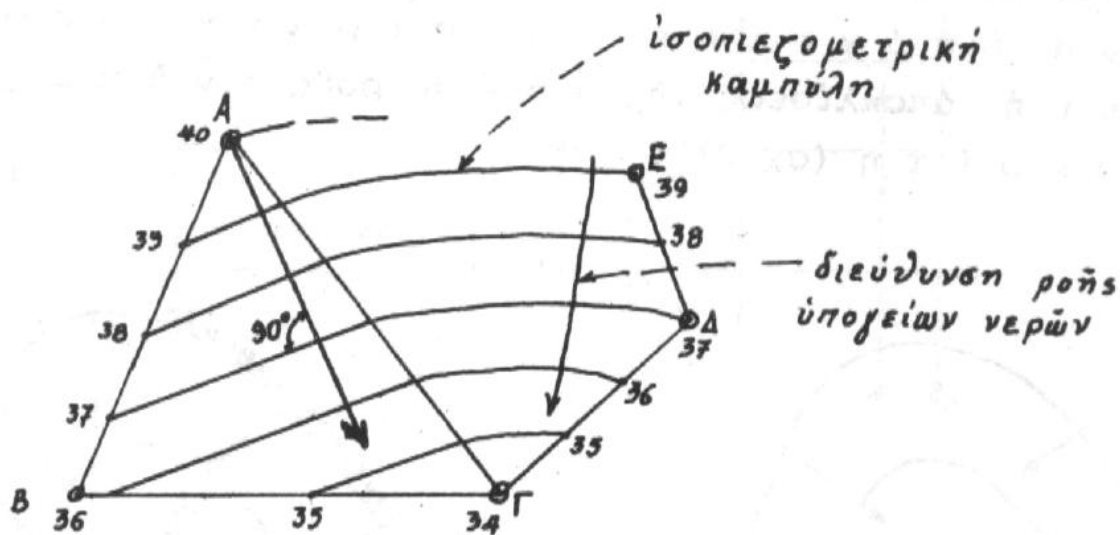
- Γεωμορφολογικές και τεκτονικές συνθήκες που καθορίζουν τη στάθμη και την πιεζομετρική πίεση, τον τύπο του υδροφόρου και το προφίλ ταπεινώσεως.
- Χαρακτηριστικά του υδροφορέα (λιθολογία, στεγανό υπόβαθρο).
- Συνθήκες τροφοδοσίας και αποστράγγισης.

Πιεζομετρικές μετρήσεις

- Πραγματοποιούνται με σταθμήμετρο και πρέπει να γίνονται τουλάχιστον δύο φορές το χρόνο.
- Περίοδος χαμηλών νερών (Οκτώβριος-Σεπτέμβριος).
- Περίοδος υψηλών νερών (Μάιος –Ιούνιος).
- Υπολογισμός πάντα του Α.Υ.Σ .
- Η μορφολογία της πιεζομετρικής επιφάνειας αφορά πάντα τη χρονική στιγμή που έγιναν οι μετρήσεις.

Κατασκευή πιεζομετρικών χαρτών

Αποτυπώνουμε όλα τα σημεία υδροληψίας πάνω σε ένα κάρναβο και στη συνέχεια ενώνουμε όλα τα γειτονικά σημεία μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Χωρίζουμε τα ευθύγραμμα τμήματα σε τόσα ίσα κομμάτια όσα είναι η διαφορά των πιεζομετρικών μετρήσεων μεταξύ των δύο σημείων. Στη συνέχεια ενώνουμε όλα τα ισοδυναμικά σημεία.



Ερμηνεία πιεζομετρικών καμπυλών

- Υπολογισμός του βάθους, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, της πιεζομετρικής επιφάνειας, σε συνδυασμό με τοπογραφικό χάρτη
- Σχεδίαση γραμμών ροής και τον προσδιορισμό της διεύθυνσης υπόγειας ροής και αποστράγγισης.
- Εντοπισμός υπόγειου υδροκρίτη.
- Προσδιορισμός υδραυλικής κλίσης.
- Σχέση τροφοδοσίας ποταμών λιμνών με τους υδροφόρους.
- Οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες δεν πρέπει να τέμνονται μεταξύ τους.
- Αν η απόσταση μεταξύ των καμπυλών μεταβάλλεται από θέση σε θέση, αυτό δηλώνει αυξομείωση της υδραυλικής κλίσης.
- Πυκνή διάταξη σημαίνει μεγάλη υδραυλική κλίση, που οφείλεται σε μεγάλη υπόγεια παροχή, ή σε μικρή υδροπερατότητα του υδροφορέα.

- Αραιή διάταξη σημαίνει μικρή υδραυλική κλίση, μικρή υπόγεια παροχή ή μεγάλη υδροπερατότητα

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρικής κατάστασης των εκμεταλλευόμενων υδροφόρων στρωμάτων στο χώρο της έρευνας, αξιοποιούμε τις μετρήσεις απόλυτης στάθμης των γεωτρήσεων που έχουμε στη διάθεσή μας, έτσι, ώστε να πάρουμε μια όσο το δυνατόν ακριβέστερη εικόνα της κατανομής των ισοδυναμικών γραμμών της πιεζομετρικής επιφάνειας και να εντοπίσουμε τις διευθύνσεις των δρόμων της υπόγειας ροής του νερού και τις υδραυλικές της κλίσεις. Οι μετρήσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας στις γεωτρήσεις παρατήρησης, θα πρέπει να αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα, έτσι, ώστε η εικόνα του πιεζομετρικού χάρτη που θα πάρουμε να χαρακτηρίζει και να αντιπροσωπεύει την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων σε όλη την επιφάνεια του χώρου έρευνας για την ίδια χρονική περίοδο. Η αξιοποίηση των τιμών της πιεζομετρικής στάθμης που παίρνονται στις γεωτρήσεις μπορεί να γίνει για τη θέση της στην αρχή και το τέλος καθενός υδρολογικού εξαμήνου ή ακόμη στο τέλος κάθε υδρολογικού έτους ή σειράς ετών. Η θέση των ισοδυναμικών γραμμών των πιεζομετρικών χαρτών που κατασκευάζουμε μας δίνει και την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων που εκμεταλλευόμαστε (Δημόπουλος, www.geo.auth.gr).

Γενικά, από ένα πιεζομετρικό χάρτη μπορούμε να:

- προσδιορίσουμε το βάθος που βρίσκεται η στάθμη των υπόγειων νερών,
- σχεδιάσουμε τις γραμμές υπόγειας ροής και τη διεύθυνση της ροής,
- σχεδιάσουμε τους άξονες υπόγειας αποστράγγισης και τον υπόγειο υδροκρίτη,
- υπολογίσουμε την υδραυλική κλίση,
- κατασκευάσουμε το προφίλ ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας,
- κατασκευάσουμε το χάρτη των ισοπαχών καμπύλων του υδροφορέα,
- υπολογίσουμε την αποθηκευτική ικανότητα του υδροφορέα (συνδυασμός δύο πιεζομετρικών χαρτών για δύο διαφορετικές περιόδους), πάρουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ή όχι πλευρικής τροφοδοσίας, για τις περιοχές εκτόνωσης του υδροφορέα, για την τροφοδοσία από ποτάμια, λίμνες κλπ. και
- να αντλήσουμε πληροφορίες για την υδροπερατότητα, την παροχή και τον τύπο του υδροφορέα.

4.5 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα

Γενικά ένας υδροφορέας οριοθετείται βάση των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν τα φυσικά εξωτερικά όρια. Τα όρια αυτά αποτελούνται από πρακτικά αδιαπέρατες γεωλογικές και υδρογεωλογικές δομές, οι οποίες επηρεάζουν μόνιμα την υπόγεια ροή. Η οριοθέτηση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης, πραγματοποιήθηκε με βάση τα παρακάτω κριτήρια.

4.5.1 Βάσει φυσικών ορίων

Για τον υπόγειο και παράκτιο υδροφορέα της περιοχής των Ιρίων, οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί που πρακτικά τον οριοθετούν, είναι κατά κύριο λόγο οι τριαδικοί ασβεστόλιθοι. Στο δυτικό και νότιο τμήμα η οριοθέτηση του υδροφορέα γίνεται από τη θαλάσσια επιφάνεια. Γενικά, εκτιμάται ότι εισροές ή εκροές δε λαμβάνουν χώρα, ακόμα και σε κάποια λεπτά τμήματα του υδροφορέα, στο βόρειο και ανατολικό του τμήμα, που πιθανώς να προέκυψαν από αλλουβιακές προσχώσεις στους αδιαπέρατους σχηματισμούς. Οι θέσεις αυτές είναι περιορισμένης έκτασης και η τροφοδοσία θεωρείται ελάχιστη και αμελείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης που θα εφαρμοστεί στη συνέχεια.

4.5.2 Βάσει υδραυλικών ορίων

Τα υδραυλικά όρια προκύπτουν από το δίκτυο ροής και μπορούν να τοποθετηθούν είτε κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών ροής είτε κατά μήκος ισοδυναμικών - πιεζομετρικών γραμμών (όρια γνωστού υδραυλικού φορτίου). Ως εκ τούτου τα υδραυλικά όρια δεν αποτελούν μόνιμες δομές και μπορούν να μεταβληθούν χρονικά. Η θέση τους, αν και καθοδηγείται από τα δίκτυα ροής, τοποθετείται τεχνητά από τον ερευνητή και έτσι αποτελεί υποκειμενικό στοιχείο.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι κατανοητό ότι τα φυσικά όρια γενικά προτιμούνται σε σχέση με τα υδραυλικά. Στις περιπτώσεις, όμως, που φυσικά όρια δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες μιας μελέτης, τότε τα υδραυλικά όρια μπορούν να δώσουν τη λύση στην πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα. Στην περίπτωση που εξετάζεται η οριοθέτηση έγινε βάσει των φυσικών ορίων.

4.6 Κατακόρυφη Οριοθέτηση Υδροφορέα

Μετά την πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα, σημαντικό είναι να εκτιμηθεί το πάχος αυτού. Ο παράκτιος υδροφορέας της περιοχής των Ιρίων είναι φρεάτιος και ως

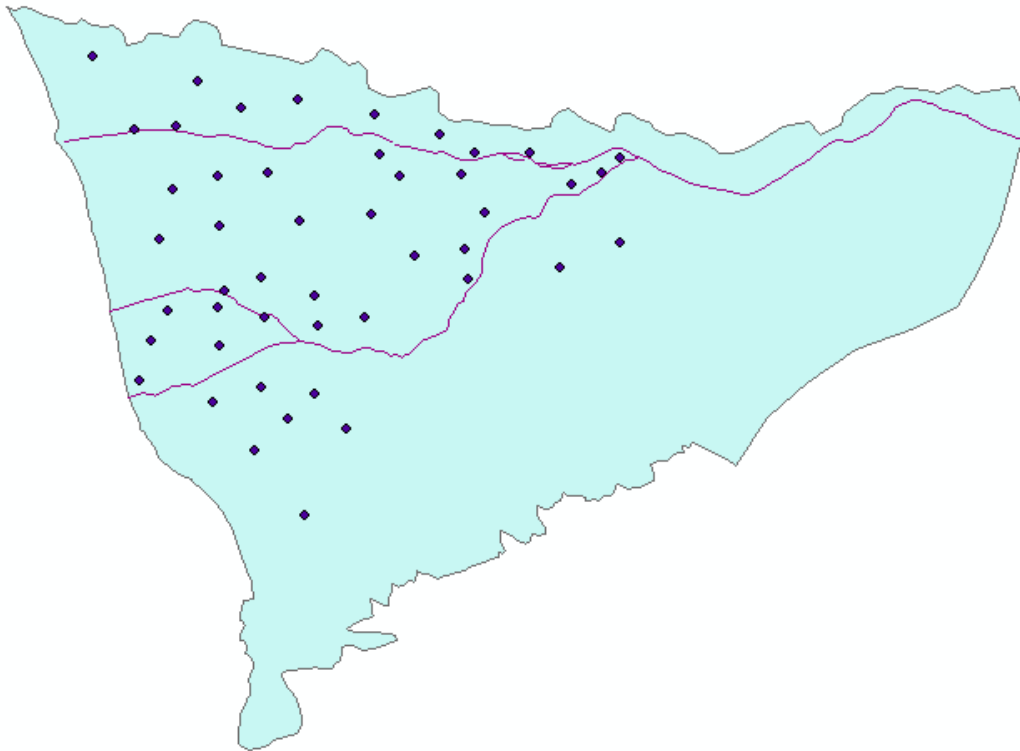
εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ως οροφή του η επιφάνεια του εδάφους. Παρόλο αυτά, ως οροφή ορίστηκε η επιφάνεια των 5m για να καλύπτει τις ανώτερες διακυμάνσεις της στάθμης του υδροφόρου. Η τρίτη διάσταση δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί και βασίζεται σε σημειακές πληροφορίες, όπως το βάθος των υδρογεωτρήσεων και απλή περιγραφή της λιθολογίας, διότι κατά την ανόρυξη γεωτρήσεων δε λαμβάνεται δείγμα εδάφους και η λιθολογία που συναντάται περιγράφεται επιτόπου από τον επιβλέποντα γεωλόγο, με κατανοητή την υποκειμενικότητα της διαδικασίας. Στοιχεία σχετικά με την εκτίμηση της βάσης του υδροφορέα για την περίπτωση που εξετάζουμε, όπως γεωλογικές τομές, δεν υπάρχουν, οπότε θα λάβουμε υπόψη τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή και το βάθος των υδρογεωτρήσεων. Βάσει των γεωλογικών σχηματισμών το πάχος του υδροφορέα μπορεί να κυμαίνεται από 70m έως 100m. Για την απλοποίηση των υπολογισμών που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια, το πάχος του υδροφόρου ορίστηκε 85m, τιμή που ούτως ή άλλως είναι απλά προσεγγιστική.

4.7 Πιεζομετρία του Υδροφορέα στην Περιοχή Μελέτης

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρίας ενός υδροφορέα χρειάζονται στοιχεία που αφορούν στάθμες των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής σε διάφορες χρονικές περιόδους. Για τον υδροφορέα που εξετάζουμε δεν υπήρχαν μελέτες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση τέτοιας πληροφορίας. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν μετρήσεις στατικής στάθμης σε πηγάδια που πραγματοποιήθηκαν από χρονοσειρές μετρήσεων προηγούμενων ετών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν υπό την εποπτεία και τον συντονισμό του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου σε συνεργασία με την ΔΕΒ της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Αργολίδας και πρόκειται για αδημοσίευτα στοιχεία που παραχωρήθηκαν αποκλειστικά και μόνο για τη σύνταξη της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν μετρήσεις σε πηγάδια, η θέση των οποίων εντοπίζεται μέσα στα όρια του υδροφορέα.

Η καταγραφή των τιμών της μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις αναφέρονται και στην υγρή και τη ξηρή περίοδο για τα έτη 2000 ,2003 ,2004, 2005, 2007, 2008 και 2009. Τα ύψη Z έχουν ως σημείο αναφοράς τη στάθμη της θάλασσας. Μετρήθηκε η υψομετρική διαφορά της ανώτερης επιφάνειας του νερού των πηγαδιών παρατήρησης (Φ) και του υψομέτρου αυτών (Z), γνωστό από μετρήσεις με συσκευή GPS ικανοποιητικής ακρίβειας (Διπλής συχνότητας–RTK του οίκου LEICA). Έπειτα, αφαιρώντας από το γνωστό υψόμετρο του πηγαδιού τη μετρημένη υψομετρική διαφορά, υπολογίσαμε την απόλυτη

στάθμη της επιφάνειας του νερού σε κάθε πηγάδι. Από τη διαφορά του ύψους Z του φρέατος με τη μέση στάθμη προκύπτει το μέσο υδραυλικό φορτίο ως προς την επιφάνεια της θάλασσας. Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης με τις ακριβείς θέσεις των πηγαδιών της περιοχής για τα οποία διαθέτουμε στοιχεία.



Εικόνα 4.1 Κατανομή γεωτρήσεων στον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής των Ιρίων

Κωδική Ονομασία	X	Y	Z	Μ.Στάθμη
IR1	410564,54	4151440,47	2,46	1,45
IR3	412692,47	4150680,95	15,61	14,95
IR4	413472,69	4150695,26	15,09	13,52
IR6	414599,52	4150642,35	46,80	44,27
IR8	413506,95	4150193,37	25,83	24,28
IR9	413024,98	4149884,27	21,33	20,08
IR10	412194,36	4149556,99	16,26	14,97
IR11	411523,96	4149226,09	9,71	8,41
IR12	411025,96	4148970,85	4,80	4,06
IR13	411805,64	4148409,34	2,56	1,87
IR14	412066,26	4148628,00	3,48	2,43
IR15	412495,91	4148547,41	6,21	5,12
IR17	411835,63	4148882,11	4,87	3,84
IR18	411053,64	4150014,80	6,40	4,85
IR19	411524,47	4150120,71	3,77	2,48
IR20	412105,95	4150153,12	6,89	5,47
IR21	411176,89	4150415,27	10,63	9,14
IR22	410880,89	4150878,61	4,00	2,71
IR24	411342,29	4151239,36	3,84	2,50
IR25	411517,04	4151020,03	5,96	4,82
IR26	412119,10	4151112,91	7,01	5,70
IR27	411523,33	4150520,13	11,60	10,30
IR28	411891,77	4150545,63	7,50	6,14
IR29	411832,74	4149722,17	10,13	9,05
IR30	411540,94	4149614,26	7,30	6,32
IR31	411117,39	4149473,09	5,17	4,04
IR32	411886,41	4149391,82	3,20	1,84
IR33	411549,25	4148792,24	7,70	7,13
IR34	412378,37	4149821,74	4,18	2,85
IR35	412886,77	4150495,56	11,59	10,22
IR36	412697,89	4150213,91	15,84	14,51
IR37	413390,96	4149940,38	14,33	13,11
IR38	413377,39	4150533,40	19,90	18,21
IR39	414597,73	4149962,22	19,92	18,80
IR40	410994,45	4149239,54	18,65	17,82
IR41	411499,09	4149497,11	2,22	0,87
IR42	412303,18	4149339,82	5,03	3,87
IR43	412549,44	4149374,90	10,23	8,94
IR44	412252,82	4148822,64	11,63	10,34

Πίνακας 4.1 Θέση και μέση στάθμη πηγαδιών στον υδροφόρα

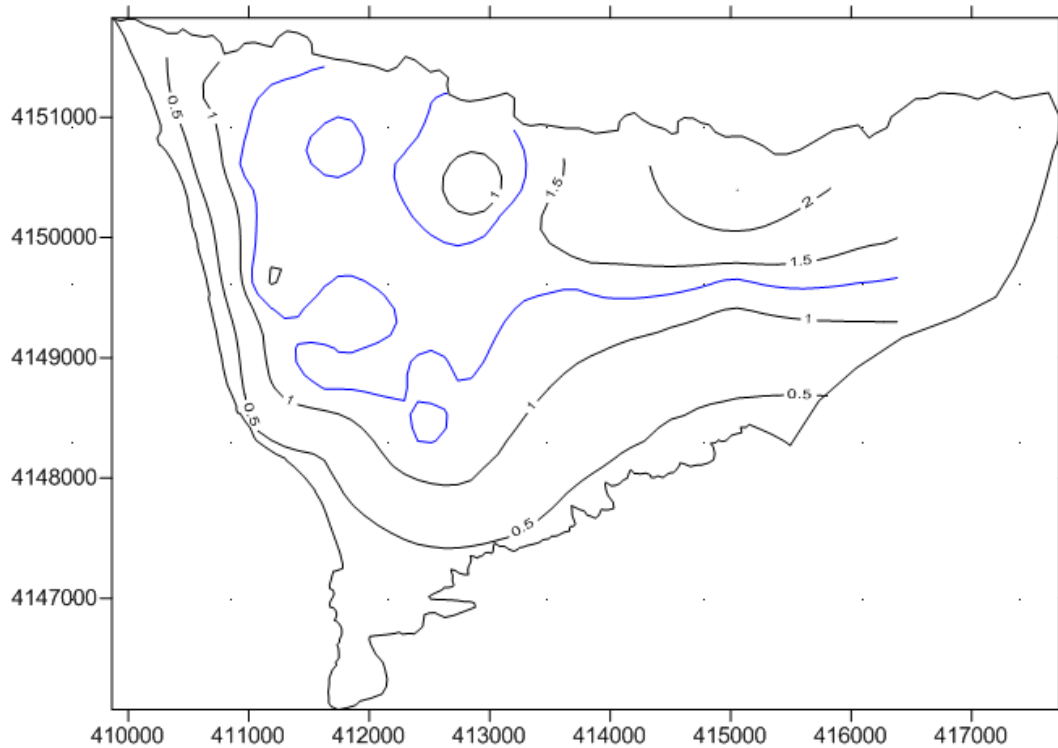
Κωδική Ονομασία	Μέσο Υδραυλικό Φορτίο
IR1	1,01
IR3	0,66
IR4	1,56
IR6	2,53
IR8	1,55
IR9	1,25
IR10	1,30
IR11	1,30
IR12	0,74
IR13	0,69
IR14	1,05
IR15	1,09
IR17	1,03
IR18	1,55
IR19	1,29
IR20	1,42
IR21	1,49
IR22	1,30
IR24	1,34
IR25	1,14
IR26	1,31
IR27	1,29
IR28	1,36
IR29	1,08
IR30	0,98
IR31	1,13
IR32	1,36
IR33	0,57
IR34	1,33
IR35	1,37
IR36	1,33
IR37	1,22
IR38	1,68
IR39	1,12
IR40	0,83
IR41	1,35
IR42	1,16
IR43	1,29
IR44	1,29

Πίνακας 4.2 Μέσο υδραυλικό φορτίο πηγαδιών

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρείται ότι οι μέσες υπερετήσεις απόλυτες στάθμες των υπόγειων νερών κυμαίνονται από 0.57m έως 2.53m με μέση τιμή 1.24m. Παρατηρείται, επίσης, ότι απουσιάζουν οι αρνητικές τιμές από τα μέσα υδραυλικά φορτία γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν λαμβάνουν πλέον χώρα εντατικές αντλήσεις σε μεγάλη κλίμακα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών από το δίκτυο του Αναβάλου, το οποίο άρχισε να λειτουργεί από το 2000 περίπου.

Με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων και τη βοήθεια του λογισμικού Surfer Golden Software 8, σχεδιάστηκαν οι ισοδυναμικές καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν την απόλυτη μέση στάθμη των υπογείων νερών του παράκτιου υδροφορέα κατά τη διάρκεια των ετών 2000-2009. Επειδή οι τιμές για τις στάθμες είναι σημειακές, χρησιμοποιήθηκε η γεωστατιστική μέθοδος Kriging στην κατασκευή του κανάβου. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής του υδροφορέα με τη μέθοδο Kriging, που δεν είναι άλλο από τη δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του υδραυλικού φορτίου και της ροής του.

Η μέθοδος Kriging αποτελεί την πλέον σύγχρονη και ακριβή τεχνική παρεμβολής, που επιπλέον παρέχει και τη δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης στη δομή της χωρικής μεταβολής της μελετώμενης μεταβλητής. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ιδιότητα της ανισοτροπίας. Στη γενική της μορφή η μέθοδος αυτή αποτελεί μια τεχνική που στηρίζεται στη θεωρία των περιοχοποιημένων μεταβλητών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μιας ευρύτερης επιστημονικής περιοχής, της Γεωστατιστικής (Π. Λατινόπουλος, Τεχνική Υδρολογία 1995).



Εικόνα 4.2 Υπολογισμένες ισοδυναμικές γραμμές από το λογισμικό Surfer

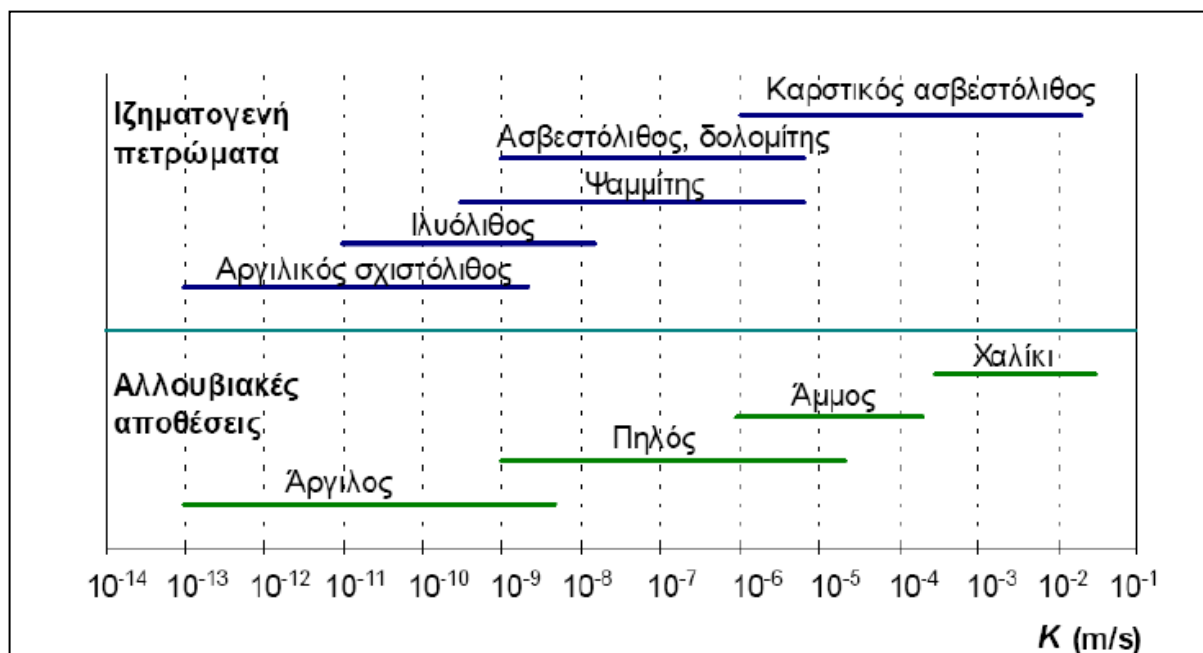
4.8 Υπολογισμός Υδραυλικής Αγωγιμότητας (K)

➤ Από εμπειρικές-βιβλιογραφικές τιμές

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) είναι η παράμετρος του πορώδους μέσου που αποτελεί το μέτρο της ικανότητας του νερού να μετακινείται μέσω των διάκενων του πορώδους μέσου. Πρόκειται, δηλαδή, για μία παράμετρο που χαρακτηρίζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου. Ο συντελεστής K έχει διαστάσεις ταχύτητας [L/T]. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για το νερό που κινείται σε διάφορα γεωλογικά μέσα. Αξίζει να επισημανθεί το κατά πολλές τάξεις μεγέθους εύρος διακύμανσης της τιμής του K στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Σε ανισότροπους υδροφορείς η περιγραφή της υδραυλικής αγωγιμότητας απαιτεί τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, τις υδραυλικές αγωγιμότητες στις τρεις κύριες διευθύνσεις. Στους ετερογενείς υδροφορείς που αποτελούν τον κανόνα, η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει από θέση σε θέση.

Ωστόσο, πολύ συχνά χρησιμοποιείται η ιδιότητα της ομοιογένειας ως μία απλουστευτική προσέγγιση, η οποία γενικά είναι επαρκής για μια συγκεκριμένη κατά περίπτωση χωρική κλίμακα.



Σχήμα 4.1 Διαστήματα μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα γεωλογικά μέσα, με βάση στοιχεία των Domenico and Swartz, 1990 (Πηγή: Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, 1999)

Βάσει βιβλιογραφίας η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

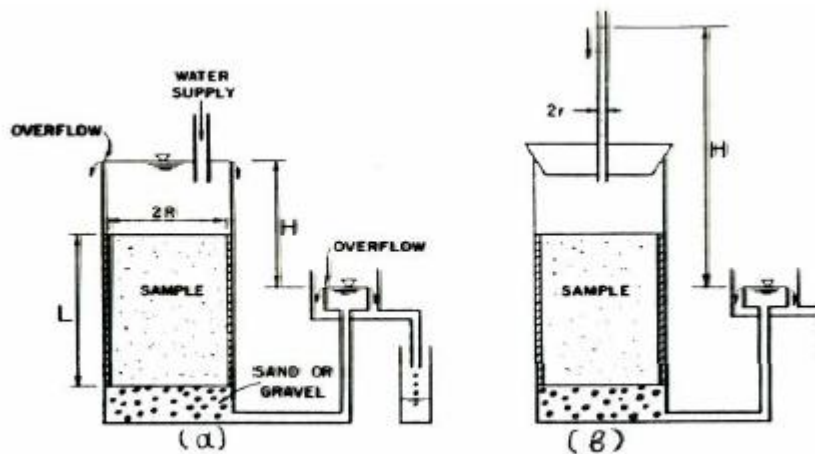
Υδραυλική Αγωγιμότητα K (m/sec)	Χαρακτηρισμός
$10^{-3} \leq K$	ΥΨΗΛΗ
$10^{-5} \leq K < 10^{-3}$	ΜΕΤΡΙΑ
$10^{-7} \leq K < 10^{-5}$	ΧΑΜΗΛΗ
$10^{-9} \leq K < 10^{-7}$	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ
$K < 10^{-9}$	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

Πίνακας 4.3 Χαρακτηρισμός τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας (Terzaghi & Peck-1967)

➤ Από εργαστηριακές δοκιμές

Σε περίπτωση οριζόντιας μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής σε ένα ομογενές και ισότροπο στρώμα με δεδομένο πάχος b χρησιμοποιείται πολύ συχνά η παράμετρος της μεταφορικότητας (T), η οποία προσδιορίζει την ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει νερό και ορίζεται από τη σχέση $T=k*b$. Η μεταφορικότητα έχει διαστάσεις $[L^2/T]$ (Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, 1999).

Η παράμετρος υδραυλική αγωγιμότητα είναι πολύ κρίσιμη και ταυτόχρονα πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω του ότι μεταβάλλεται εύκολα. Για πιο ακριβή αποτελέσματα ο προσδιορισμός της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται με εργαστηριακές μεθόδους.



Σχήμα 4.1 Διαπερατότητα σταθερού (α) και μεταβλητού (β) υδραυλικού φορτίου

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests), αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του K και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάτρησης, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη δειγματοληπτική γεώτρηση ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από δεδομένη πίεση είτε η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (Constanthead test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test).

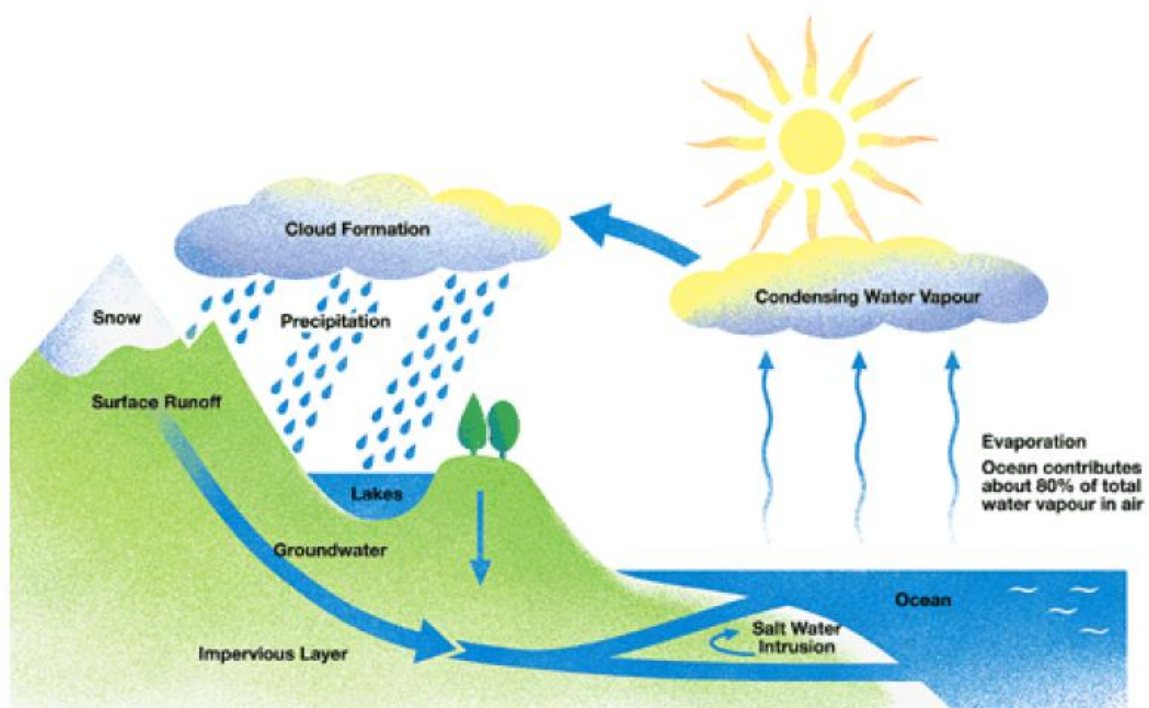
Γενικά υπάρχουν οι εξής κατηγορίες δοκιμών:

- Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου για αδρόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LUGEON (για βραχώδεις σχηματισμούς)

5. ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

5.1 Γενικά

Η ποσότητα του νερού που υπάρχει στον πλανήτη θεωρείται ότι παραμένει σταθερή στο πέρασμα των αιώνων και βρίσκεται σε μία συνεχή εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων φάσεων του νερού, γνωστή ως υδρολογικός κύκλος (Σχήμα 5.1). Οι μεγαλύτερες ποσότητες νερού βρίσκονται στη θάλασσα από την οποία με την εξάτμιση και τη μεταφορά των υδρατμών καταλήγουν στη ξηρά ως ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Το νερό αυτό αποθηκεύεται σε τοπικές κοιλότητες στην επιφάνεια της γης, διηθείται στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης και καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς και τέλος δια των ποταμών απορρέει επιφανειακά. Τα επιφανειακά νερά των ποταμών και οι διαδρομές που ακολουθούν τα υπόγεια νερά έχουν ως κατάληξη κάποιο φυσικό αποδέκτη, συνήθως τη θάλασσα.



Σχήμα 5.1 Ο υδρολογικός κύκλος του νερού στη φύση

Αυτό που συνήθως αποτελεί πρόβλημα σε μία περιοχή ή ευρύτερη γεωγραφική ενότητα είναι η ποσότητα του καθαρού νερού. Με την έννοια καθαρό νερό εννοείται το

κατάλληλο για ύδρευση και άρδευση κυρίως, η ποιότητα του οποίου πρέπει να είναι σύμφωνη με κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές που αφορούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του.

Οι παράκτιοι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν μία κύρια πηγή νερού σε περιοχές παρακείμενες στη θάλασσα, στις οποίες κατοικεί ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού της Γης. Επίσης, μεγάλες ανάγκες σε νερό άρδευσης υπάρχουν σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα. Με την εντατική εκμετάλλευση, για ύδρευση ή άρδευση, των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων από τους παράκτιους υδροφορείς, βρισκόμαστε πολλές φορές αντιμέτωποι με τον κίνδυνο εισβολής του θαλασσινού νερού υπό την μορφή αλμυρής “σφήνας” μέσα σε γλυκούς υδροφορείς .

Η αλατότητα στο νερό μετράται και καταγράφεται ως ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC_w) ή ως συγκέντρωση ολικών διαλυμένων στερεών (TDS, Total Dissolved Solids). Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται μία ταξινόμηση της ποιότητας του νερού με τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών, ενώ στον Πίνακα 5.2 αναφέρονται ενδεικτικά τα επιτρεπτά όρια για τις διάφορες χρήσεις του νερού.

Πίνακας 5.1 Ταξινόμηση του νερού σύμφωνα με τη συγκέντρωση ολικών διαλυμένων στερεών(TDS)

Κατηγορία	TDS(mg/l)
Γλυκό νερό	$0-10^3$
Υφάλμυρο νερό	10^3-10^4
Αλμυρό νερό	10^4-10^5
Πολύ αλμυρό νερό	$>10^5$

Πηγή:Holzbecher (1998)

Πίνακας 5.2 Ενδεικτικά επιτρεπτά όρια αλατότητας για τη χρήση του νερού

Κατηγορία	$EC_w(\mu\text{s/cm})$	TDS(mg/l)
Ύδρευση	2500	1600
Άρδευση(βαθμός περιορισμού)		
Κανένας	<700	<450
Μικρός έως μέτριος	700-3000	450-2000
Μεγάλος	>3000	>2000
βιομηχανία	Έως 2300	Έως 1500

Πηγές:(*Οδηγία 98/83/ΕΚ),**Πανώρας και Ηλίας 1999,***Αντωνόπουλος 2001)

Η αύξηση της αλατότητας στο νερό των παράκτιων υδροφορέων οφείλεται συνήθως στη διείσδυση του θαλασσινού νερού, αλλά μπορεί να οφείλεται και σε άλλους λόγους (Jonet et al,1999), όπως η ύπαρξη παλιών θαμμένων αλμύρων (παγιδευμένα παλιά νερά) σε συγκεκριμένες περιοχές του υδροφορέα, η διάλυση αποθέσεων εβαπορίτων, το εκτόπισμα παλιού αλμυρού νερού από υποκείμενο ή παρακείμενο υδροφορέα λόγω γεωθερμικών πεδίων, καθώς και από ρύπανση λόγω οικιστικών (βοθρολύματα), βιομηχανικών και γεωργικών δραστηριοτήτων. Τις περισσότερες φορές το ενδιαφέρον εστιάζεται στη διάκριση της θαλάσσιας διείσδυσης από την προερχόμενη από άλλες πηγές αλατότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή γεωχημικών ερευνών και τη μελέτη της σχέσης των συγκεντρώσεων μεταξύ διαφόρων χημικών παραμέτρων (π.χ. Na^+ , Cl^- , Ca/Mg). Η αναγνώριση της αιτίας της αύξησης της αλατότητας, μπορεί να είναι αρκετά χρήσιμη ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια της διείσδυσης του θαλασσινού νερού (Δουλιγέρης Χ. ,2005).

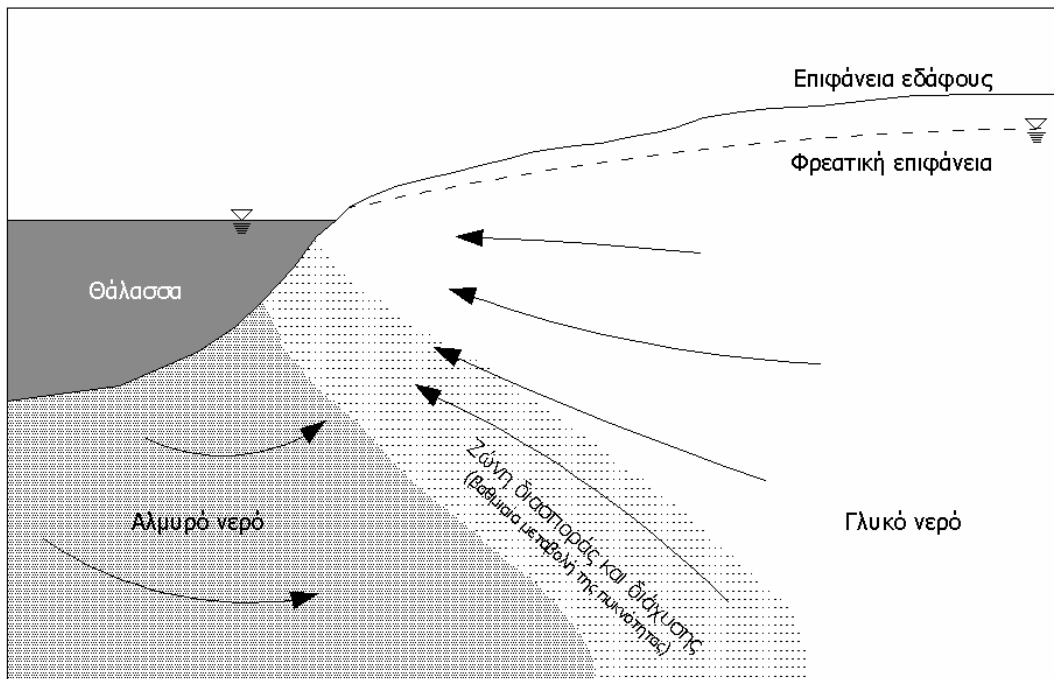
Η διείσδυση θαλασσινού νερού αφορά τη μεταφορά μάζας αλατούχου νερού σε περιοχές οι οποίες προηγουμένως καταλαμβάνονταν από γλυκό νερό. Ο ρυθμός και η διαδρομή της μεταφοράς αυτής στους υπόγειους υδροφορείς καθορίζονται από τις υδραυλικές κλίσεις, την κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς και τη διασπορά και διάχυση των αλάτων. Το αλμυρό και το γλυκό νερό όταν έρθουν σε επαφή αναμιγνύονται, και ανάμεσά τους σχηματίζεται μία ενδιάμεση ζώνη μεταβλητής πυκνότητας, όπου το αλμυρό νερό ως πυκνότερο θα βρίσκεται προς τα κάτω σε σχέση με το γλυκό νερό. Στον παράκτιο υδροφορέα του Σχήματος 5.2 παρατηρούμε τις περιοχές του αλμυρού και του γλυκού νερού, καθώς και την ενδιάμεση ζώνη μέσης πυκνότητας, που σχηματίζεται, τη ζώνη διασποράς και διάχυσης. Στη ζώνη αυτή το αλμυρό νερό αναμιγνύεται με το γλυκό νερό, το οποίο κινείται προς τη θάλασσα, αναγκάζοντας το αλμυρό νερό να ρέει κατά μήκος της περιοχής ανάμειξης, προκαλώντας έτσι μία επανακυκλοφορία του αλμυρού νερού. Το πάχος της ζώνης αυτής μπορεί να ποικίλει και σε συνθήκες ισορροπίας εξαρτάται από το είδος, τις διαστάσεις και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα, καθώς και την παροχή του γλυκού νερού που εκρέει προς τη θάλασσα.

Η επαρκής διαχείριση των υδάτινων πόρων μιας περιοχής προϋποθέτει την ορθή πρόβλεψη, τόσο των αλλαγών στην αλμυρότητα των υδροφορέων που συνδέονται με ένα οποιοδήποτε σχήμα εκμετάλλευσης όσο και τις πηγές προέλευσής της. Η αιτία της υπαλμύρωσης δεν είναι πάντα η θάλασσα. Οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν συνήθως ένα σημαντικό αριθμό πηγών ρύπανσης που η εκδήλωσή τους συνδέεται με

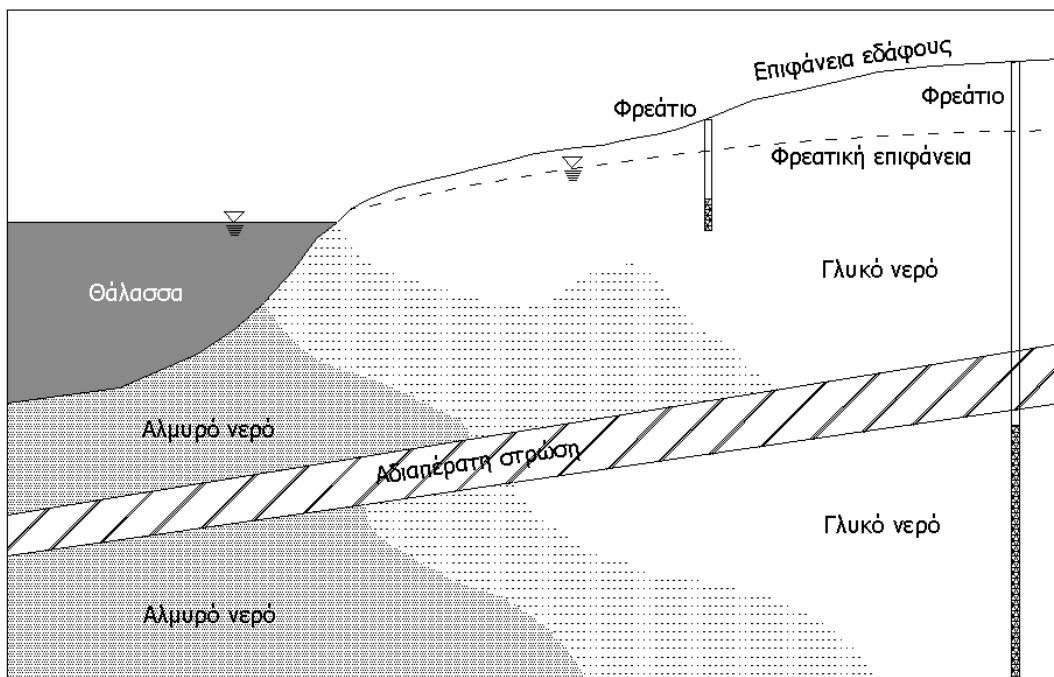
διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες(κυρίως αγροτικές και αστικές) και με την παρουσία φυσικών πηγών ρύπανσης. Η κατανόηση της αλληλεξάρτησης ενός υφάλμυρου υπόγειου υδροφορέα με την εντατικοποίηση της εκμετάλλευσής του ή μη απαιτεί την ολοκληρωμένη γνώση του συνόλου του συστήματος, δηλαδή το σύνολο των υδρογεωλογικών συνθηκών. Μερικώς η αλληλεξάρτηση αυτή υπαγορεύεται από τη διάταξη του επιβαρυμένου νερού στο χώρο και αυτή με τη σειρά της υπαγορεύεται από την πηγή προέλευσής του. Ο καθορισμός της πηγής είναι συνήθως υδροχημικός, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η επιβάρυνση του υδροφορέα είναι αποτέλεσμα της θαλάσσιας διείσδυσης.

Η αξία της υδροχημικής διερεύνησης πρέπει οπωσδήποτε να είναι περιορισμένη στην περίπτωση που οι χημικές παρατηρήσεις μπορούν ισομερώς να ερμηνευθούν μέσω δύο ή περισσότερων σειρά διαδικασιών. Κατάκολουθία η ορθή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, όπου εντοπίζεται το πρόβλημα της επιβάρυνσης, κρίνεται απαραίτητη για την αξιοποίηση των στοιχείων της υδροχημείας και προς αποφυγή εσφαλμένων συμπερασμάτων όσον αφορά τη προέλευση της επιβάρυνσης.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η περίπτωση ενός παράκτιου υδροφόρου συστήματος, το οποίο αποτελείται από έναν υπό πίεση υδροφορέα και έναν υπερκείμενο ελεύθερο υδροφορέα. Οι υδροφορίες διαχωρίζονται από την ύπαρξη μίας πρακτικά αδιαπέρατης στρώσης. Η προώθηση της σφήνας του θαλασσινού νερού και η διαμόρφωση της μεταβατικής ζώνης ενδιάμεσης πυκνότητας επηρεάζονται από τις αντλήσεις και στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα παρατηρούμε την χαρακτηριστική ανόρθωση κωνοειδούς μορφής του θαλασσινού νερού (Δουλγέρης Χ.,2005).



Σχήμα 5.2 Υποθετική κάθετη τομή παράκτιου ελεύθερου υδροφόρα



Σχήμα 5.3 Επίδραση των αντλήσεων σε υποθετικό υδροφόρο σύστημα

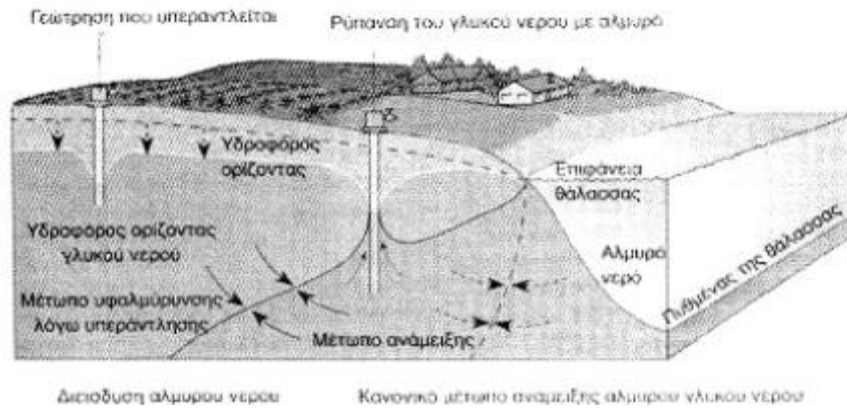
Η υδραυλική ισορροπία που υπάρχει ανάμεσα στο αλμυρό και το γλυκό νερό μπορεί να διαταραχθεί σημαντικά με αποτέλεσμα τη μετακίνηση της “σφήνας” του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα, είτε με μείωση της παροχής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα κατά την περίοδο συνεχόμενων ξηρών υδρολογικών ετών, είτε με αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Ένας τρίτος παράγοντας που μπορεί να

μεταβάλλει αυτή την ισορροπία είναι η παρατεταμένη άντληση του υπόγειου νερού για την κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και άλλων αναγκών, οι οποίες στις παράκτιες περιοχές είναι συνήθως αρκετά μεγάλες.

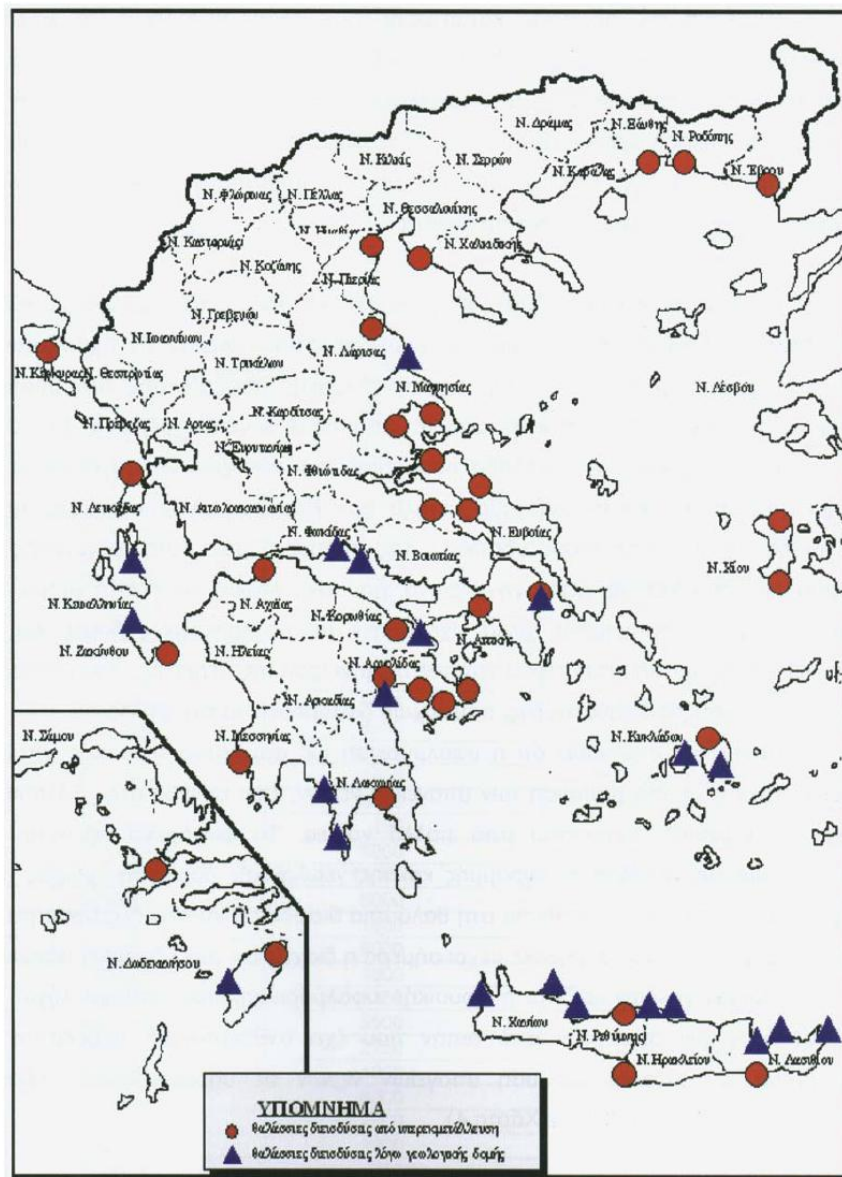
5.2 Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Ως υφαλμύρωση ενός υπόγειου υδροφορέα ορίζεται η εισροή θαλασσινού νερού σε αυτόν με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του, γεγονός που έχει ως άμεσες συνέπειες την ποιοτική καταστροφή των γεωτρήσεων και τη διατάραξη του οικοσυστήματος. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς εμφανίζεται ολοένα και περισσότερο σε αρκετά μέρη του κόσμου αλλά και της χώρας μας. Η Ελλάδα, λόγω του μεγάλου μήκους των ακτών της, παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στη διείσδυση θαλασσινού νερού και στο Χάρτη 5.1 εμφανίζονται ενδεικτικά τα σημεία όπου έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο. Στο Χάρτη 5.2 που δίνεται από το Τμήμα Γεωλογίας του ΑΠΘ, εμφανίζονται οι περιοχές εκείνες που θεωρούνται πιο ευαίσθητες στη διείσδυση θαλασσινού νερού.

Το φαινόμενο παρατηρείται σε παράκτιους υδροφορείς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται εντατικά για την κάλυψη των αναγκών σε νερό σε περιοχές όπου το αξιοποιήσιμο επιφανειακό δυναμικό δεν επαρκεί. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα νησιά του Αιγαίου, όπου η αυξημένη τουριστική ανάπτυξη σε συνδυασμό με την ανεπάρκεια υδατικών πόρων καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση του υπόγειου δυναμικού. Στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους γνωστή ως διεπιφάνεια. Πάνω από αυτή κινείται το ελαφρύτερο γλυκό νερό (ειδικό βάρος περίπου $1.000\text{cm}^3/\text{gr}$) που εξέρχεται προς τη θάλασσα ενώ από κάτω συναντάται το αλμυρό νερό (ειδικό βάρος περίπου $1.025\text{cm}^3/\text{gr}$). Οι υδραυλικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής στη ζώνη αυτή μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η πυκνότητα εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης άλατος. Οι Das and Data (1999) μελέτησαν τη «μικτή» αυτή ροή στη ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας μέσω κατάλληλου μοντέλου (Πηγή: Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων, Μαντόγλου Α., Κουράκος Γ., 2005).



Εικόνα 5.1 Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα



Χάρτης 5.1 Περιοχές εμφάνισης της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας, 2002)



Χάρτης 5.2 Περιοχές ευαίσθητες στη διείσδυση του θαλασσινού νερού.(Πηγή: Ιστοσελίδα τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ-<http://www.geo.auth.gr/763>)

5.3 Είδη υφαλμύρωσης

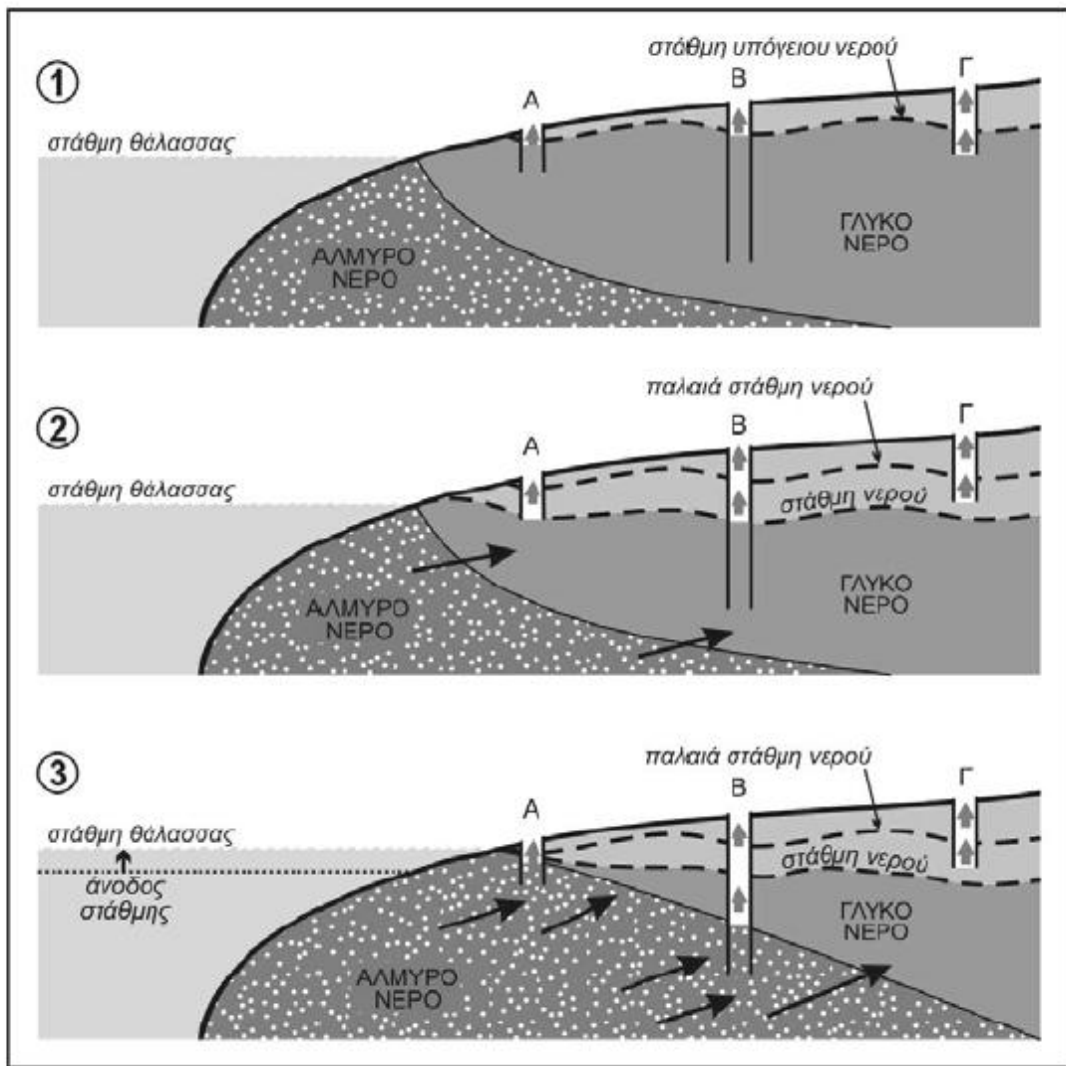
Η φυσική ισορροπία των παράκτιων υδροφόρων μπορεί να ανατραπεί, όταν η ροή του γλυκού νερού μειώνεται εξαιτίας των υπεραντλήσεων ή της μείωσης στην τροφοδοσία (φυσικό εμπλουτισμό) των υδροφόρων. Έτσι, η διείσδυση του αλμυρού νερού μπορεί να χαρακτηριστεί *παθητική*, αν με οποιοδήποτε τρόπο αλλάζουν οι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

κατακρημνισμάτων, όπως επίσης και μετά από μακροχρόνιες αλλαγές στον κλιματικό τύπο ή στη σχετική θέση του επιπέδου της θάλασσας.

Χαρακτηρίζεται όμως και *ενεργή*, όταν προκύπτει μετά από τεχνητή παρέμβαση στις διακινούμενες ποσότητες (περίπτωση υπεραντλήσεων). Αυτό οφείλεται κυρίως στη σημειακή εξαγωγή (άντληση) υπόγειου νερού που δημιουργεί ένα βαθύ κώνο κατάπτωσης. Η ζώνη τότε του ορίου, σε αντίθεση με την περίπτωση της παθητικής διείσδυσης, μετακινείται πολύ γρηγορότερα προς την ενδοχώρα και με αλλαγή της υδραυλικής κλίσης. Επιπλέον, η μετακίνηση αυτή δεν θα σταματήσει παρά μόνο όταν φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης στο κέντρο της άντλησης.

Δηλαδή, οι υπερβολικές αντλήσεις υπόγειων νερών σε παράκτιους υδροφορείς, σε πολλές περιοχές, προκαλούν μια ανάστροφη ροή των υπόγειων νερών με αποτέλεσμα μια αξιοσημείωτη θαλάσσια διείσδυση στην αντλούμενη περιοχή, όταν η στάθμη υποβιβάζεται κάτω από το επίπεδο της υποθαλάσσιας εμφάνισης της αντλούμενης ενότητας ή εάν η μεταβατική ζώνη ανάμεσα στο γλυκό και στο αλμυρό νερό αποτελεί μέρος του κώνου κατάπτωσης.

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η υφαλμύρωση του γλυκού νερού που οφείλεται σε υπεράντληση στη στεριά, κατά τα διάφορα στάδια. Αρχικά, στο 1ο στάδιο υπάρχει ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, ενώ από τις τρεις γεωτρήσεις Α, Β, και Γ, που υπάρχουν στην ακτή αντλείται αποκλειστικά γλυκό νερό. Στο 2ο στάδιο η στάθμη του γλυκού νερού έχει κατέβει εξαιτίας της άντλησης από τις τρεις γεωτρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αλμυρό νερό να εισχωρεί όλο και περισσότερο στη στεριά, οπότε και σε συνδυασμό με την άνοδο της θάλασσας, στο 3ο στάδιο αντλείται αποκλειστικά αλμυρό νερό από τις γεωτρήσεις Α και Β.



Σχήμα 5.4 Στάδια του φαινομένου της υπαλμύρωσης λόγω υπεράντλησης(πηγή Βουδούρης κ.α. 2005)

5.4 Αίτια υπαλμύρωσης των υπόγειων νερών

5.4.1 Γενικά

Κύρια αιτία για την υπαλμύρωση των υπόγειων νερών, που στις περισσότερες περιπτώσεις των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων είναι δεδομένη από τη φύση, αποτελεί η ύπαρξη χαμηλής πιεζομετρίας, δηλαδή η ανάπτυξη μικρού υδραυλικού φορτίου που αποτελεί την κινητήρια δύναμη των υπόγειων νερών προς τη θάλασσα. Με αυτό το δεδομένο, η όποια φυσική ή ανθρωπογενής δράση που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση του υδραυλικού φορτίου αποτελεί αφορμή για ανύψωση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού.

5.4.2 Φυσικά αίτια

Κύρια φυσικά αίτια που αποτελούν αφορμές ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών είναι :

5.4.2.1 Μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που προκύπτει από την αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος

Είναι σαφές ότι σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής, οτιδήποτε σχετίζεται με το νερό θα γνωρίσει στο μέλλον μεγάλες αλλαγές. Σε κάποιες χώρες το μέσο ύψος της βροχής θα αυξηθεί σημαντικά, όπως αναμένεται να συμβεί στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη, σε άλλες, όπως οι χώρες του τρίτου κόσμου, η ανομβρία θα ενταθεί ενώ στη περιοχή της Μεσογείου, θα αλλάξει η κατανομή των βροχοπτώσεων στο χρόνο, καθώς θα έχουμε συχνότερη εμφάνιση ακραίων φαινομένων. Γεγονός, που για τη χώρα μας σημαίνει ότι στο εξής, ακόμη κι αν δεχόμαστε συνολικά σε ετήσια βάση τα ίδια ύψη βροχής σε σχέση με το παρελθόν, η κατανομή του νερού θα είναι τέτοια, ώστε να μην ευνοεί, όπως παλιά, τον εμπλουτισμό των φυσικών δεξαμενών του νερού. Το έδαφος, ως γνωστό, δεν προλαβαίνει να διηθήσει το νερό, όταν αυτό έρχεται σε μεγάλες ποσότητες και για σύντομα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του νερού των βροχοπτώσεων μεγάλης έντασης, να απορρέει αναξιοποίητο.

5.4.2.2 Άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της ροής του αλμυρού νερού εισβάλλοντας στους υπόγειους υδροφορείς. Όπως παρατηρούμε και από το νόμο Ghyben-Herzberg το βάθος του γλυκού νερού (z) εξαρτάται από το h , δηλαδή το ύψος του γλυκού νερού από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε αύξηση του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας έχει ως συνέπεια τη μείωση της χωρητικότητας του γλυκού νερού στον υδροφόρο και τη μετατόπιση της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού προς τα πάνω.

5.4.3 Ανθρωπογενή αίτια

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, από το 2000 έως το 2005 οι βροχές ήταν κατά 25% περισσότερες, σε σχέση με το διάστημα 1995-2000 και κατά 62% περισσότερες, σε σχέση με το διάστημα 1990-1995. Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται, η θάλασσα εισχωρεί με έντονους ρυθμούς και τα αποθέματα νερού μειώνονται επικίνδυνα από την αλόγιστη χρήση που γίνεται από τις ανθρώπινες δράσεις που προκαλούν ελάττωση των υδραυλικών

φορτίων, και είναι κατά κύριο λόγο οι υπεραντλήσεις υπόγειων νερών, καθώς και όλα τα είδη τεχνικών έργων που λειτουργούν αποστραγγιστικά (π.χ. αποστραγγιστικό δίκτυα σε δέλτα ποταμών και σε παραθαλάσσιες πεδινές ζώνες). Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν τα αποστραγγιστικά και αντιπλημμυρικά έργα στο Δέλτα του Νέστου. Ακόμα, τα οποιασδήποτε μορφής ανθρώπινα έργα που προκαλούν ελάττωση της κατείσδυσης από την επιφάνεια του εδάφους, μείωση της διήθησης από τις κοίτες των ποταμών και χειμάρρων (αντιπλημμυρικά έργα, εγκιβωτισμοί υδατορευμάτων, ασφαλτοστρώσεις, φράγματα, τεχνικοί ταμιευτήρες κ.α.).

Προβλήματα δημιουργούνται από την ανάσχεση της υπόγειας ροής, όπως τα τεχνικά έργα (υπόγεια διαφράγματα, βαθιές θεμελιώσεις κ.α.). Επίσης, είναι γνωστό ότι ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται κατά 96 εκατομμύρια το χρόνο. Έτσι, έχουν διαμορφωθεί τρία εναλλακτικά σενάρια σχετικά με τη μελλοντική αύξηση του πληθυσμού της Γης. Η πιο πιθανή προοπτική, είναι το 2050 ο πληθυσμός της γης να φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια. Ενώ σύμφωνα με την πλέον απαισιόδοξη προοπτική θα φθάσει τα 12,5 δισεκατομμύρια. Οι αριθμοί αυτοί παίρνουν άλλες διαστάσεις, όταν ληφθεί υπόψη ότι το 1930 ο πληθυσμός της Γης δεν ξεπερνούσε τα 2 δις και το 1975 τα 4 δις. Εάν στους προηγούμενους αριθμούς λάβουμε υπόψη και το φαινόμενο της αστυφιλίας, τότε γίνεται αντιληπτό ότι οι απαιτήσεις σε νερό θα είναι ακόμα μεγαλύτερες. Επίσης, οι παράκτιες περιοχές παντού στον κόσμο παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού και πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες. Στην χώρα μας η άνοδος του βιοτικού επιπέδου, η ανάπτυξη και εντατικοποίηση της γεωργίας σε πεδιάδες παραθαλάσσιες συνοδευόμενη από αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων που έγιναν αιτία εμφάνισης νιτρικών αλάτων και άλλων ρυπαντών καθώς και η ανάπτυξη του τουρισμού έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των υδατικών αναγκών σε υπόγειο νερό που οδηγούν σε υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων με συνέπεια τον μηδενισμό ή και την αναστροφή των υδραυλικών κλίσεων του και τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς προκαλώντας την υφαλμύρωση των αποθεμάτων που καθίστανται ακατάλληλα για οποιαδήποτε χρήση (Στάμος Κ.,2010).

5.4.4 Γεωλογικά αίτια

Στους παράκτιους καρστικοποιημένους υδροφορείς οι συνθήκες για την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Η δημιουργία καρστικών φαινομένων συνδέεται με την παρουσία πετρωμάτων τα οποία είναι ευδιάλυτα και αφήνουν ελάχιστο υπόλειμμα με αποτέλεσμα να διευρύνονται τα διάκενα με τη διάλυσή τους οπότε είναι δυνατή η κίνηση του νερού μέσω αυτών στο υπέδαφος. Τέτοια πετρώματα είναι οι εβαπορίτες, τα ανθρακικά, οι ηφαιστίτες, οι χαλαζίτες και οι υπερβασίτες.

5.5 Επιπτώσεις της υφαλμύρωσης

Γενικά το υφάλμυρο νερό χαρακτηρίζεται ακατάλληλο τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση, ενώ αρνητικές είναι και οι επιπτώσεις του στην υγεία των καταναλωτών.

Από υδρευτικής άποψης, για τις περιοχές που είναι τουριστικές, με μεγάλο αριθμό εποχικών επισκεπτών και αυξημένες υδρευτικές απαιτήσεις, που καλύπτονται από τα υπόγεια νερά, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφορέων καθιστά προβληματική και ελλειμματική την ύδρευση. Η έλλειψη αυτή οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω των δαπανηρών λύσεων (εμφιαλωμένο νερό, έργα υδροδότησης κ.α.) ή στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Αύξηση του κόστους ζωής αλλά και των εγγενών δυσκολιών παρατηρείται και για τους τουρίστες με αποτέλεσμα τη μείωση της δυναμικής οικονομικής εκμετάλλευσης της περιοχής, μείωση της εισροής νέων επενδυτικών κεφαλαίων και του αριθμού των τουριστών, αφού καθίσταται λιγότερο ανταγωνιστική συγκρινόμενη με άλλες τουριστικές περιοχές.

Από αρδευτικής άποψης, τα προβλήματα που προκαλούνται είναι πολλαπλά διότι παρουσιάζεται έλλειψη επαρκούς ποσότητας νερού, λόγω της έλλειψης έργων υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης, όπως τα έργα εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδατικών πόρων, γεγονός που οδηγεί στην ποσοτικά ελλειμματική άρδευση και στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο ή ακάθατο νερό, με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την πτώση της αξίας της γης, την αύξηση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων, τη μείωση της ανταγωνιστικότητάς τους, τη μείωση του αριθμού των πωλήσεων, τη μείωση των εισοδημάτων των αγροτών και την υποβάθμιση του βιοτικού τους επιπέδου. Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών αναγκάζει τους καλλιεργητές είτε να αντισταθμίζουν ποσοτικά (χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό) την ποιοτική υποβάθμιση του νερού είτε να χρησιμοποιούν

μεγαλύτερα και δραστικότερα βελτιωτικά λιπάσματα. Το γεγονός της αύξησης των εξόδων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εισοδήματός τους ή, στην προσπάθεια αποκατάστασης των εσόδων τους, την αύξηση της τιμής των προϊόντων που μειώνει την ανταγωνιστικότητά τους. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να οδηγήσει τους κατοίκους να επιλέξουν για απασχόλησή τους την τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους, η οποία είναι και άμεσα αποδοτική, παρά τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν και όχι την παραδοσιακή γεωργική ανάπτυξη, η οποία και επισφαλής είναι αλλά και απαιτεί μεγάλης κλίμακας έργα για την εξασφάλιση ικανών ποσοτήτων αρδευτικού νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης (περίπου 15% την τελευταία δεκαετία) και την επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης.

Τέλος, στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο, λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας, προκαλεί σημαντικά προβλήματα στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως αύξηση των ρυθμών εμφάνισης βλαβών με επακόλουθη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, μείωση της παροχτευτικής ικανότητας των αγωγών, αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητάς του (Θεοδωρακόπουλος, 2009).

5.6 Μέτρα προστασίας - αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης

5.6.1 Γενικά

Ο έλεγχος της θαλάσσιας διείσδυσης απαιτεί ικανοποιητική γνώση των υδραυλικών συνθηκών του υδροφόρου και της πηγής του αλμυρού νερού. Η γνώση της έκτασης ενός προβλήματος υφαλμύρωσης και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του αλμυρού νερού κάτω από διαφορετικές συνθήκες εμπλουτισμού και εκφόρτισης είναι αναγκαία, έτσι, ώστε να είναι αποτελεσματική η διαχείριση του προβλήματος.

Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης είναι η παρεμπόδιση της με τη ρύθμιση του υδροφόρου, ώστε η σφήνα του θαλάσσιου νερού (πόδι της διεπιφάνειας) να ελέγχεται σε έναν αποδεκτό βαθμό. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις το πρόβλημα αποτελεί "κληρονόμημα" του παρελθόντος και η προσπάθεια δεν μπορεί παρά να επικεντρωθεί στην ελαχιστοποίηση της περαιτέρω θαλάσσιας διείσδυσης ή/και στη μείωση της έκτασης του υφιστάμενου αλμυρού νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο υδροφόρος μπορεί να είναι ρυπασμένος σε τέτοιο βαθμό, ώστε η ανάκτησή του να μην μπορεί να είναι εφικτή κάτω από συνθήκες τεχνητού

εμπλουτισμού. Στις περιπτώσεις αυτές η εγκατάλειψη της χρήσης του υδατικού πόρου για ύδρευση είναι η μόνη λύση, παρά το γεγονός ότι το νερό μπορεί να χρησιμοποιείται ακόμη σε ορισμένες βιομηχανικές και γεωργικές εφαρμογές.

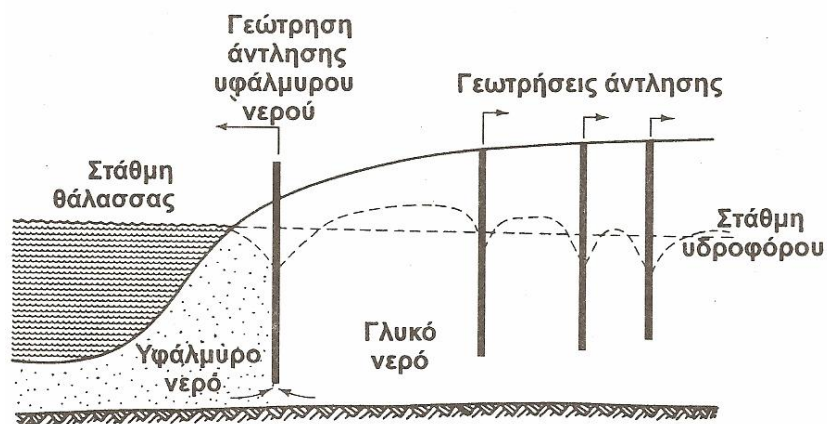
Στην περίπτωση που πολλά βαθιά υδροφόρα συστήματα αποτελούνται από επάλληλους υδροφόρους σε εναλλαγές με βραδυυδροφόρα, τότε οι βαθύτεροι αυτοί υπό πίεση υδροφόροι αξιοποιούνται συχνά όταν οι ανώτεροι υδροφόροι έχουν ρυπανθεί από θαλάσσια διείσδυση. Όμως, εδώ εγκυμονεί ο κίνδυνος διαρροής από τον υπερκείμενο υδροφόρο, καθώς αυξάνουν οι διαφορές στο υδραυλικό φορτίο. Μια δυναμική απειλή για την ποιότητα του νερού στον υποκείμενο υδροφόρο εμφανίζεται στις περιπτώσεις εκείνες που οι γεωτρήσεις χαρακτηρίζονται από κακοτεχνίες. Οι γεωτρήσεις αυτές μπορεί να παρέχουν μια διαδρομή μεταβίβασης αλμυρού νερού από τον υπερκείμενο προς τον υποκείμενο υδροφόρο.

Οι μέθοδοι ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης συνήθως έχουν εφαρμοστεί ή μελετηθεί σοβαρά μόνο σε περιοχές όπου οι υπεραντλήσεις του νερού προκάλεσαν την πτώση της στάθμης των υδροφόρων κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Σε πολλές περιοχές με σοβαρές υπεραντλήσεις, οι υδροφόροι δεν έχουν ακόμα απολέσει την ιδιότητά τους ως πηγές νερού και αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή ταχύτητα κίνησης του αλμυρού νερού. Οι υπεύθυνοι φορείς των περιοχών αυτών βέβαια πρέπει να λύσουν το πρόβλημα, γιατί αν το αλμυρό νερό εισβάλλει στον υδροφόρο τότε απαιτούνται εκατοντάδες χρόνια για την επαναφορά του υδροφόρου στα επίπεδα εκείνα πριν την εκμετάλλευσή του.

Διάφοροι φραγμοί ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμπόδιση ή την επιβράδυνση της θαλάσσιας διείσδυσης μέσα στον υδροφόρο, όπως :

5.6.2 Φραγμοί άντλησης

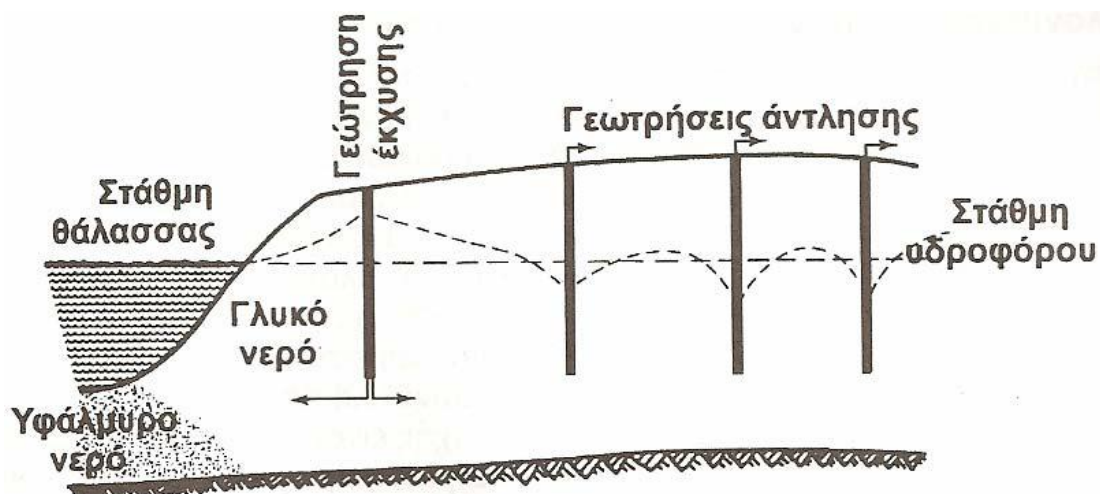
Οι φραγμοί ή κοιλώματα άντλησης δημιουργούνται από συνεχείς αντλήσεις κατά μήκος μιας γραμμής γεωτρήσεων πολύ κοντά στη ακτογραμμή, με αποτέλεσμα το γλυκό νερό να ρέει προς τη θάλασσα. Το αντλούμενο νερό είναι υφάλμυρο και ρίχνεται στη θάλασσα. (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Δημιουργία υδραυλικής τάφρου με άντληση υφάλμυρου νερού η οποία εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση

5.6.3 Φραγμοί εμπλουτισμού (έγχυσης) γλυκού νερού

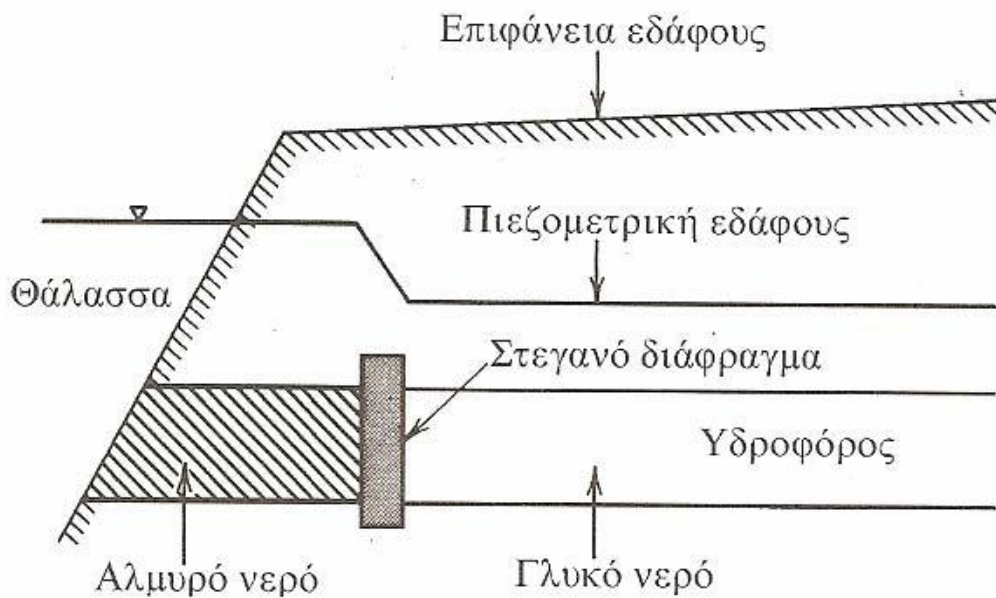
Φραγμοί εμπλουτισμού σχηματίζονται από γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή έγχυσης (injection well) με σκοπό τη διατήρηση ενός υβώματος πίεσης κατά μήκος της ακτογραμμής. Εδώ γλυκό νερό εγχέεται μέσα στον υδροφόρο με τη βοήθεια μιας γραμμής γεωτρήσεων παράλληλα προς την ακτή, αφού το νερό εμπλουτισμού ρέει τόσο προς την ενδοχώρα όσο και προς τη θάλασσα (Σχήμα 5.6). Το δημιουργούμενο ύβωμα προστατεύει τον υδροφόρο από τη θαλάσσια διείσδυση. Ο κατάλληλος σχεδιασμός των αποστάσεων μεταξύ των γεωτρήσεων και η επιλογή των θέσεων θα διασφαλίσει ότι το νερό της θάλασσας δεν θα βρει διέξοδο μεταξύ των φραγμών για να διεισδύσει ή να κινηθεί κατακόρυφα. Γενικά, απαιτείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων, που έχουν υψηλό κόστος συντήρησης και το πιο σημαντικό μια πηγή γλυκού νερού υψηλής ποιότητας.



Σχήμα 5.6 Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη αλμύρινης παράκτιου υδροφόρου

5.6.4 Τεχνητοί υπόγειοι φραγμοί

Η δημιουργία τεχνητών υπόγειων φραγμών, σε όλη την έκταση του υδροφόρου και παράλληλα προς την ακτογραμμή, περιλαμβάνει την κατασκευή κουρτίνας από πασσαλοσανίδες ή την κατασκευή τάφρων από άργιλο ή την έγχυση αδιαπέρατων υλικών μέσω γεωτρήσεων όπως μπετονίτη, υδατοστεγανή άργιλο και ρευστοκονίαμα από τσιμέντο (Σχήματα 5.7 και 5.8).



Σχήμα 5.7 Αντιμετώπιση θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, παράλληλο στη ακτή



Σχήμα 5.8 Σχηματικό διάγραμμα ενός υπόγειου διαφράγματος για την παρεμπόδιση ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού

5.6.5 Έλεγχος αντλήσεων

Στην περίπτωση που ο υδροφόρος υπέρκειται ενός αλμυρού ρευστού, η άνοδος του αλμυρού ρευστού μπορεί να περιοριστεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία των γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αβαθείς και να αντλούνται με μικρές ομοιόμορφες παροχές. Ένα σύστημα πολλαπλών γεωτρήσεων με μικρές επί μέρους παροχές θα ήταν προτιμότερο από μια γεώτρηση υψηλής παροχής. Μία εναλλακτική μέθοδο αποτελεί η κατασκευή μιας στοάς διήθησης, δηλαδή μιας οριζόντιας γεώτρησης, η οποία βοηθά στη μείωση της ανοδικής κίνησης του αλμυρού νερού που είναι αποτέλεσμα υπεράντλησης από μια κατακόρυφη γεώτρηση.

Οι ρυθμοί των απολήψεων μπορούν να μειωθούν όταν η ζήτηση σε νερό μειώνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη λήψη μέτρων, όπως :

- Πληροφόρηση του ευρύτερου κοινού και του τομέα της βιομηχανίας για την ανάγκη οικονομίας στο νερό και, αν είναι αναγκαίο, απαγόρευση ορισμένων χρήσεων.
- Μείωση των απωλειών από συστήματα μεταφοράς και διάθεσης του νερού οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές.
- Ανακύκλωση του νερού βιομηχανικών διαδικασιών μετά από κατάλληλη επεξεργασία πριν από τις διαδοχικές χρήσεις.
- Επαναχρησιμοποίηση υποβαθμισμένων σε ποιότητα νερών, μετά από κάποια επεξεργασία, για άλλες χρήσεις, όπως ψύξη, άρδευση και έγχυση στο υπέδαφος για τη διατήρηση ενός φραγμού παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης.
- Μείωση των απαιτήσεων σε νερό άρδευσης μέσω της επιλογής μη υδροβόρων καλλιεργειών και εφαρμογή τεχνικών άρδευσης, με μικρή κατανάλωση σε νερό, όπως η στάγδην άρδευση και η επένδυση των καναλιών.

5.6.6 Ανακατανομή αντλήσεων

Η επανατοποθέτηση των γεωτρήσεων άντλησης στην ενδοχώρα μπορεί να βοηθήσει στην αποκατάσταση της εκροής του γλυκού υπόγειου νερού. Σύμφωνα με τους Headworth και Fox (1986), μερικά σχέδια μείωσης των επιπτώσεων της θαλάσσιας διείσδυσης χρησιμοποιούν δύο ομάδες γεωτρήσεων, η μία στην ενδοχώρα και η άλλη πλησίον της ακτής. Οι παράκτιες γεωτρήσεις αντλούνται σε περιόδους με υψηλές

στάθμες υπόγειου νερού ενώ οι γεωτρήσεις της ενδοχώρας χρησιμοποιούνται σε περιόδους με χαμηλές στάθμες υπόγειου νερού.

5.6.7 Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων

Είναι φανερό ότι ιδιαίτερα στους υπό πίεση υδροφόρους, η θέση μιας γεώτρησης πιο κοντά στην ενδοχώρα είναι πιο επιθυμητή από μια θέση κοντά στην ακτή και αυτό επειδή το πάχος του γλυκού φακού είναι σημαντικά μεγαλύτερο και ο κίνδυνος της ανοδικής κίνησης αλμυρού νερού είναι μικρότερος. Η τοποθέτηση των υδρομαστευτικών έργων στην ενδοχώρα επιτρέπει περαιτέρω προώθηση της αλμυρής σφήνας μέχρι την τελική σταθερή θέση της έτσι, που να επιτρέπει μικρότερο μεν ρυθμό συνεχόμενων αντλήσεων, αλλά και ελαχιστοποίηση του κινδύνου περαιτέρω διείσδυσης της αλμυρής σφήνας. Σε φρεάτιους υδροφόρους νησιών, τα υδρομαστευτικά έργα πρέπει να τοποθετούνται σε τόσο μικρή απόσταση από την ακτογραμμή, ώστε να γίνεται απόληψη της μέγιστης δυνατής ποσότητας από τον εμπλουτισμό του υδροφόρου πριν την εκροή της ποσότητας αυτής στην ακτογραμμή.

Επίσης, δε θα πρέπει η απόσταση αυτή να είναι τόσο μικρή, ώστε το πάχος του υδροφόρου να είναι πολύ μικρό δημιουργώντας έτσι κινδύνους για ανοδική κίνηση του αλμυρού νερού. Η τοποθέτηση των υδρομαστευτικών έργων πιο μακριά από την ακτή, προς την ενδοχώρα, θα οδηγούσε μικρότερο διαθέσιμο όγκο γλυκού νερού, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν απόθεμα για περιόδους ξηρασίας. Για ελεύθερους ή υπό πίεση υδροφόρους με καθεστώς μέτριων αντλήσεων, μπορεί να σχεδιαστεί συντονισμένη παύση των αντλήσεων σε ορισμένες γεωτρήσεις.

Η αποτελεσματικότητα του τροποποιημένου σχεδίου άντλησης ποικίλλει, ανάλογα με το ρυθμό εμπλουτισμού, τον ρυθμό των αντλήσεων, την καθαρή υπεράντληση, τη στάθμη του υπόγειου νερού, τη γεωμετρία του υδροφόρου και του υφιστάμενο βαθμό της θαλάσσιας διείσδυσης. Το μέτρο αυτό οδηγεί και στη μείωση των απωλειών του γλυκού νερού μέσω μη ελεγχόμενων εκροών.

5.6.8 Τεχνικές αφαλάτωσης

Οι διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα, ουσιαστικά βοηθούν στη διατήρηση των υπαρχόντων διαθέσιμων υδατικών πόρων, ενώ οι τεχνικές αφαλάτωσης μπορούν να παράγουν ανανεωμένο νερό από μη χρησιμοποιημένο νερό. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης, σήμερα λειτουργούν περίπου 13.600 μονάδες

αφαλάτωσης σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες παράγουν περίπου $25,744 \times 10^6 \text{ m}^3$ γλυκού νερού σε ημερήσια βάση.

5.6.9 Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση χρήσης του υπόγειου νερού

Η κάλυψη των διαφόρων αναγκών μιας περιοχής από επιφανειακές πηγές νερού σε αντικατάσταση των αντλούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού, θα επέτρεπε την αποκατάσταση των φυσικών συνθηκών λειτουργίας του υδροφόρου, ενώ η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού θα επιβράδυνε την οποιαδήποτε υφιστάμενη προώθηση της θαλάσσιας διείσδυσης και ορισμένες περιπτώσεις θα προκαλούσε ακόμη και την υποχώρηση του αλμυρού μετώπου.

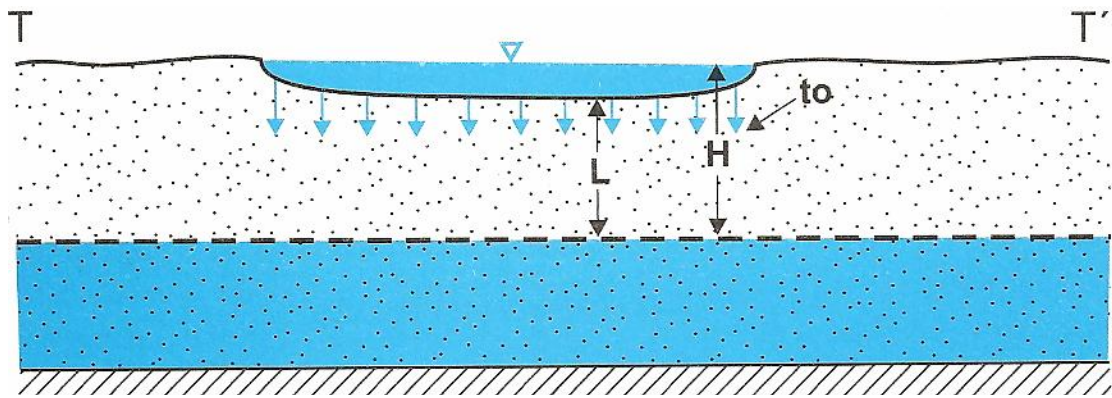
5.6.10 Τεχνητός εμπλουτισμός

Σε περιπτώσεις παράκτιων περιοχών όπου επαρκείς ποσότητες γλυκού νερού είναι διαθέσιμες για εμπλουτισμό σε εποχές υψηλών βροχοπτώσεων, το πλεονάζον νερό θα μπορούσε με διαδικασίες τεχνητού εμπλουτισμού να εμπλουτίζει τους υδροφόρους, να ανυψώνει τα επίπεδα της στάθμης των και να εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση.

Οι προϋποθέσεις του τεχνητού εμπλουτισμού είναι :

- να υπάρχει επιφανειακό νερό σε επαρκή ποσότητα.
- η ποιότητα του επιφανειακού νερού να είναι κατάλληλη και χημικά συμβατή με αυτήν του υπόγειου νερού.
- να υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες (επιφάνειες με μεγάλη περατότητα, υδροφόρα στρώματα σε με αλληλουχία και υδραυλική διασύνδεση).
- το κατασκευαστικό και το λειτουργικό κόστος να μην είναι ασύμφορα.

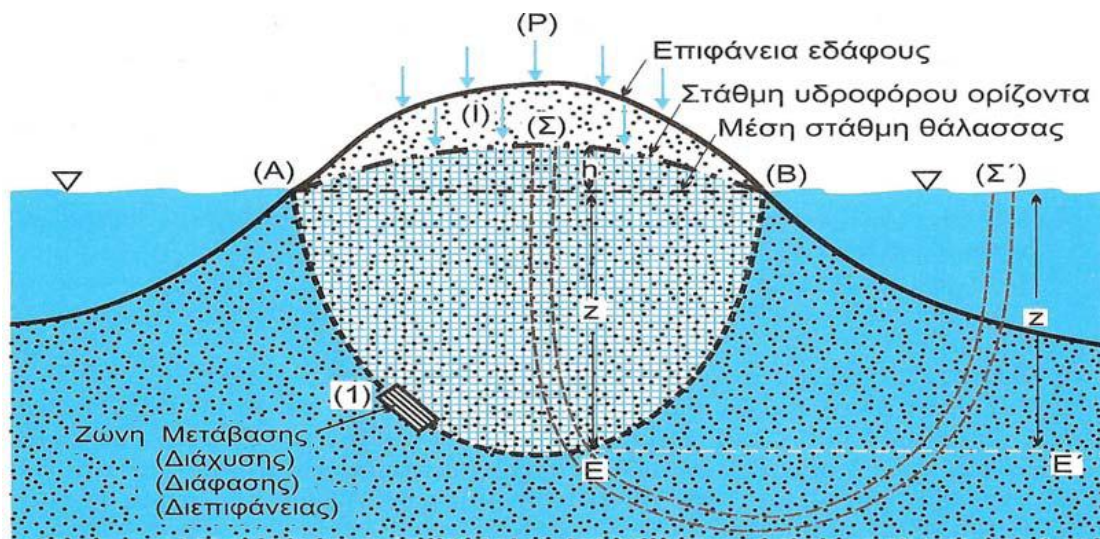
Τα μειονεκτήματα του τεχνητού εμπλουτισμού είναι : α) ότι απαιτείται συνεχής και συστηματική παρακολούθηση των συστημάτων του και β) υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης-ρύπανσης του υπόγειου νερού, αν, έστω και επεισοδιακά, χρησιμοποιηθεί μολυσμένο-ρυπανμένο νερό και γ) η ελάττωση του ενεργού πορώδους εξαιτίας της έμφραξης των πόρων του υδροφορέα.



Σχήμα 5.9 Τεχνητός εμπλουτισμός με τη μέθοδο του πλημμυρισμού επιφανειών

5.7 Επαφή γλυκού-αλμυρού νερού

Για να απλοποιήσουμε την κατάσταση δεχόμαστε ότι έχουμε ένα στρογγυλό νησί δομημένο γεωλογικά και με ομοιόμορφο περατό υλικό. Τότε το νερό της κατείσδυσης θα σχηματίζει ένα υδροφόρο στρώμα από γλυκό νερό. Επειδή το γλυκό νερό της κατείσδυσης (που προέρχεται από τη βροχή) είναι ελαφρύτερο, αφού έχει ειδικό βάρος περίπου $1,000 \text{ gr/cm}^3$ ενώ το θαλασσινό νερό περίπου $1,025 \text{ gr/cm}^3$, θα επιπλέει πάνω από το θαλασσινό νερό σαν ένα παγόβουνο, όπως στο σχήμα 5.10. Δηλαδή, το γλυκό νερό του υδροφόρου θα επιπλέει πάνω από το θαλασσινό που θα υπόκειται και θα βρίσκεται σε βαθύτερα τμήματα του υπεδάφους, όπως συμβαίνει με δύο μη μιγνυόμενα υγρά. Όμως, η επαφή αυτή του γλυκού νερού δε γίνεται με μια απλή γραμμή, με μια επιφάνεια, αλλά με μια ζώνη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10, που στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως ζώνη διεπιφάνειας, ή ζώνη διάφρασης, ή ζώνη διάχυσης, ή ζώνη μετάβασης.



Σχήμα 5.10 Επαφή γλυκού – αλμυρού νερού

5.8 Τρόποι προσέγγισης του φαινομένου

Δύο είναι οι γενικοί τρόποι προσέγγισης του φαινομένου της διείσδυσης του θαλασσινού νερού μέσα στους παράκτιους υδροφορείς που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία : ο τρόπος της διεσπαρμένης διεπιφάνειας (ή γνωστή στην ξένη βιβλιογραφία σαν *disperse interface*) και ο τρόπος της οξείας διεπιφάνειας (ή *sharp interface*). Σύμφωνα με την πρώτη η διεπιφάνεια αναπαριστά την παρουσία μιας μεταβατικής ζώνης σημαντικής έκτασης όπου λαμβάνει χώρα ανάμειξη γλυκού και αλμυρού νερού εξαιτίας της υδροδυναμικής διασποράς. Η δεύτερη αποδέχεται της παρουσία αυτής της ζώνης, την οποία όμως θεωρεί αμελητέας έκτασης συγκρινόμενη με τις διαστάσεις του υδροφορέα, οπότε την αναπαριστά σαν γραμμικό όριο μεταξύ των δύο υγρών.

Η προσομοίωση της μεταβατικής ζώνης που διαχωρίζει τα δύο υγρά απαιτεί ταυτόχρονη λύση των εξισώσεων ροής καθώς και αυτών της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών για τα συντηρητικά χημικά στοιχεία. Ο μεγάλος υπολογιστικός φόρτος όμως που απαιτείται για τη λύση προβλημάτων μεταφοράς που εξαρτώνται από την πυκνότητα, έχει περιορίσει τις περισσότερες λύσεις σε δυσδιάστατες κάθετες τομές.

Η προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας, σε αντίθεση με την προηγούμενη προσέγγιση, διευκολύνει τη μελέτη των παράκτιων συστημάτων. Όταν λοιπόν η μεταβατική ζώνη είναι μικρή σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα, τότε χωρίς μεγάλο σφάλμα μπορούμε να δεχτούμε ότι το γλυκό και το θαλασσινό νερό διαχωρίζονται από μια

σαφή διεπιφάνεια, δηλαδή ότι τα δύο υγρά είναι μη μιγνυόμενα. Τα μοντέλα αυτού του τύπου συνενώνουν τις δύο περιοχές ροής (θαλασσινού και γλυκού νερού) μέσω της οριακής συνθήκης διεπιφάνειας που στηρίζεται στη συνέχεια της ροής και της πίεσης. Σε τρεις διαστάσεις αυτή η οριακή συνθήκη παρουσιάζει υψηλή μη γραμμικότητα, αλλά θεωρώντας οριζόντια ροή και ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις ως προς την κατακόρυφο το πρόβλημα απλοποιείται.

Κάθε μία από τις δύο προσεγγίσεις (οξείας και διεσπαρμένης επιφάνειας) έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της και μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες. Η προσέγγιση της διεσπαρμένης επιφάνειας είναι κατάλληλη για περιοχές όπου η μεταβατική ζώνη είναι πλατιά. Αριθμητικές αστάθειες και λάθη εμφανίζονται όταν επιχειρείται προσομοίωση σε περιοχές όπου η μεταβατική ζώνη είναι στενή, ειδικά δε όταν η ζώνη αυτή προσεγγίζει την οξεία διεπιφάνεια.

Η προσέγγιση της οξείας διεπιφάνειας, σε συνδυασμό με την ολοκλήρωση των εξισώσεων ροής ως προς την κάθετο εφαρμόζεται συνήθως σε εκτεταμένες περιοχές. Αυτή η προσέγγιση δε δίνει πληροφορίες για τη φύση της μεταβατικής ζώνης. Πάντως, αναπαράγει την υδροδυναμική κατάσταση του συστήματος και τις αντιδράσεις του σε εξωτερικές επιδράσεις. Οι Volker και Rushton (1982) συνέκριναν τις λύσεις για μόνιμες ροές και για τις δύο προσεγγίσεις και έδειξαν ότι όσο ο συντελεστής διασποράς μικραίνει τόσο οι δύο λύσεις προσεγγίζουν η μία την άλλη.

5.9 Στατική ισορροπία διεπιφάνειας : νόμος των Ghyben και Herzberg

Η προσέγγιση των Ghyben-Herzberg αποτελεί μία απλή αναλυτική λύση εντοπισμού της θέσης της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού. Αν και έχει βρεθεί-αποδειχθεί πάνω από έναν αιώνα πριν, παραμένει ακόμα γενικώς παραδεκτή και τα αποτελέσματά της θεωρούνται μία έγκυρη προσέγγιση του φαινομένου.

Περισσότερο από έναν αιώνα πριν, οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901) ανεξάρτητα βρήκαν ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δε βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα Ghyben-Herzberg, προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit. Ορίζοντας h_f το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και h_s τη

θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν και γ_f , γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και δ το λόγο $\gamma_f/(\gamma_s-\gamma_f)$, ισχύει:

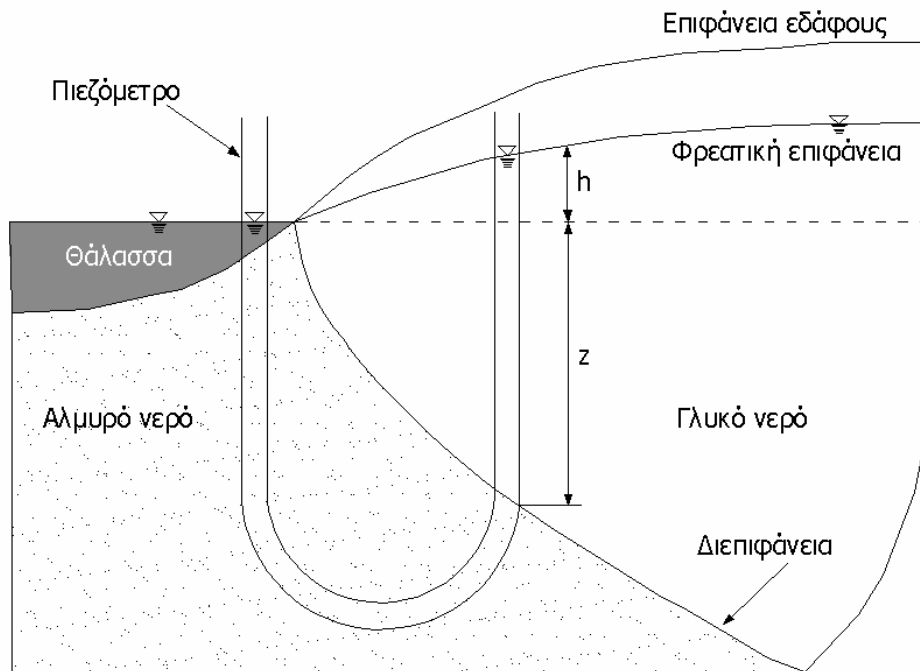
$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Για $\rho_f=1,000 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_s=1,025 \text{ gr/cm}^3$, υπολογίζεται ότι: $h_s=40h_f$ (Νάνου –Γιάνναρου,2006).

Η χρήση της εξίσωσης Ghyben - Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, ως εξής:

- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό.
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την προαναφερθείσα εξίσωση, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή.
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα.
- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί το πόδι της αλάτινης σφήνας.

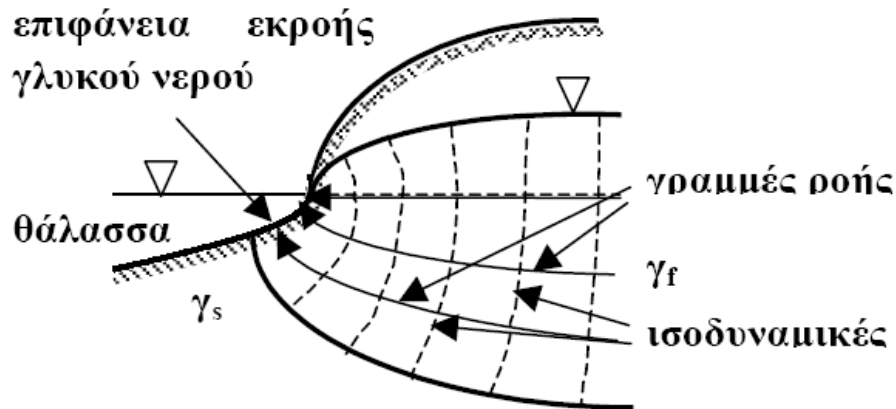
Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για περιοσμένους και φρεάτιους υδροφορείς (Νάνου –Γιάνναρου,2006).



Σχήμα 5.11 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

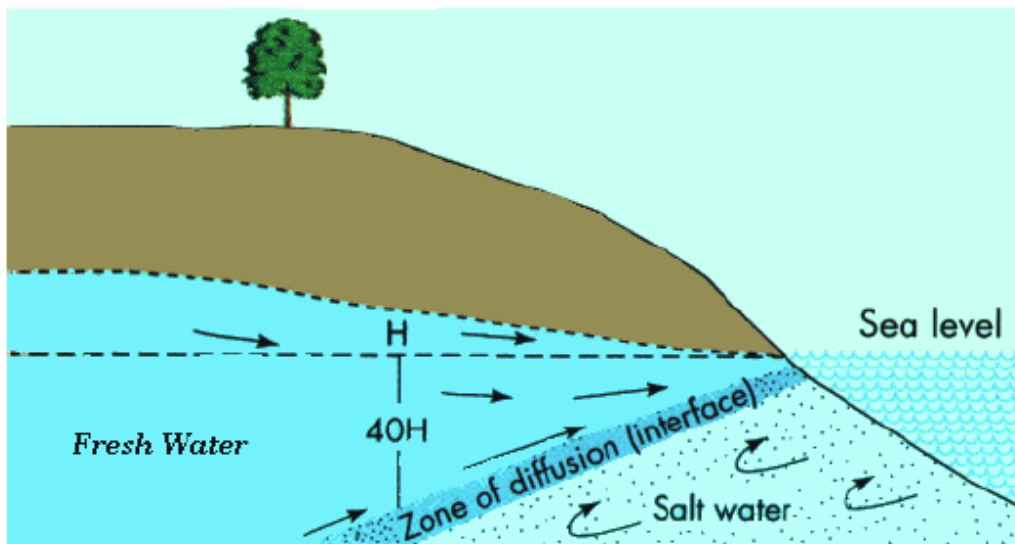
Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας ωστόσο είναι διαφορετική από αυτή που παρουσιάζεται στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg, αφού:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης (Νάνου – Γιάνναρου, 2006).



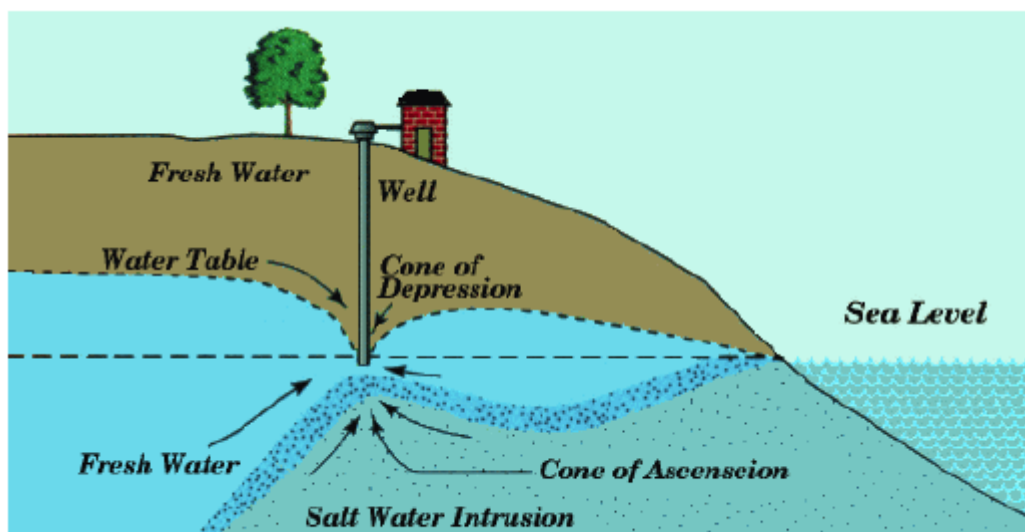
Σχήμα 5.12 Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας

Στα Σχήματα 5.13 και 5.14 φαίνεται η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας και η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή λόγω διείσδυσης της θάλασσας στους παράκτιους υπόγειους υδροφορείς, αντίστοιχα, σύμφωνα με το νόμο των Ghyben-Herzberg.



Σχήμα 5.13 Επαφή γλυκού με αλμυρό νερό

Με τον τρόπο αυτό γίνεται κατανοητό πως, εάν υπάρξει μία πτώση στάθμης μέχρι το επίπεδο της θάλασσας, τότε η τιμή του h θα είναι μηδενική και κατ' επέκταση το βάθος z του γλυκού νερού θα είναι και αυτό μηδενικό, δηλαδή θα υπάρχει μόνο θαλασσινό νερό.



Σχήμα 5.14 Η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή

5.10 Μαθηματικά μοντέλα

Η ποσοτικοποίηση του προβλήματος της υφαλμύρωσης δεν είναι εύκολη υπόθεση. Κατά την εισροή της θάλασσας σε έναν υδροφόρο με συνθήκες μόνιμης ροής στην πραγματικότητα δεν αποκαθίσταται εύκολα. Επιπλέον, τις περισσότερες φορές, το πρόβλημα φτάνει σε ανεπίτρεπτα όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν παίρνονται εγκαίρως. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών είναι συνήθως συνδεδεμένη με οικονομικούς, κοινωνικούς, νομικούς και πολιτικούς παράγοντες και αυτό δυσχεραίνει ιδιαίτερα το πρόβλημα.

Μια τεχνική η οποία ακολουθείται είναι η εφαρμογή κατά τη διαχείριση υπόγειων υδροφόρων μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης. Επομένως, για την αντιμετώπισή τους απαιτούνται αφενός εξειδικευμένες γνώσεις ενός ιδιαίτερα δυσχερούς φαινομένου, όπως είναι η υφαλμύρωση, και αφετέρου δυνατότητα χρήσης μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων και προσαρμογής των τεχνικών αυτών στις απαιτήσεις του υπό εξέταση προβλήματος.

Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για τον μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφόρων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες και στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις

προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς του υδροφόρου μετά από μετρήσεις πεδίου.

Η μαθηματική προσομοίωση απαιτείται επίσης στις περιπτώσεις εκείνες που ένα επιτυχές πρόγραμμα παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τεχνικές απαραίτητες στην έκδοση αδειών ανόρυξης νέων γεωτρήσεων. Η μοντελοποίηση με υπολογιστές μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης και των χαρακτηριστικών των προτεινόμενων γεωτρήσεων παρεμπόδισης θαλάσσιας διείσδυσης και για την αξιολόγηση των επιπτώσεων από την εφαρμογή των προτεινόμενων προγραμμάτων εμπλουτισμού και παρακολούθησης.

Βασική προϋπόθεση για τα ανωτέρω είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μαθηματική προσομοίωση και την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου υπολογιστικού προγράμματος να είναι σωστά, δηλαδή να αντιπροσωπεύουν πράγματι τον υπό μελέτη υδροφόρο. Η εκπόνηση συνεπώς αξιόπιστων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων είναι αναγκαία.

Ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμοσμένες μαθηματικές προσομοιώσεις έχουν οι μετρήσεις πεδίου, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο, επιτρέπουν την βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύουν για την επαλήθευσή του και συνεπώς την αύξηση της αξιοπιστίας του. Σε συνδυασμό με την οικονομική δαπάνη που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, είναι αντιληπτή η σημασία που έχει ο σωστός σχεδιασμός τους.

Η ορθή εφαρμογή μοντέλων ροής, όπως ο κώδικας MODFLOW, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης και στην καλύτερη εφαρμογή των μεθόδων παρεμπόδισης παρέχοντας πληροφορίες οι οποίες θα ήταν αδύνατο να ληφθούν με τις κλασσικές έρευνες. Τα προηγούμενα μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν με μοντέλα βελτιστοποίησης για να βοηθήσουν στην ανάπτυξη στρατηγικών άντλησης που θα εμποδίσουν ή θα αναστρέψουν τη διείσδυση της θάλασσας, ενώ παράλληλα θα συνεχίσει να ικανοποιείται η ζήτηση σε γλυκό νερό.

6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

6.1 Εισαγωγικά στοιχεία

6.1.1 Ιστορική αναδρομή - ορισμοί

Η θεωρία της κίνησης του νερού στα πορώδη μέσα βασίζεται στο "νόμο του Darcy" που διατυπώθηκε στα μέσα του προηγούμενου αιώνα, το 1856, ύστερα από σχετικά πειράματα που διεξήχθησαν στην πόλη Dijon της Γαλλίας. Ανάμεσα στις πρώτες αξιοσημείωτες εφαρμογές του νόμου του Darcy διακρίνονται αυτές των Dupuit, Thiem, Forcheimer και Bousinesq (Γιαννουλόπουλος Π. , 2000).

Σύμφωνα με τον παραπάνω συγγραφέα, ο επόμενος σημαντικός σταθμός στη διερεύνηση των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν τη ροή των υπόγειων νερών είναι η εργασία του C. V. Theis (1935) ο οποίος, με τη βοήθεια του μαθηματικού C.I. Lublin, αναγνώρισε την αναλογία μεταξύ της ροής θερμότητας και της ροής του υπόγειου νερού. Έτσι, ο Theis παρουσίασε μια μαθηματική σχέση η οποία περιγράφει την ακτινική ροή του νερού σε συνθήκες μη μόνιμης ροής στο περιβάλλον ενός υπό άντληση πηγαδιού (αμελητέας διαμέτρου).

Δύο ακόμη σημαντικές εργασίες, που έγιναν στο πρώτο μισό του εικοστού αιώνα, είναι αυτές των Hubbert και Jacob. Ο Hubbert (1940) δεν ασχολήθηκε με την ακτινική ροή που ήταν και η γενική τάση της εποχής εκείνης αλλά με τη φυσική ροή του υπόγειου νερού σε μεγάλες υδρογεωλογικές λεκάνες, και για το λόγο αυτό η εργασία του δεν έτυχε ευρείας αποδοχής παρά μόνο μετά τη δεκαετία του 1960. Ο Jacob (1940) κατέληξε σε μια εξίσωση ροής των υπόγειων νερών, όχι ως ανάλογο της ροής της θερμότητας που πρότεινε ο Theis (1935), στην οποία συμπεριέλαβε και την ελαστική συμπεριφορά των πορωδών μέσων που ο Meinzer είχε περιγράψει 12 χρόνια ενωρίτερα (βλ. Domenico και Schwartz, 1990). Μετά από τη δεκαετία του 1960 η έρευνα στράφηκε περισσότερο στη μελέτη κίνησης διαλυτών ουσιών στα πορώδη μέσα.

Η ροή του υπόγειου νερού σε υδροφόρους σχηματισμούς περιγράφεται σήμερα από διάφορες εξισώσεις, που βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και ποικίλουν ανάλογα με το είδος του υδροφόρου, τις συνθήκες ροής κλπ. Ανάμεσα σε άλλους, οι

Bear και Verruijt (1987) περιγράφουν τις βασικότερες εξισώσεις ή "μαθηματικά μοντέλα" ροής του υπόγειου νερού σε διάφορους τύπους υδροφόρων σχηματισμών.

Η επίλυση προβλημάτων ροής σε πορώδη μέσα έχει επιτευχθεί και επιτυγχάνεται ακόμη και σήμερα με τρεις βασικές μεθοδολογίες, η πρώτη βασίζεται στην ανάπτυξη φυσικών μοντέλων, η δεύτερη στην ανάπτυξη αναλογικών μοντέλων και η τρίτη στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων. Η επίλυση των μαθηματικών μοντέλων επιτυγχάνεται είτε με την εφαρμογή αναλογικών λύσεων είτε αριθμητικών προσεγγίσεων των αντίστοιχων αναλυτικών εξισώσεων. Οι αναλυτικές λύσεις εφαρμόζονται συνήθως σε απλά προβλήματα ροής ενώ, αντίθετα, σύνθετα πεδία ροής απαιτούν την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων επίλυσης.

"Μοντέλο" είναι μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος η οποία προσεγγιστικά προσομοιώνει τη συμπεριφορά του τελευταίου σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή "τάσεις" (Bear και Verruijt, 1987). Σύμφωνα με τα μοντέρνα ASTM πρότυπα (ASTM, D5880-95) μοντέλο, θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα.

"Μαθηματικό μοντέλο", κατά την ευρεία έννοια, είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος ή διαδικασίας με μαθηματική μορφή. Σε γενικές γραμμές μπορεί να περιγραφεί με μια συναρτησιακή σχέση της μορφής:

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

Η εξαρτημένη μεταβλητή, περιγράφει την κατάσταση του συστήματος (π.χ. υδραυλικό φορτίο, συγκέντρωση κλπ.), οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως διαστάσεις χώρου και χρόνου, οι παράμετροι περιγράφουν τις ιδιότητες και τη σύσταση του συστήματος, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου (forcing functions) περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις (stresses).

Στην περίπτωση των υπόγειων νερών, το μαθηματικό μοντέλο, αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του αντίστοιχου φυσικού συστήματος (του υδροφόρου σχηματισμού) θεωρώντας διάφορες παραδοχές απλοποίησής του (ASTM, D5447-93). Ως "μοντέλο ροής υπόγειων νερών" θεωρείται η

εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου σε συγκεκριμένα προβλήματα υπόγειων νερών (ASTM, D5880-95).

Οι αριθμητικές μέθοδοι στα μοντέλα ροής υπόγειων νερών χρησιμοποιούνται στην επίλυση των εξισώσεων μαθηματικών μοντέλων στις οποίες οι μερικές διαφορικές εξισώσεις¹ αντικαθίστανται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν σε διακριτοποιημένη μορφή τη μεταβλητή κατάσταση (state variable) σε συγκεκριμένα (διακριτά) σημεία στο χώρο και στο χρόνο. Μερικές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος αριθμητικό μοντέλο αντί της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου. Αυτό συμβαίνει γιατί στο αριθμητικό μοντέλο εισάγεται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών επιπλέον αυτών που εισήχθησαν στο αντίστοιχο μαθηματικό, με αποτέλεσμα το πρώτο να αποτελεί ένα μοντέλο με δική του ξεχωριστή ταυτότητα και οντότητα. Το αριθμητικό μοντέλο, λοιπόν, είναι ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το υπό μελέτη πρόβλημα.

6.1.2 Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειων νερών

Τα μοντέλα των υπόγειων νερών μπορούν να ταξινομηθούν με ποικίλα κριτήρια. Αρχικά ταξινομούνται ανάλογα με το μέσο ροής, το οποίο διακρίνεται σε μικροπορώδες (πορώδες) και μακροπορώδες (ρωγμώδες). Η ροή στη συνέχεια διακρίνεται σε μονοφασική και πολυφασική. Η μονοφασική ροή περιλαμβάνει ροή νερού σε κορεσμένη ή σε ακόρεστη ζώνη. Η πολυφασική, λαμβάνει χώρα είτε στην ακόρεστη ζώνη όπου το νερό και ο αέρας που καταλαμβάνουν τους πόρους κινούνται ταυτόχρονα ή εκεί (στην κορεσμένη) όπου μη αναμίξιμα υγρά ρέουν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Σε ειδικότερες περιπτώσεις απαντώνται μοντέλα που προσομοιώνουν και ροές υγρών διαφορετικής πυκνότητας.

Μια από τις πιο ολοκληρωμένες και επικρατέστερες ταξινομήσεις είναι αυτή που περιγράφεται στα ASTM πρότυπα (ASTM, D5880-95). Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα υπόγειων νερών ταξινομούνται, ανάλογα την μεθοδολογία δόμησής τους, τη μαθηματική μέθοδο επίλυσης των βασικών διαφορικών εξισώσεων, τη μεταβλητή κατάσταση (state variable) και, την ακρίβεια και πιστότητα.

¹ Η διαφορική εξίσωση εκφράζει τη σχέση μεταξύ μεταβολών συγκεκριμένων ποσοτήτων σε σχέση με τις ποσότητες αυτές. Με την ιδιότητα αυτή συσχετίζεται μια φυσική κατάσταση με τη γειτονική της τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Συνεπώς είναι μια έκφραση της σχέσης αίτιου - αιτιατού (*principle of causality*) που είναι και η βάση των φυσικών επιστημών και αποτελεί μια έκφραση κάποιου φυσικού νόμου (Domenico και Schwartz, 1990).

Ανάλογα με τη μεθοδολογία δόμησής τους τα μοντέλα διακρίνονται σε φυσικά μοντέλα, σε αναλογικά μοντέλα και σε μαθηματικά μοντέλα (κώδικες – λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών).

- Τα φυσικά μοντέλα αντιπροσωπεύονται σχεδόν αποκλειστικά από τα δοχεία άμμου ενώ χρησιμοποιούνται πλέον για εκπαιδευτικούς σκοπούς ή επιδείξεις. Οι πρακτικές τους εφαρμογές είναι δύσκολες εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα φυσικά συστήματα.
- Τα αναλογικά μοντέλα, περιλαμβάνουν κυρίως τα ηλεκτρικά ανάλογα αντιστάσεων – πυκνωτών. Με την ανάπτυξη, όμως, των Η/Υ αντικαθίστανται σταδιακά από πολύπλοκα λογισμικά.
- Τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία έχουν πλέον ταυτιστεί με λογισμικά Η/Υ, αποτελούν την σύγχρονη μέθοδο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν προβλήματα ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά.

Τα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν στην επίλυση των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων, την αναλυτική ή την αριθμητική μέθοδο. Ένας συνδυασμός αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων είναι η μέθοδος του οριακού ολοκληρώματος (boundary integral) ενώ η μέθοδος των αναλυτικών στοιχείων (analytic elements) είναι μια πιο εξειδικευμένη αναλυτική μέθοδος.

- Εάν οι αντίστοιχες εξισώσεις επιλύονται αναλυτικά, τότε χαρακτηρίζονται και ως αναλυτικά μοντέλα. Η γνωστή εξίσωση του Theis για παράδειγμα αποτελεί την επίλυση ενός τέτοιου αναλυτικού μοντέλου. Το μεγαλύτερο συγκριτικό πλεονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης έγκειται στη δυνατότητα να παράγουν, σε μερικές μόνο περιπτώσεις, ακριβείς λύσεις ιδιαίτερα σε απλά προβλήματα ροής ή μεταφοράς διαλυτών ουσιών. Η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη στον έλεγχο της ακρίβειας των αριθμητικών μεθόδων έναντι των αναλυτικών.
- Για πολυπλοκότερα φυσικά συστήματα, όπου οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται καλύτερα με τη χρήση αριθμητικών προσεγγίσεων, προκύπτουν οι λύσεις που καλούνται αριθμητικά μοντέλα. Τα αριθμητικά μοντέλα είναι πιο κατάλληλα για προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία, καθώς και με χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, ρυθμό άντλησης και τροφοδοσίας (distributed models). Στις περισσότερες αριθμητικές μεθόδους η συνεχής μορφή των μερικών διαφορικών

εξισώσεων αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων.

Οι πιο αντιπροσωπευτικές αριθμητικές μέθοδοι είναι αυτές των "πεπερασμένων διαφορών", των "πεπερασμένων στοιχείων", των "οριακών στοιχείων (boundary Integral Equation ή Boundary element method)" και των "αναλυτικών στοιχείων (analytical element method)". Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά επίλυσης προβλημάτων ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στο υπέδαφος υιοθετούν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος αυτή στην περίπτωση των δισδιάστατων προβλημάτων απαιτεί τη διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος σε τετραγωνικά ή ορθογώνια κελιά, ενώ σε τρισδιάστατα προβλήματα σε ορθορομβικά. Τα κελιά αυτά μπορούν να δομούν είτε ομοιόμορφο είτε μεταβλητού μεγέθους κανάβο ή πλέγμα. Η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων γίνεται κάθε φορά σε κόμβους του κανάβου. Ο κόμβος μπορεί να βρίσκεται είτε στο κέντρο κάθε κελιού (block centered grid) ή στις κορυφές του (mesh – centered grid).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι βασικά πιο ευέλικτη στη διακριτοποίηση της περιοχής προσομοίωσης. Σε δισδιάστατα προβλήματα τα επιμέρους στοιχεία είναι τρίγωνα ή τετράπλευρα ενώ σε τρισδιάστατα προβλήματα, τετράεδρα, εξάεδρα ή πρίσματα. Η επιλογή μεταξύ των δύο παραπάνω μεθόδων εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα καθώς και από τη σχετική εμπειρία του χρήστη. Οι πεπερασμένες διαφορές προγραμματίζονται και κατανοούνται ευκολότερα. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή ενός κανάβου πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερα δεδομένα. Τα πεπερασμένα στοιχεία σε αντίθεση με τις πεπερασμένες διαφορές, προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, όπως ρήγματα, ενώ ακόμη μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Αντίθετα, στα πεπερασμένα στοιχεία το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation functions).

Σε ό,τι αφορά στη μεταβλητή κατάσταση (state variable) διακρίνονται τέσσερις γενικοί τύποι μοντέλων:

- Ροής υπόγειων νερών (Fluid flow models): Συνήθως περιγράφονται από μια μόνο εξίσωση που υπολογίζει το υδραυλικό φορτίο, την πίεση ή το δυναμικό. Σε πολυφασική ροή, χρησιμοποιείται μια διαφορετική εξίσωση για κάθε φάση.
- Μεταφοράς διαλυτών ουσιών (Solute transport models): Αντιπροσωπεύονται από μια επιπλέον εξίσωση, από αυτή που υπολογίζει τις συνιστώσες ροής η οποία υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των διαλυτών ουσιών στο σύστημα. Επίσης, έχει αναπτυχθεί μια άλλη οικογένεια μοντέλων τα υδροχημικά μοντέλα που περιγράφουν την ανταλλαγή συστατικών μεταξύ του υπόγειου νερού και του πορώδους μέσου.
- Μεταφοράς θερμότητας (Heat transport models): Στην απλούστερη περίπτωση η μεταφορά της θερμότητας προσομοιώνεται με μια επιπλέον εξίσωση από αυτή της ροής του υπόγειου νερού, ανάλογη με αυτή της μεταφοράς διαλυτών ουσιών αλλά με μεταβλητή κατάστασης τη θερμοκρασία. Σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις, η ροή της θερμότητας αντιμετωπίζεται μαζί με τη ροή του υπόγειου νερού. Η εξίσωση ροής πρέπει να περιγράφει μεταβλητή πυκνότητα νερού ενώ μια επιπλέον εξίσωση χρειάζεται για να περιγράψει τη ροή θερμότητας μέσα στο πορώδες μέσο.
- Παραμορφώσεων – Καθιζήσεων (Deformation models): Η παραμόρφωση του πορώδους μέσου προσομοιώνεται συνδυάζοντας τη ροή του υπόγειου νερού με εξισώσεις που περιγράφουν σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων του ιστού του πορώδους μέσου.

Τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται ακόμη σε αιτιοκρατικά (deterministic) σε στατιστικά (stochastic) ή σε συνδυασμό τους.

- Στα αιτιοκρατικά μοντέλα, συγκεκριμένοι παράμετροι και μαθηματικές εκφράσεις οδηγούν σε ένα μόνο αποτέλεσμα.
- Τα στατιστικά ή στοχαστικά μοντέλα, εισάγουν πολλαπλές προσομοιώσεις με τυχαία μεταβαλλόμενα δεδομένα εισόδου, ανάλογα με τις στατιστικές κατανομές των αντίστοιχων παραμέτρων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι χρήσιμοι σε στατιστικές αναλύσεις αβεβαιότητας, σε ταξινόμηση δεδομένων και περισσότερο στην περιγραφή συστημάτων που παρέχονται μειωμένες σχετικά πληροφορίες. Τα στοχαστικά μοντέλα σε αντίθεση με τα αιτιοκρατικά οδηγούν σε ένα εύρος απαντήσεων το οποίο εκφράζεται με συναρτήσεις κατανομών πιθανότητας.

Σχετικά με την ακρίβεια και την πιστότητα (model fidelity), τα μοντέλα διακρίνονται στα αναγνωριστικά (screening) μοντέλα και στα εφαρμοσμένα - τεχνικά μοντέλα (ή μοντέλα προσομοίωσης υδροφόρων σχηματισμών).

- Τα γενικευμένα αναγνωριστικά μοντέλα, περιγράφουν το φυσικό σύστημα με μικρή σχετικά πιστότητα και εφαρμόζονται στην προσομοίωση γενικευμένων μηχανισμών λειτουργίας. Τυπικές εφαρμογές τους περιλαμβάνουν την εκτίμηση της ποιοτικής συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος κατά τη σχεδίαση προγραμμάτων συλλογής δεδομένων καθώς και σε αρχικούς σχεδιασμούς μελετών σκοπιμότητας.
- Τα τεχνικά ή εφαρμοσμένα μοντέλα, εφαρμόζονται στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος σε συγκεκριμένες φυσικές ή τεχνητές μεταβολές των οριακών συνθηκών, των τάσεων (stresses) ή και υδραυλικών παραμέτρων.

6.2 Μεθοδολογία εφαρμογής και ανάπτυξης μοντέλων - πρωτόκολλα

Σύμφωνα με το (U.S.) National Research Council (1990), τα μοντέλα είναι χρήσιμα εργαλεία στην έρευνα των υπόγειων νερών γιατί συμβάλλουν,

- Στη διερεύνηση και μελέτη του προβλήματος,
- στο σχεδιασμό επανορθωτικών μέτρων,
- στην αποσαφήνιση και αποκωδικοποίηση των μηχανισμών λειτουργίας,
- στην παροχή πρόσθετων πληροφοριών που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων και
- στον εντοπισμό έλλειψης απαραίτητων δεδομένων και συνεπώς στην αναγκαιότητα συλλογής τους.

Τα μοντέλα των υπόγειων νερών συνήθως εφαρμόζονται στα πλαίσια λήψης αποφάσεων στη διαχείριση των φυσικών πόρων. Τα μοντέλα που υποστηρίζουν αυτές τις αποφάσεις πρέπει να είναι επιστημονικά τεκμηριωμένα ενώ αυτοί που ασχολούνται με τη λήψη αποφάσεων οφείλουν να γνωρίζουν τη σχετική αβεβαιότητα στις προβλέψεις των μοντέλων (ASTM, D5447-93). Έτσι, καθίσταται απαραίτητη η θέσπιση ορισμένων κανόνων, πρότυπων ή γενικότερα πρωτοκόλλων εφαρμογής των μοντέλων αυτών. Οι κανόνες αυτοί γίνονται ιδιαίτερα επιτακτικοί τα τελευταία χρόνια, όπου η ανάπτυξη των αριθμητικών και συναφών μεθόδων υπολογισμού έχει

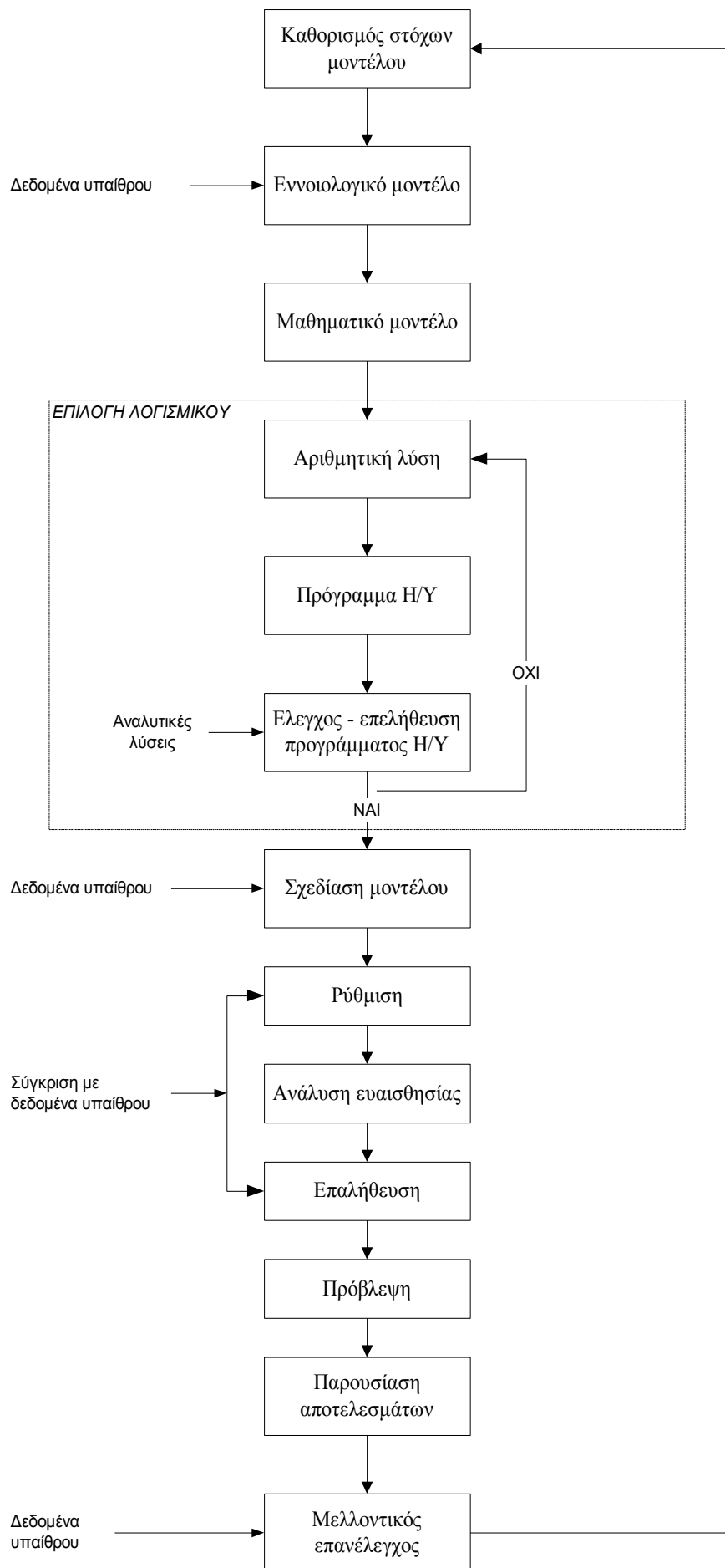
προσελκύσει το ενδιαφέρον όχι μόνο των επιστημόνων αλλά και πολλών υπηρεσιών και φορέων που ασχολούνται με θέματα διαχείρισης φυσικών πόρων.

Τέτοια πρότυπα και κανόνες εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων στα υπόγεια νερά έχουν θεσπιστεί ήδη από τις αρχές της περασμένης δεκαετίας από το (U.S.) National Research Council (1990) και στη συνέχεια από άλλους φορείς και επιστήμονες (Anderson and Woessner, 1992, ASTM: D5447-93). Με βάση τα παραπάνω μια ολοκληρωμένη ανάπτυξη και εφαρμογή ενός μοντέλου υπόγειων νερών πρέπει τουλάχιστον να περιλαμβάνει τα ακόλουθα (βλ. Διάγραμμα 6.1):

- Καθορισμός των **αντικειμενικών στόχων του μοντέλου**. Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν και τις αντίστοιχες εξισώσεις που επιλέγονται καθώς και το λογισμικό.
- Ανάπτυξη του **υποθετικού μοντέλου (conceptual model) του συστήματος**. Στη φάση αυτή ορίζονται οι υδροστρωματογραφικές ενότητες, αναγνωρίζονται τα όρια του συστήματος, συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου, δεδομένα που αφορούν (υδραυλικές) παραμέτρους και εκτιμώνται ποσοτικά οι διάφορες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.
- Επιλογή της αντίστοιχης εξίσωσης και του **κατάλληλου λογισμικού**. Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα Η/Υ το οποίο περιέχει αλγόριθμους που επιλύουν το μαθηματικό μοντέλο αριθμητικά. Η εξίσωση καθώς και το λογισμικό πρέπει πρώτα να επαληθευτούν. Η επαλήθευση της εξίσωσης αποδεικνύει ότι αυτή περιγράφει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο. Η επαλήθευση του λογισμικού επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την αριθμητική του λύση με την αντίστοιχη αναλυτική, αν υπάρχει, για να αποδειχθεί έτσι ότι αυτό επιλύει ορθά τις σχετικές εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.
- **Σχεδιασμός – κατασκευή του μοντέλου**. Περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, τον καθορισμό αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και αρχική επιλογή υδραυλικών παραμέτρων και τάσεων (stresses).
- **Ρύθμιση (Calibration)**. Στόχος της ρύθμισης είναι να καταδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις πραγματικές ροές (fluxes) και τις μεταβλητές κατάστασης (state variables). Κατά τη διαδικασία της ρύθμισης, αναζητάτε ένα σύνολο παραμέτρων (parameters) και τάσεων (stresses) 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 μαθηματικών μεθόδων αυτόματης ρύθμισης (inverse modeling).

- **Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis).** Το μοντέλο υπόκειται σε αβεβαιότητα που αποδίδεται στον μη ακριβή καθορισμό της χωρικής κατανομής των παραμέτρων του στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αβεβαιότητα εισάγεται, επίσης, και στον καθορισμό των τάσεων και των οριακών συνθηκών. Η ανάλυση ευαισθησίας αποσκοπεί στον έλεγχο της σημασίας της αβεβαιότητας στη ρύθμιση του μοντέλου.
- **Επαλήθευση του μοντέλου (validation ή verification).** Στόχος της επαλήθευσης είναι η απόδοση μεγαλύτερης εμπιστοσύνης στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους ρύθμισής του για να παραχθεί έτσι ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων.
- **Πρόβλεψη (prediction).** Αποδίδει ποσοτικά τη συμπεριφορά του συστήματος σε μελλοντικά σενάρια. Το μοντέλο εκτελείται διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους ρύθμισης και μεταβάλλοντας τις πιέσεις εκείνες που εκτιμάται ότι πρόκειται να αλλάξουν στο μέλλον.
- **Επανελέγχος του μοντέλου (postaudit).** Διεξάγεται μετά από αρκετό χρονικό διάστημα από τη ρύθμιση του μοντέλου. Νέα δεδομένα υπαίθρου συλλέγονται για να ελεγχθεί εάν οι προβλέψεις ήταν σωστές. Εάν αυτές ήταν σωστές τότε το μοντέλο αυτό επαληθεύεται για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.



Διάγραμμα 6.1 Μεθοδολογία ανάπτυξης και εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων υπόγειων νερών

7. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

7.1 Γενικά

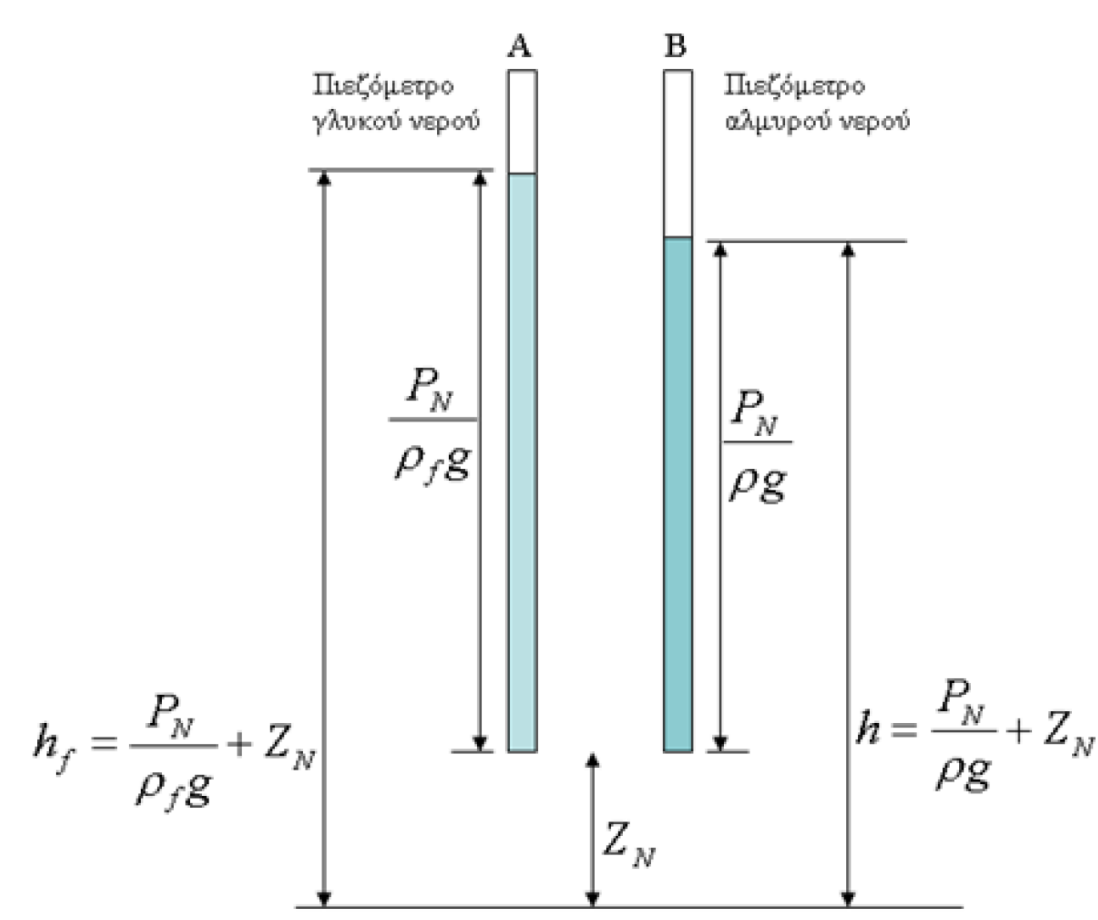
Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι μια σύνθετη υπόθεση και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού, όπως αναλύθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο. Υπάρχουν μοντέλα που ειδικεύονται στις προσομοιώσεις παράκτιων υδροφορέων, όπως το SWAT, το μοντέλο Mantoglou et al (2004) κ.α.

Τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας βασίζονται στην ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας και τη μεταφορά διαλυμένης μάζας σε πορώδες μέσο. Η θεωρία της κίνησης του νερού μεταβλητής πυκνότητας συνήθως παρουσιάζεται με όρους υδραυλικής πίεσης και πυκνότητας του υγρού. Σε αυτήν την παράγραφο, ωστόσο, η κίνηση του νερού μεταβλητής πυκνότητας εξετάζεται με όρους του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου και πυκνότητας του υγρού.

Η επίλυση βασίζεται στην αρχή του υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού ή του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου σε περιβάλλον υφάλμυρου υπόγειου νερού. Η κατανόηση αυτής της αρχής είναι απαιτούμενη τόσο για τη δημιουργία των εξισώσεων μεταβλητής πυκνότητας της κίνησης του υπόγειου νερού που χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση όσο και για την κατανόηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Στην επόμενη παράγραφο δίνεται ένα παράδειγμα που βοηθάει στην κατανόηση αυτής της αρχής.

Στο σχήμα φαίνονται δύο πιεζόμετρα σε κάποιο σημείο N του υπόγειου υδροφορέα με υφάλμυρο νερό. Το πιεζόμετρο A περιέχει γλυκό νερό και είναι εξοπλισμένο με μηχανισμό που δεν επιτρέπει το αλμυρό νερό του υδροφορέα να αναμειχθεί με το γλυκό νερό του πιεζόμετρου B ενώ επιτρέπει στο πιεζόμετρο να ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην πίεση στο σημείο N. Το πιεζόμετρο B περιέχει υφάλμυρο νερό, ίδιο με του υδροφορέα στο σημείο N. Το ύψος της στήλης του νερού στο πιεζόμετρο A είναι $P_N/(\rho_f \cdot g)$. Επομένως, το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στο σημείο N ισούται με το ύψος της στήλης του νερού συν την απόσταση από το επίπεδο αναφοράς.

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f \cdot g} + Z_N$$



Εικόνα 7.1 Παράκτιος υδροφόρας αντλούμενος από μια γεώτρηση (πηγή:Γ. Κουράκος 2009)

Το υδραυλικό φορτίο δεν είναι συνάρτηση μόνο της πίεσης και του υψομέτρου αλλά και της πυκνότητας. Έτσι, σε δύο σημεία με ίδια πίεση και υψόμετρο αλλά διαφορετική πυκνότητα θα καταγραφεί διαφορετικό υδραυλικό φορτίο. Η εξίσωση της κίνησης της υπόγειας ροής μπορεί να σχηματιστεί με βάση το φορτίο αλλά το αποτέλεσμα είναι πολύπλοκες εκφράσεις που περιλαμβάνουν την πυκνότητα και τις παραγωγούς της. Αντίθετα, ο σχηματισμός των εξισώσεων με όρους ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού απλοποιεί το πρόβλημα και επιτρέπει την χρησιμοποίηση λογισμικών, όπως το Modflow με μικρές τροποποιήσεις.

7.2 Αντικειμενικός σκοπός

Ο αντικειμενικός στόχος της ανάπτυξης του αριθμητικού μοντέλου στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι η ποσοτική διερεύνηση και προσομοίωση των μηχανισμών λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών της περιοχής. Η διερεύνηση αυτή αφορά τόσο στα ποσοτικά του χαρακτηριστικά (μεταβολές της στάθμης) όσο και στα ποιοτικά

του (μεταβολές της αλατότητας). Τελικός, επίσης, στόχος εφαρμογής των μοντέλων είναι η διερεύνηση των ασφαλών διαθέσιμων ποσοτήτων υπόγειων νερών ("*sustainable yield*"). Η προσομοίωση των υδροφόρων αυτών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός ή περισσότερων αριθμητικών μοντέλων με τη χρήση των οποίων είναι εφικτή η διερεύνηση της ροής και της μεταφοράς διαλυτών ουσιών (αλάτων) τόσο σε συνθήκες μόνιμης (σταθερής) όσο και σε συνθήκες μη μόνιμης (ασταθούς) ροής. Με την εφαρμογή και ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου θα μπορεί να ελεγχθεί η συμπεριφορά του υδροφόρου σχηματισμού σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς πιέσεις και σενάρια.

7.3 Εννοιολογικό μοντέλο

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια ερμηνεία ή λειτουργική περιγραφή των χαρακτηριστικών και της δυναμικής του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος. Ο ρόλος του είναι η ομαδοποίηση τοπικών και ευρύτερων υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων σε ένα σύνολο παραδοχών και ιδεών που μπορούν να υποστούν ποσοτική επεξεργασία (ASTM, D5447-93, 1993) ενώ η ανάπτυξή του προϋποθέτει την συλλογή και ανάλυση των σχετικών υδρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων. Περιγράφει βασικές πτυχές του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος, όπως τη γεωλογική και υδροστρωματογραφική δομή, το είδος του υδροφόρου μέσου (πορώδες ή ρωγμώδες) φυσικοχημικές διεργασίες, υδραυλικές ιδιότητες καθώς και τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στο εννοιολογικό μοντέλο είναι η κατανομή και διαμόρφωση των υδροφόρων σχηματισμών καθώς και των αδιαπέρατων ή ημιπερατών σχηματισμών που παρεμβάλλονται ή τους πλαισιώνουν. Ανάλογου ενδιαφέροντος είναι, επίσης, και το πάχος των επιμέρους σχηματισμών καθώς και η συνέχεια στη λιθολογική και γεωλογική τους διάρθρωση.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν, την ανάπτυξη και οριοθέτηση των υδροφόρων σχηματισμών της περιοχής μελέτης, τις ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν ή ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού, την εκτίμηση αξόνων ροής και τροφοδοσίας καθώς και την περιγραφή των υδραυλικών και φυσικών ορίων του υδροφόρου.

Οι υδραυλικές ιδιότητες, όπως η μεταβιβαστικότητα (T) και η αποθηκευτικότητα αποτελούν τις παραμέτρους του μοντέλου και γι' αυτό οι τιμές τους στο χώρο καθώς και τα όρια διακύμανσης τους παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Οι πηγές και οι καταβόθρες (sources and sinks), σύμφωνα με τη μαθηματική έκφραση, παρουσιάζουν επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί επηρεάζουν σημαντικά το δίκτυο ροής. Η ποσοτική εκτίμηση των εισροών και εκροών στις θέσεις αυτές αποτελεί αντικείμενο του υδατικού ισοζυγίου.

Τέλος, στο εννοιολογικό μοντέλο επισημαίνονται οι ελλείψεις δεδομένων και οι πιθανές δυνητικές πηγές σφαλμάτων που προέρχονται από αυτές. Συνήθως αναζητούνται περιοχές με φτωχή πληροφορία σε διάφορες παραμέτρους ή τάσεις (stresses), εξαιτίας έλλειψης δεδομένων, οι όποιες αναγνωρίζονται και η βαρύτητά τους συνεκτιμάται ανάλογα.

7.4 Μαθηματικό και αριθμητικό μοντέλο

7.4.1 Επιλογή λογισμικού

Στην επιλογή του μαθηματικού μοντέλου και κατά συνέπεια του σχετικού λογισμικού ελήφθησαν υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον "Αντικειμενικό σκοπό" (παραγρ. 7.2). Επίσης, κρίθηκε σκόπιμη η επιλογή ενός μοντέλου το οποίο θα ήταν σε γενικές γραμμές συμβατό με την ευρύτερη οικογένεια μοντέλων "τύπου" MODFLOW που έχουν αναπτυχθεί από τη USGS.

Η επιλογή του κατάλληλου λογισμικού ή κώδικα Η/Υ, *πέραν των συμβατικών προδιαγραφών της μελέτης* βασίστηκε σε διάφορα κριτήρια. Το βασικότερο κριτήριο βέβαια ήταν η επιλογή του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου που επιλύεται αριθμητικά με το υποψήφιο λογισμικό. Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένα, το υδρογεωλογικό ενδιαφέρον επικεντρώνεται ως επί το πλείστον σε μικροπερατούς υδροφόρους σχηματισμούς της περιοχής. Συνεπώς, απαιτείται ένα μαθηματικό μοντέλο που να βασίζεται στο νόμο του Darcy και να επιλύει αριθμητικά την εξίσωση της συνέχειας στα υπόγεια νερά. Το λογισμικό αυτό θα πρέπει να έχει επίσης ελεγχθεί τόσο ως προς τις λειτουργικές όσο και ως προς τις εκτελεστικές του δυνατότητες (Van der Heijde, 1996). Το λογισμικό που επιλέχτηκε τελικά ήταν αυτό που αναπτύχθηκε από την USGS (McDonald and Harbaugh, 1988) και είναι γνωστό διεθνώς με το ακρωνύμιο "SEAWAT", το οποίο λειτουργεί στη βάση του MODFLOW και του MT3DMS.

Το λογισμικό MODFLOW πληρεί όλα τα παραπάνω κριτήρια, αφού επιλύει την εξίσωση της συνέχειας στα υπόγεια νερά σε τρεις διαστάσεις με βάση το νόμο του Darcy σε συνθήκες τόσο σταθερής όσο και ασταθούς ροής, είναι αρκετά λειτουργικό,

αφού έχει δυνατότητα προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών περιβαλλόντων και οριακών συνθηκών, προσομοιώνει δισδιάστατη οριζόντια ή κατακόρυφη ροή, ημισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή, σε συνθήκες σταθερής ή ασταθούς ροής, σε ανισότροπους, ετερογενείς και επάλληλους (*layered*) υδροφόρους. Οι τύποι των υδροφόρων σχηματισμών που μπορούν να προσομοιωθούν είναι οι υπό πίεση, οι ελεύθεροι, οι μερικώς υπό πίεση και μεταβατικές συνθήκες υπό πίεση – μερικώς υπό πίεση – ελεύθερων υδροφόρων. Είναι, μέχρι σήμερα, το πιο ευρέως διαδεδομένο αριθμητικό μοντέλο ροής υπόγειων νερών και έχει εφαρμοστεί σε παγκόσμια κλίμακα σε πολυάριθμες μελέτες και προβλήματα ροής υπόγειων νερών (Wurbs, 1995). Τέλος, σε ό,τι αφορά στις λειτουργικές του δυνατότητες, έχει τύχει διεθνώς ευρείας αποδοχής, ενώ έχουν αναπτυχθεί από διάφορους φορείς και ερευνητικά ιδρύματα ενδιαφέροντα λογισμικά προ-επεξεργασίας και προετοιμασίας των δεδομένων εισόδου (*preprocessors*) καθώς και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του (*postprocessors*) με αποτέλεσμα να γίνεται φιλικότερο προς το χρήστη.

Το πρόγραμμα SEAWAT έχει αναπτυχθεί στη βάση του MODFLOW και του MT3DMS που επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφοράς διαλυτών ουσιών. Κάποια μέρη του MODFLOW τροποποιήθηκαν για να συμπεριλάβουν τους επιπλέον όρους που απαιτούνται και τους όρους με τους οποίους ποσοτικοποιείται η αναλογία μεταβολής της μάζας, εξαιτίας των μεταβολών στην συγκέντρωση. Ο συνδυασμός του υπολογισμού της ροής και της μεταφοράς επιτυγχάνεται μέσω μιας ταυτόχρονης σταδιακής προσέγγισης κατά την οποία πραγματοποιείται εναλλάξ υπολογισμός της εξίσωσης της ροής με το πρόγραμμα MODFLOW και υπολογισμός της εξίσωσης μεταφοράς διαλυμένης μάζας με το πρόγραμμα MT3DMS

Το SEAWAT περιλαμβάνει δύο μεθοδολογίες επίλυσης (ρητή και πεπλεγμένη) για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με την ρητή επίλυση, χρησιμοποιείται μια υστέρηση (*lag*) στον καθορισμό των πυκνοτήτων στην εξίσωση ροής. Αυτό σημαίνει ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς του προηγούμενου χρονικού βήματος. Έπειτα υπολογίζεται η κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά με βάση την λύση της εξίσωσης της ροής στο τρέχον χρονικό βήμα και η λύση χρησιμοποιείται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας. Σύμφωνα με την πεπλεγμένη μέθοδο, η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού και κίνησης της μάζας επαναλαμβάνεται, ενώ οι συγκεντρώσεις και οι πυκνότητες ενημερώνονται κάθε χρονικό βήμα ωστόσο η μέγιστη διαφορά

στην πυκνότητα, στα κελιά, για διαδοχικές επαναλήψεις να είναι μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή.

Ο τρόπος χρονικής διακριτοποίησης που εφαρμόζεται στο SEAWAT είναι συνδυασμός των αντίστοιχων τρόπων που εφαρμόζονται στα προγράμματα MODFLOW και MT3DMS. Στο MODFLOW η συνολική περίοδος προσομοίωσης διαιρείται σε μία ή και περισσότερες περιόδους. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου οι παροχές και οι οριακές συνθήκες διατηρούνται σταθερές. Επιπλέον, κάθε περίοδος χωρίζεται σε ένα ή και περισσότερα χρονικά βήματα ώστε τα αποτελέσματα να είναι είτε πιο ακριβή είτε να επιτρέπουν την εξαγωγή αποτελεσμάτων τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Το πρόγραμμα MT3DMS αρχικά σχεδιάστηκε έτσι, ώστε να συνεργάζεται με το MODFLOW. Σε μια συμβατική εφαρμογή που συνδυάζει το MODFLOW με το MT3DMS οι χωρικές και χρονικές μεταβολές του πεδίου πυκνοτήτων υποτίθεται ότι είναι τόσο μικρές ώστε δεν επηρεάζουν την κίνηση του νερού. Έτσι αναπτύχθηκε μια πρακτική διαδικασία σύμφωνα με την οποία πρώτα εκτελείται η προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων νερών και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης διάφορες πληροφορίες σχετικές με την κίνηση των υπόγειων νερών που απαιτούνται από το MT3DMS αποθηκεύονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο. Στη συνέχεια, με βάση αυτό το αρχείο το πρόγραμμα MT3DMS εκτελεί την προσομοίωση της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Στο MT3DMS κάθε χρονικό βήμα του MODFLOW χωρίζεται επιπλέον σε πιο μικρά χρονικά τμήματα που ονομάζονται βήματα μεταφοράς. Ο όρος βήματα μεταφοράς εισήχθη για να αποφευχθεί η σύγχυση με τα χρονικά βήματα στα οποία χωρίζεται μια περίοδος στο MODFLOW. Ωστόσο, το βήμα μεταφοράς δεν είναι τίποτα άλλο από ένα χρονικό βήμα σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η μεταφορά μάζας. Αυτός ο επιπλέον διαχωρισμός γίνεται κυρίως για λόγους σταθερότητας της λύσης που δίνει το MT3DMS. Οι Zheng and Wang(1999) όρισαν κάποιους περιορισμούς ώστε η λύση που δίνεται από το πρόγραμμα να είναι σταθερή και ακριβής. Έτσι, στην περίπτωση κίνησης διαλυμένης μάζας από μεταφορά ισχύει:

$$\Delta t \leq \frac{0.5}{\frac{v_x}{\Delta x} + \frac{v_y}{\Delta y} + \frac{v_z}{\Delta z}}$$

Εξίσωση 7.1 Κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά

Στην περίπτωση κίνησης της διαλυμένης μάζας από διασπορά:

$$\Delta t \leq \frac{0.5}{\frac{D_x}{\Delta x^2} + \frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}}$$

Εξίσωση 7.2 Κίνηση της διαλυμένης μάζας από διασπορά

Στην περίπτωση εισροής από εξωτερικές πηγές ή εκροής σε καταβόθρες διαλυμένης μάζας:

$$\Delta t \leq \frac{\theta}{|q_{ss}|}$$

Εξίσωση 7.3 Εισροή από εξωτερικές πηγές ή εκροής σε καταβόθρες διαλυμένης μάζας.

όπου Δt είναι το χρονικό βήμα μεταφοράς και Δx , Δy , Δz είναι οι διαστάσεις του κελιού.

Το MT3DMS χρησιμοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς για να υπολογίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό βήμα μεταφοράς το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα και δεν μπορεί να ορισθεί από το χρήστη. Στην περίπτωση της εξίσωσης 1 ο υπολογισμός απαιτεί να είναι γνωστό το πεδίο των ταχυτήτων. Έτσι, για ένα χρονικό βήμα του MODFLOW από t_i σε t_{i+1} το MT3DMS χρησιμοποιεί το πεδίο ταχυτήτων που έχει υπολογισθεί την στιγμή t_{i+1} για να υπολογίσει την διάρκεια και τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς. Επιπρόσθετα, το MT3DMS έχει διαδικασίες σύμφωνα με τις οποίες ο χρήστης καθορίζει το βήμα μεταφοράς, το οποίο από την μια μπορεί να μειώσει τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς που απαιτούνται σε μια προσομοίωση, αλλά ταυτόχρονα τίθενται θέματα σύγκλισης και ακρίβειας εάν το βήμα μεταφοράς δεν είναι κατάλληλο.

Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων και του πεδίου ταχυτήτων πριν ξεκινήσει ο υπολογισμός της εξίσωσης μεταφοράς και έτσι δεν είναι κατάλληλη σε προγράμματα μεταβλητής πυκνότητας εξαιτίας της

αλληλεξάρτησης μεταξύ των εξισώσεων ροής και μεταφοράς. Στο πρόγραμμα SEAWAT η κάθε περίοδος χωρίζεται σε χρονικά βήματα. Αν για την εξίσωση κίνησης της διαλυμένης μάζας χρησιμοποιηθεί ρητή επίλυση, τότε το χρονικό βήμα υπολογίζεται από το πρόγραμμα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των εξισώσεων 1 έως 3 με αποτέλεσμα ο αριθμός των χρονικών βημάτων να μην είναι γνωστός πριν από τη εκτέλεση του προγράμματος. Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύονται και οι δύο εξισώσεις της ροής και μεταφοράς διαλυμένης μάζας. Για τον συνδυασμό των δύο αυτών εξισώσεων το SEAWAT έχει διαθέσιμες δύο μεθοδολογίες. Η ρητή επίλυση απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο αλλά μπορεί η λύση να μην είναι τόσο ακριβής όσο με την πεπλεγμένη επίλυση. Επιπλέον, μπορεί να απαιτούνται μικρότερα χρονικά βήματα στη ρητή μέθοδο από αυτά που απαιτούνται στην πεπλεγμένη επίλυση.

Τα βήματα που ακολουθούνται αν ο χρήστης επιλέξει ρητή επίλυση είναι τα εξής:

Η εξίσωση της ροής επιλύεται επαναληπτικά με το διαμορφωμένο σε προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας πρόγραμμα MODFLOW για να υπολογιστούν τα ισοδύναμα υδραυλικά φορτία την χρονική στιγμή t_1 , το οποίο αναπαριστά και το τέλος του πρώτου χρονικού βήματος. Σε αυτήν την λύση, ως πεδίο πυκνοτήτων χρησιμοποιούνται οι τιμές της προηγούμενης περιόδου ή οι τιμές που υπολογίζονται με βάση την αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας εάν η περίοδος είναι η πρώτη. Το μήκος του αρχικού χρονικού βήματος Δt_1 είτε καθορίζεται από το χρήστη μέσω της μεταβλητής INITIALDT είτε χρησιμοποιείται μια προκαθορισμένη από το πρόγραμμα τιμή ίση με 0.01 μονάδες χρόνου, για παράδειγμα 0.01 ημέρες εάν έχει επιλεγεί ως μονάδα χρόνου η ημέρα.

1. Οι τιμές ειδικής απορροής υπολογίζονται για την χρονική στιγμή t_1 με βάση το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της κίνησης και χρησιμοποιούνται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας και αντιπροσωπεύουν το πεδίο ροής για όλο το χρονικό βήμα Δt_1 .
2. Με βάση την εξίσωση μεταφοράς για το διάστημα Δt_1 υπολογίζεται η συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας την χρονική στιγμή t_1 .
3. Το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_1 , το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πεδίου ροής στο δεύτερο χρονικό βήμα υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις της χρονικής στιγμής t_1 .
4. Το μήκος του χρονικού βήματος Δt_2 υπολογίζεται με βάση τους

περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες που έχουν υπολογισθεί την χρονική στιγμή t_1 . Το χρονικό βήμα Δt_2 θα πρέπει πάντοτε να είναι μεγαλύτερο από το βήμα Δt_1 . Εάν η τιμή του Δt_2 είναι μεγαλύτερη από την τιμή του Δt_1 , αυτό σημαίνει ότι το πεδίο των συγκεντρώσεων κατά συνέπεια και των πυκνοτήτων μεταβάλλεται αλματωδώς. Αν το Δt_1 είναι μεγαλύτερο από το Δt_2 τότε το SEAWAT προτρέπει τον χρήστη να ελαττώσει την τιμή INITIALDΤ και να ξεκινήσει εκ νέου το πρόγραμμα.

5. Η εξίσωση της κίνησης της ροής επιλύεται για να υπολογιστούν τα υδραυλικά φορτία και το πεδίο ροής την χρονική στιγμή t_2 χρησιμοποιώντας το πεδίο των πυκνοτήτων του πρώτου χρονικού βήματος.
6. Το πεδίο συγκεντρώσεων την χρονική στιγμή t_2 προσδιορίζεται από την επίλυση της εξίσωσης της κίνησης διαλυμένης μάζας για το χρονικό βήμα Δt_2 . Με βάση τις υπολογισμένες συγκεντρώσεις υπολογίζεται το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_2 .
7. Με βάση τους περιορισμούς σταθερότητας και ακρίβειας υπολογίζεται το μήκος το χρονικού βήματος Δt_3 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Όταν η επίλυση που ακολουθείται στο SEAWAT είναι ρητή, λαμβάνονται υπόψη τα εξής τρία κριτήρια:

1. Προβλήματα αστάθειας της λύσης που μπορεί να προκύψουν στην εξίσωση ροής, εξαιτίας του ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από τις συγκεντρώσεις του προηγούμενου χρονικού βήματος.
2. Το μήκος του χρονικού βήματος, το οποίο υπολογίζεται για να ικανοποιήσει τους περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας στην εξίσωση κίνησης της διαλυμένης μάζας, βασίζεται στις ταχύτητες που υπολογίζονται στο τέλος του χρονικού βήματος.
3. Με βάση τα δύο παραπάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια υστέρηση ενός χρονικού βήματος στην εφαρμογή των περιορισμών. Έτσι, οι περιορισμοί που θα έπρεπε να εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα t_t , στην πραγματικότητα εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα t_{t+1} .

Εξαιτίας των ανωτέρω προτείνεται η εκτέλεση της προσομοίωσης και με μειωμένα χρονικά βήματα ώστε να επαληθεύεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Η πεπλεγμένη μέθοδος επίλυσης περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφοράς διαλυμένης μάζας επαναληπτικά για κάθε χρονικό βήμα ωσότου οι διαφορές στο πεδίο πυκνοτήτων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερες από μια τιμή καθορισμένη από το χρήστη. Έτσι, τα βήματα 2, 3 και 4 επαναλαμβάνονται στο ίδιο χρονικό βήμα μέχρι η διαφορά στο πεδίο πυκνοτήτων να είναι μικρότερη από μια τιμή που καθορίζει ο χρήστης. Με αυτή τη διαδικασία τα υδραυλικά φορτία, οι συγκεντρώσεις, οι πυκνότητες και οι ταχύτητες σχετίζονται με το τέλος του.

Τέλος, το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας θεωρείται ότι προσομοιώνει καλύτερα το πραγματικό σύστημα των παράκτιων υδροφορέων, λαμβάνοντας υπόψη την ζώνη διασποράς και υπολογίζοντας την συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου μέσα από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς ρύπων. Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να προσομοιώσει σύστημα μη μόνιμης ροής. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι ότι απαιτεί διακριτοποίηση ως προς την κατακόρυφη διάσταση σε επίπεδα. Έτσι, ο αριθμός αγνώστων μεγαλώνει εκθετικά καθώς επίσης και ο χρόνος επίλυσης. Σε πραγματικές συνθήκες με σχετικά πυκνό σύστημα κελιών ο χρόνος είναι σχεδόν απαγορευτικός για ενσωμάτωση του μοντέλου σε προβλήματα βελτιστοποίησης (Γ. Κουράκος 2009).

7.4.2 Μαθηματικό μοντέλο SEAWAT

Το μοντέλο αυτό είναι αναπτυσσόμενο στη βάση του κλασικού μοντέλου MODFLOW, αλλά αποτελεί τελείως διαφορετικό μοντέλο δεδομένου ότι οι σχετικές μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται αριθμητικά τροποποιούνται ριζικά. Η ροή του υπόγειου νερού στο SEAWAT, περιγράφεται από την εξίσωση 7.4.

$$-\nabla \cdot (\rho \bar{q}) + \bar{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial P}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (7.4)$$

όπου, ρ , είναι η πυκνότητα του υφάλμυρου υπόγειου νερού

\bar{q} , το άνυσμα της ειδικής παροχής (specific discharge vector)

$\bar{\rho}$, η πυκνότητα του νερού που εισρέει στο σύστημα ή εκρέει από αυτό σε διάφορες πηγές / καταβόθρες (π.χ. γεωτρήσεις κατακόρυφη φυσική τροφοδοσία, εστίες ρύπανσης, τεχνητός εμπλουτισμός κλπ.)

q_s η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας που αφορά τις πηγές / καταβόθρες.

θ το ενεργό πορώδες και

t ο χρόνος.

Για τη σχέση της πυκνότητας - αλατότητας του νερού χρησιμοποιείται η εξίσωση.

$$\rho = \rho_f + EC \quad (7.5)$$

όπου E είναι μια αδιάστατη σταθερά η οποία έχει μια προσεγγιστική τιμή ίση με 0,7143 για συνήθεις τιμές συγκέντρωσης μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού,

C είναι η συγκέντρωση των αλάτων (ML^{-3})

Η μεταφορά διαλυτών ουσιών και συγκεκριμένα η μεταφορά αλάτων στα υπόγεια νερά από την ανάμιξη νερών διαφορετικής πυκνότητας υπολογίζεται από το πλέον σύγχρονο μαθηματικό μοντέλο που είναι γνωστό ως MT3DMS (Zheng and Wang, 1998). Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό SEAWAT αποτελεί έναν ενιαίο κώδικα ο οποίος συμπεριλαμβάνει και τροποποιημένη έκδοση του MT3DMS.

Η τροποποιημένη εξίσωση μεταφορά – διασπορά του λογισμικού MT3DMS που επιλύεται από το SEAWAT είναι η εξίσωση (7.6)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{f\alpha} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \\ = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \quad (7.6) \end{aligned}$$

όπου α, β είναι οι κύριες κατευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας (παράλληλα με τη στρώση)

γ , η κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των α και β (δηλ. κάθετη στη στρώση)

ρ και ρ_f οι πυκνότητες του υφάλμυρου και του γλυκού νερού αντίστοιχα.

Z το υψόμετρο του κελιού,

h και h_f το υδραυλικό φορτίο και το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού αντίστοιχα.

K_f η υδραυλική αγωγιμότητα για το γλυκό νερό

S_f η ειδική αποθηκευτικότητα για το γλυκό νερό [L^{-1}].

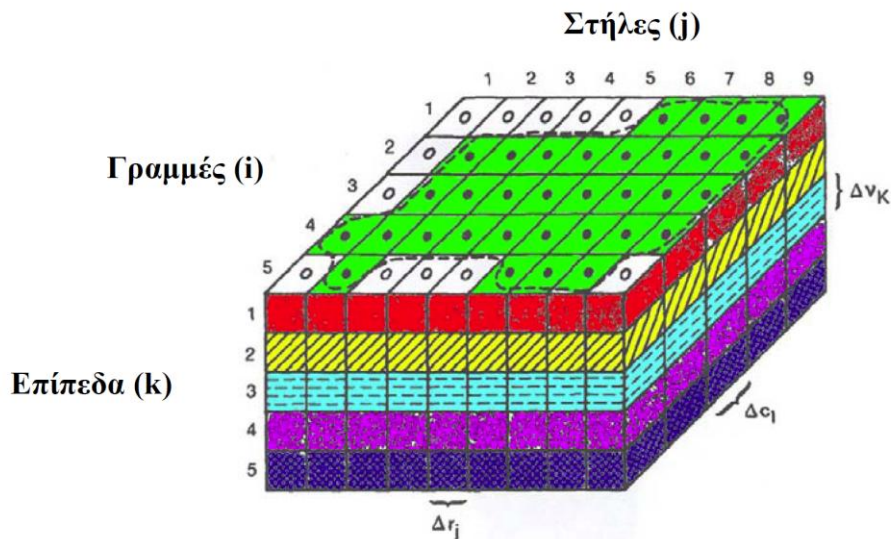
E η σταθερά που αναφέρεται στην εξίσωση 3.2($\partial\rho/\partial C$)

7.4.3 Αριθμητική προσέγγιση του κώδικα MODFLOW

7.4.3.1 Η συνθήκη της διακριτοποίησης

Το παρακάτω Σχήμα 1 παρουσιάζει τη χωρική διακριτοποίηση του συστήματος ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα κελιών, η θέση των οποίων περιγράφεται με όρους γραμμών, στηλών και επιπέδων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα δεικτών i, j, k . Για ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από “nrow” γραμμές, “ncol” στήλες και “nlay” επίπεδα, i είναι ο δείκτης των γραμμών ($i= 1, 2, \dots, nrow$), j είναι ο δείκτης των στηλών ($j= 1, 2, \dots, ncol$) και k είναι ο δείκτης των επιπέδων ($k= 1, 2, \dots, nlay$). Για παράδειγμα, το Σχήμα 1 παριστάνει ένα σύστημα με $nrow= 5$, $ncol= 9$ και $nlay= 5$.

Κατά το σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η παραδοχή πως τα επίπεδα ανταποκρίνονται γενικά σε οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες ή διαστήματα. Με αυτόν τον τρόπο, και με όρους καρτεσιανών συντεταγμένων, ο δείκτης k καταδεικνύει μεταβολές στον κατακόρυφο άξονα z . Λόγω της συνθήκης που ακολουθείται στο μοντέλο αυτό να αριθμούνται τα επίπεδα από το ανώτατο στρώμα προς το κατώτατο, προσαύξηση στο δείκτη k μαρτυρά μείωση του επιπέδου. Αντίστοιχα οι γραμμές θεωρούνται παράλληλες στον άξονα x , έτσι ώστε προσαύξηση στο δείκτη i να μαρτυρά μείωση κατά τον άξονα των y . Τέλος, οι στήλες θεωρούνται παράλληλες στον άξονα y , έτσι ώστε μια προσαύξηση στο δείκτη j να μαρτυρά αύξηση κατά τον άξονα των x .



Σχήμα 7.1 Ένας υποθετικός διακριτοποιημένος υδροφόρεας(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)

Όπου :

----- : τα όρια του υδροφορέα

● : ενεργό κελί

○ : ανενεργό κελί

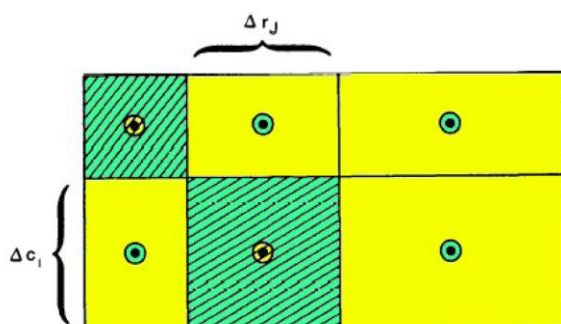
Δr_j : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των γραμμών. ο δείκτης j υποδεικνύει τον αριθμό της στήλης

Δc_i : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των στηλών. ο δείκτης i υποδεικνύει τον αριθμό της γραμμής

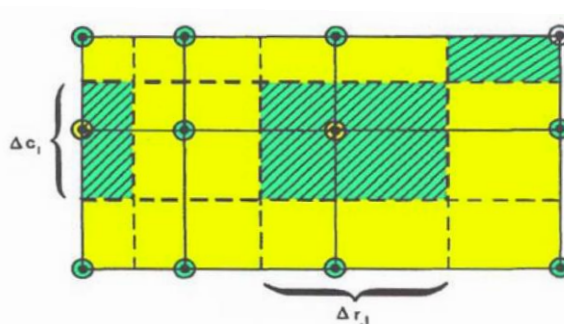
Δv_k : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των επιπέδων. ο δείκτης k υποδεικνύει τον αριθμό των επιπέδων

Σε κάθε κελί υπάρχει ένα σημείο το οποίο καλείται «κόμβος» και για το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί το φορτίο. Το Σχήμα 7.2 απεικονίζει σε δύο διαστάσεις δύο συνθήκες για τον καθορισμό της δομής των κελιών ανάλογα με το πού βρίσκονται οι κόμβοι προσδιορισμού των τιμών του φορτίου, αυτή των κεντραρισμένων όγκων (block- centered formulation) και αυτή των κεντραρισμένων σημείων (point- centered formulation). Και τα δύο συστήματα ξεκινούν με το διαχωρισμό του υδροφορέα με δύο ορθογώνιες διατάξεις παράλληλων ευθειών. Στο σχηματισμό των κεντραρισμένων όγκων, οι όγκοι που σχηματίζονται από τις διατάξεις των παράλληλων γραμμών αποτελούν τα κελιά, ενώ οι κόμβοι βρίσκονται

στα κέντρα των κελιών. Στο σχηματισμό των κεντραρισμένων σημείων, οι κόμβοι βρίσκονται στα σημεία τομής των διατάξεων των παράλληλων ευθειών, ενώ τα κελιά σχηματίζονται γύρω από τους κόμβους και διαχωρίζονται από τη μεσοκάθετο της ευθείας μεταξύ δύο κόμβων. Και στις δύο περιπτώσεις, η διάταξη των κόμβων πρέπει να επιλέγεται τέτοια, ώστε οι υδραυλικές ιδιότητες του συστήματος να είναι σε γενικές γραμμές ομοιόμορφες σε όλη την έκταση του κελιού. Ο σχηματισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο είναι αυτός των κεντραρισμένων όγκων, παρά το γεγονός ότι η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών που αναπτύχθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ισχύει και για τους δύο σχηματισμούς.







Σχήμα 7.2 Σύστημα δικτύων κεντραρισμένων όγκων(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)



Σχήμα 7.3 Σύστημα δικτύων κεντραρισμένων σημείων(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)

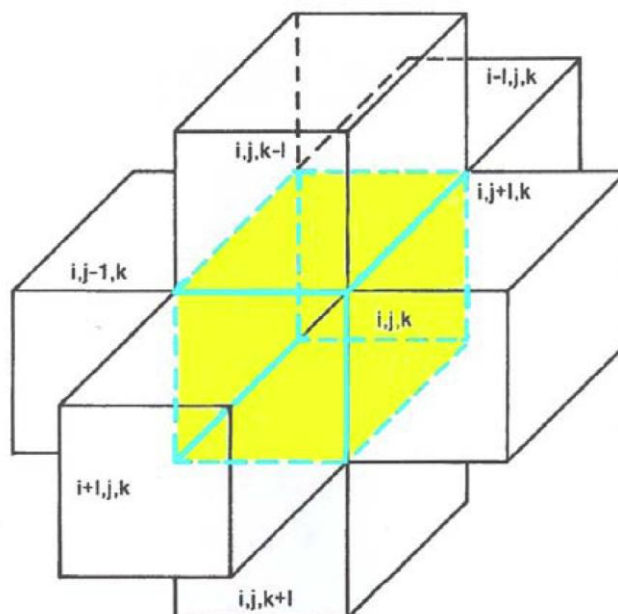
Όπου:

-  : οι κόμβοι,
-  : οι γραμμές του δικτύου,
-  : τα όρια των κελιών του σχηματισμού των κεντραρισμένων σημείων,
-  : τα κελιά που σχετίζονται με τους επιλεγμένους κόμβους

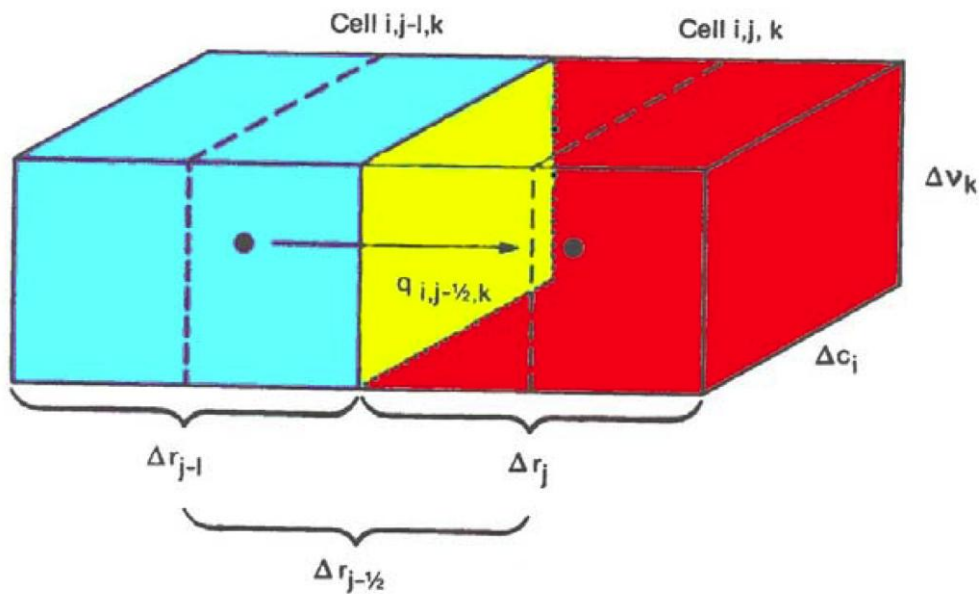
7.4.3.2 Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Σε συνθήκες μεταβλητής πυκνότητας η κίνηση του νερού και η κίνηση της διαλυμένης μάζας είναι διαδικασίες αλληλένδετες για αυτό απαιτείται ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς. Στα περισσότερα προβλήματα είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να επιτευχθούν αναλυτικές λύσεις και για αυτό εφαρμόζονται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η προσέγγιση του προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών γιατί το μοντέλο προσομοίωσης που επιλέχθηκε για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της ροής και μεταφοράς μάζας στις διάφορες εφαρμογές είναι το SEAWAT το οποίο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια συνήθης μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρις ορθογώνιο πλέγμα χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελιά. Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές επομένως εφαρμόζεται στον διακριτοποιημένο χώρο με βάση την υπόθεση ότι κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς.

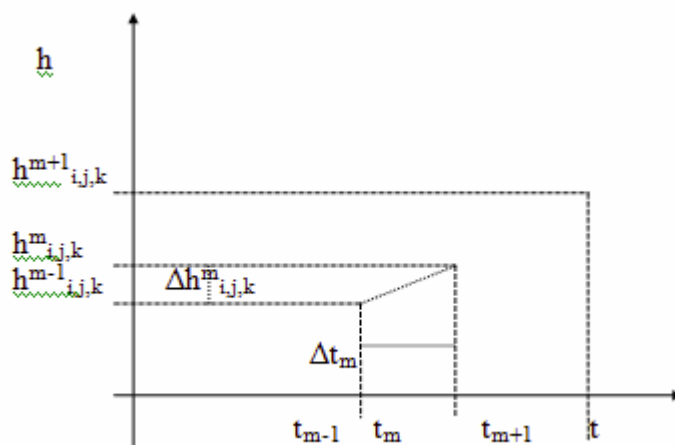


Σχήμα 7.4 Το κελί (i, j, k) και οι δείκτες των έξι γειτονικών κελιών του



Σχήμα 7.5 Ροή από το κελί (i, j- 1, k) στο κελί (i, j, k)

Στο διάγραμμα 7.1 δίνεται ένα διάγραμμα του υδραυλικού φορτίου για το κελί i, j, k. Οι δύο χρονικές τιμές στον οριζόντιο άξονα του χρόνου παριστάνουν, η μεν πρώτη το χρόνο κατά τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός του υδραυλικού φορτίου, η δε δεύτερη το χρόνο ένα χρονικό βήμα πίσω από την t_m .



Διάγραμμα 7.1 Διάγραμμα υδραυλικού φορτίου - χρόνου για το κελί i, j, k

Όπου:

t_m : ο χρόνος στο τέλος του χρονικού βήματος m

$h^m_{i,j,k}$: το υδραυλικό φορτίο στον κόμβο i,j,k κατά τη χρονική στιγμή t_m

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης υπολογίζουν την διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής της μάζας ανά μονάδα όγκου διαμέσου των πλευρών του στοιχείου διακριτοποίησης του υδροφορέα (π.χ. σε ένα κελί). Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας του υγρού ανά μονάδα όγκου εξαιτίας των μεταβολών στην πίεση του συστήματος. Ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα εξαιτίας των μεταβολών της συγκέντρωσης. Ο δεύτερος όρος υπολογίζεται από τη συγκέντρωση που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Καθώς οι συγκεντρώσεις φτάνουν σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας αυτός ο όρος γίνεται αμελητέος. Επομένως, το πεδίο ροής σταθεροποιείται όταν οι συγκεντρώσεις δεν μεταβάλλονται στο χρόνο. Ο τρίτος όρος του δεξιού μέρους της ίδιας εξίσωσης αντιπροσωπεύει την εισροή από εξωτερικές πηγές και εκροή σε καταβόθρες. Χρησιμοποιώντας το σχήμα των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών στο χώρο και των οπισθοδρομικών πεπερασμένων διαφορών στον χρόνο η προσέγγιση της εξίσωσης της κίνησης των υπογείων νερών έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} \frac{K_{\alpha,i+1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i+1/2,j,k}} A_{j,k} \left[h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} \frac{K_{\alpha,i-1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i-1/2,j,k}} A_{j,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i-1,j,k} + \frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} \frac{K_{\beta,i,j+1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j+1/2,k}} A_{i,k} \left[h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} \frac{K_{\beta,i,j-1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j-1/2,k}} A_{i,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j-1,k} + \frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} \frac{K_{\gamma,i,j,k+1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k+1/2}} A_{i,j} \left[h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} \frac{K_{\gamma,i,j,k-1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k-1/2}} A_{i,j} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j,k-1} + \frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) v_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k},
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.7

Όπου:

i, j, k είναι δείκτες που καθορίζουν την σειρά, τη στήλη και επίπεδο αντίστοιχα,

$A_{j,k}$ είναι το εμβαδόν της πλευράς του κελιού των πεπερασμένων διαφορών κάθετης στον άξονα a

$[L^2]$ έτσι ώστε $A_{j,k} = \Delta\beta_j \cdot \Delta\gamma_k$ και παρόμοια για τις άλλες διευθύνσεις

$z_{i,j,k}$ είναι το υψόμετρο του κελιού $[L]$

n είναι το χρονικό βήμα με το οποίο προσεγγίζεται η παράγωγος ως προς τον χρόνο,

$V_{i,j,k}$ είναι ο όγκος του κελιού $[L^3]$ έτσι ώστε $V_{i,j,k} = \Delta\alpha_i \Delta\beta_j \cdot \Delta\gamma_k$

Οι δείκτες $i+1/2, i-1/2, j+1/2, j-1/2, k+1/2, k-1/2$ αναφέρονται στην τιμή μιας ιδιότητας ή μεταβλητής μεταξύ δύο γειτονικών κελιών (π.χ. ο αρμονικός μέσος της υδραυλικής αγωγιμότητας).

Οι τιμές των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων στο αριστερό μέρος της εξίσωσης αναφέρονται στη χρονική στιγμή $n+1$. Γενικά, σε αυτό το κεφάλαιο, όπου δεν υποδεικνύεται η χρονική στιγμή του υπολογισμού των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων, αυτή θα θεωρείται η χρονική στιγμή $n+1$. Στην παραπάνω εξίσωση συναντώνται δύο διαφορετικοί συμβολισμοί της πυκνότητας. Η διαφορετικότητα έχει να κάνει με τον τρόπο υπολογισμού της πυκνότητας στο μεσοδιάστημα δύο κελιών όπου η τιμή του \hat{p} εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής. Έτσι, αν υποθεθεί ότι η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί i, j, k στο $i, j, k+1$, τότε ο όρος $\rho_{i,j,k+1/2} = \rho_{i,j,k}$ ενώ αν η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί $i, j, k+1$ στο κελί i, j, k τότε $\rho_{i,j,k+1/2} = \rho_{i,j,k+1}$. Αντίθετα, η πυκνότητα που συμβολίζεται με ρ υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμητικό μέσο όρο των γειτονικών κελιών.

Εισάγοντας τον όρο της αγωγιμότητας $COND$ σύμφωνα με τον οποίο ισχύει:

$$COND = \frac{AK}{L},$$

όπου A είναι το εμβαδόν κάθετα στη ροή και L είναι η απόσταση κατά μήκος της ροής η εξίσωση 7.7 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} \left[h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i-1,j,k} + \frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} \left[h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j-1,k} + \frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} \left[h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j,k-1} + \frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k},
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.8

όπου CC,CR και CV είναι η αγωγιμότητα COND κατά μήκος των στηλών, των γραμμών και επιπέδων αντίστοιχα, της διακριτοποίησης του υδροφορέα. Η εξίσωση 7.8 μετά από πράξεις μπορεί να διατυπωθεί και με την παρακάτω έκφραση:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k}^{-h_{f,i,j,k}}] \\
& + \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} [h_{f,i,j,k}^{-h_{f,i-1,j,k}}] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k}^{-h_{f,i,j,k}}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j,k}^{-h_{f,i,j-1,k}}] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1}^{-h_{f,i,j,k}}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k}^{-h_{f,i,j,k-1}}] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.9

Με αλλαγή των προσήμων έτσι, ώστε έξω από τις παρενθέσεις να έχουμε μόνο θετικά πρόσημα η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} [h_{f,i-1,j,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i-1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j-1,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j-1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k-1} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k-1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.10

Η εξίσωση 7.10 αποτελεί την προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές της διαφορικής εξίσωσης της τρισδιάστατης κίνησης του υπόγειου νερού σε περιβάλλον μεταβλητής πυκνότητας.

Για λόγους απλότητας θεωρείται η παρακάτω έκφραση:

$$D_{i,j,k} = D_{i+1/2,j,k} + D_{i-1/2,j,k} + D_{i,j+1/2,k} + D_{i,j-1/2,k} + D_{i,j,k+1/2} + D_{i,j,k-1/2},$$

Εξίσωση 7.11

όπου

$$\begin{aligned}
 D_{i+1/2,j,k} &= \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right], \\
 D_{i-1/2,j,k} &= \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i-1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right], \\
 D_{i,j+1/2,k} &= \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right], \\
 D_{i,j-1/2,k} &= \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j-1,k} - Z_{i,j,k}) \right], \\
 D_{i,j,k+1/2} &= \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right], \\
 D_{i,j,k-1/2} &= \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k-1} - Z_{i,j,k}) \right].
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.12

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 7.10 και 7.11 η πρώτη παίρνει την εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
 &\hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} [h_{f,i-1,j,k} - h_{f,i,j,k}] \\
 &+ \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j-1,k} - h_{f,i,j,k}] \\
 &+ \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k-1} - h_{f,i,j,k}] + D_{i,j,k} \\
 &= \left(\rho_{f,i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}.
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.13

Η εξίσωση 7.13 δείχνει ότι τα επίπεδα στα οποία έχει διακριτοποιηθεί ο υδροφόρας μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κεκλιμένα. Όταν τα επίπεδα είναι κεκλιμένα τότε οι όροι $D_{i+1/2,j,k} + D_{i-1/2,j,k} + D_{i,j+1/2,k} + D_{i,j-1/2,k}$ είναι μη μηδενικοί, ενώ, αντίθετα, όταν τα επίπεδα είναι οριζόντια οι όροι αυτοί μηδενίζονται.

Σύστημα εξισώσεων

Η εξίσωση 7.13 μπορεί να γραφτεί με τέτοια μορφή, ώστε όλοι οι όροι που περιέχουν την εξαρτημένη μεταβλητή h_f τη χρονική στιγμή $n + 1$ να μεταφερθούν στο αριστερό μέρος της εξίσωσης και στο δεξιό μέρος μεταφέρονται όλοι οι γνωστοί όροι:

$$\begin{aligned}
 & \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i+1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i-1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j+1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j-1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k+1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k-1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
 & + D_{i,j,k} - \rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{V_{i,j,k}}{t_{n+1} - t_n} h_{f,i,j,k}^{n+1} = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{-h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}.
 \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.14

Στο αριστερό μέρος της εξίσωσης 7.14 όλοι οι όροι εκτός από το $D_{i,j,k}$ περιέχουν την εξαρτημένη μεταβλητή h_f την χρονική στιγμή $n+1$ ενώ στο δεξιό μέρος δεν περιέχεται καμία μεταβλητή της χρονικής στιγμής $n + 1$. Επίσης, όλες οι τιμές της πυκνότητας εκτός από αυτήν του γλυκού νερού αντιστοιχούν σε χρονική στιγμή αντίστοιχη με αυτήν των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων. Στην πραγματικότητα, όταν λύνονται οι εξισώσεις υπολογισμού των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων, η πυκνότητα θεωρείται σταθερή. Αυτή η απλοποίηση είναι αποδεκτή όταν το χρονικό βήμα είναι αρκετά μικρό ή όταν η μεταβολή της πυκνότητας του υγρού είναι σχετικά αργή σε σχέση με την μεταβολή του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου. Έτσι, για τον υπολογισμό των ισοδύναμων φορτίων την χρονική στιγμή $n+1$ ο όρος $D_{i,j,k}$ υπολογίζεται με βάση το πεδίο πυκνοτήτων είτε της προηγούμενης χρονικής στιγμής είτε της προηγούμενης επανάληψης της ίδιας χρονικής στιγμής. Επομένως, η ποσότητα $D_{i,j,k}$ στην εξίσωση 7.14 μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, αφού δεν επηρεάζεται από τις τιμές των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων της επόμενης χρονικής στιγμής. Έτσι, ο όρος αυτός μπορεί να μεταφερθεί στο δεξιό μέρος της εξίσωσης, όπου όλοι οι όροι θεωρούνται γνωστοί:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i+1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i-1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j+1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j-1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k+1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k-1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& - \rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{V_{i,j,k}}{t_{n+1} - t_n} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{-h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k} - D_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.15

Επειδή στο δεξιό μέρος της εξίσωσης όλοι οι όροι θεωρούνται γνωστοί σύμφωνα με τις παραδοχές που αναφέρθηκαν μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας σταθερός αριθμός. Η εξίσωση 7.15 αποτελεί την προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές της ροής στο κελί (i,j,k). Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφτούν για κάθε κελί της διακριτοποίησης του υδροφορέα. Έστω ότι ο υδροφορέας αποτελείται από N κελία τότε μπορούν να σχηματιστούν N εξισώσεις παρόμοιες με την 7.15 και να σχηματιστεί ένα σύστημα N εξισώσεων με N αγνώστους το οποίο μπορεί να γραφτεί με μητρώα ως εξής:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_f = \mathbf{B}$$

Όπου:

A: είναι το μητρώο συντελεστών μεγέθους [N*N],

h_f : είναι το άγνωστο διάνυσμα μεγέθους [N*1] των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων της επόμενης χρονικής στιγμής,

B: είναι το διάνυσμα μεγέθους [N* 1] στο οποίο αθροίζονται όλοι οι γνωστοί όροι.

7.5 Σχεδίαση-ανάπτυξη του μοντέλου

7.5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά-διακριτοποίηση

Το στάδιο της σχεδίασης του μοντέλου περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και την εισαγωγή των φυσικών και ανθρωπογενών πιέσεων και μεταβολών, όπως η φυσική τροφοδοσία και οι εκάστοτε αντλήσεις.

Η σχεδίαση του μαθηματικού μοντέλου καθώς και η περαιτέρω εφαρμογή και ανάπτυξή του στο συγκεκριμένο υδροφόρο σχηματισμό της περιοχής, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, προϋποθέτει την συλλογή και επεξεργασία όλων των διαθέσιμων γεωλογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων δηλαδή στην ανάπτυξη ενός ορθού εννοιολογικού μοντέλου.

- **Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου**

- Διαστασιολόγηση καννάβου (Mesh Grid)

Η δημιουργία του καννάβου είναι η πρωταρχική ενέργεια κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή.

Ο κανάβος σχηματίζεται από δύο ζεύγη παραλλήλων γραμμών κάθετα μεταξύ τους, σχηματίζοντας τα αντίστοιχα κελιά. Οι στήλες του καννάβου αντιστοιχούν στον άξονα των τετμημένων X , οι γραμμές, στον άξονα των τεταγμένων Y , ενώ τα επίπεδα του καννάβου αντιστοιχούν στον άξονα των υψομέτρων Z . Αυτό συμβαίνει ώστε ο κανάβος του Groundwater Vistas να σχετίζεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες.

Ο κανάβος μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφος (uniform), όταν όλα τα κελιά που τον αποτελούν έχουν τις ίδιες διαστάσεις, είτε ανομοιόμορφος (custom), όταν το μέγεθος των κελιών ποικίλει.

Ο ομοιόμορφος κανάβος, ο οποίος άλλωστε προτιμάται και από μαθηματικής σκοπιάς ως προς την αρτιότητα του μοντέλου, αποτελεί καλή επιλογή όταν :

- τα δεδομένα του συστήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και
- το σύστημα αντιμετωπίζεται συνολικά και δεν εστιάζει τοπικά, δηλαδή δεν υπάρχει περισσότερο ενδιαφέρον σε κάποιες θέσεις σε σχέση με άλλες.

Σε αντίθεση ανομοιόμορφος κανάβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που

υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα, ενώ για άλλα μέρη της περιοχής τα αντίστοιχα δεδομένα απουσιάζουν παντελώς, αλλά κυρίως, όταν υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για κάποιες συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής (όπως συμβαίνει συνήθως σε προβλήματα μεταφοράς ρύπων). Πρέπει, τέλος, να τονισθεί ότι στην περίπτωση εφαρμογής ανομοιόμορφου κανάβου, υπάρχει ένας σημαντικός κανόνας που πρέπει πάντα να ακολουθείται για την σωστή μαθηματική επίλυση από το μοντέλο : το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις (κολώνα, γραμμή, επίπεδο) δεν μπορεί να διαφέρει (να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο) πάνω από 1,5 του μεγέθους των γειτονικών κελιών. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα της περιοχής των Ιρίων εφαρμόζεται *ομοιόμορφος κανάβος*, διότι τα δεδομένα εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανεμημένα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο τοπικό ενδιαφέρον.

Horizontal Model Grid		Vertical Model Grid	
Number of Rows	58	Number of Layers	20
Number of Columns	80	Model Bottom Elevation	-80
Uniform X Spacing	100	Model Top Elevation	5
Uniform Y Spacing	100	<input type="checkbox"/> Layers are flat	Layer Elevations

Default Parameter Values						No. Zones	
K	Kx	15	Ky	15	Kz	1.5	10
Storage	S	0.1	Sy	0.1	Porosity	0.1	10
Leakance		0.01					10
Recharge	Rate	0.00015	Conc.	0			10
ET	Rate	0	Extinction	0			10
Dispersivity	Long.	0	Transverse	0	Vertical	0	10
Sorption	Kd	0	Density	157			10
Initial Conc.		0					10

Maximum Number of Stress Periods: 1

World Coordinates of Model Origin: X: 0, Y: 0, Rotation: 0

Buttons: MODFLOW..., ModelCad, EVS..., TMR..., Flowpath..., OK, Cancel

Εικόνα 7.2 Παράθυρο δημιουργίας κανάβου του μοντέλου

- Οροφή και βάση μοντέλου (*Model Top and Bottom elevation*)

Ο υδροφορέας που εξετάζουμε προσομοιώθηκε με 20 επίπεδα (layer) πάχους 4m το καθένα (εκτός από το πρώτο επίπεδο), όπως φαίνεται και από το παράθυρο δημιουργίας του κανάβου του μοντέλου στην παραπάνω εικόνα. Οροφή τίθεται η τιμή 5 και ως βάση θέτουμε την τιμή -80 .

Από την εντολή Props/Top elevation (ή Bottom elevation) και την εντολή Props/Property values/Matrix editor μπορούμε να παρατηρήσουμε τις τιμές των υψομέτρων για κάθε ένα από τα 20 επίπεδα. Παρακάτω για το επίπεδο 1 φαίνεται ότι παντού έχουμε model top elevation 5 και -4 model bottom elevation.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
2	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
4	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
8	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
9	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
10	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
11	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
12	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
13	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
14	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
15	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
16	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
17	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
18	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
19	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
20	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
21	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
22	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
23	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
24	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
25	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

Εικόνα 7.3 Πίνακας top elevation layer 1

Matrix Editor

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
2	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
3	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
4	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
5	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
6	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
7	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
8	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
9	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
10	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
11	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
12	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
13	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
14	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
15	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
16	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
17	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
18	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
19	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
20	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
21	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
22	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
23	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
24	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00
25	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00

Current Selection: Change Block... Replace... Math... Go to Row 1 Column 1

Layer: 1 Format Fixed Width 6 Precision 2 Copy Paste

Use Color Ramp Use Log Values for Color Ramp

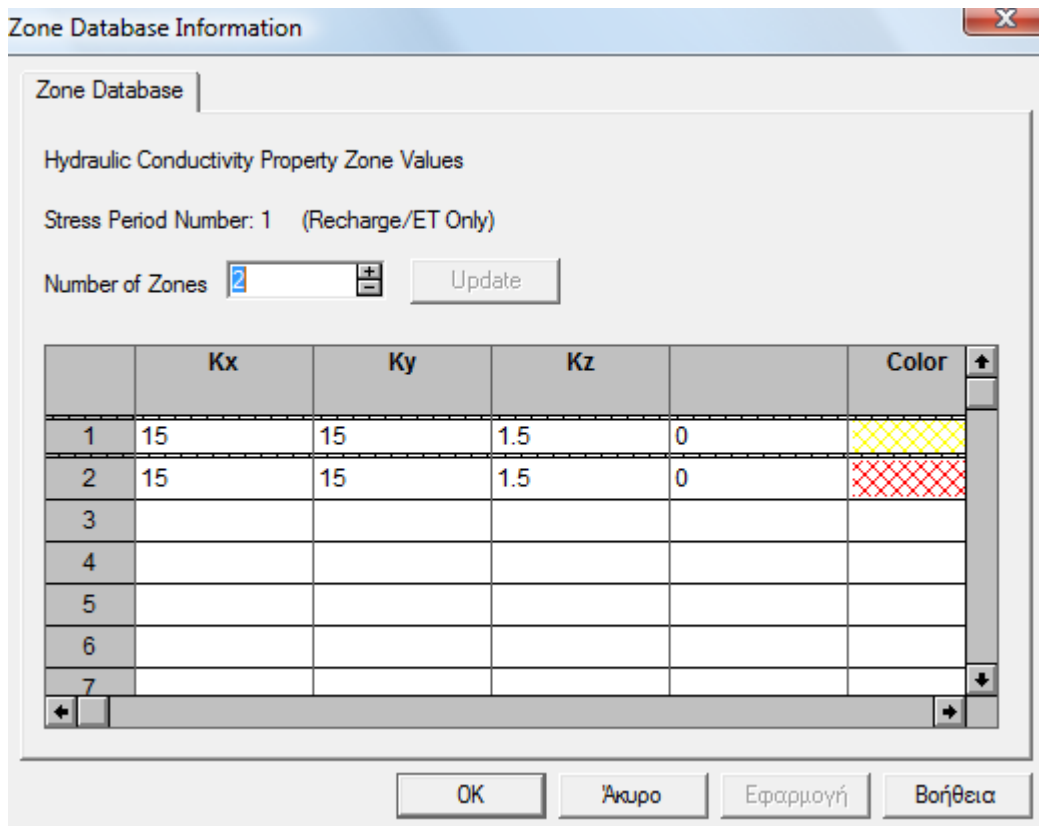
Currently Editing: Bottom

OK Cancel

Εικόνα 7.4 Πίνακας bottom elevation layer 1

- Υδραυλική αγωγιμότητα (*Hydraulic Conductivity*)

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους και του ρευστού μέσου και αποτελεί την κρίσιμότερη παράμετρο για το μοντέλο. Ο καθορισμός της ακριβούς τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται με εργαστηριακές μεθόδους, ωστόσο στην περίπτωση που εξετάζεται τέτοια δεδομένα δεν υπήρχαν στη διάθεσή μας. Επομένως, για την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση. Με την προσωπική εκτίμηση του κ. Γιαννουλόπουλο και μέσω διαρκών δοκιμών διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και συνεχών προσομοιώσεων, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες στάθμες από τον πιεζομετρικό χάρτη (Κεφάλαιο 4) καταλήξαμε στη δημιουργία δύο ζωνών επιρροής στην περιοχή μελέτης. Αρχικά είχαμε δύο διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε ζώνη αλλά στη συνέχεια συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις αντίστοιχες στάθμες από τον πιεζομετρικό χάρτη καταλήξαμε σε μία ενιαία τιμή που προσομοίωνε καλύτερα τον υδροφόρο μας ($K_x=15\text{m/day}=K_y$ και $K_z=(15/10)*K_x=1.5\text{m/day}$).



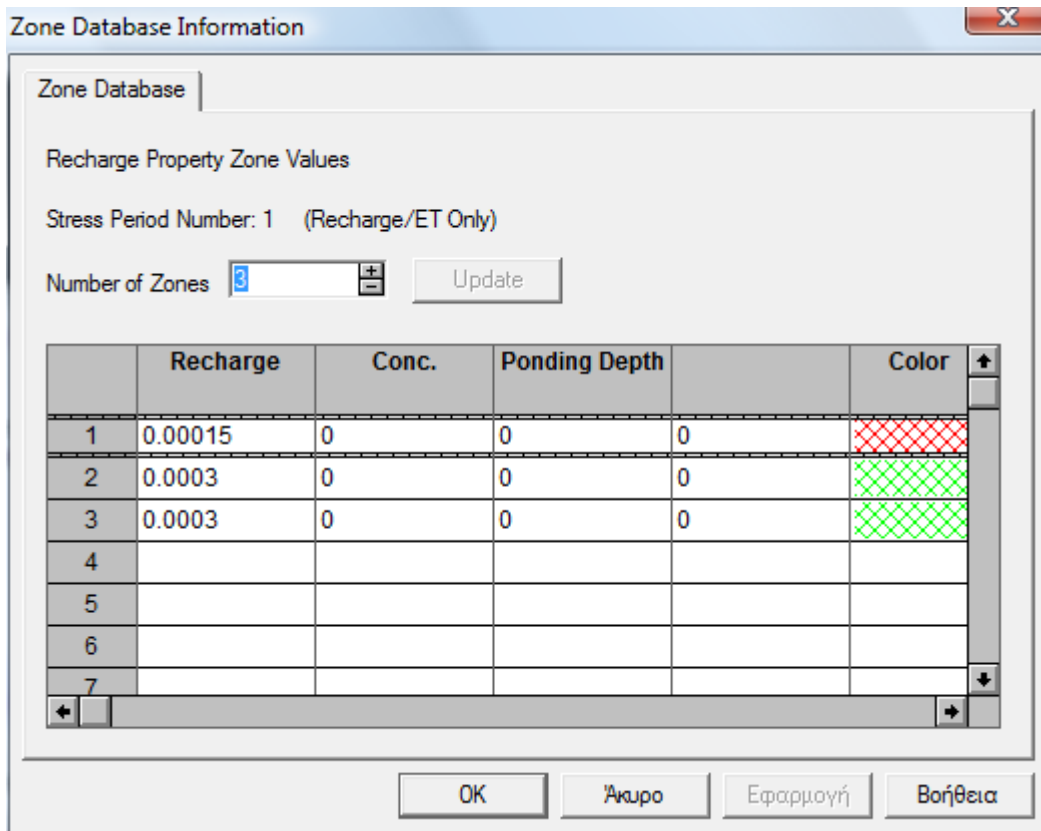
Εικόνα 7.5 Πίνακας προσδιορισμού υδραυλικής αγωγιμότητας(K m/day)

- *Πορώδες (Porosity)*

Βάση της επικρατούσας κοκκομετρίας των υλικών του υδροφορέα, η τιμή του πορώδους είναι περίπου στο **10%**.

- *Τροφοδοσία υδροφορέα (Recharge)*

Σύμφωνα με τα στοιχεία (Διπλωματική Χατζούλη 2005 Υπεύθυνος Καθηγητής κ .Μαντόγλου), η τιμή της τροφοδοσίας υπολογίσθηκε στα **54.00mm ετησίως**. Έτσι η ημερήσια τροφοδοσία του υδροφορέα θα αντιστοιχεί στην τιμή $0.054/365=$ **0,00015m/day**. Εξαιτίας όμως της γεωλογικής δομής που επικρατεί στην περιοχή και του γεγονότος ότι από την περιοχή μελέτης διαρρέουν ποτάμια κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργήσουμε τρεις ζώνες επιρροής με τρεις διαφορετικές τροφοδοσίες σε κάθε ζώνη όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 7.6 Πίνακας προσδιορισμού τροφοδοσίας(R m/day)

- Διασπορά(*Dispersivity*)

Ένας από τους κύριους μηχανισμούς κίνησης ρύπων στα υπόγεια νερά είναι η διασπορά και οφείλεται στην ετερογένεια του πορώδους και στη μεταβλητότητα των μικροσκοπικών καθώς και των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο πορώδες μέσο σε όλες τις δυνατές κλίμακες. Η τιμή που ορίστηκε για τη διασπορά έγινε βιβλιογραφικά, καθώς είναι πολύ δύσκολος έως αδύνατος ο προσδιορισμός της γιατί δεν υπάρχουν στοιχεία συγκέντρωσης και παρουσιάζει πολλές ασάφειες και ανομοιογένειες. Συγκεκριμένα, **Dispersivity Long=10m, Transverse=1m και Vertical=0.1m**

- Αρχικές συνθήκες (*Initial conditions*)

Με τον όρο αρχικές συνθήκες εννοούνται τιμές υδραυλικών φορτίων, στην περίπτωση όμως που εξετάζουμε τιμές δυναμικού, για κάθε ενεργό κελί και για κάθε κελί σταθερού φορτίου, οι οποίες καθορίζονται για κάποια ορισμένη χρονική στιγμή – αφετηρία. Έτσι, λοιπόν, δόθηκε ως αρχική συνθήκη, τιμή δυναμικού μηδέν $\varphi = 0$, σε όλα τα κελιά σταθερού φορτίου της θάλασσας αλλά και στα ενεργά κελιά του υδροφορέα. Στη συνέχεια για να δοθούν οι αρχικές τιμές των υδραυλικών φορτίων πραγματοποιήσαμε επαναλήψεις 40.000 ημερών και έπειτα δώσαμε τιμές άντλησης στα φρέατα.

- Χρόνος (*time*)

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας οι μονάδες του χρόνου (*time units*) επιλέγονται σε ημέρες (**days**) και οι μονάδες του μήκους (*length units*) σε **m**, έτσι ώστε όλες οι παράμετροι στο μοντέλο να αναφέρονται σε μονάδες μέτρα ανά ημέρα (**m/day**).

7.5.2 Οριακές και αρχικές συνθήκες (**Boundary Conditions**)

7.5.2.1 Τύποι οριακών συνθηκών

Οριακή συνθήκη είναι μια μαθηματική έκφραση της κατάστασης του φυσικού συστήματος η οποία περιορίζει τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου στο χώρο (ASTM, D5609-94). Αντίστοιχα, όριο του μαθηματικού μοντέλου είναι η γεωμετρική διαμόρφωση της επιφάνειας που περικλείει την περιοχή της προσομοίωσης (*model domain*).

Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατανομή του υδραυλικού φορτίου (ή της συγκέντρωσης) σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή η οποία αντιστοιχεί στις πρότερες υδρολογικές συνθήκες του υδροφόρου σχηματισμού. Η αρχική αυτή χρονική στιγμή είναι και η αφετηρία ή ο χρόνος μηδέν που αποτελεί, με άλλα λόγια, την οριακή συνθήκη στο χρόνο. Η αρχική συνθήκη δηλαδή, δίνει την κατανομή του υδραυλικού φορτίου (ή της μεταβλητής της κατάστασης γενικότερα) στο χώρο σε χρόνο $t=0$, δηλαδή $h=f(x,y,z;t=0)$.

Οι οριακές συνθήκες στην εξίσωση ροής διακρίνονται σε καθορισμένου φορτίου ή

Dirichlet, καθορισμένης ροής ή Neumann, συνδυασμό μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy, ελεύθερης επιφάνειας και επιφάνειας διήθησης (seepage face).

Στην οριακή συνθήκη “καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet ή πρώτου είδους”, το υδραυλικό φορτίο ορίζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές, στο όριο αυτό, το υδραυλικό φορτίο μπορεί είτε να μεταβάλλεται με το χρόνο ή να παραμένει σταθερό. Έτσι, η οριακή αυτή συνθήκη διακρίνεται σε όριο μεταβαλλόμενου φορτίου και σε όριο σταθερού φορτίου. Σε συνθήκες μόνιμης ροής περιγράφεται από τη σχέση $h=f(x,y,z)$ ενώ σε συνθήκες μη μόνιμης ροής από τη σχέση $h=f(x,y,z,t)$

Στη συνθήκη τύπου “καθορισμένης ροής ή Neumann ή δευτέρου είδους” ,καθορίζεται η ροή κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας, ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου. Σε περίπτωση μόνιμης ή σταθερής ροής περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση $\partial h/\partial n = f(x,y,z,t)$, ενώ στην περίπτωση μη μόνιμης ροής από τη σχέση $\partial h/\partial n = f(x,y,z)$. Στην ειδικότερη περίπτωση αδιαπέρατου υδραυλικού ορίου (π.χ. αδιαπέρατος γεωλογικός σχηματισμός, γραμμή ροής, υπόγειος υδροκρίτης κ.λ.π) ισχύει $\partial h/\partial n = 0$, όπου n η διεύθυνση κάθετα στη ροή.

Η συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy ή τρίτου είδους χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται τόσο από τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου που επικρατεί στην αντίστοιχη επιφάνεια όσο και από την υδραυλική κλίση εγκάρσια στην επιφάνεια.

Η οριακή συνθήκη τύπου ελεύθερης επιφάνειας αποτελεί βασικά ένα μεταβλητό “υλικό όριο” που ισοδυναμεί με την ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Η ελεύθερη επιφάνεια είναι μεταβλητή και οριοθετεί το κορεσμένο από το ακόρεστο τμήμα του υδροφόρου σχηματισμού. Μια άλλη περίπτωση οριακής συνθήκης αυτού του είδους αποτελεί, σε μερικές περιπτώσεις, και η διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς.

Η επιφάνεια διαρροής, αποτελεί ένα όριο μεταξύ του κορεσμένου τμήματος του υδροφόρου σχηματισμού και της ατμόσφαιρας. Η επιφάνεια διαρροής σχετίζεται άμεσα με το προηγούμενο της ελεύθερης επιφάνειας. Σε μεγάλη κλίμακα, η οριακή αυτή συνθήκη είναι συνήθως ασήμαντη και αγνοείται ενώ σε προβλήματα μικρής κλίμακας (π.χ. ροή σε χωμάτινα φράγματα) είναι αρκετά σημαντική. Εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση $h(x,y,z,t)=z$.

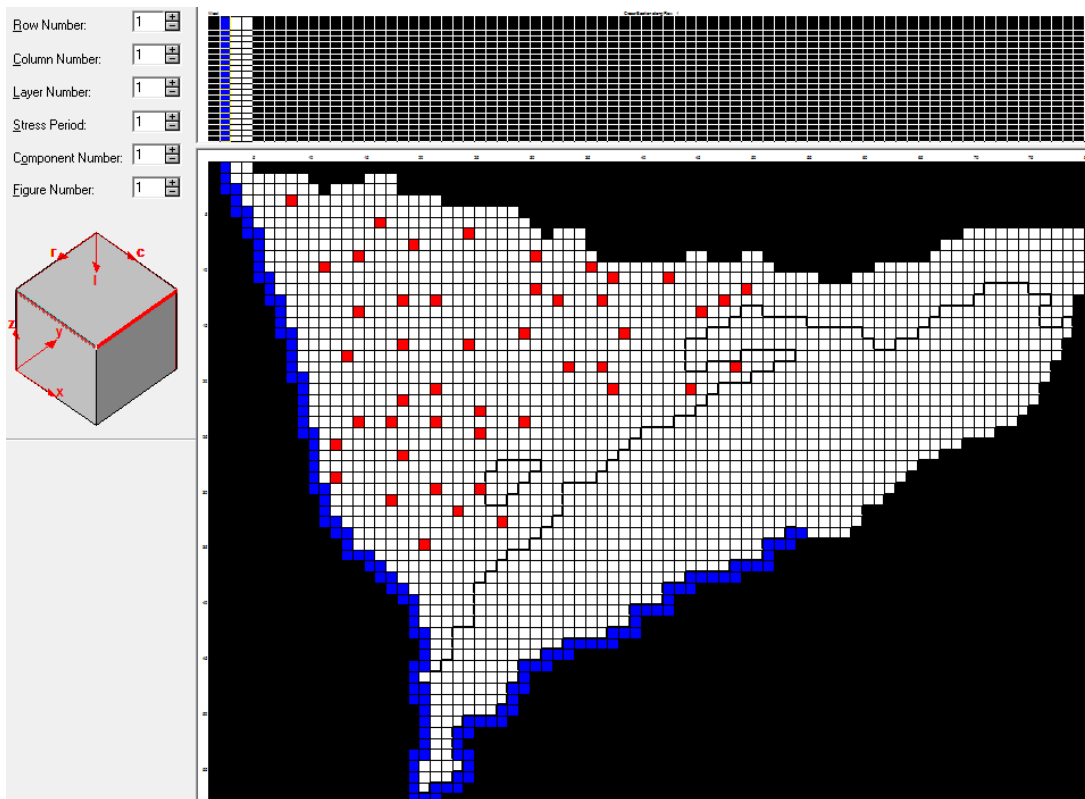
7.5.2.2 Οριακές συνθήκες μοντέλου

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατάστρωση των μαθηματικών μοντέλων ροών σε υπόγειους υδροφορείς είναι ο καθορισμός των ορίων και οι αντίστοιχες συνθήκες που ισχύουν κατά μήκος του (Λατινόπουλος, 1986). Συνηθέστερες κατηγορίες από πλευρά μαθηματικής φυσικής είναι οι συνθήκες για τη μεταβλητή του προβλήματος (όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου) ή συνθήκες Dirichlet, οι συνθήκες για την παράγωγο της μεταβλητής (όρια δεδομένων εισροών ή εκροών) ή συνθήκες Neumann και οι συνθήκες συνδυασμού της μεταβλητής και της παραγώγου της (μικτού τύπου), ή συνθήκη Cauchy. Επίσης, μπορούν να οριστούν οριακές συνθήκες για την ελεύθερη επιφάνεια ή την επιφάνεια και τη γραμμή διήθησης. Στο Groundwater Vistas για την περιγραφή των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήσαμε κελιά σταθερού υδραυλικού φορτίου, ενεργά και ανενεργά κελιά.

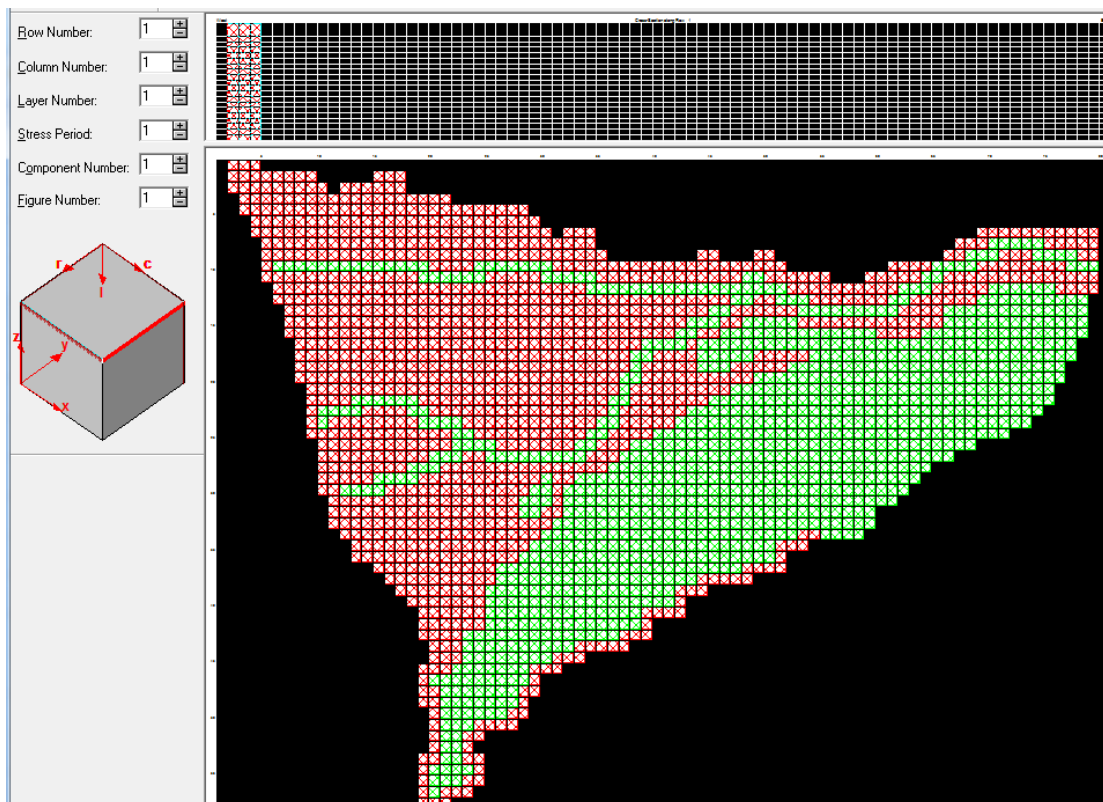
Τα κελιά σταθερού φορτίου χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα όρια του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία, όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας έρχεται σε επαφή με υδάτινες επιφάνειες. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου στα κελιά αυτά ορίζεται από την αρχή στο μοντέλο και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (τα κελιά σταθερού φορτίου παίρνουν την τιμή -1 στο IBOUND του προγράμματος). Στον υδροφορέα που εξετάζουμε ως κελιά σταθερού δυναμικού φ, όπως αυτό ορίζεται από τον Strack, λαμβάνονται της θάλασσας τα οποία διακρίνονται με μπλε χρώμα (Εικόνα 7.7).

Τα ενεργά κελιά είναι τα κελιά των οποίων το υδραυλικό φορτίο θα υπολογιστεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως, ως ενεργά λαμβάνονται τα κελιά εκείνα του κανάβου εντός του περιγράμματος του υδροφορέα τα οποία διακρίνονται με λευκό χρώμα (Εικόνα 7.7).

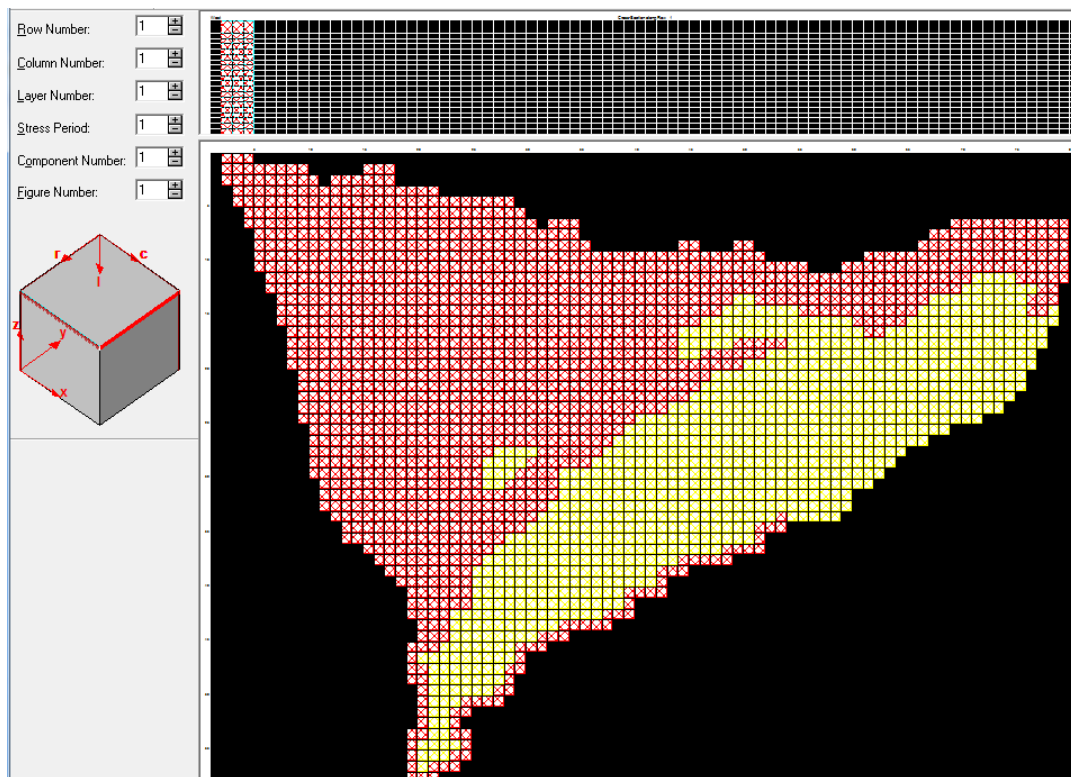
Αντίστοιχα ανενεργά θεωρούνται εκείνα τα κελιά στα οποία η ροή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι μηδενική, τα ανενεργά κελιά παίρνουν την τιμή 0 στο IBOUND του προγράμματος. Τέτοια κελιά αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που πρακτικά οριοθετούν τον υδροφορέα μας και τα οποία διακρίνονται με μαύρο χρώμα (Εικόνα 7.7).



Εικόνα 7.7 Οριακές συνθήκες υδροφορέα. Με μπλε απεικονίζονται τα κελιά σταθερού φορτίου (θάλασσα), με μαύρο τα ανενεργά (αδιαπέρατοι σχηματισμοί), με λευκό τα ενεργά κελιά (υδροφορέας) και κόκκινο τα πηγάδια.



Εικόνα 7.8 Προσδιορισμός ζωνών επιρροής της περιοχής με διαφορετικές τροφοδοσίες. Με κόκκινο η ζώνη 1 με τροφοδοσία 0.00015m/day, ενώ με πράσινο η ζώνη 2 και η ζώνη 3 με τροφοδοσία 0.0003m/day.

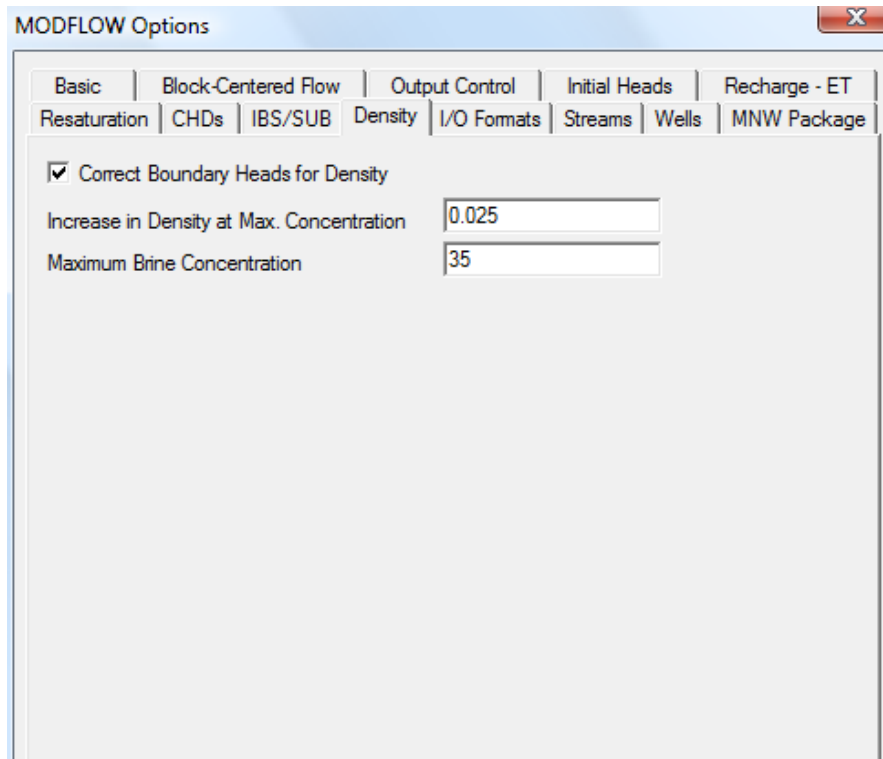


Εικόνα 7.9 Προσδιορισμός ζωνών επιρροής της περιοχής με διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Με κόκκινο και κίτρινο η ζώνη 1 και η ζώνη 2 με υδραυλική αγωγιμότητα 15m/day

- **Χρήση του SEAWAT στο GROUNDWATER VISTAS 4**

Για να χρησιμοποιήσουμε το SEAWAT, δουλεύουμε σαν MODFLOW/MT3DMS κανονικά, όπως θα ήταν για μια κανονική ροή και προσομοίωση. Η μόνη πραγματική διαφορά είναι στα όρια συνθηκών ροής (π.χ. σταθερό φορτίο κατά μήκος της ακτής). Σε οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το θαλασσινό νερό, καθορίστηκε μια συγκέντρωση, είτε 2,185 lb/ft³ ή 35 kg/m³ για το θαλασσινό νερό. Επίσης, ορίσαμε τις σωστές μονάδες μάζας (kg) για MT3D από Model/MT3D/General Options – Basic transport tab.

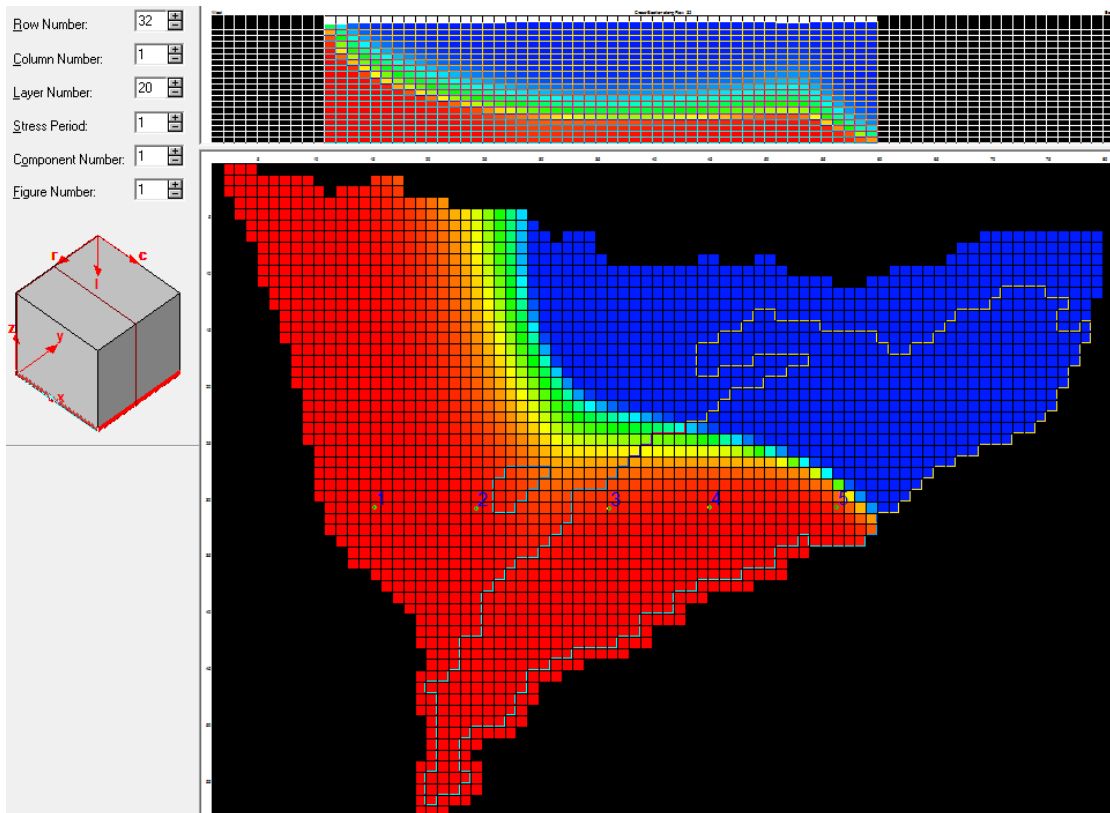
Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι το φορτίο που αποδίδεται στο όριο. Επιλέγοντας Model / MODFLOW / Package Options – Density tab ορίζουμε, όπως φαίνεται παρακάτω:



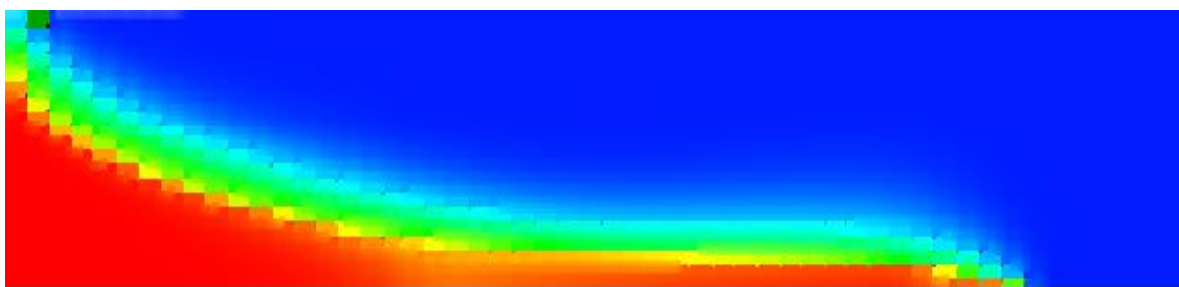
Εικόνα 7.10 Density tab-ορισμός φορτίου στο όριο

7.6 Εξαγόμενα προσομοίωσης- 0^ο Σενάριο

Αρχικά, προσομοιώνεται ο υδροφόρας χωρίς άντληση από τα πηγάδια που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Χρησιμοποιώντας επομένως τα διαθέσιμα στοιχεία εμφανίζεται η θέση της αλάτινης σφήνας, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

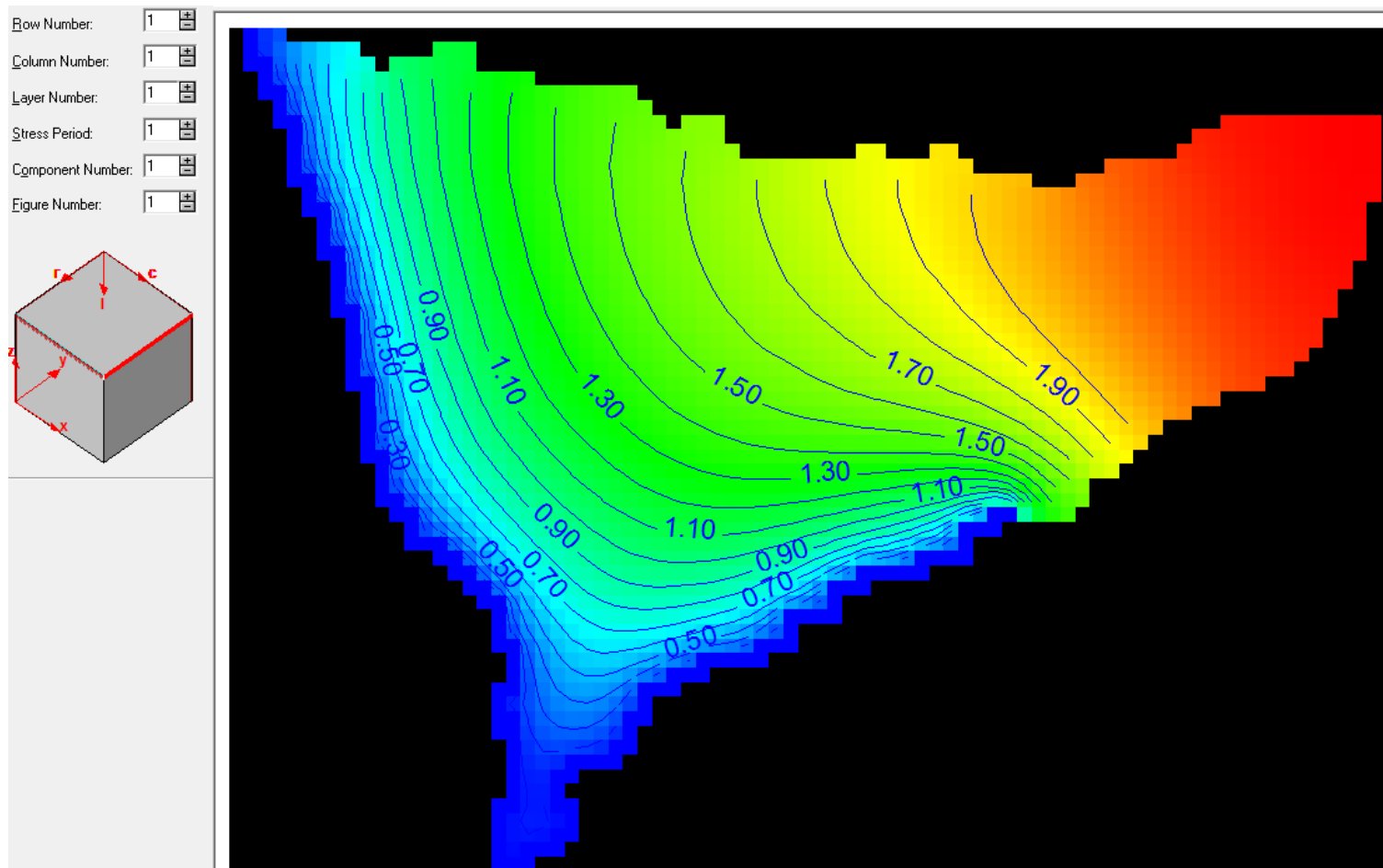


Εικόνα 7.11 Η κατανομή των συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας χωρίς άντληση από τον υδροφόρα στο επίπεδο 20.

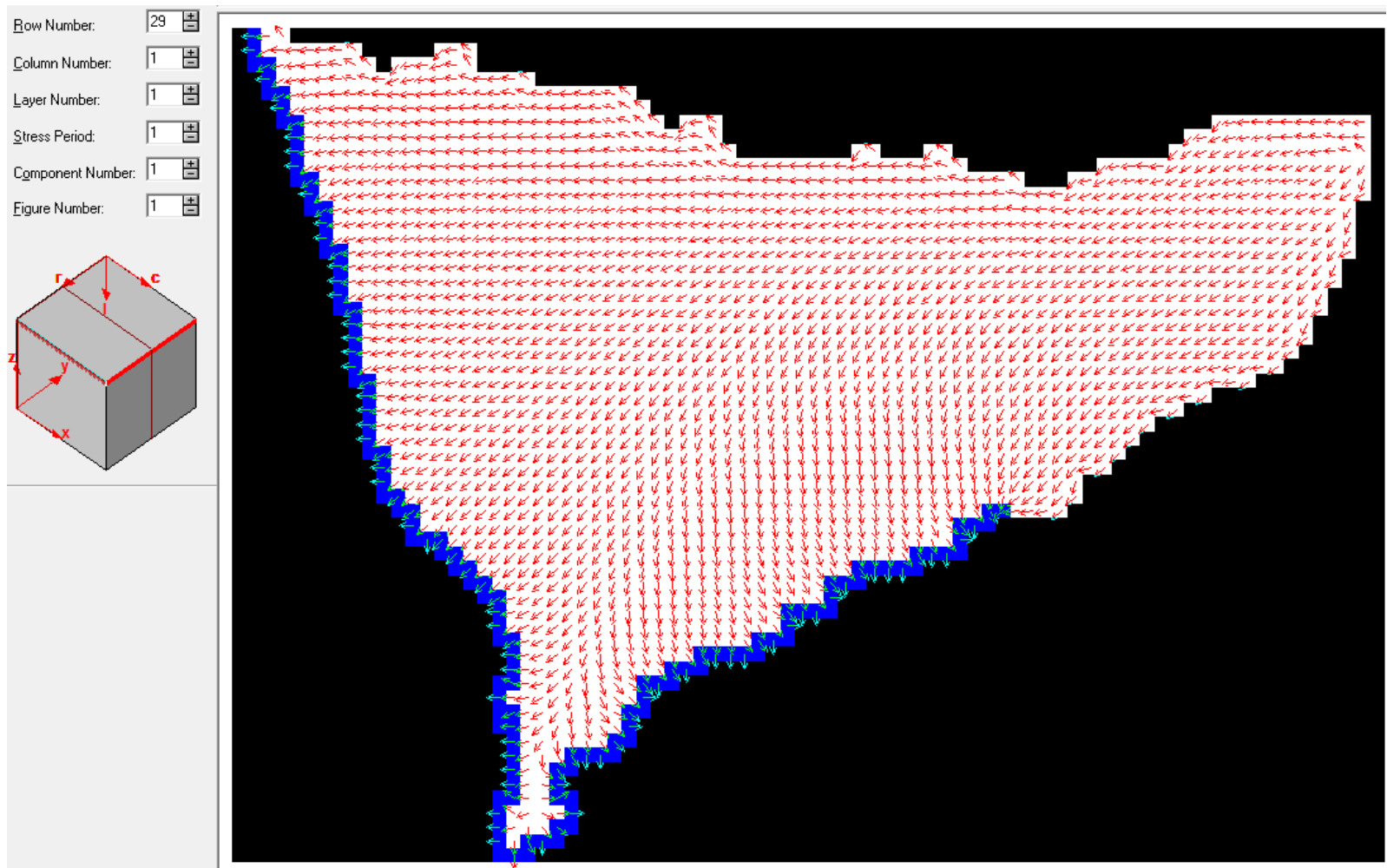


Εικόνα 7.12 Τομή από τον υδροφόρα στο Row Number 32 (για 40.000 μέρες)

Αντίστοιχα οι ισοδυναμικές καμπύλες παρουσιάζονται με την παρακάτω μορφή:

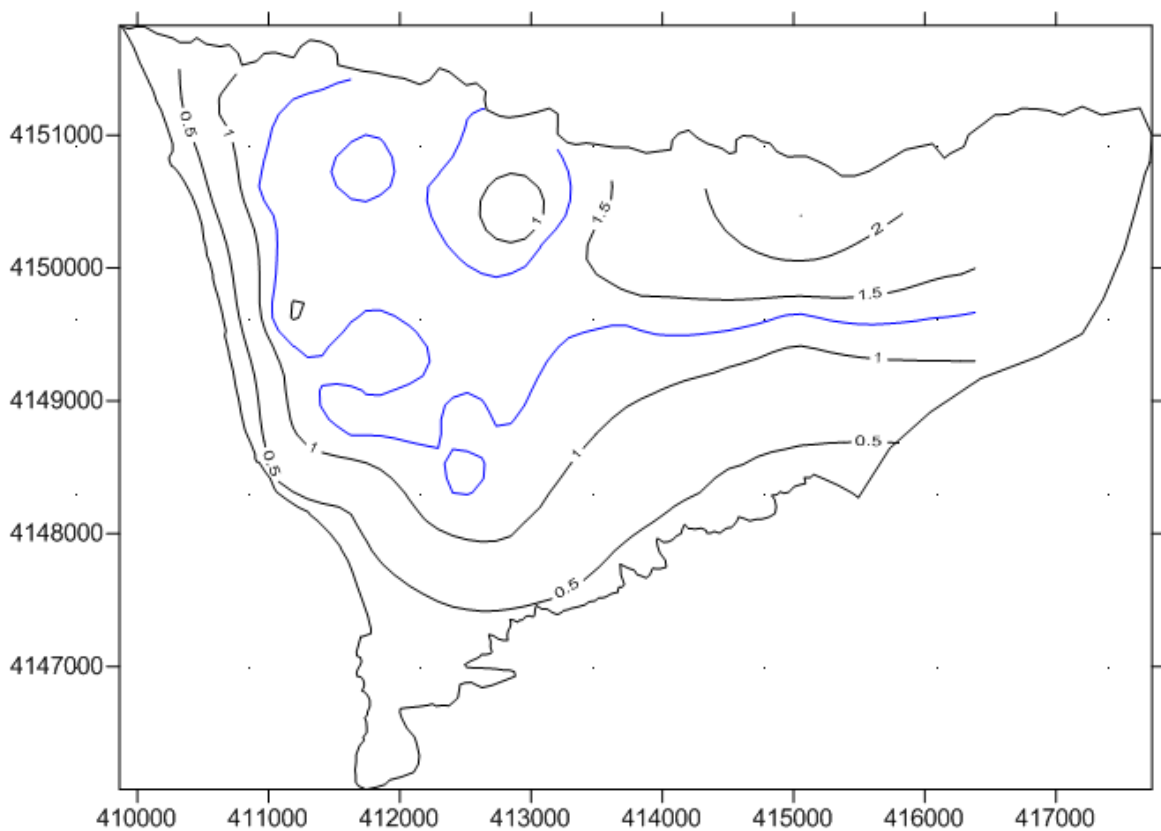


Εικόνα 7.13 Υπολογισμένες ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση χωρίς άντληση από τον υδροφόρα στο επίπεδο 1.

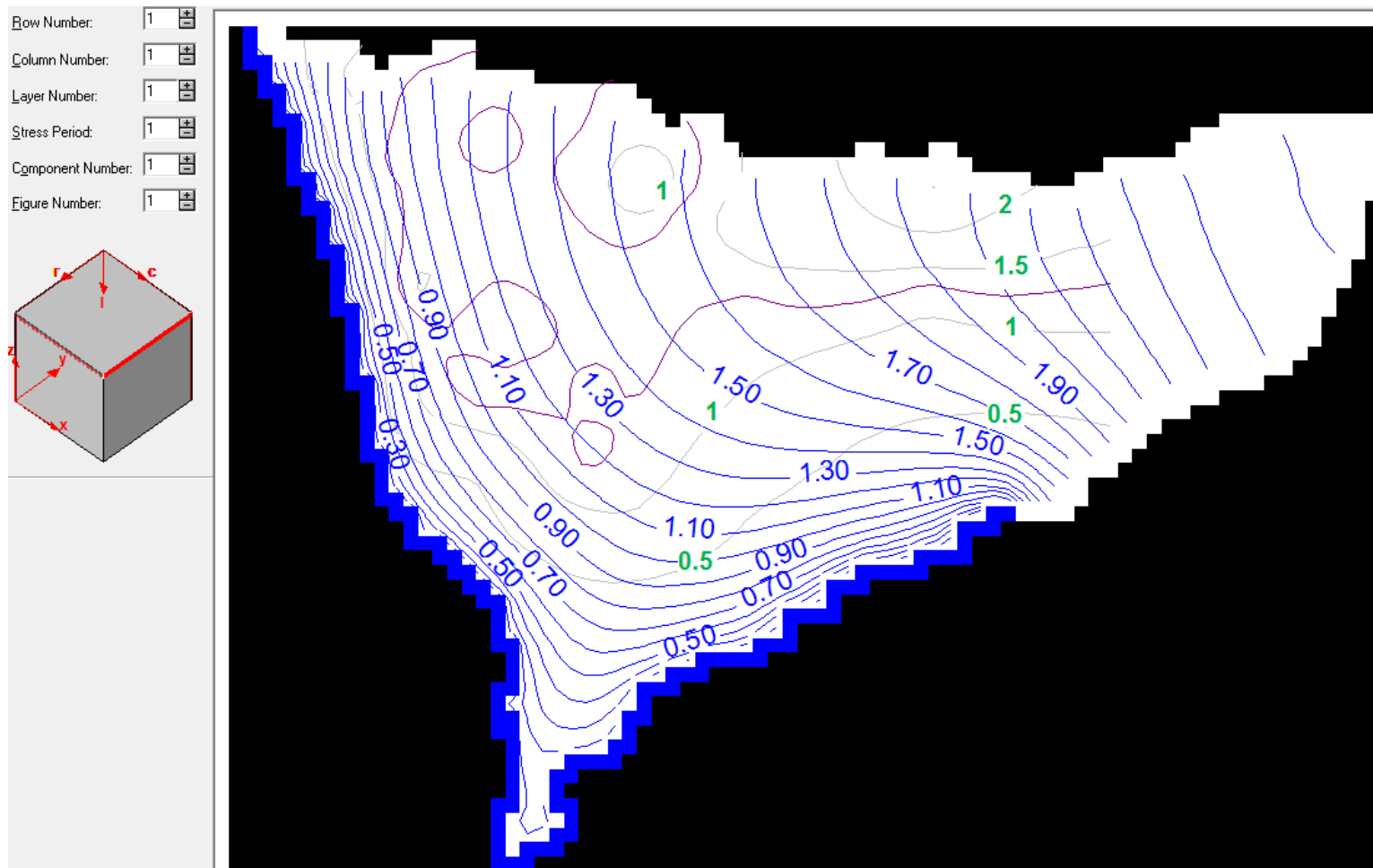


Εικόνα 7.14 Κίνηση του υπόγειου νερού

Αν τώρα συγκριθούν οι παραπάνω ισοδυναμικές καμπύλες (Εικόνα 7.13) με τον πιεζομετρικό χάρτη (Εικόνα 7.15) που δημιουργήθηκε στο κεφάλαιο 4 με πραγματικά δεδομένα, διαπιστώνεται ότι σε γενικές γραμμές οι ισοδυναμικές καμπύλες ταυτίζονται και επομένως η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα κρίνεται αρκετά ικανοποιητική. Παρακάτω δίνεται ο χάρτης (Εικόνα 7.16), όπου συγκρίνονται οι ισοδυναμικές καμπύλες που προκύπτουν από το λογισμικό Surfer (από πραγματικά δεδομένα) και από το λογισμικό GROUNDWATER VISTAS (προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα).

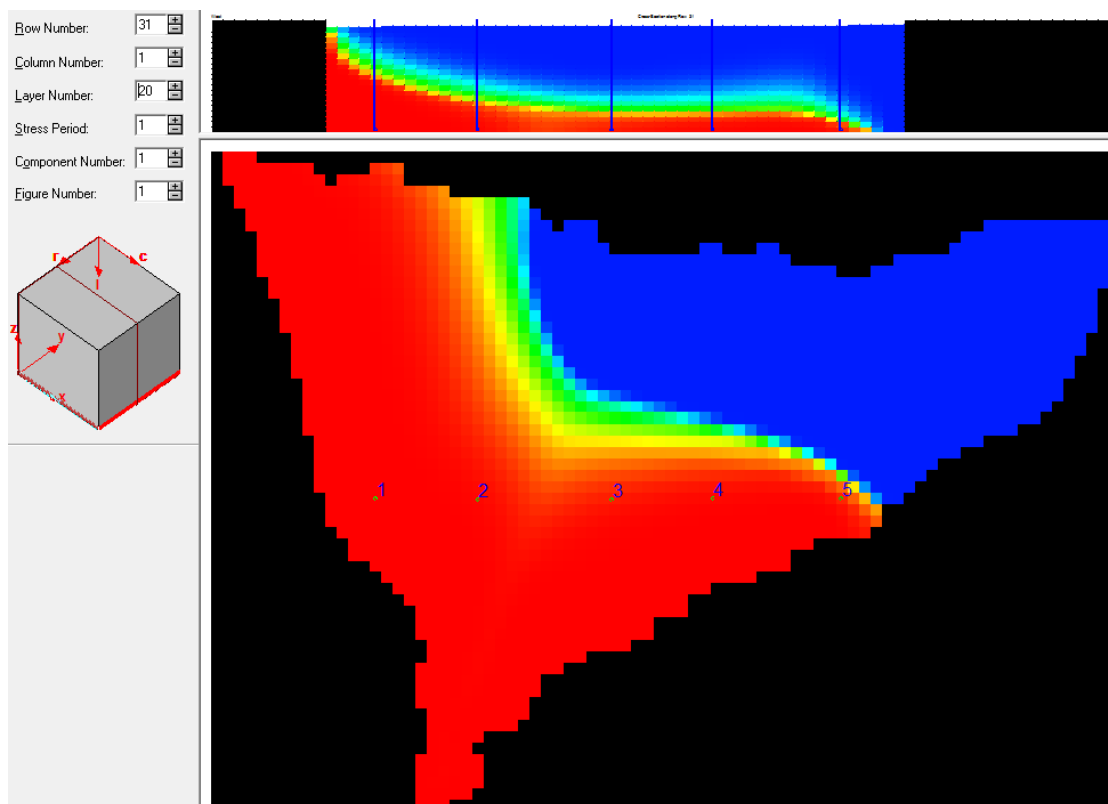


Εικόνα 7.15 Πιεζομετρικός χάρτης από το λογισμικό GROUNDWATER VISTAS



Εικόνα 7.16 Ισοδυναμικές καμπύλες : Με μπλε χρώμα οι καμπύλες που προέκυψαν από το λογισμικό SEAWAT, με γκρι και μωβ οι καμπύλες που προέκυψαν από το Surfer

Στη συνέχεια, για την εξέταση του χρόνου διαμόρφωσης της στατικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού για τη σταθερότητα αλλά και την τεκμηρίωση των αρχικών υφιστάμενων υδραυλικών συνθηκών του μοντέλου τοποθετήθηκαν **5 monitoring Wells** (πηγάδια ελέγχου) στο *επίπεδο 20* .

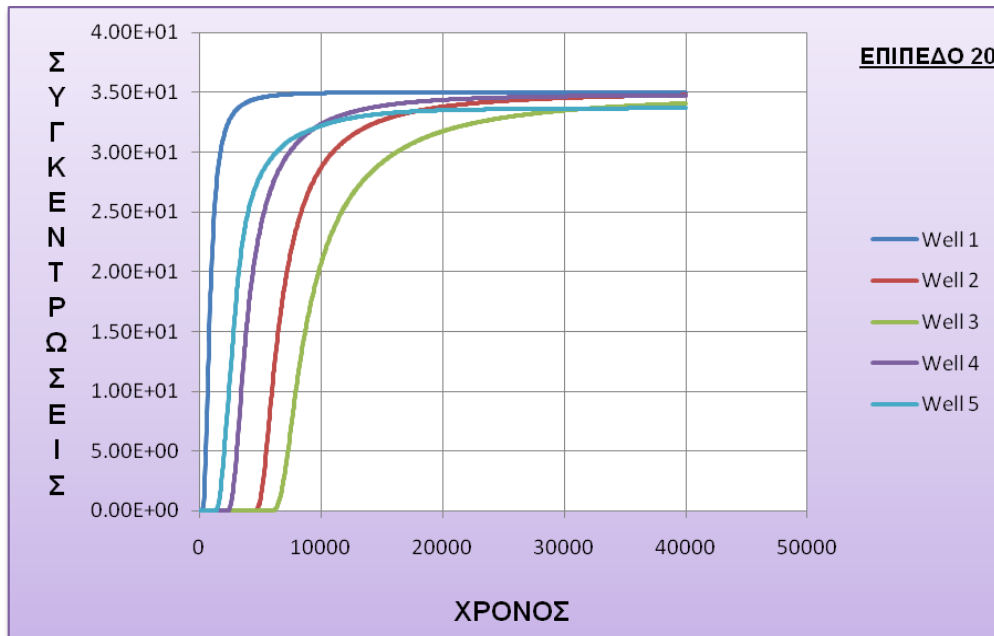


Εικόνα 7.17 Monitoring Wells στο επίπεδο 20

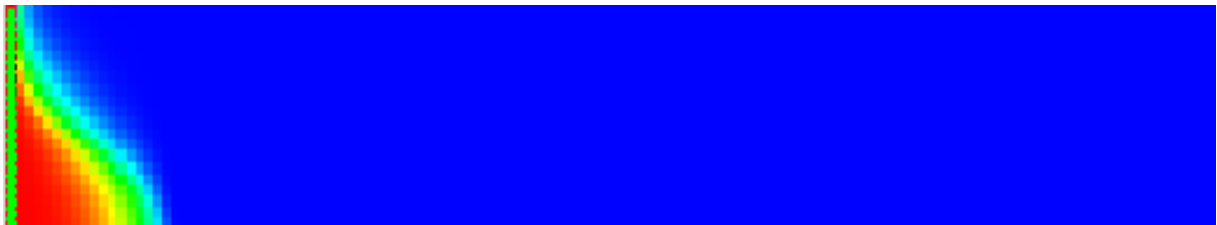
Έχοντας, λοιπόν, τοποθετηθεί στο επίπεδο 20 τα 5 monitoring Wells, είναι δυνατόν να υπολογισθούν ανά πάσα στιγμή οι συγκεντρώσεις των πηγαδιών με το πέρασμα των χρόνων. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα για το επίπεδο 20.

Από ό,τι φαίνεται στο διάγραμμα 7.2 το μοντέλο αρχίζει να έρχεται σε κατάσταση ισορροπίας από τις 30.000 μέρες και μετά, αφού παρατηρείται μια σταθερή πορεία των τιμών της συγκέντρωσης των πηγαδιών.

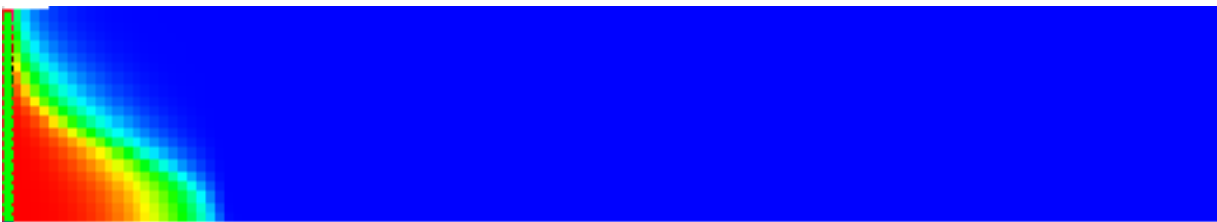
Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ο υπόγειος υδροφορέας μελέτης να έρθει σε ισορροπία φαίνεται και από τις παρακάτω τομές. Οι παρακάτω τομές έχουν παρθεί σε κατάσταση ισορροπίας του μοντέλο σε διαφορετικές περιόδους (stress period).



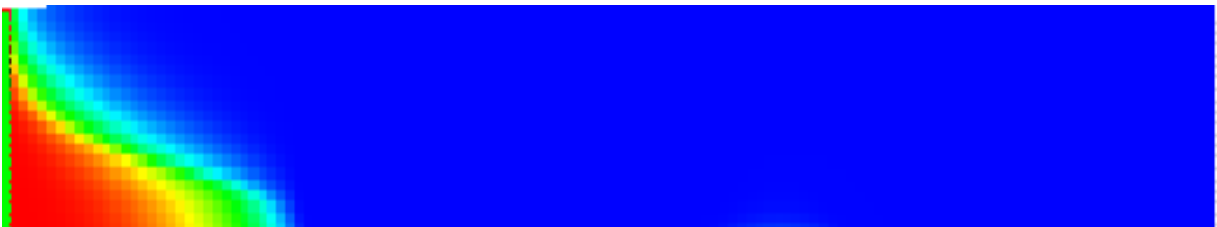
Διάγραμμα 7.2 Χρόνος διαμόρφωσης της στατικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού-αλμυρού νερού



Εικόνα 7.18 Τομή από τον υδροφορέα (για 2.500 μέρες)



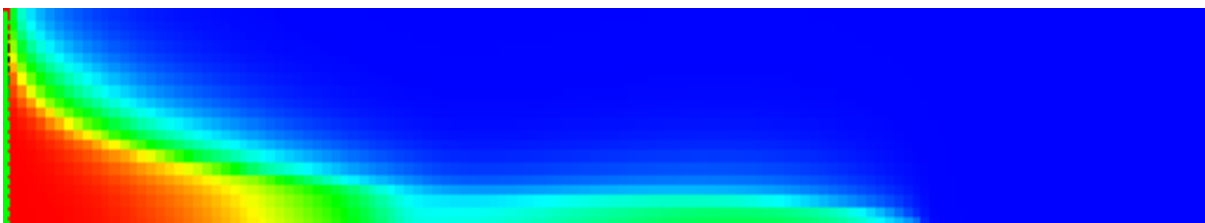
Εικόνα 7.19 Τομή από τον υδροφορέα (για 5.000 μέρες)



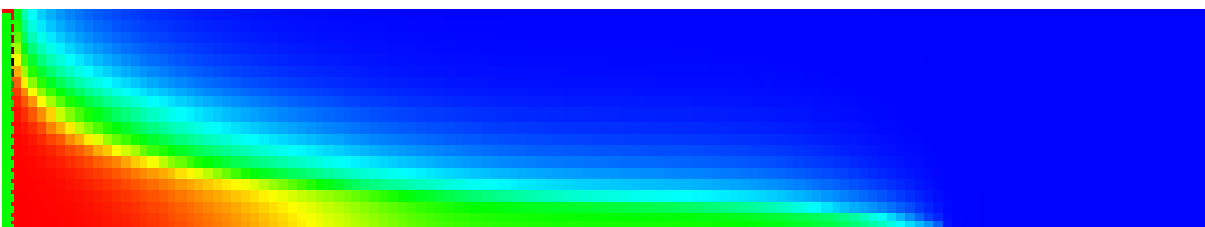
Εικόνα 7.20 Τομή από τον υδροφορέα (για 10.000 μέρες)



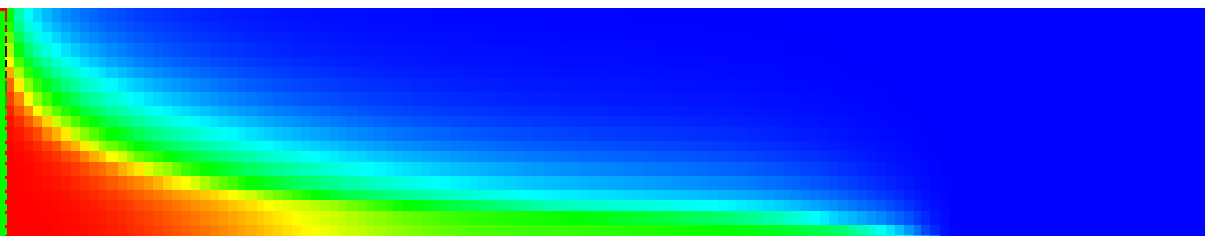
Εικόνα 7.21 Τομή από τον υδροφορέα (για 15.000 μέρες)



Εικόνα 7.22 Τομή από τον υδροφορέα (για 25.000 μέρες)



Εικόνα 7.23 Τομή από τον υδροφορέα (για 55.000 μέρες)



Εικόνα 7.24 Τομή από τον υδροφορέα (για 110.000 μέρες)

Όπως διαπιστώνεται, από τις παραπάνω τομές ο υδροφορέας ισορροπεί από τις 25.000 μέρες και μετά. Επομένως οι 40.000 μέρες που θέσαμε σαν αρχική συνθήκη για την προσομοίωση του υδροφορέα κρίνεται ικανοποιητική, αφού επαληθεύεται από τα αποτελέσματα της.

7.7 Προσομοίωση υδροφορέα με παροχές άντλησης

7.7.1 Σενάριο 1^ο

Αν θεωρηθεί πως, σε περιόδους υψηλής ζήτησης νερού, αντλείται το 50% του συνολικού υδατικού αποθέματος που εισρέει στον υδροφορέα, τότε αυτό αντιστοιχεί σε περίπου $1.500.000\text{m}^3$, εφόσον το συνολικό ποσό αγγίζει τα $3.000.000\text{m}^3$ ετησίως. Βέβαια, αυτά τα ποσά αντιστοιχούν σε δυσμενείς για τον υδροφορέα συνθήκες άντλησης, αφού τους χειμερινούς μήνες το ποσοστό άντλησης είναι αρκετά κάτω από το 50% (Ζυμής Αντρέας).

Στο συγκεκριμένο σενάριο χωρίζεται ο υπόγειος υδροφορέας σε δύο ζώνες (μία την παράκτια ζώνη και μία τη ζώνη στο εσωτερικό του) και πραγματοποιείται άντληση με διαφορετικές τιμές. Στην παράκτια ζώνη στην οποία βρίσκονται 13 πηγάδια γίνεται άντληση με 0 m^3 από το καθένα ενώ στο εσωτερικό του υδροφορέα στο οποίο βρίσκονται άλλα 33 πηγάδια με 80 m^3 . Οι τιμές αυτές εισάγονται στο περιβάλλον του προγράμματος από την εντολή Models / MODFLOW / Flow Packages/ Well, όπου επιλέγεται το κελί στο οποίο βρίσκεται το πηγάδι ή η γεώτρηση και αντιστοιχίζεται η τιμή των 0 m^3 ή 80 m^3 αντίστοιχα, οι οποίες **εισάγονται με αρνητικό πρόσημο**, αφού το ποσό αυτό αφαιρείται από το υδατικό απόθεμα του υδροφορέα. Επίσης, σημειώνεται ότι η προσομοίωση έγινε για περίοδο (stress period) 10000 ημερών δηλαδή για 27 περίπου χρόνια.

Constant Flux (Well) Boundary Condition [X]

Modify A Window of Boundary Cells

Spatial Location		Well Characteristics	
Row number:	<input type="text" value="4"/>	Flow Rate in Well	<input type="text" value="-80"/>
Column number:	<input type="text" value="8"/>	Concentration (Injection)	<input type="text" value="0"/>
Layer number:	<input type="text" value="1"/>	<input type="checkbox"/> Store Data for All Chemical Components	
Reach number:	<input type="text" value="0"/>		

Optimization for Managed Pumping			
Unit Stimulus	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound	<input type="text" value="0"/>
Radius	<input type="text" value="0.5"/>	Lower Bound	<input type="text" value="0"/>
Weight	<input type="text" value="1"/>	Max Drawdown	<input type="text" value="100"/>
Install Cost	<input type="text" value="0"/>	Pumping Cost	<input type="text" value="0"/>

Options

Steady-state Boundary Condition

Computed Boundary Condition

Transient Data Component C.

Color OK

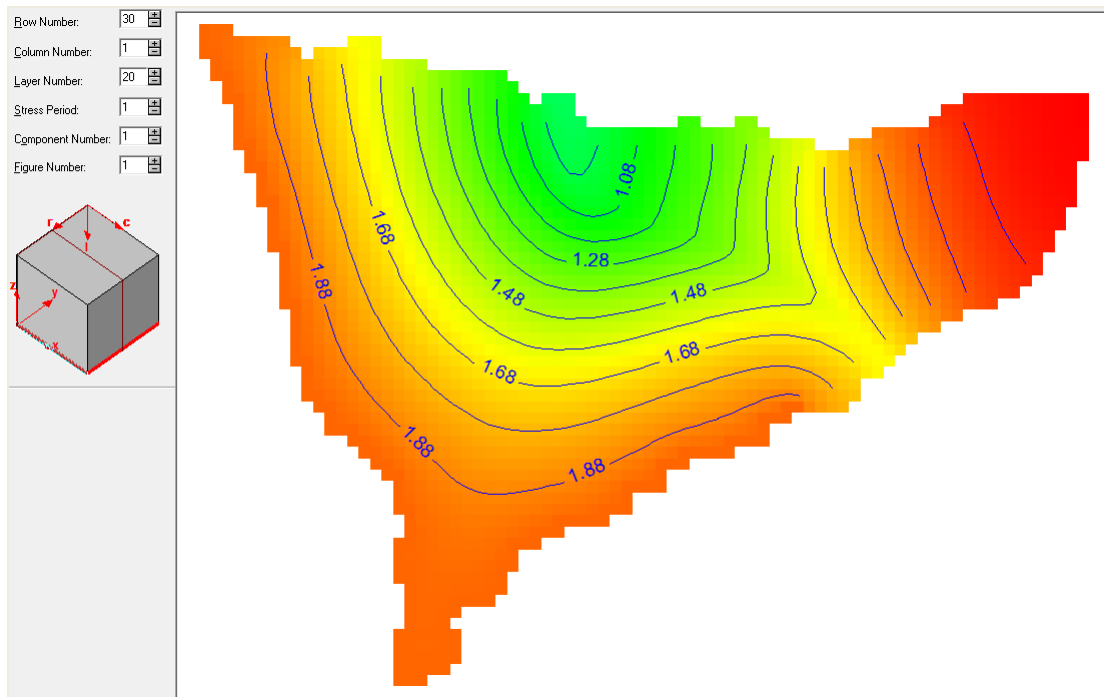
Cancel

Title

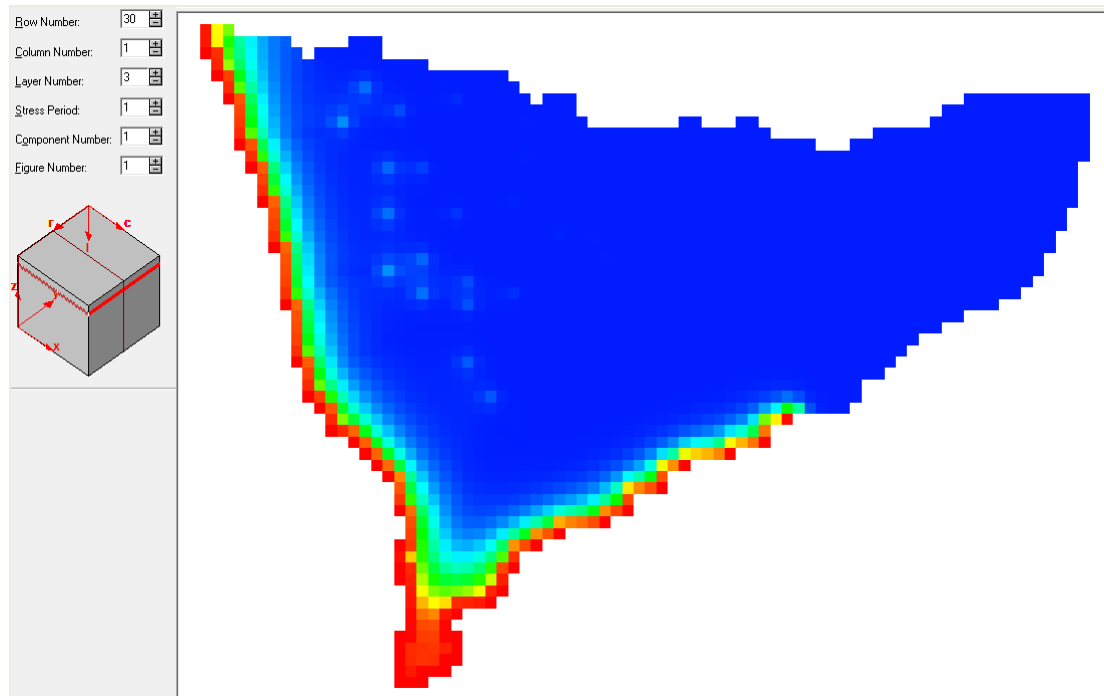
Replace Select Option when Editing an Existing Boundary Condition

Εικόνα 7.25 Εισαγωγή παροχών άντλησης

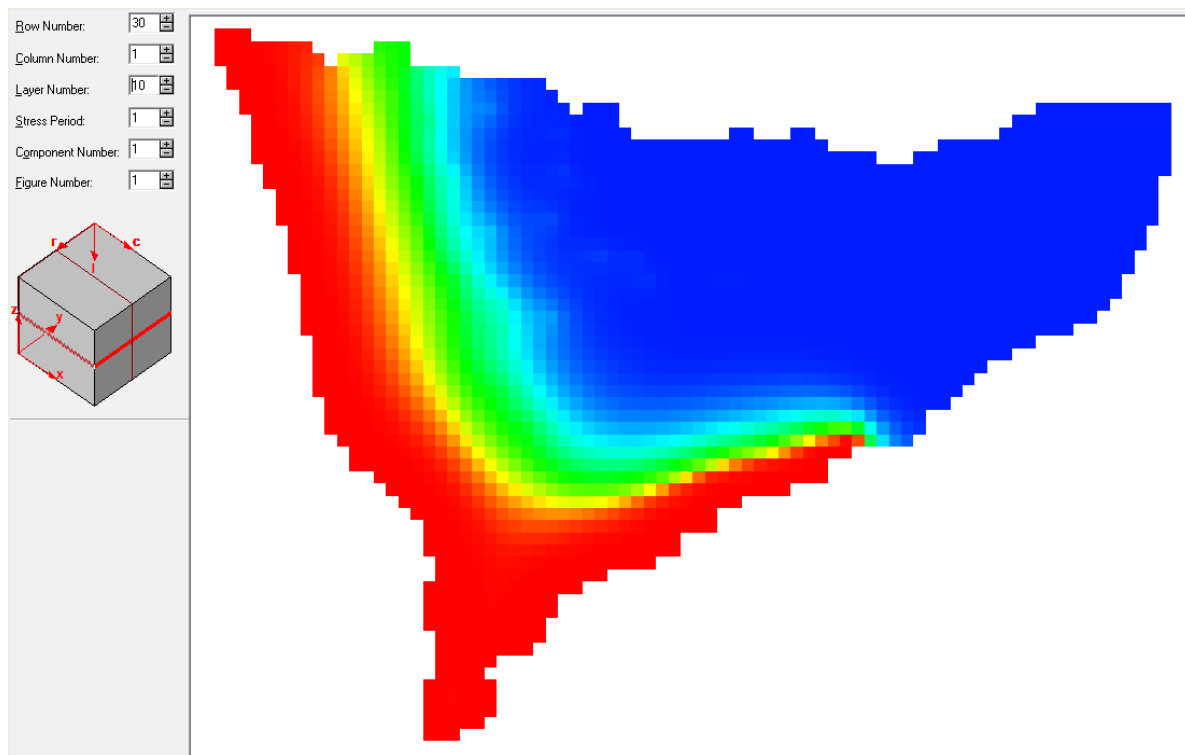
Προσομοιώνεται ο υδροφορέας ξανά για να υπολογιστούν οι καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας. Στα παρακάτω σχήματα εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος τα αποτελέσματα αυτά.



Εικόνα 7.26 Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $80 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ στο επίπεδο 20.

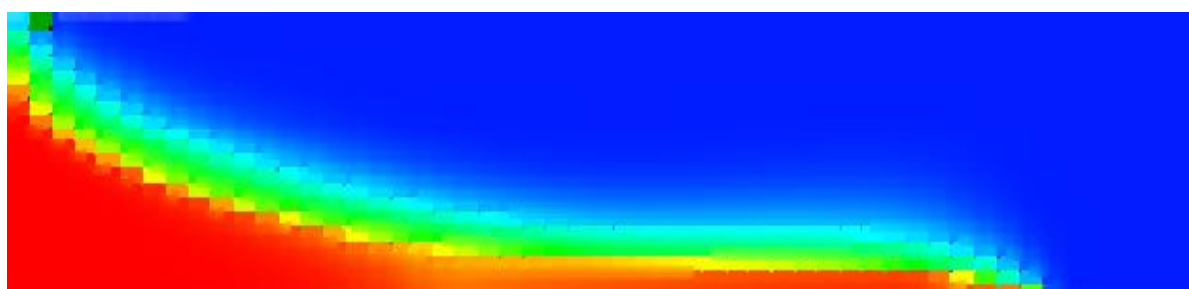


Εικόνα 7.27 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $80 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 3).

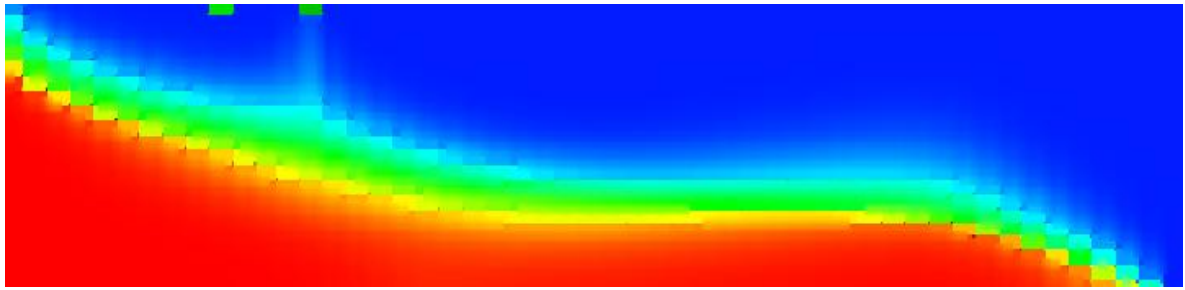


Εικόνα 7.28 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $80 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 10).

Στις παρακάτω τομές φαίνεται πως κινείται το μέτωπο της υφαλμύρωσης σε συγκεκριμένη Row Number (32) αλλά και ο κώνος ανύψωσης που δημιουργείται από την άντληση. Στην εικόνα 7.28 δεν υπάρχει άντληση ενώ στην εικόνα 7.29 προσομοιώνεται ο υδροφορέας με παροχή άντλησης $80 \text{ m}^3/\text{day}$ (από την παράκτια ζώνη δεν αντλείται).

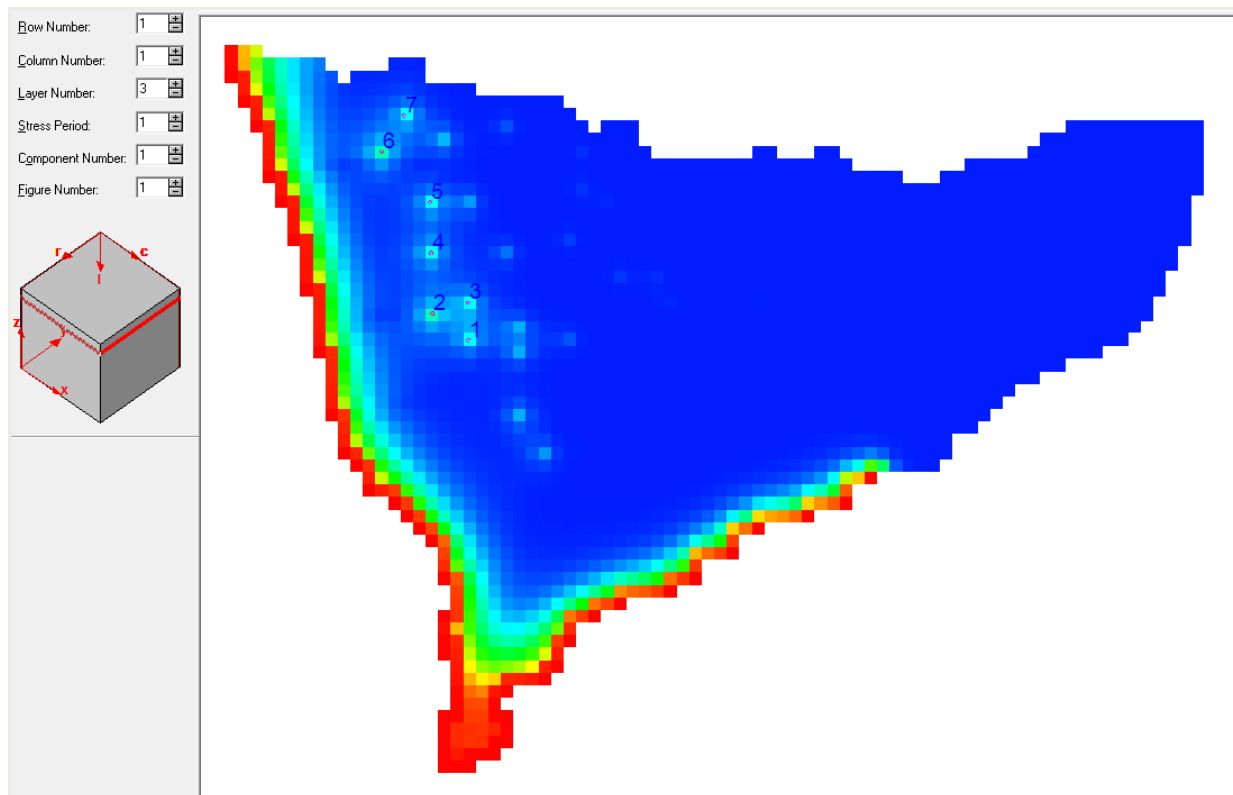


Εικόνα 7.29 Τομή από τον υδροφορέα στο Row Number 32 (χωρίς άντληση)



Εικόνα 7.30 Τομή από τον υδροφορέα στο Row Number 32 (μετά από 22 έτη άντλησης)

Παρατηρώντας τα παρακάτω αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του υδροφορέα διακρίνεται η υφαλμύρωση μερικών πηγαδιών. Στα συγκεκριμένα επτά πηγάδια μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων ουσιών, τα χλώρια και η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους (βλ. εικόνα 7.31), ώστε να παρακολουθηθεί η πορεία των τιμών συγκέντρωσης των πηγαδιών στα διάφορα σενάρια άντλησης που διατυπώθηκαν στη συνέχεια (35kg/m^3 είναι περίπου 22.000 mg/l και $56.000\text{ }\mu\text{S/cm}$).



Εικόνα 7.31 Θέση των πηγαδιών με υψηλές τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών.

ΠΗΓΑΔΙ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ(Kg/m ³)		ΧΛΩΡΙΑ(mg/l)		ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC (μS/cm)	
	5000*	10000*	5000*	10000*	5000*	10000*
1	1.26	2.70	792	1697.14	2016	4320
2	2.10	3.34	1320	2099.43	3360	5344
3	1.12	2.25	704	1414.29	1792	3600
4	1.23	2.43	773.15	1527.43	1968	3888
5	1.23	2.31	773.15	1452	1968	3696
6	2.20	3.68	1382.86	2313.14	3520	5888
7	1.43	2.48	898.86	1558.86	2288	3968

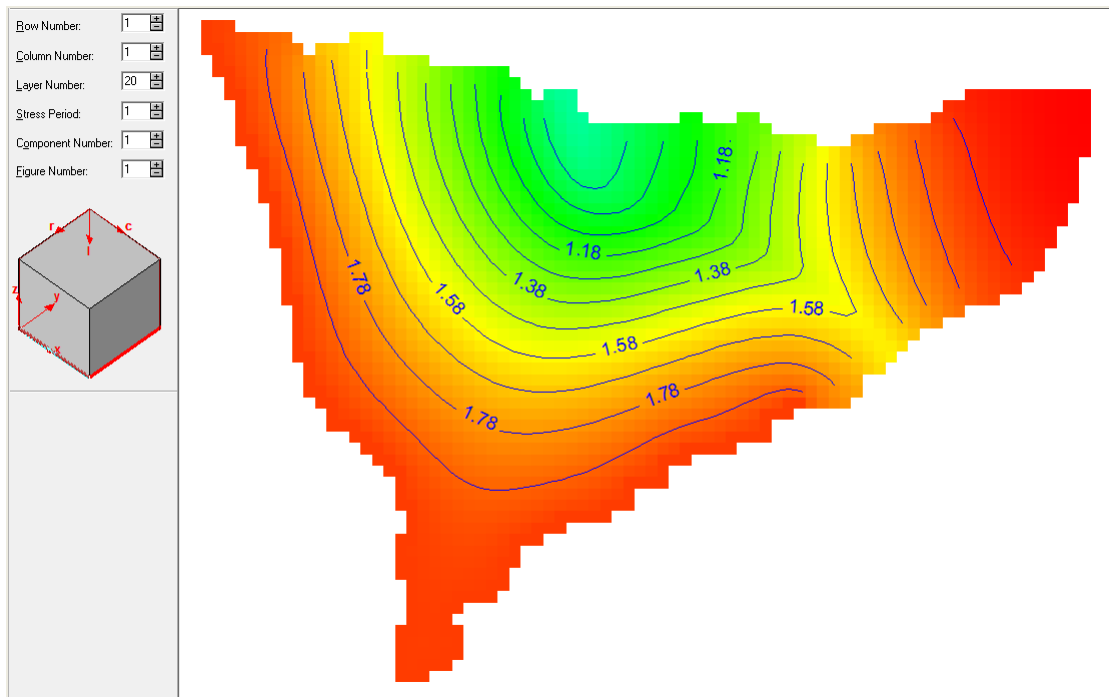
*Περίοδος άντλησης (ημέρες)

Πίνακας 7.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (σενάριο 1)

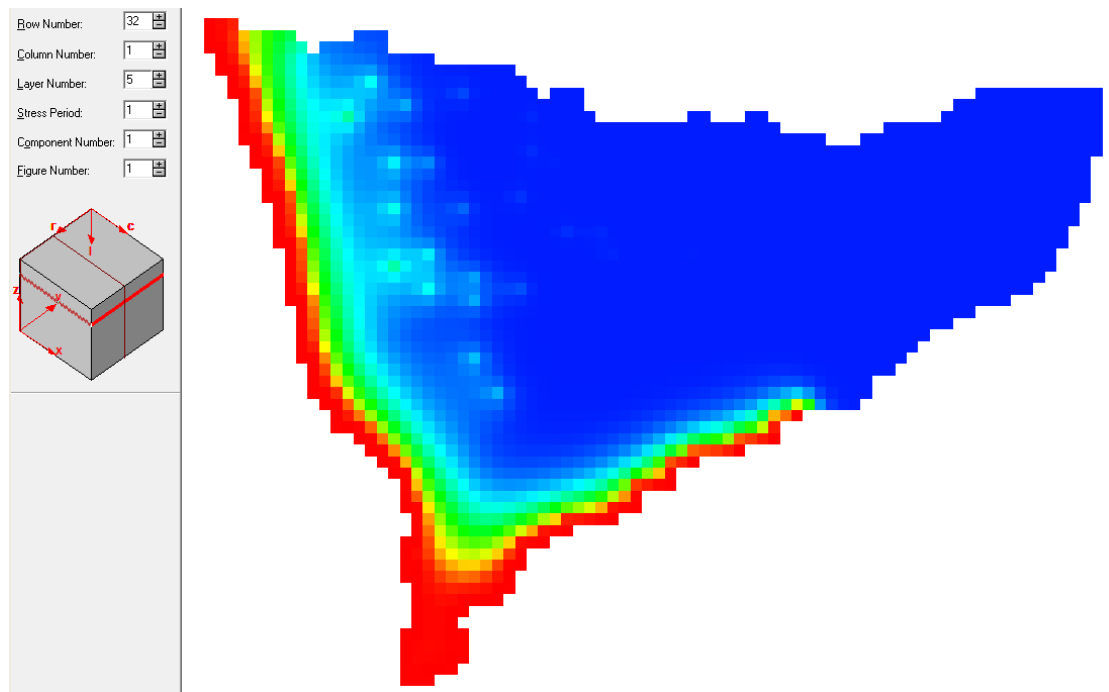
7.4.2 Σενάριο 2⁰

Προσομοιώνεται ο υδροφορέας ξανά με παροχή άντλησης στα πηγάδια της παράκτιας ζώνης **0 m³/ημέρα** και στα πηγάδια του εσωτερικού του υδροφορέα **100 m³/ημέρα** που αντιστοιχεί σε 40.15% της συνολικής κατείσδυσης, για να υπολογιστούν οι καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας. Στα παρακάτω σχήματα, εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος τα αποτελέσματα αυτά.

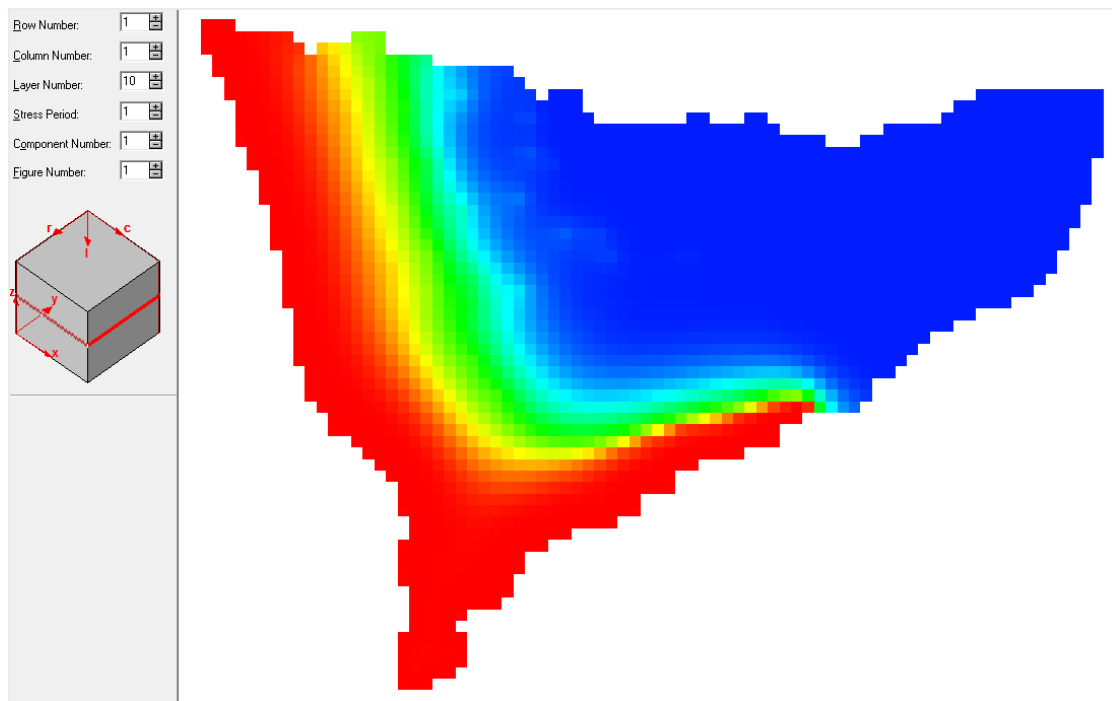
Είναι εμφανές πως επηρεάζουν τις τιμές του δυναμικού οι παροχές αντλήσεων, καθώς και την κατανομή των ισοδυναμικών καμπύλων στο χώρο. Επίσης, είναι φανερή η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε στην κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 7.32 Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0\text{m}^3/\text{ημέρα}$ και $100\text{m}^3/\text{ημέρα}$ στο επίπεδο 20.

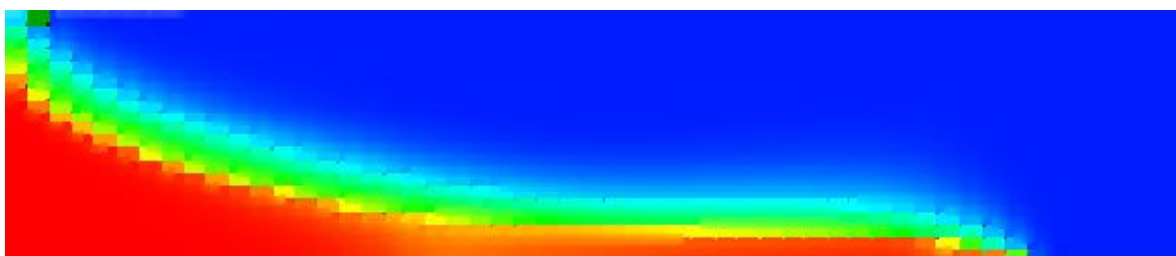


Εικόνα 7.33 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0\text{m}^3/\text{ημέρα}$ και $100\text{m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 5).

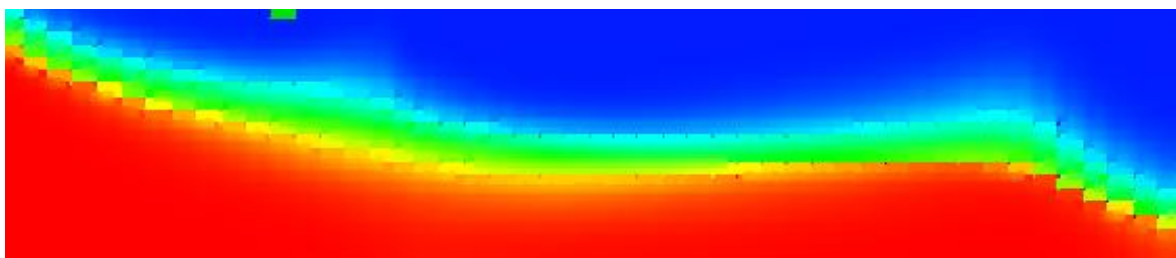


Εικόνα 7.34 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $100 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 10).

Οι αντίστοιχες τομές για το σενάριο 2 ακολουθούν παρακάτω.



Εικόνα 7.35 Τομή από τον υδροφόρα στο Row Number 32 (χωρίς άντληση)



Εικόνα 7.36 Τομή από τον υδροφόρα στο Row Number 32 (μετά από 22 έτη άντλησης)

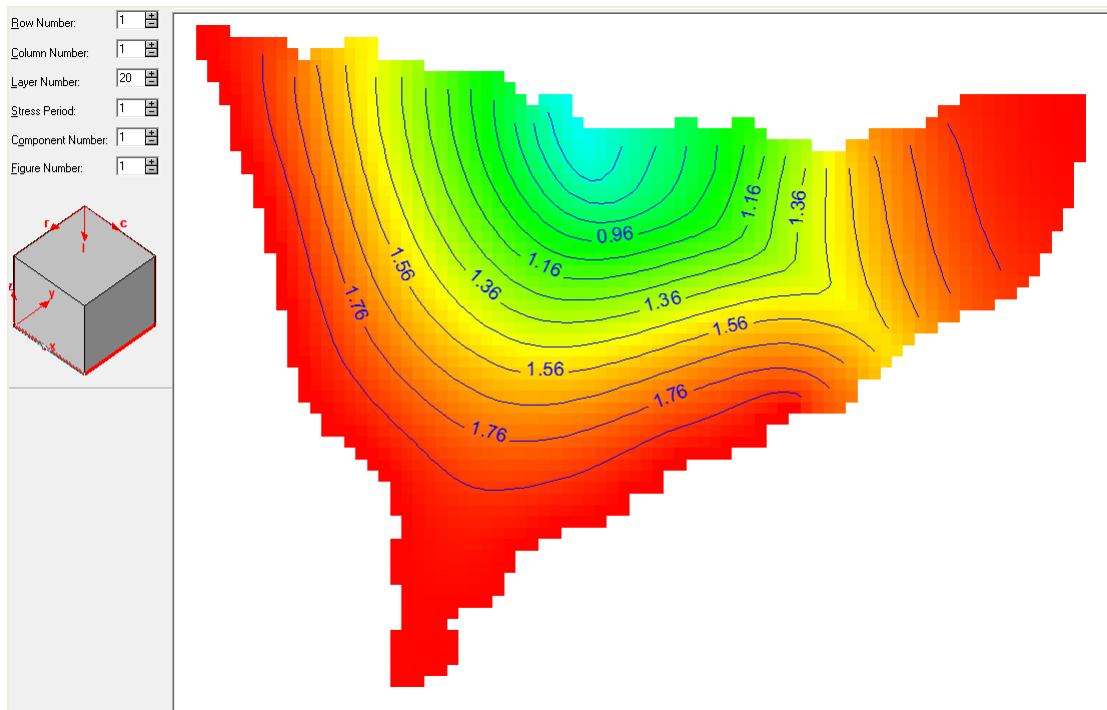
ΠΗΓΑΔΙ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ(Kg/m ³)		ΧΛΩΡΙΑ(mg/l)		ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC (μS/cm)	
	5000*	10000*	5000*	10000*	5000*	10000*
1	2.11	4.43	1326.29	2784.57	3376	7088
2	2.89	5.60	1816.57	3520	4624	8960
3	1.80	4.28	1131.43	2690.29	2880	6848
4	2.11	4.54	1326.29	2853.71	3376	7264
5	1.72	3.89	1081.14	2445.14	2752	6224
6	3.06	5.70	1923.43	3582.86	4896	9120
7	1.83	4.54	11550.29	2853.71	2928	7264

*Περίοδος άντλησης (ημέρες)

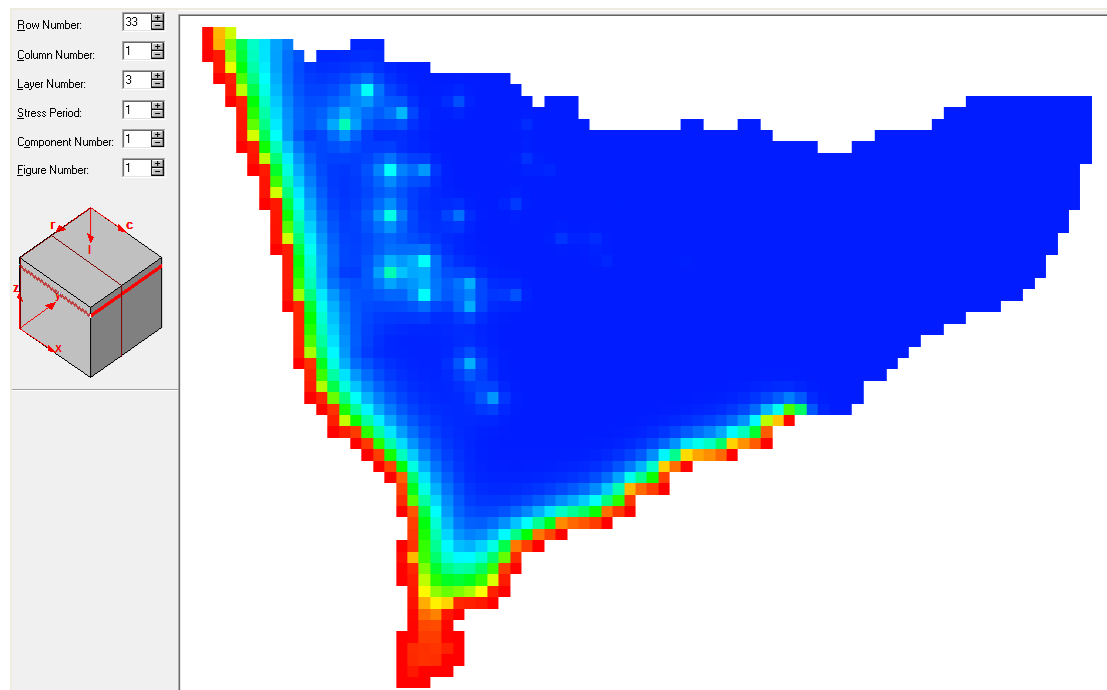
Πίνακας 7.2 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (σενάριο 2)

7.4.3 Σενάριο 3⁰

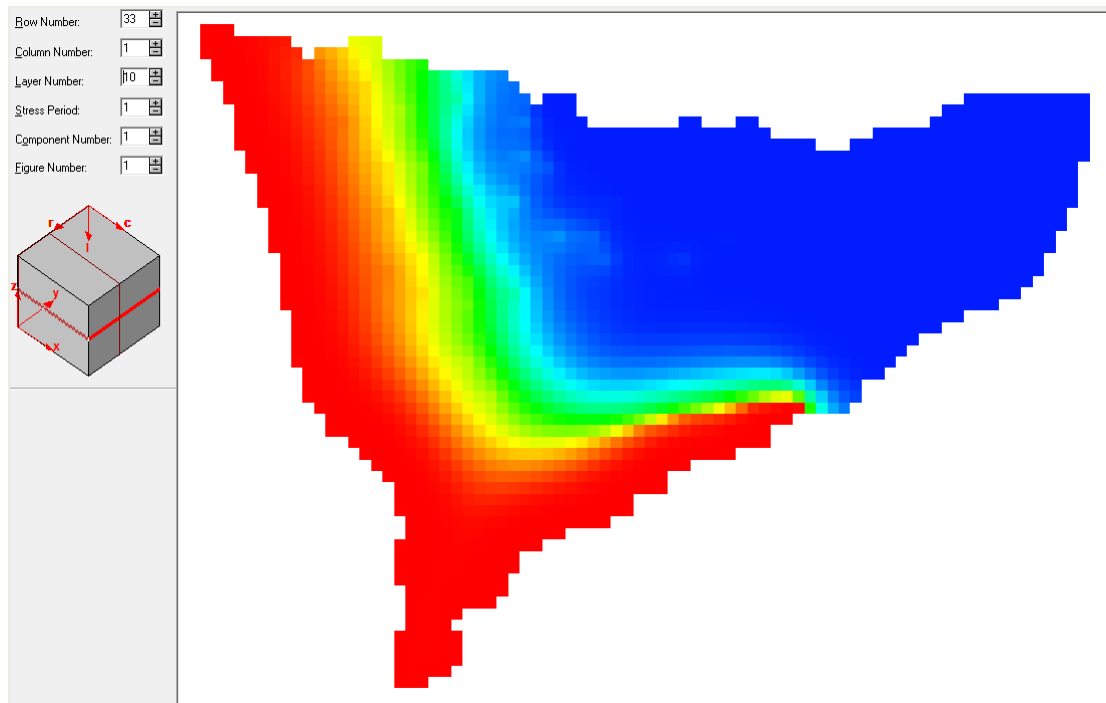
Προσομοιώνεται ο υδροφορέας ξανά με παροχή άντλησης στα πηγάδια της παράκτιας ζώνης **0 m³/ημέρα** και στα πηγάδια του εσωτερικού του υδροφορέα **125 m³/ημέρα** που αντιστοιχεί σε 50.19% της συνολικής κατείσδυσης, για να υπολογιστούν οι καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας. Αντίστοιχα, για αυτό το σενάριο παρουσιάζονται παρακάτω τα αποτελέσματα προσομοίωσης που προέκυψαν από το λογισμικό.



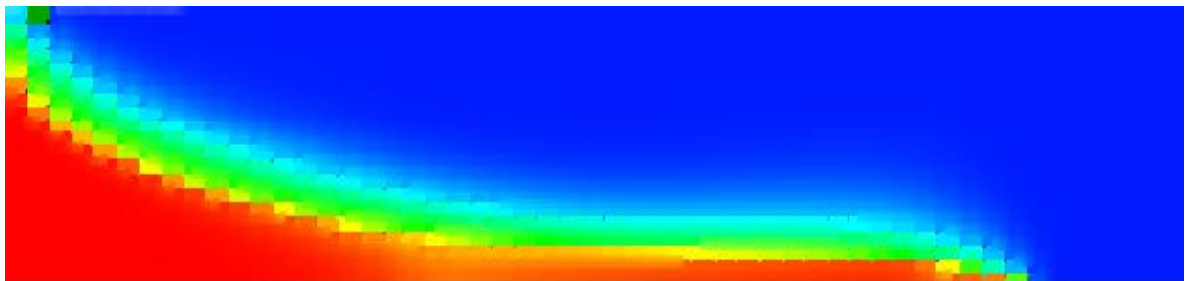
Εικόνα 7.37 Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0\text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $125\text{ m}^3/\text{ημέρα}$ στο επίπεδο 20.



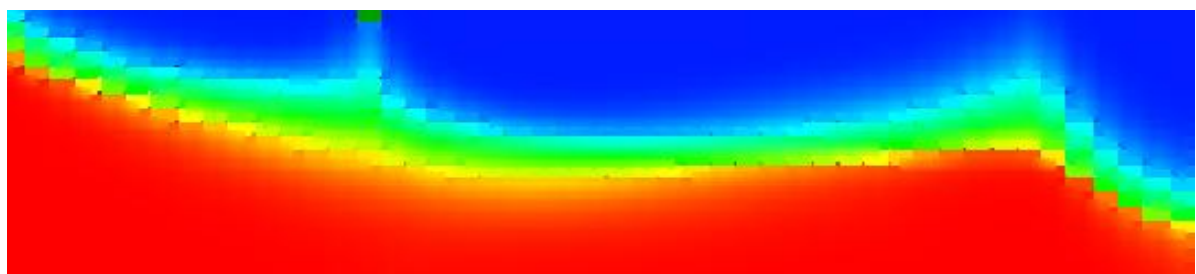
Εικόνα 7.38 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0\text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $125\text{ m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 5).



Εικόνα 7.39 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $0 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ και $125 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ αντίστοιχα (επίπεδο 10).



Εικόνα 7.40 Τομή από τον υδροφόρα στο Row Number 32 (χωρίς άντληση)



Εικόνα 7.41 Τομή από τον υδροφόρα στο Row Number 32 (μετά από 22 έτη άντλησης)

ΠΗΓΑΔΙ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ(Kg/m ³)		ΧΛΩΡΙΑ(mg/l)		ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ EC (μS/cm)	
	5000*	10000*	5000*	10000*	5000*	10000*
1	3.19	6.90	2005.14	4337.14	5104	11040
2	4.21	8.52	2646.29	5355.43	6736	13632
3	3.13	7.46	1967.43	4689.14	5008	11936
4	3.27	7.72	2055.43	4852.57	5232	12352
5	2.91	6.98	1829.29	4387.43	4656	11168
6	4.77	9.28	2998.29	5833.14	7632	14848
7	2.77	7.33	4607.43	1741.14	11728	4432

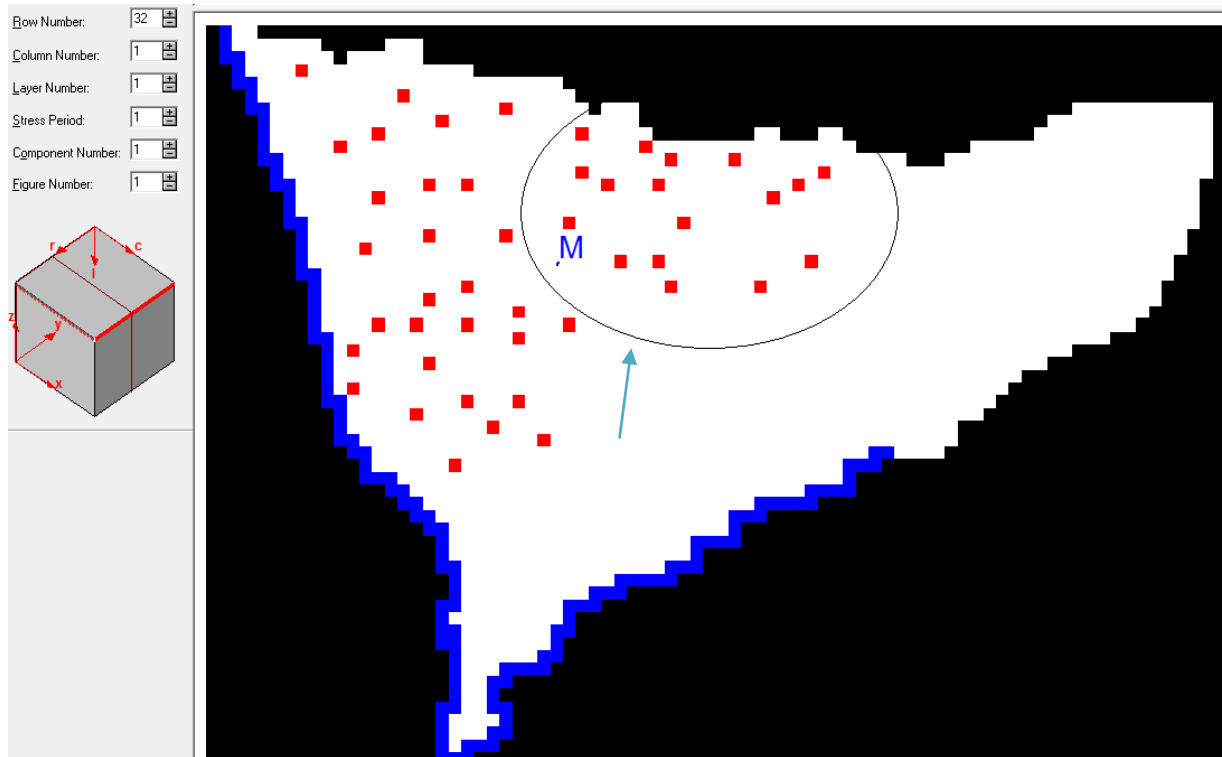
*Περίοδος άντλησης (ημέρες)

Πίνακας 7.3 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων (σενάριο 3)

Για να εξεταστεί κάθε φορά η καταλληλότητα του νερού για ανθρώπινη χρήση σε κάθε ένα από τα τρία παραπάνω σενάρια, τοποθετήθηκε 1 Monitoring Well σε μια κομβική θέση στο εσωτερικό του υδροφορέα για να ελέγχονται οι συγκεντρώσεις των πηγαδιών και άρα να διαπιστώνεται αν το νερό είναι πόσιμο ή όχι (όριο 0.5 kg/m³).

Η τοποθέτηση του Monitoring Well M στη θέση που φαίνεται παρακάτω δεν είναι τυχαία. Τα πηγάδια από τα οποία αντλείται νερό για ανθρώπινη χρήση είναι εκείνα που βρίσκονται μέσα στην έλλειψη. Τα υπόλοιπα πηγάδια χρησιμοποιούνται κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς, καθώς, όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδροφορέα μελέτης στο μηδενικό σενάριο, δηλαδή χωρίς άντληση, τα συγκεκριμένα πηγάδια έχουν τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών πάνω από το όριο (0.5 kg/m³), επομένως καθίστανται ακατάλληλα για ανθρώπινη

χρήση και δεν χρήζουν αντικείμενο μελέτης στα σενάρια με διαφορετικές παροχές άντλησης που διατυπώθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 7.42 Θέση του Monitoring Well M

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα τρία σενάρια λειτουργίας του υδροφορέα.

Ζώνη 1: παράκτια ζώνη του υδροφορέα μελέτης (13 πηγάδια)

Ζώνη 2: ζώνη στο εσωτερικό του υδροφορέα μελέτης (33 πηγάδια)

Τιμή συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών: kg/m^3

	1 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ (m ³ /ημέρα)	2 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ (m ³ /ημέρα)	3 ^ο ΣΕΝΑΡΙΟ (m ³ /ημέρα)
Ζώνη 1	0	0	0
Ζώνη 2	80	100	125
Τιμή συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών για το Monitoring Well	0.06	0.26	0.49
Αθροιστική Ημερήσια Άντληση (m ³ /ημέρα)	2.640	3.300	4.125
Αθροιστική Ετήσια Άντληση (m ³ /έτος)	963.600	1.204.500	1.505.625
Συνολικό Υδατικό Απόθεμα (m ³ /έτος)	3.000.000	3.000.000	3.000.000
Ποσοστό Άντλησης (%)	32.12	40.15	50.19

Πίνακας 7.4 Συγκεντρωτικά στοιχεία προσομοιώσεων

Συνεπώς το ποσοστό του 50.19% της συνολικής κατείδουσας που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο Monitoring Well M είναι 0.49kg/m^3 .

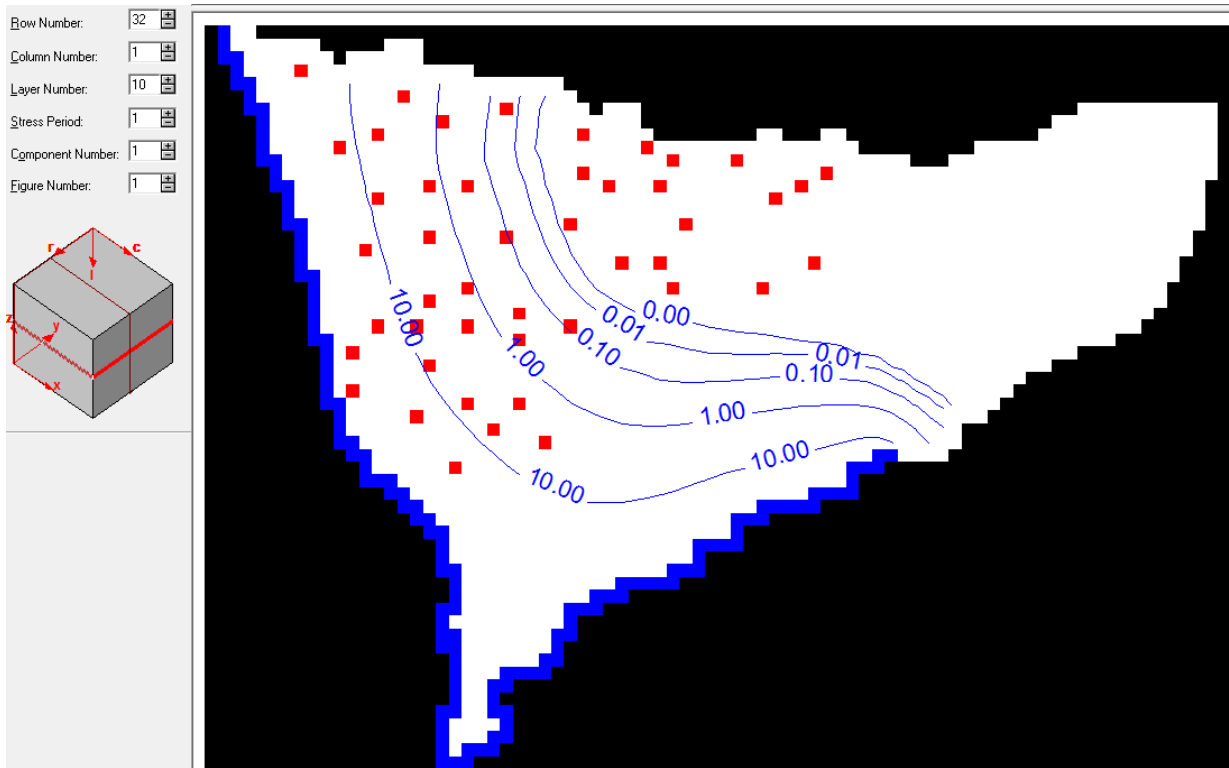
Επομένως, η μέγιστη ημερήσια ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί ώστε να μην τίθεται θέμα καταλληλότητας του νερού είναι $4.125\text{ m}^3/\text{ημέρα}$, που αντιστοιχεί σε μέγιστη ετήσια $1.505.625\text{ m}^3/\text{έτος}$ και ποσοστό άντλησης 50.19 %.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι πραγματοποιήθηκαν πάρα πολλά σενάρια και δοκιμές ώστε να επιλεγθούν αυτά τα τρία σενάρια και να εντοπιστεί το δυσμενέστερο για τον υδροφορέα μελέτης.

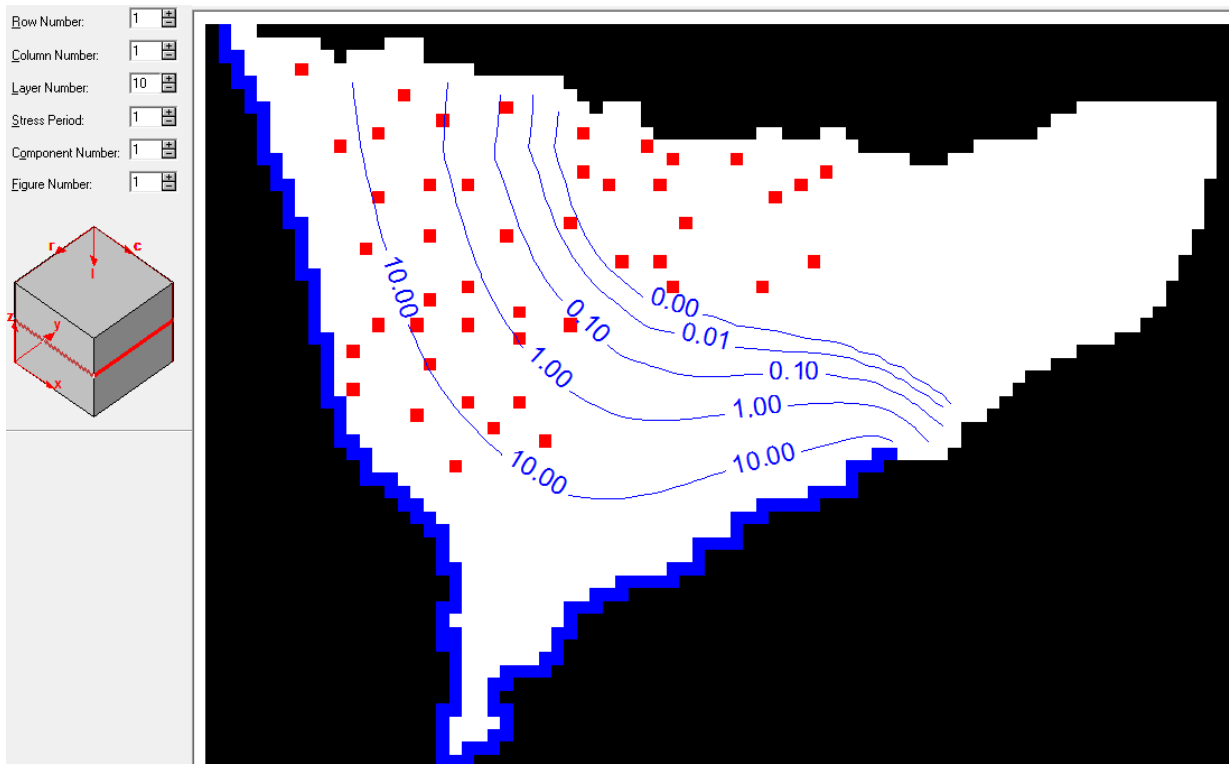
7.4.4 Σενάριο 4^ο

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσομοιώνεται ξανά ο υδροφορέας με μηδενική άντληση από όλα τα πηγάδια, όπως και στο μηδενικό σενάριο, χρησιμοποιώντας όμως τώρα σαν αρχικές συνθήκες, τις συνθήκες που προέκυψαν από το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή το τρίτο σενάριο. Με άλλα λόγια προσομοιώνεται ο υδροφορέας μελέτης με αρχικές συνθήκες τις τελικές του 3^{ου} σεναρίου. Σκοπός του σεναρίου είναι ο υπολογισμός του χρόνου αποκατάστασης του φυσικού συστήματος, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται, ώστε το μοντέλο να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή σε ισορροπία.

Στα παρακάτω σχήματα, εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος οι ισοχλώριες στο επίπεδο 10 στο μηδενικό σενάριο για stress period 40.000 ημέρες και οι ισοχλώριες στο επίπεδο 10 στο τέταρτο σενάριο για stress period 10.000 ημέρες. Αν συγκριθούν τα παρακάτω αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι οι ισοχλώριες βρίσκονται σχεδόν στην ίδια θέση και επομένως ο χρόνος επαναφοράς του φυσικού συστήματος στην αρχική του ισορροπία είναι 10.000 ημέρες.



Εικόνα 7.43 Ισοχλώριες καμπύλες μετά την προσομοίωση με μηδενική άντληση στο επίπεδο 10 (μηδενικό σενάριο).



Εικόνα 7.44 Ισοχλώριες καμπύλες μετά την προσομοίωση με μηδενική άντληση στο επίπεδο 10 (τέταρτο σενάριο).

8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Σύνοψη

Για τη διερεύνηση ενός υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα με σκοπό την προσομοίωση του σε συνθήκες υπεράντλησης των υδατικών αποθεμάτων του χρειάζεται μια σειρά εργασιών και εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων που θα προσομοιώσουν διάφορα σενάρια για τον υπό μελέτη υδροφορέα. Αρχικά, ωστόσο, θα πρέπει να γνωρίζουμε τον ίδιο τον υδροφορέα και κατ' επέκταση την ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η περιοχή μελέτης είναι ο υπόγειος και παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας της περιοχής των Ιρίων, που εκτείνεται σε μια περιοχή 10.000 στρεμμάτων και περιβάλλεται από πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Η περιοχή «Ίρια» βρίσκεται νοτιοανατολικά του Ναυπλίου ανήκει στο νομό Αργολίδας και έχει έκταση 12.000 στρέμματα, από τα οποία αρδεύονται περίπου τα 10.000 στρέμματα (83.3%). Η φυτοκάλυψη της περιοχής είναι πολύ σημαντική, λόγω της έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης που καταλαμβάνει σχεδόν ολόκληρη την πεδινή έκταση. Έτσι, η γεωργία αποτελεί το βασικό τομέα απασχόλησης των κατοίκων. Από την ανεξέλεγκτη, μακροχρόνια και εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών το υδροφόρο στρώμα της πεδιάδας έχει υποβαθμιστεί ποσοτικά και ποιοτικά.

Το κλίμα της περιοχής μελέτης ανήκει στον Μεσογειακό υποτροπικό τύπο και σε ετήσια βάση ανήκει στον τύπο Η8Υw8a (ζώνη λεμονιάς).

Με βάση τη λιθολογική και υδρογεωλογική σύσταση των Ιρίων έγινε και η πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα ο οποίος εδαφικά αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις και τριαδικούς ασβεστόλιθους. Η ακριβής εδαφική σύσταση, ωστόσο, δεν ήταν αρκούντως γνωστή, με αποτέλεσμα να γίνουν διάφορες υποθέσεις έως ότου καταλήξουμε στον πιθανότερο εδαφικό τύπο. Με την επεξεργασία των απαραίτητων μετρητικών δεδομένων, που παραχωρήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε., κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της πιεζομετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος και η κατασκευή του αντίστοιχου πιεζομετρικού χάρτη.

Τα παραπάνω δεδομένα, σε συνδυασμό με τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα που είχαν υπολογιστεί στην προηγούμενη διπλωματική εργασία

(Χατζούλη Ευθυμία , Διπλωματική Εργασία «Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων- Διερεύνηση Παράκτιου Υδροφορέα στην Περιοχή των Ιρίων Αργολίδας» ΕΜΠ, Αθήνα 2005), χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωσή του, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας και τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού (GROUNDWATER VISTAS). Βέβαια, όπως αναφέρθηκε, πολλά από τα απαιτούμενα δεδομένα απλώς είχαν εκτιμηθεί, καθώς ήταν αδύνατον να μετρηθούν ή να υπολογισθούν, λόγω ελλειμματικών δεδομένων.

8.2 Συμπεράσματα

8.2.1 Συμπεράσματα από την πιεζομετρία του υδροφορέα

Στην περιοχή του υδροφορέα υπάρχουν πάνω από πενήντα πηγάδια αλλά περίπου σαράντα έξι από αυτά λειτουργούν σήμερα. Από τις μετρήσεις που μας παραχωρήθηκαν από το Δρ. Υδρογεωλόγο Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο παρατηρείται ότι οι μέσες υπερετήσεις απόλυτες στάθμες των υπόγειων νερών κυμαίνονται από 0.57m έως 2.53m με μέση τιμή 1.24m. Παρατηρείται, επίσης, ότι απουσιάζουν οι αρνητικές τιμές από τα μέσα υδραυλικά φορτία γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν λαμβάνουν πλέον χώρα εντατικές αντλήσεις σε μεγάλη κλίμακα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών από το δίκτυο του Αναβάλου το οποίο άρχισε να λειτουργεί από το 2000 περίπου.

Για την μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας αλλά και για τη βέλτιστη προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα κρίθηκε σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα της πιεζομετρίας που προήλθαν από πραγματικές μετρήσεις (έξω στο πεδίο) με αυτά που εξήχθησαν από το λογισμικό (GROUNDWATER VISTAS). Η προσομοίωση κρίθηκε αρκετά ικανοποιητική καθώς τα αποτελέσματα από τις δύο πηγές συνέκλιναν σε μεγάλο βαθμό χωρίς ουσιαστικά μεγάλες διαφορές (Εικόνα 7.16).

8.2.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροφόρου σχηματισμού

Το τελικό στάδιο της εργασίας αφορούσε την προσομοίωση του υδροφορέα με την εφαρμογή ενός μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας που στηρίζεται στον προσδιορισμό διαφόρων υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων για την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση του φυσικού συστήματος. Όπως είναι αντιληπτό, οι περισσότερες από αυτές τις παραμέτρους είχαν εκτιμηθεί κατά το δυνατόν βάσει των διαθέσιμων στοιχείων, ωστόσο η εκτίμηση είναι μόνο προσεγγιστική και μπορεί να

απέχει από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών αυτών χρειάζονται εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες στην παρούσα φάση δεν ήταν διαθέσιμες. Ακόμα όμως και αν υπήρχαν προσδιορισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του συστήματος του υδροφορέα, οι φυσικές συνθήκες και διεργασίες είναι πάντα δύσκολο να προσομοιωθούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Επομένως, σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει απλώς μια προσέγγιση στη λειτουργία του υδροφορέα εκτιμώντας τις πιθανές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό το φυσικό σύστημα.

Τέτοιες παραδοχές είναι η εκτίμηση του πάχους του υδροφορέα, η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, εφόσον απουσιάζουν εργαστηριακές μετρήσεις, η ύπαρξη άνισων χωρικά μετρήσεων της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η απουσία δεδομένων αντλήσεων στα σημεία που υπάρχουν καταγεγραμμένες γεωτρήσεις και πηγάδια παρατήρησης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως, οι ανάγκες σε νερό, οι οποίες διαφέρουν από μήνα σε μήνα, μπορούν απλά να εκτιμηθούν και να θεωρηθούν ίδιες για όλη τη διάρκεια του έτους, κάτι που πρακτικά δεν είναι σωστό και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα αν οι τιμές αυτές υποεκτιμηθούν.

Η συλλογή των παραπάνω δεδομένων θα βοηθούσε στη βελτιστοποίηση του μοντέλου προσομοίωσης και θα μπορούσε να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια τις διαδικασίες της υπόγειας ροής ενός υδροφορέα επιτυγχάνοντας το στόχο του, που δεν είναι άλλος από την πρόγνωση και έγκαιρη πρόληψη πιθανών μελλοντικών καταστάσεων που θα οδηγούσαν σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των αποθεμάτων του υδροφορέα.

Αρχικά υπολογίστηκε ο χρόνος διαμόρφωσης της στατικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού. Από τα αποτελέσματα του λογισμικού διαπιστώθηκε ότι ο υδροφορέας ισορροπεί από τις 25.000 μέρες και μετά. Επομένως, οι 40.000 μέρες που ορίστηκαν σαν αρχική συνθήκη για την προσομοίωση του υδροφορέα κρίνεται ικανοποιητική, αφού επαληθεύεται από τα αποτελέσματα της.

Για τα διάφορα σενάρια που προσομοιώθηκαν, με βάση πάντα τις παραδοχές και τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας, οι παροχές άντλησης στην παράκτια ζώνη θα πρέπει να είναι σχεδόν μηδενικές καθώς η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι μεγάλη και δημιουργεί προβλήματα υφαλμύρωσης των πηγαδιών. Διαπιστώθηκε πως στο μηδενικό σενάριο στο οποίο δεν είχαν οριστεί παροχές άντλησης ότι η

αλάτινη σφήνα προχωρά πολύ μέσα στο εσωτερικό του υδροφορέα με αποτέλεσμα τα πηγάδια της παράκτιας ζώνης να κρίνονται ακατάλληλα για ανθρώπινη χρήση καθώς παρουσίαζαν αρκετά υψηλές τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών (όριο 0.5 kg/m^3). Έτσι, για την εκμετάλλευση των υπόλοιπων πηγαδιών στο εσωτερικό του υδροφορέα μελέτης διατυπώθηκαν διάφορα σενάρια άντλησης για τον υπολογισμό της μέγιστης ημερήσιας άντλησης, ώστε τα πηγάδια στο εσωτερικό του υδροφορέα να είναι κατάλληλα για ανθρώπινη χρήση. Διαπιστώθηκε λοιπόν, ότι η μέγιστη ημερήσια ποσότητα νερού που μπορούμε να αντληθεί είναι $4.125 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ που αντιστοιχεί σε μέγιστη ετήσια $1.505.625 \text{ m}^3/\text{έτος}$ και ποσοστό άντλησης 50.19% της συνολικής κατείσδυσης. Τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν ήταν πάρα πολλά ενώ στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκαν τα πιο αντιπροσωπευτικά.

Τέλος, ο χρόνος αποκατάστασης του υπόγειου υδροφορέα, δηλαδή ο χρόνος που χρειάζεται το φυσικό σύστημα ώστε να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, υπολογίστηκε σε 10.000 ημέρες (περίπου 27 έτη).

8.3 Προτάσεις – Μέτρα Προστασίας για βιώσιμη διαχείριση του υδατικού δυναμικού στα Ίρια

Από την ανεξέλεγκτη, μακροχρόνια και εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών το υδροφόρο στρώμα της πεδιάδας έχει υποβαθμιστεί ποσοτικά και ποιοτικά. Τα προβλήματα αυτά διογκώνονται κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, καθώς οι ανάγκες σε νερό είναι αυξημένες και οι εντατικές αντλήσεις οδηγούν σε κρίσιμες καταστάσεις για τόσο ζωτικής σημασίας φυσικά συστήματα.

Αιτία δημιουργίας αυτών των προβλημάτων δεν είναι άλλη από την έλλειψη σωστής διαχείρισης των διαθέσιμων αποθεμάτων και της ορθολογικής τους χρήση. Ιδιαίτερα οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ευάλωτοι σε λάθος συνθήκες διαχείρισης, αφού η ποιοτική υποβάθμιση των διαθέσιμων αποθεμάτων τους οδηγεί πρακτικά στην καταστροφή ολόκληρου του υδροφορέα.

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, τρωτοί σε εξωτερική ρύπανση, ανομοιόμορφα κατανομημένοι, στενά εξαρτώμενοι από ακραίες συχνά μεταβολές του υδρολογικού καθεστώτος αλλά και απολύτως απαραίτητοι για την συντήρηση της ζωής και της ανάπτυξης του περιβάλλοντος. Η υπερεκμετάλλευση τους έχει προκαλέσει σε πολλές παράκτιες περιοχές και νησιά σημαντική ταπείνωση στάθμης, καθιζήσεις εδαφών, υφαλμύρωση και γενικότερα ποιοτική υποβάθμιση του νερού.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χρειάζεται η εφαρμογή μέτρων και στρατηγικός σχεδιασμός για μια ορθολογική διαχείριση. Η πολιτική διαχείρισης που πρόκειται να υιοθετηθεί από τους αρμόδιους φορείς και οργανισμούς, κρίνεται απαραίτητο να βασίζεται στην ισόρροπη ανάπτυξη της περιοχής με παράλληλη διατήρηση των υδατικών και λοιπών φυσικών πόρων. Στο πλαίσιο της βιώσιμης τουριστικής και κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης της περιοχής πρέπει να εξασφαλίζονται τα εξής:

- Διατήρηση της ποιότητας των υδατικών και εν γένει των φυσικών πόρων.
- Ισόρροπη ανάπτυξη τουριστικών και οικιστικών μονάδων με στόχο την αειφορία.
- Δημιουργία συνθηκών οικονομικής άνθησης χωρίς κατασπατάληση των υπαρχόντων φυσικών πόρων.
- Δημιουργία οικισμών και τουριστικών μονάδων με στόχο την ανθρώπινη διάσταση, που να προσφέρει στους επισκέπτες ηρεμία και ξεκούραση και στους κατοίκους υλική και πνευματική ευημερία.
- Διατήρηση της ομορφιάς και της φυσικότητας του τοπίου και της πολιτιστικής κληρονομιάς.

(Μαντόγλου,1997)

Συγκεκριμένα, για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του υδατικού περιβάλλοντος στα Ίρια, προτείνονται τα παρακάτω:

Εκπόνηση Υδρογεωλογικών Μελετών

Η κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών στα Ίρια πραγματοποιείται σε μεγάλο ποσοστό από τα υπόγεια νερά. Δεδομένου της σπουδαιότητας της υπόγειας υδροφορίας, κρίνεται σκόπιμη η διενέργεια υδρογεωλογικής έρευνας στη πεδιάδα των Ιρίων, που λόγω της ύπαρξης ασβεστόλιθων στο υπέδαφος, εμφανίζεται καρστική υδροφορία.

Ποσοτικός - Ποιοτικός έλεγχος νερού

Οι αυξανόμενες ανάγκες της περιοχής σε νερό και η ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων που παρατηρείται ως συνέπεια των κοινωνικοοικονομικών δραστηριοτήτων (τουρισμός, γεωργία κτλ), καθιστούν αναγκαία τη συστηματική παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Στη λογική αυτή συντείνει και η έλλειψη επαρκών

υδρολογικών στοιχείων ώστε να είναι εφικτή η σύνταξη τεκμηριωμένου υδατικού ισοζυγίου. Για την ακριβή εκτίμηση του υδατικού δυναμικού στα Ίρια είναι απαραίτητη η δημιουργία βάσεως δεδομένων που θα υποστηρίζεται από τις παρακάτω ενέργειες:

- Δημιουργία μικρομετεωρολογικού σταθμού εξοπλισμένου με σύγχρονα όργανα, που θα επιτρέπουν την εφαρμογή κατάλληλων ποσοτικών μεθόδων (π.χ. Penman) εκτίμησης συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου.
- Εγκατάσταση δικτύου μέτρησης παροχών σε ρέματα.
- Εγκατάσταση μόνιμου δικτύου παρακολούθησης της υπόγειας στάθμης των υδροφόρων σχηματισμών.
- Στα σημεία ελέγχου παροχών και υπόγειας στάθμης να γίνονται μετρήσεις φυσικοχημικών παραμέτρων και ποιότητας των νερών.
- Καταγραφή και αξιοποίηση όλων των σημαντικών πηγών της ευρύτερης περιοχής.
- Καταγραφή των ιδιωτικών και δημοτικών γεωτρήσεων και φρεάτων.

Έργα διανομής νερού

Η περιορισμένη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων επιβάλλει την αντικατάσταση ή βελτίωση των δικτύων διανομής για τη μείωση του συντελεστή απωλειών. Τα διαβρωμένα δίκτυα πολλαπλασιάζουν τις απαιτούμενες ανάγκες και επιπλέον επιβαρύνουν την ποιότητα του νερού, θέτοντας σε κίνδυνο σε κάποιες περιπτώσεις τη δημόσια υγεία. Η αντικατάσταση ή βελτίωση των δικτύων θα έχει ως συνέπεια τη μείωση ή και παύση των αντλήσεων από φρεάτια και γεωτρήσεις και τη σταδιακή βελτίωση των χαρακτηριστικών του υπόγειου υδροφορέα. Ας σημειωθεί, όμως, ότι πρόσφατα (2001) έχει ολοκληρωθεί το νέο αρδευτικό δίκτυο της περιοχής που μεταφέρει πηγαία νερά από τις πηγές Κιβερίου.

Έργα για τη μείωση της επιφανειακής απορροής σε επίπεδο υδρολογικής Λεκάνης

Η μείωση της επιφανειακής απορροής, ώστε τα όμβρια να συγκρατούνται και να διηθούνται στους υπόγειους υδροφορείς, μπορεί να επιτευχθεί με μία σειρά ενεργειών:

- Με τη δημιουργία αναβαθμιδών, οι οποίες μειώνουν την ταχύτητα απορροής και αυξάνουν την διήθηση.

- Πολιτική αναδάσωσης. Η αναβάθμιση και προστασία της φυσικής χλωρίδας και η οργανωμένη αναδάσωση θα βελτιώσει τις συνθήκες απορροής του νερού, ευνοώντας την κατείσδυση του και συνεπώς την τροφοδοσία του υπόγειων υδροφορέα.
- Μικρές δεξαμενές αποθήκευσης και μικρά φράγματα. Προτείνεται η κατασκευή τέτοιων έργων κατά μήκος μικρών ρεματιών για τη συγκράτηση μικρών ποσοτήτων νερού και τη χρήση τους στις παρακείμενες καλλιέργειες.

Οργάνωση Διαχείρισης Υδατικών Πόρων

Η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στον Ελληνικό χώρο διέπεται από το θεσμικό πλαίσιο που απορρέει από το Ν.1739/87 και τα σχετικά προεδρικά διατάγματα, καθώς επίσης και από τη νέα κοινοτική Οδηγία - Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο παραπάνω νόμος αν και καταγράφει την πρόθεση για ενιαία εθνική υδατική πολιτική, παρουσιάζει πολλά κενά και ενισχύει την πολυδιάσπαση των αρμοδιοτήτων, με αποτέλεσμα αλληλοκαλύψεις και τριβές.

Στα πλαίσια αυτά θεωρείται σημαντική η ίδρυση ενός φορέα Διαχείρισης και προστασίας Υδατικών Πόρων στην ευρύτερη περιοχή του νομού Αργολίδας, (αφού είναι γνωστή η έκταση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή π.χ Αργολικό πεδίο) και η στελέχωση του με εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό.

Παρακολούθηση και έλεγχος των αρδευτικών καταναλώσεων

Η απασχόληση με τη γεωργία αποτελεί σημαντικότερη οικονομική δραστηριότητα των κατοίκων στα Ίρια, η οποία όμως λόγω της ανάπτυξης του τουρισμού και της λειψυδρίας ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, σταδιακά μειώνεται, αφού η παραγωγή δεν είναι ανάλογη ποιοτικά και ποσοτικά της προσπάθειας των αγροτών. Παρατηρούνται φαινόμενα υπεράντλησης και εξάντλησης των υπόγειων αποθεμάτων. Για τη βελτίωση των συνθηκών άρδευσης και συνάμα τη μείωση της αλόγιστης χρήσης των υπόγειων υδατικών πόρων προτείνονται οι παρακάτω ενέργειες:

- Εγκατάσταση υδρομετρητών στις γεωτρήσεις για τον έλεγχο των αντλήσεων.
- Εξέταση του ενδεχόμενου δημιουργίας ζωνών απαγόρευσης αντλήσεως, σε περιοχές κοντά σε ακτές, διότι σε τέτοιες ζώνες υπάρχει ο κίνδυνος διείσδυσης του θαλάσσιου νερού ακόμα και σε περίπτωση μικρών αντλούμενων ποσοτήτων

- Εξέταση των τρόπων βελτίωσης των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου σχηματισμού, με την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού.

Ευαισθητοποίηση των κατοίκων

Για την παραγωγική και αποδοτική διαχείριση των υδατικών πόρων απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η αλλαγή στη νοοτροπία του κοινωνικού συνόλου σε ό,τι αφορά στη χρήση των πόρων. Η θέσπιση νομικού πλαισίου και η λήψη αποφάσεων από τις αρμόδιες αρχές αποτελούν βέβαια σημαντικό βήμα προς την αειφορία του υδάτινου περιβάλλοντος αλλά η επίτευξη του στόχου δεν είναι εφικτή χωρίς τη συνειδητοποίηση και ευαισθητοποίηση των κατοίκων.

Ο παραμερισμός της λογικής κάλυψης των ατομικών, βραχυπρόθεσμων συμφερόντων (ανόρυξη γεωτρήσεων, υπεραντλήσεις, κα.), η οποία εμφανίζεται στην περιοχή ως απόρροια της ελλιπούς ενημέρωσης των κατοίκων, θα οδηγήσει στον περιορισμό της σπατάλης και της υποβάθμισης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων.

Καθοριστικό, επίσης, ρόλο στην αποτελεσματική εφαρμογή πολιτικής για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων θα διαδραματίσει η ενημέρωση του εποχιακού πληθυσμού της περιοχής, η προσέλευση του οποίου προκαλεί αύξηση των υδρευτικών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες που οι βροχοπτώσεις είναι μηδενικές και συνεπώς δεν πραγματοποιείται τροφοδοσία των υδατικών διαθεσίμων.