



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Επίδραση των ρηγμάτων στη μοντελοποίηση
ρηγματωμένων υδροφορέων -

Εφαρμογή πεδίου στην περιοχή Χερσονήσου Ηρακλείου»



ΑΡΕΤΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

καθ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΡΑΤΖΑΣ (Επιβλέπων)

καθ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ

καθ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ

αναπλ. καθ. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ.Καρατζά Γεώργιο, πρόεδρο του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και υπεύθυνο του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαιτέρως θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο Μανώλη Βαρουχάκη, μέλος του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, για τη συνεισφορά του στην ολοκλήρωση της εργασίας καθώς και για τη πολύτιμη βοήθεια του.

Ακόμη, ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Νικολαΐδη, καθηγητή του τμήματος, κ. Παλαιολόγο, αναπληρωτή καθηγητή και τον κ. Καλογεράκη, καθηγητή επίσης του τμήματος, ως αναπληρωματικό μέλος της επιτροπής εξέτασης.

Τέλος, θερμά ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους όποτε τη χρειάστηκα.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιείται, μέσω προγράμματος modflow, η υπόγεια ροή της περιοχής Χερσονήσου Ηρακλείου και κατ' επέκταση προσομοιάζεται το μέτωπο της υφαλμύρινης στην περιοχή. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των ρηγμάτων που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή στη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και του μετώπου της υφαλμύρινης.

Η περιοχή της Χερσονήσου, περίπου 20-30 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου, αντιμετωπίζει την τελευταία δεκαετία οξύ πρόβλημα με την υποβάθμιση των παράκτιων υδροφορέων της από τη διείσδυση της θάλασσας. Το φαινόμενο της υφαλμύρινης είναι ιδιαίτερα έντονο, λόγω της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου νερού, υποβαθμίζοντας με αυτό τον τρόπο την ποιότητα του, καθώς μετατρέπεται σταδιακά σε υφάλμυρο.

Για την προσέγγιση του προβλήματος, εισάγαμε τα δεδομένα που περιγράφουν την περιοχή μελέτης, δηλαδή τις συντεταγμένες των ρηγμάτων, των γεωτρήσεων, της ακτογραμμής και τις τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων, μέσω προγράμματος GIS και έπειτα μεταφέραμε τα δεδομένα μας στο πρόγραμμα visual modflow. Το πρόγραμμα παρείχε την δυνατότητα για εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων με βάση τα δεδομένα εισαγωγής προσομοιάζοντας την υπόγεια ροή.

Επιπλέον, με την μεταβολή κάποιων παραμέτρων μέσω modflow, εξετάσαμε τρεις περιπτώσεις όσον αφορά την ύπαρξη ή όχι ρηγμάτων στο υπέδαφος και το πλήθος των στρωμάτων στην περιοχή μελέτης. Με βάση αυτές τις περιπτώσεις διερευνήθηκαν 2 σενάρια ώστε να αναπαρασταθεί το μέτωπο της υφαλμύρινης, σε κάθε σημείο του υπεδάφους, για διάφορες χρονικές περιόδους, με ορίζοντα 10 και 20 χρόνων και με διαφορετικές υποθέσεις.

Σε κάθε ένα σενάριο εξετάστηκαν υποθέσεις που αφορούσαν τις μεταβολές στις παροχές άντλησης, με διπλασιασμό ή υποδιπλασιασμό, το πλήθος των γεωτρήσεων, με δημιουργία νέων ή απενεργοποίηση αυτών.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, διαπιστώνεται ότι η ανθρώπινη παρέμβαση επηρεάζει την ταχύτητα εισχώρησης του μετώπου της υφαλμύρινης. Αυτό διαπιστώνεται μετά το πέρας των 20 χρόνων (δημιουργία νέων πηγαδιών) η γεώτρηση που βρίσκεται πιο κοντά στην ακτογραμμή αντλεί νερό με ελάχιστη συγκέντρωση άλατος. Συνεπώς, σε βάθος χρόνου υπάρχει πιθανότητα το πηγάδι να αντλεί υφάλμυρο νερό. Ακόμη και με παντελή απουσία αντλήσεων για χρονικό διάστημα 20 ετών το μέτωπο της υφαλμύρινης θα συνεχίζει να κινείται.

Τέλος, τα ρήγματα στην περιοχή λειτουργούν σαν ανοικτός αγωγός μεταφέροντας στο εσωτερικό της χερσονήσου νερό με πολύ μεγάλη συγκέντρωση άλατος επηρεάζοντας άμεσα το μέτωπο της υφαλμύρινης καθώς η ύπαρξη γεωτρήσεων περιμετρικά των ρηγμάτων εντείνει τη διείσδυση υφάλμυρου νερού, υποβαθμίζοντας την ποιότητα των υπογείων υδάτων.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Υδρολογικός κύκλος.....	1
1.2.Ρύπανση υδάτων.....	3
2. ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ	6
2.1.Υφαλμύρινη ως φυσικό φαινόμενο.....	6
2.2. Αίτια φαινομένου	8
2.3.Επιπτώσεις υφαλμύρινης.....	10
2.4. Υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα.....	12
2.4.1 Πελοπόννησος	12
2.4.2 Στερεά Ελλάδα.....	13
2.4.3 Θεσσαλία	13
2.4.4 Ήπειρος.....	14
2.4.5 Ιόνια Νησιά.....	14
2.4.6 Μακεδονία - Θράκη.....	14
2.4.7 Νησιά Αιγαίου.....	15
2.4.8 Κρήτη.....	15
2.5. Προσέγγιση Ghyben-Herzberg	16
2.5.1 Απόκλιση.....	17
2.5.2 Μαθηματικό υπόβαθρο.....	19
3. ΚΩΔΙΚΕΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	23
3.1 Μοντέλα.....	23
3.2 Μαθηματική προσομοίωση ροής υπογείων υδάτων.....	24
3.3 Οι αριθμητικές μέθοδοι.....	25
3.4 Το μοντέλο Modflow	27
3.4.1 Γενικά.....	27
3.4.2 Μαθηματικό υπόβαθρο.....	28
3.5 Στάδια του προγράμματος	29
3.5.1 Το τμήμα εισαγωγής.....	32
3.5.2 Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων.....	36
3.5.3 Το τμήμα αποτελεσμάτων.....	37
3.6 Κώδικας προσομοίωσης Seawat.....	40
3.7 Επαλήθευση- Ρύθμιση.....	41
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
4.1 Γενικά	43
4.2 Κλιματολογικά στοιχεία.....	45
4.3 Γεωλογία – Υδρογεωλογία.....	48
4.3.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί.....	49

4.3.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί.....	51
4.3.3. Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων.....	52
4.4 Προσομοίωση του φυσικού συστήματος της περιοχής ενδιαφέροντος.....	55
4.5 Οριακές Συνθήκες.....	58
5. ΣΕΝΑΡΙΑ.....	61
5.1 Δεδομένα.....	61
5.2 Ανάλυση περιπτώσεων.....	63
5.2.1 Σενάρια.....	64
5.2.2 Επιπρόσθετες υποθέσεις.....	65
5.3 Τρόπος παρουσίασης.....	66
5.4 Πρώτη Περίπτωση (Χωρίς Ρήγματα).....	68
5.4.1 Μετά το πέρας 10 ετών.....	68
5.4.2 Μετά το πέρας 20 ετών.....	70
5.5 Δεύτερη Περίπτωση (Υπαρξη Ρηγμάτων).....	72
5.6 Τρίτη Περίπτωση (Υπαρξη Ρηγμάτων – Δύο Ζώνες).....	76
5.6.1 Μεταβολή του μετώπου μετά από 10 χρόνια και μετά την σταθεροποίηση της ροής.....	76
5.6.2 Εποχιακές μεταβολές.....	78
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	83
6.1 Αποτελεσματικότητα του Seawat.....	83
6.2 Συμπεράσματα.....	85
6.3 Προτάσεις.....	88
6.3.1 Τεχνητός εμπλουτισμός.....	91
6.4 Επίλογος.....	94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υδρολογικός κύκλος

Ο Υδρολογικός κύκλος αποτελεί μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σ' αυτή την αλυσίδα των εμφανίσεων το νερό παρουσιάζεται μ' όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός), στερεό (χιόνι/χαλάζι).

Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινάει με την εξάτμιση του νερού από τους ωκεανούς, τις λίμνες και τις υγρές επιφάνειες στην ξηρά. Η μετατροπή του υγρού νερού σε υδρατμούς γίνεται είτε μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και της θέρμανσης όταν οι υγρές επιφάνειες ξηραίνονται κάτω από τη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία, είτε από τους ανέμους. Το νερό επίσης εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής από τα φύλλα και τον κορμό των φυτών. Ο υγρός αέρας ανυψώνεται στην τροπόσφαιρα, ψύχεται και τελικά οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και σχηματίζουν νέφη. Οι άνεμοι που επικρατούν μεταφέρουν την υγρασία είτε σε μορφή υδρατμών ή νεφών σε διάφορες αποστάσεις γύρω από τη γη, αλλά τελικά το νερό επιστρέφει στην επιφάνεια σαν υετός. Ο υετός μπορεί να έχει διάφορες μορφές, όπως βροχή, χιόνι, χαλάζι.

Όταν το νερό φτάσει στο έδαφος, μπορεί να εξατμιστεί ή να εισχωρήσει στο έδαφος και να ενσωματωθεί στα υπόγεια ύδατα ή να διαρρεύσει στους ωκεανούς μέσω της γήινης επιφάνειας με τη μορφή ποταμών, λιμνών ή ρευμάτων. Ακόμα και τα υπόγεια ύδατα εν μέρει διαρρέουν στους ωκεανούς, στα ποτάμια ή στα ρέματα. Σε κάθε περίπτωση τελικά το νερό είτε θα εξατμιστεί ή θα διαπνεύσει πίσω στην ατμόσφαιρα, όπου ο κύκλος ξεκινάει πάλι. Παρουσιάζεται μια απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου, [3].

Συνοπτικά μέσα στον υδρολογικό κύκλο μπορεί να συμβεί:

- α. Μεταφορά νερού.
- β. Προσωρινή αποθήκευση νερού.
- γ. Μεταβολή της κατάστασης νερού.



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση υδρολογικού κύκλου, [2].

1.2 Ρύπανση υδάτων

Το νερό είναι ένας ανανεώσιμος πόρος αλλά περιορισμένος. Παρόλο που ο υδρολογικός κύκλος ανανεώνει τα αποθέματα του γλυκού νερού στην επιφάνεια της γης και τους υπόγειους υδροφορείς, η ποσότητα του νερού είναι περιορισμένη και η κατανομή του στον χώρο και στο χρόνο άνιση. Το ίδιο ισχύει και για την ποιότητά του. Η ρύπανση του νερού περιορίζει ακόμη περισσότερο τις ποσότητες που είναι διαθέσιμες για τις διάφορες χρήσεις του. Δεν έχουμε επομένως, πάντα στην διάθεσή μας όσο νερό θέλουμε, όποτε το θέλουμε και στην ποιότητα που το θέλουμε.

Το νερό είναι άριστος διαλύτης και ως εκ τούτου έχει την ικανότητα να μεταφέρει την ρύπανση. Η διάβρωση των πετρωμάτων που προκαλείται από το νερό, διαμορφώνει το ανάγλυφο της γης διαλύοντας και μεταφέροντας τους ρύπους που συναντά στην πορεία του. Παρόλα αυτά, ούτε τα ποτάμια, ούτε οι λίμνες, ούτε οι θάλασσες έχουν μέγιστη ικανότητα αυτοκαθαρισμού. Κάποτε τα οικοσυστήματα αυτά καταρρέουν και τότε μετατρέπονται σε υπαίθριους υπονόμους επικίνδυνους για την δημόσια υγεία και τα νερά καθίστανται ακατάλληλα για οποιαδήποτε χρήση.

Ένα άλλο φαινόμενο που επιτείνει το φαινόμενο της ρύπανσης είναι και η έλλειψη υδάτινων αποθεμάτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ανάγκη όχι μόνο των κατοίκων των πόλεων για νερό αλλά και των βιομηχανιών και της γεωργίας και της ανάπτυξης του τουρισμού. Επομένως το νερό που χρησιμοποιείται επιστρέφεται στη φύση συχνά ρυπασμένο ή μολυσμένο και καταλήγει στη θάλασσα, στα ποτάμια, στις λίμνες, στα υπόγεια νερά και στους άλλους υδατικούς αποδέκτες. Η απόληψη νερού για την κάλυψη των αναγκών μειώνει την ποσότητα των επιφανειακών και των υπογείων νερών. Επίσης μία άλλη σημαντική παράμετρος της ρύπανσης των υδάτινων αποθεμάτων είναι ότι όσο λιγότερο νερό εμπλουτίζει τα ποτάμια, τις λίμνες και τους υπόγειους υδροφορείς τόσο μεγαλύτερη συγκέντρωση ρύπων έχουμε, δηλαδή μεγαλώνει το φορτίο των ρύπων ανά κυβικό νερού.

Γενικότερα οι χρήσεις του νερού είναι αντικρουόμενες. Μπορεί μεν το νερό να εξυπηρετεί πολλές χρήσεις ταυτόχρονα, αλλά πολλές φορές οι χρήσεις αυτές αντικρούονται στον βαθμό που η μία να αποκλείει τις άλλες. Όσοι ζουν «ψηλότερα» σε μια υδρολογική λεκάνη χρησιμοποιούν και ρυπαίνουν το νερό, με αποτέλεσμα να το στερούν από αυτούς που ζουν «χαμηλότερα».

Ακόμη το νερό που έχει φορτιστεί με λιπάσματα δεν είναι κατάλληλο για πόση και αυτό που έχει ρυπανθεί από βαρέα μέταλλα κρίνεται επίσης ακατάλληλο ακόμη και για άρδευση. Για αυτό η ύδρευση των πόλεων, η άρδευση των καλλιεργειών, η αναπτυσσόμενη βιομηχανία, ο οικονομικός τουρισμός ερίζουν για την εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων καλής ποιότητας νερού για να καλυφθούν οι ανάγκες τους. Τα τελευταία χρόνια ένα συχνό φαινόμενο που παρατηρείται σε όλο και περισσότερα κράτη είναι η μεταφορά νερού από μεγάλες αποστάσεις για την ύδρευση των μεγάλων πόλεων ή την άρδευση γεωργικών περιοχών.

Τέλος, τα υδάτινα αποθέματα δεν προορίζονται μόνο για τον άνθρωπο διότι τα ποτάμια, οι πηγές, οι υγρότοποι είναι αναγκαίοι για την διατήρηση της άγριας πανίδας και χλωρίδας επειδή και η φύση χρειάζεται το νερό. Οι οικολογικές απαιτήσεις σε νερό αφορούν, όπως και οι ανθρώπινες, επαρκείς ποσότητες καλής οικολογικής ποιότητας νερού για την διατήρησή τους. Οπότε είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διατηρηθούν οι υδάτινοι αποδέκτες απαλλαγμένοι από ρυπασμένες εκροές, τόσο για λόγους προστασίας της άγριας πανίδας και χλωρίδας που φιλοξενούν, όσο και για τον ρόλο που παίζουν στην υδρολογική ισορροπία, την τροφοδότηση των υπόγειων νερών, την συγκράτηση των πλημμυρών και τον καθαρισμό των νερών, [1].

Βιβλιογραφία

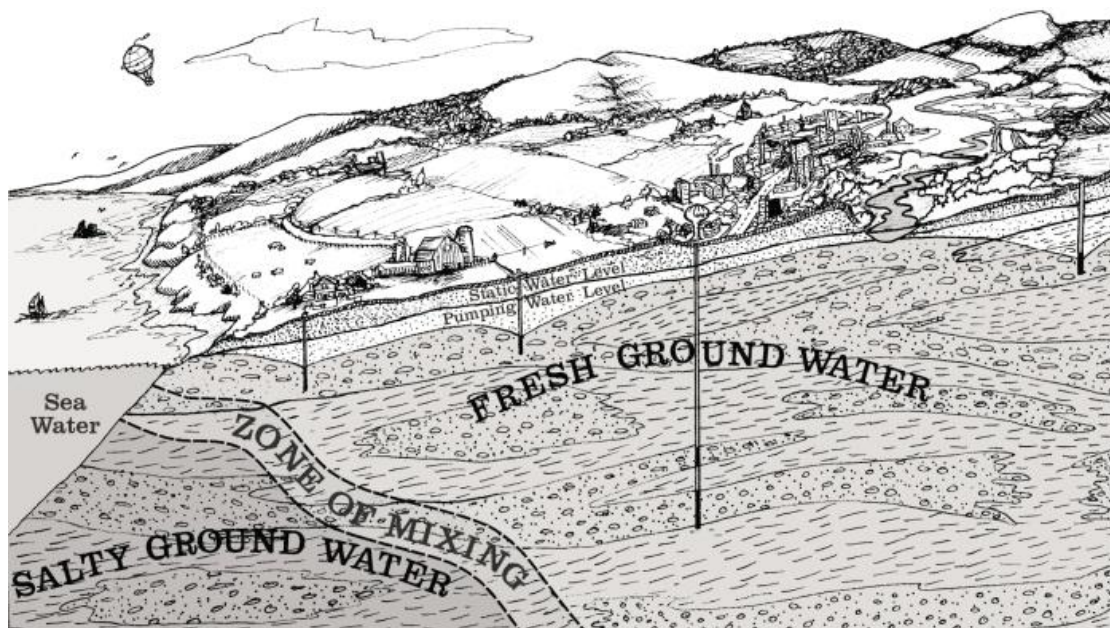
- [1] <http://www.ekpa.gr/>
- [2] <http://ga.water.usgs.gov/edu/graphics/watercyclegreekhigh.jpg>
- [3] Γ. Τσακίρης, 1995. Υδατικοί Πόροι: Τεχνική Υδρολογία

2. ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ

2.1 Η υφαλμύρινη ως φυσικό φαινόμενο

Βασική προϋπόθεση για την μελέτη της υπόγειας ροής σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι η διερεύνηση του φαινομένου της υφαλμύρινης που απαντάται σε όλες τις παράκτιες ζώνες.

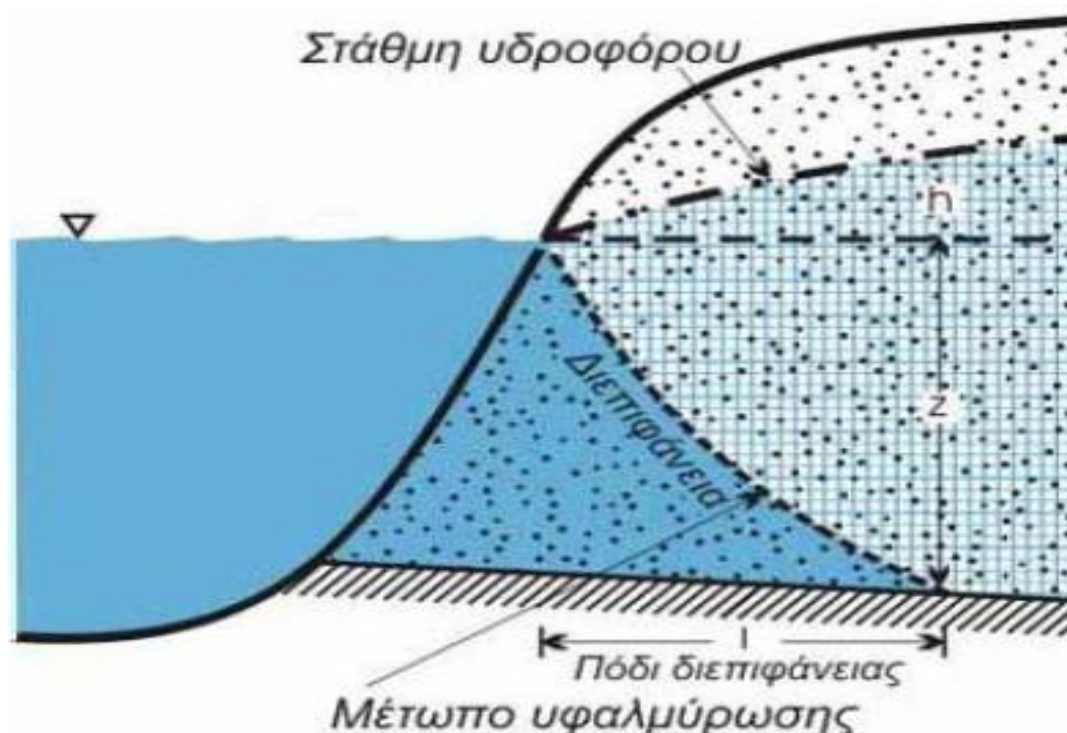
Όταν ένα υδροφόρο στρώμα είναι σε υδραυλική σύνδεση με θαλάσσια ύδατα, τότε μέρη του υδροφόρου στρώματος μπορούν να περιέχουν αλμυρό νερό, ενώ άλλα να περιέχουν γλυκό νερό, όπως παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της υφαλμύρινης, [10].

Το γλυκό νερό έχοντας ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα από το αλμυρό, είναι ελαφρύτερο και κατά συνέπεια τείνει να επιπλέει πάνω από το αλμυρό όταν και τα δύο αυτά ρευστά είναι παρόντα σε ένα υδροφόρο στρώμα.

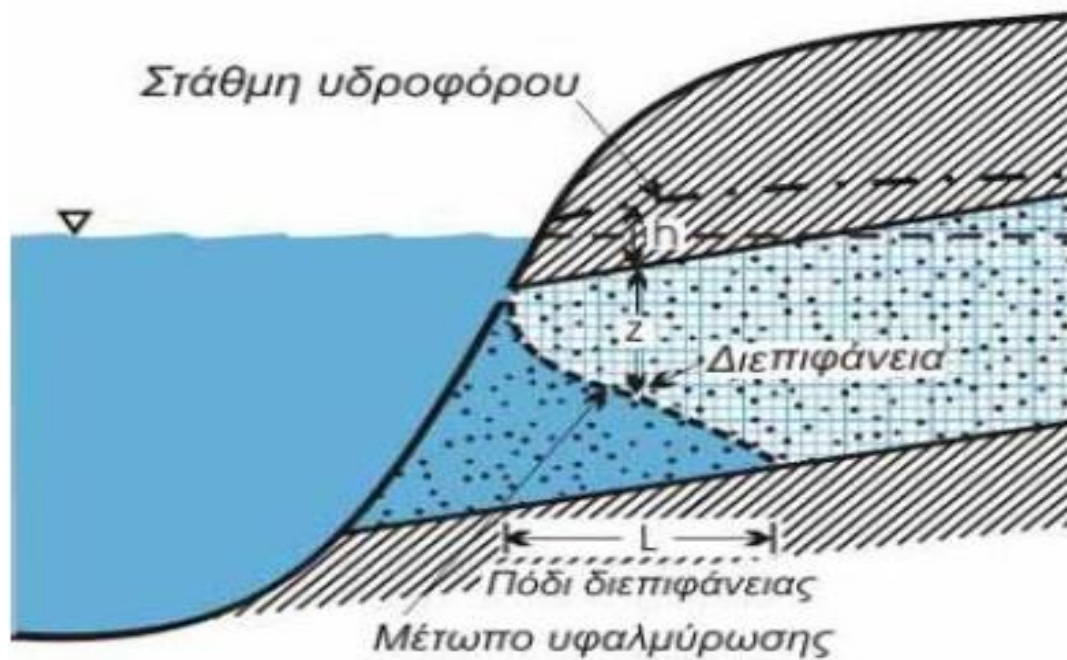
Συνεπώς, στο τμήμα του υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σχηματίζεται μια ζώνη επαφής, μεταξύ του ελαφρύτερου γλυκού νερού του υδροφορέα και του υποκείμενου βαρύτερου αλμυρού νερού, μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους που είναι γνωστή με τον όρο «διεπιφάνεια» (εικόνα 2.2 και 2.3). Ο όγκος του αλμυρού νερού κάτω από το γλυκό λόγω της χαρακτηριστικής του μορφής ονομάζεται «σφήνα», [1]. Το φαινόμενο αυτό που είναι ιδιαίτερα έντονο σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες, προκαλεί σημαντικό πρόβλημα στην ποιότητα του υπόγειου νερού.



Εικόνα 2.2: Υφαλμύριση σε ελεύθερο υδροφορέα, [11].

Η ποσοτικοποίηση του προβλήματος δεν είναι εύκολη υπόθεση λόγω της έλλειψης αρκετών στοιχείων, ενώ η απομάκρυνση του υφάλμυρου νερού είναι ακόμα δυσκολότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης συνδέεται κυρίως με την πρόληψη, δηλαδή τη λήψη μέτρων και την ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων, πριν ακόμα το πρόβλημα εμφανιστεί ή επιδεινωθεί. Η λήψη όμως των απαραίτητων μέτρων συνδέεται κατά συνέπεια με πολιτικούς, νομικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες με αποτέλεσμα τα μέτρα αυτά να μη λαμβάνονται έγκαιρα.

Επομένως η προσέγγιση του φαινομένου γίνεται με μεθόδους μαθηματικής προσομοίωσης οι οποίες διευκολύνουν τη διεξαγωγή συμπερασμάτων και δίνουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς των υδροφορέων κάτω από διάφορα υποθετικά σενάρια, [3].



Εικόνα 2.3: Υφαλμύριση σε περιορισμένο υδροφόρα, [11].

2.2 Αίτια φαινομένου

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης παρατηρείται συνήθως σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού προκάλεσε την διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υπόγειους υδροφορείς.

Η υδραυλική κλίση του υπόγειου νερού έχει συνήθως κατεύθυνση προς τη θάλασσα και υπό φυσιολογικές συνθήκες οι υπόγειοι υδροφορείς αποστραγγίζονται προς τη θάλασσα. Σε περίπτωση όμως, που η στάθμη του γλυκού νερού μειωθεί, τότε μπορεί να αντιστραφεί αυτή η κατάσταση.

Η υφαλμύριση των παράκτιων υδάτων οφείλεται κυρίως σε πρωτογενείς και δευτερογενείς παράγοντες, [5]:

- Οι πρωτογενείς παράγοντες σχετίζονται με την μεταβολή του φυσικού εμπλουτισμού του υδροφορέα και συνήθως συνδέονται με την ελάττωση του ρυθμού των βροχοπτώσεων.
- Οι δευτερογενείς παράγοντες είναι αυτοί που συνδέονται με την υπερβολική άντληση.

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για υδάτινα αποθέματα είναι το κατεξοχήν αίτιο στη χώρα μας που οδηγεί στην υφαλμύριση των υπόγειων υδάτων και αυτό παρατηρείται κυρίως στις εντατικά καλλιεργούμενες παράκτιες πεδινές εκτάσεις όπου οι υπεραντλήσεις λαμβάνουν χώρα, τόσο στους ελεύθερους όσο και στους περιορισμένους (υπό πίεση) υδροφόρους ορίζοντες.

Γενικά όταν παρατηρούμε οι υδροφορείς να περιέχουν ποσότητα αλμυρού νερού, μπορεί να οφείλεται στα εξής φαινόμενα, [8]:

- Θαλασσινό νερό που διείσδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν ή που εισχώρησε μέσω ρηγμάτων.
- Αλάτι που προέρχεται από εργοστάσιο αφαλάτωσης (ιδίως σε νησιά) ή διάλυση των πετρωμάτων (πλούσια σε άλατα) που φιλοξενούν το υπόγειο νερό.
- Νερό υφάλμυρο που προέρχεται από απόβλητα βιομηχανιών και ορυχείων ή που έχει χρησιμοποιηθεί για έκπλυση δρόμου.
- Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης όπως αλάτι που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου.
- Παγίδευση του θαλασσινού νερού από παλαιότερες γεωλογικές εποχές στα πετρώματα.
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ή καθοδικές κινήσεις της ξηράς.

2.3 Επιπτώσεις υφαλμύρισης

Παρόλο που το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του πλανήτη καλύπτεται από νερό η διατήρηση της ζωής και κάθε έμβιου οργανισμού επάνω στη Γη οφείλεται αποκλειστικά στα αποθέματα του γλυκού νερού τα οποία αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του υδατικού συνόλου.

Το θαλασσινό νερό θεωρείται ως πηγή ρύπανσης για το γλυκό νερό όταν έρχεται σε επαφή με αυτό αφού η ανάμειξη των δυο, καθιστά το υφάλμυρο νερό ακατάλληλο για κάθε χρήση. Γι' αυτό το λόγο η υφαλμύριση ενός υδροφορέα γλυκού νερού σημαίνει και την απώλεια αυτού του υδροφορέα ως πηγή νερού, [4].

Η άντληση του υπόγειου νερού σε παράκτιες περιοχές μετακινεί τη διεπιφάνεια που σχηματίζεται ανάμεσα στο υπόγειο γλυκό νερό και το νερό της θάλασσας. Το υπόγειο μέτωπο του θαλασσινού νερού προωθείται προς την ξηρά και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό ή ακόμη και θαλασσινό νερό.

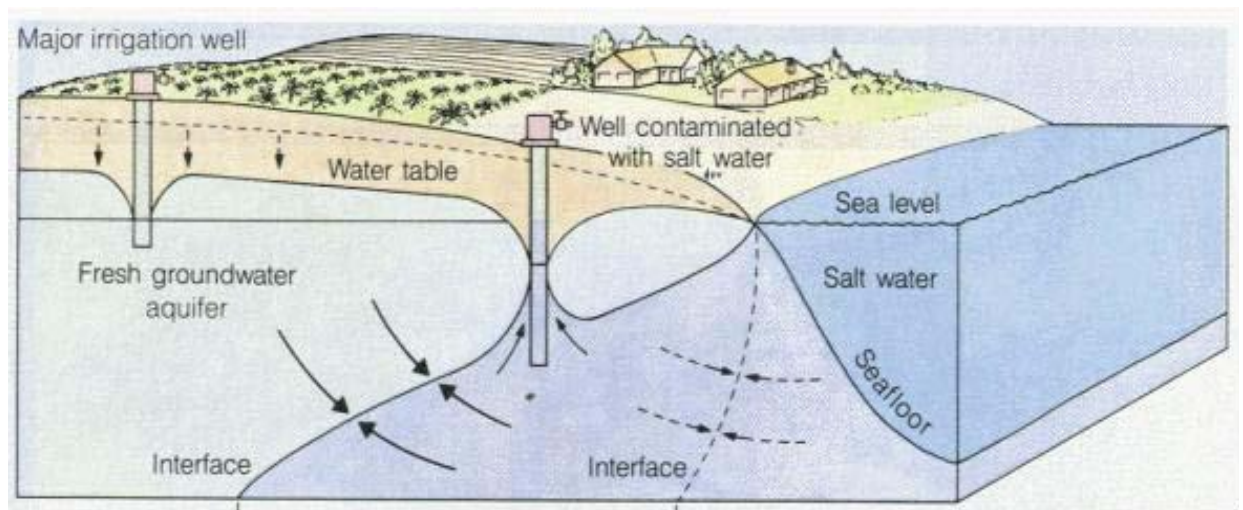
Η υφαλμύριση έχει αρνητικές επιπτώσεις στις περιοχές στις οποίες εμφανίζεται. Η ρύπανση τα καθιστά τα ύδατα ακατάλληλα για κάθε χρήση από τον άνθρωπο με συνέπειες τόσο κοινωνικές όσο και οικονομικές.

Η έλλειψη γλυκού νερού οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω των δαπανηρών λύσεων (εμφιαλωμένο νερό, έργα υδροδότησης κ.α.) ή οδηγεί στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Συνεπώς ο τουρισμός, η γεωργία και η βιομηχανία πλήττονται άμεσα, αφού η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων και καταστρέφει τις καλλιέργειες αχρηστεύοντας τα χωράφια, ενώ διαβρώνει τους σωλήνες και τους λέβητες σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής τους, την αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, τη μείωση της παροχτευτικής ικανότητας των αγωγών, την αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας του νερού, [4].

Οπότε η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών αναγκάζει τους καλλιεργητές είτε να αντισταθμίζουν ποσοτικά την ποιοτική υποβάθμιση του νερού χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό, είτε να χρησιμοποιούν δραστικότερα λιπάσματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική μείωση των κερδών.

Συνεπώς, η εξέλιξη αυτή μπορεί να οδηγήσει τους κατοίκους να επιλέξουν για την απασχόληση τους την τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους. Η καλλιεργούμενη γη ολοένα συρρικνώνεται και επικρατεί ο εποχικός χαρακτήρας απασχόλησης.

Σημαντικό επίσης είναι ότι η υπαλμύριση μπορεί να προκαλέσει την εξάντληση ενός υδροφορέα από ένα κάτοχο γεώτρησης. Το γεγονός αυτό είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει τις γειτονικές αβαθέστερες γεωτρήσεις σε αστοχία, δημιουργώντας ουσιαστικά και νομικά προβλήματα εκτός από τη μείωση της εκροής του υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα προκαλώντας δυσμενείς συνέπειες στα παράκτια οικοσυστήματα.



Εικόνα 2.4: Επιπτώσεις ανεξέλεγκτης άντλησης, [12].

Επομένως όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσκολεύοντας τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Αυτή την αργή κίνηση του υπόγειου νερού αυξάνει επίσης το χρόνο αποκατάστασης του υδροφορέα. Ακόμα και στην περίπτωση που σταματήσουν όλες οι γεωτρήσεις άντλησης σε μια περιοχή, η πιθανότητα να οπισθοχωρήσει η σφήνα της υφαλμύρισης είναι σχεδόν ανύπαρκτη.

2.4 Η υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα

Σύμφωνα με την 'Διεύθυνση Υδρογεωλογίας του τομέα υδατικών πόρων και περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών' (ΙΓΜΕ) παρουσιάζεται παρακάτω η κατάσταση των αποθεμάτων και η εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας, [14].

2.4.1 Πελοπόννησος

Αυξητικές τάσεις παρατηρούνται στο πηγαίο δυναμικό της κεντρικής Πελοποννήσου όπως και σε τουριστικές ζώνες. Η αντιμετώπιση των προβλημάτων μπορεί να υπάρξει με μεταφορά νερού από την κεντρική Πελοπόννησο.

Τα προβλήματα της υφαλμύρισης εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές έντονης γεωργικής εκμετάλλευσης:

- Αργολικό πεδίο, Δ. Μεσσηνία (ανεπάρκεια νερού, νιτρορύπανση, υφαλμύριση).
- Ηλεία, ΒΔ Αχαΐα (νιτρορύπανση, παρουσία σιδήρου, μαγγανίου).

2.4.2 Στερεά Ελλάδα

Στη δυτική Στερεά Ελλάδα το υπόγειο υδάτινο δυναμικό δεν παρουσιάζει μεγάλη αυξητική τάση, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις του ετήσιου ύψους βροχής. Η ποιότητα των νερών είναι γενικά ικανοποιητική και τα προβλήματα σε νερό περιορισμένα (ύδρευση Αμφιλοχίας, Μενιδίου κ.ά.).

Στην ανατολική Στερεά Ελλάδα παρατηρείται σημαντική αύξηση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού με παράλληλη ελαφρά βελτίωση της ποιοτικής του κατάστασης στις περιοχές αγροτικής εκμετάλλευσης (λεκάνη Σπερχειού, λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού).

Τα προβλήματα είναι γνωστά και εντοπίζονται κυρίως:

- Λεκάνη Μαραθώνα (νιτρορύπανση, υφαλμύριση)
- Θριάσιο Πεδίο (νιτρορύπανση, βιομηχανικές ρυπάνσεις).

2.4.3 Θεσσαλία

Επίσης αυξητικές είναι γενικά οι τάσεις των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων, με πολύ εμφανείς επανακάμψεις της στάθμης των υδροφόρων, που σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν και τα 30 μέτρα.

Τα προβλήματα είναι κυρίως ποιοτικά, με κατά τόπους εξάρσεις της νιτρορύπανσης, χωρίς πάντως να λείπουν και τα ποσοτικά, τα οποία είναι τοπικής κυρίως φύσεως.

Τα υδρευτικά προβλήματα δεν είναι τόσο έντονα και μπορούν να επιλυθούν με τεχνητά μέσα (μεταφορά νερού, ταμιευτήρες κ.ά.).

2.4.4 Ήπειρος

Το γεωγραφικό διαμέρισμα της Ηπείρου είναι το πλέον πλούσιο σε υπόγεια νερά και παρουσιάζει μόνιμο πλεονασματικό δυναμικό. Ωστόσο υπάρχουν ποιοτικά προβλήματα που εντοπίζονται στους καρστικούς υδροφόρους, οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις θειικών αλάτων. Το πρόβλημα νιτρορύπανσης που εμφανίζεται στη λεκάνη της Άρτας και η μόλυνση της λίμνης Παμβώτιδας στα Ιωάννινα από αστικά και γεωργικά απόβλητα, επιβαρύνει τους παρακείμενους υδροφόρους.

2.4.5 Ιόνια Νησιά

Έντονα είναι τα προβλήματα ύδρευσης των Ιόνιων νησιών λόγω της υφαλμύρινσης των υδροφόρων, αλλά και λόγω των θειικών αλάτων που πολλοί απ' αυτούς περιέχουν (Ν. Κέρκυρα).

Η αντιμετώπιση των προβλημάτων μπορεί να επιτευχθεί με ορθολογική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών και με συνεκμετάλλευσή των επιφανειακών με φράγματα και λιμνοδεξαμενές.

2.4.6 Μακεδονία - Θράκη

Προβλήματα ποσοτικής επάρκειας υπάρχουν πολλά, αλλά σχετίζονται κυρίως με το κόστος μεταφοράς νερού από περιοχή σε περιοχή. Τα ποιοτικά προβλήματα σχετίζονται κυρίως με νιτρορυπάνσεις, κυρίως στην πεδιάδα της Θεσσαλονίκης και στις περιοχές των λιμνών Κορώνειας και Κερκίνης και φαινόμενα υφαλμύρινσεων όπως στο δέλτα του ποταμού Νέστου και Έβρου.

Τοπικού χαρακτήρα επιβαρύνσεις σε βαρέα τοξικά μέταλλα παρατηρούνται σε περιοχές των Νομών Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής και οφείλονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε γεωθερμικά πεδία αλλά και σε μεταλλοφορία.

Στον ευρύτερο αυτό χώρο πάντως δεν παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις του υπόγειο υδατικού δυναμικού λόγω των σχετικά σταθερών ετήσιων βροχοπτώσεων που δέχεται ο χώρος αυτός.

2.4.7 Νησιά Αιγαίου

Στα νησιά του Αιγαίου, και ιδιαίτερα του νοτίου, παρατηρούνται αξιόλογες αυξητικές τάσεις του υπόγειου υδατικού δυναμικού, με συνέπεια τα προβλήματα ύδρευσης να μην επιτείνονται το καλοκαίρι όσο σε προγενέστερες περιόδους.

Για τα μεγαλύτερα νησιά, ως λύση των υδρευτικών τους κυρίως προβλημάτων μπορεί να είναι η συνεκμετάλλευση επιφανειακών και υπόγειων νερών, ενώ σε ορισμένα μικρά και υψηλής τουριστικής κίνησης νησιά, η λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης κατά τη θερινή, κυρίως, περίοδο.

2.4.8 Κρήτη

Μεγάλη είναι η αύξηση των πηγαίων εκφορτίσεων της Κρήτης, καθώς και η επανατροφοδότηση των υπόγειων υδροφόρων.

Η ποιοτική κατάσταση των υπόγειων νερών παραμένει γενικά σε ικανοποιητικά επίπεδα και μόνο στις παράκτιες ζώνες παρατηρούνται προβλήματα υφαλμύρισης, αλλά με ελαφρά τάση βελτίωσης, αφού η σημαντική αναπλήρωση του υπόγειου υδάτινου δυναμικού ενισχύει τους μηχανισμούς ποιοτικής τους προστασίας. Επίσης συχνά απαντούν επιβαρύνσεις σε θειικά άλατα των καρστικών υδροφόρων προερχόμενες από εμφανίσεις γυψών.

Η ικανοποίηση υδρευτικών (τουριστικών) αναγκών αποτελεί το κυριότερο πρόβλημα στην Κρήτη, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, αλλά και με την αξιοποίηση των επιφανειακών του νερών, όπως π.χ. φράγμα Αποσελέμη.

2.5 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό είναι μια ζώνη και όχι μια απλή επιφάνεια. Την επαφή αυτή μελέτησαν πρώτοι ο Ολλανδός Ghyben και ο Γερμανός Herzberg στις αρχές του 20ου αιώνα.

Η εξίσωση των Ghyben-Herzberg βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία μεταξύ μη αναμειγνυόμενων υγρών, διαφορετικής πυκνότητας (που σχηματίζουν περισσότερες από μία φάση, όταν βρεθούν σε επαφή), και συσχετίζει το δυναμικό του γλυκού νερού (h), πάνω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας, με το βάθος της διεπιφάνειας (z) (Εικόνα 2.5).

Έτσι διατυπώνεται η σχέση:

$$z = \alpha h$$

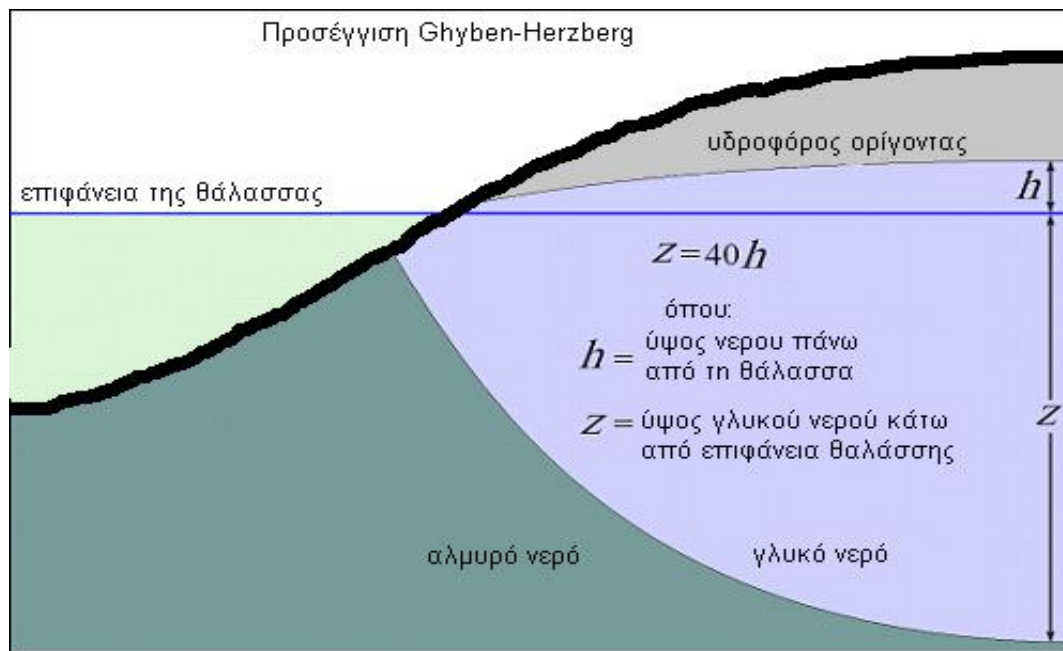
όπου:

$\alpha = \gamma_f / (\gamma_s - \gamma_f)$ είναι συνάρτηση της διαφοράς του ειδικού βάρους μεταξύ γλυκού νερού (γ_f) και αλμυρού νερού (γ_s).

Οι συνηθισμένες τιμές για τις πυκνότητες των δυο μέσων είναι 1,025 για το θαλάσσιο νερό και 1,000 για το γλυκό, [1].

Επομένως προκύπτει ότι : **$z = 40h$** .

Η φυσική σημασία της εξίσωσης Ghyben-Herzberg είναι πως το γλυκό νερό επιπλέει επάνω στο θαλασσινό με συγκεκριμένο βάθος. Εάν είναι γνωστό το ύψος h της στάθμης του υδροφόρου στρώματος σε κάποιο σημείο μπορεί εύκολα να υπολογισθεί το βάθος z του γλυκού νερού στο σημείο αυτό, καθώς θα είναι 25 με 40 φορές μεγαλύτερο από το h , [7], [9].

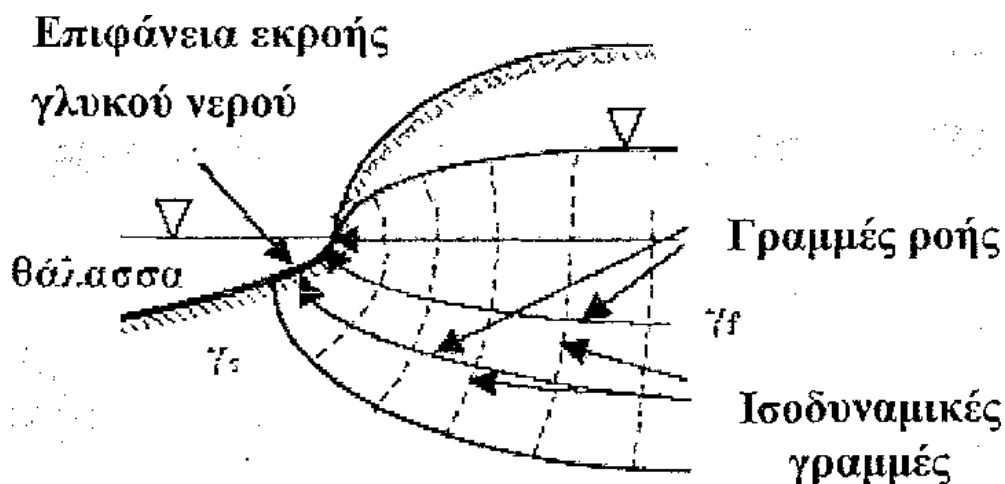


Εικόνα 2.5: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg, [13].

2.5.1 Απόκλιση

Παρόλο που η παραπάνω θεωρία των Ghyben-Herzberg, δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής γρήγορων και αρκετά αξιόπιστων αποτελεσμάτων, δεν αποτελεί παρά μία απλουστευμένη προσέγγιση. Μία ακριβέστερη θεώρηση θα απαιτούσε να ληφθεί υπ' όψη η δυναμική κίνηση της υπόγειας ροής όπως επίσης και η μεταφορά μάζας του άλατος. Ακόμη η προσέγγιση αυτή παραβλέπει τη συνεισφορά της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, κυρίως στην επιφάνεια διαστάλαξης του γλυκού νερού προς τη μεριά της θάλασσας, [6].

Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας διαφέρει σημαντικά από την προσέγγιση Ghyben - Herzberg. Οι παραδοχές που γίνονται δηλαδή ότι η αλάτινη σφήνα είναι ακίνητη και η ροή είναι οριζόντια δεν ισχύουν, καθώς η διεπιφάνεια αλμυρού - γλυκού νερού κινείται προς την ξηρά. Ακόμη, η προσέγγιση Ghyben - Herzberg δεν υπολογίζει την επιφάνεια μέσω της οποίας λαμβάνει χώρα η εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα και στην περίπτωση ελεύθερων υδροφορέων δε μπορεί να υπολογίσει την επιφάνεια διήθησης.



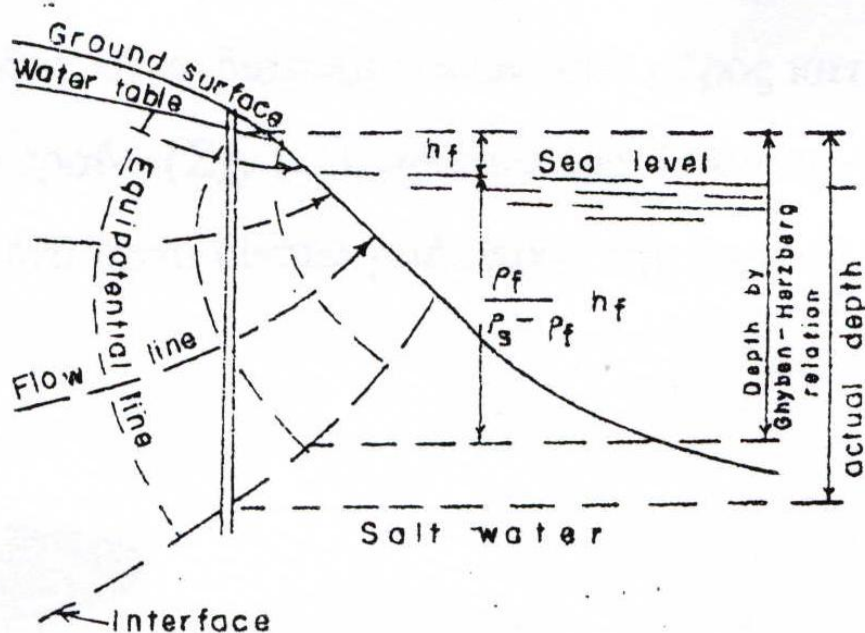
Εικόνα 2.6: Πραγματική εικόνα διεπιφάνειας, [3].

Στην προσπάθεια επίλυσης του φαινομένου μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης αναλυτικές και αριθμητικές λύσεις για τα φαινόμενα μεταφοράς και διασποράς, [7]. Τέλος μπορούν να υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες όντως η μεταβατική ζώνη είναι πολύ στενή και έτσι θα ήταν δυνατή η χρήση του πιο απλουστευμένου μοντέλου της απότομης διεπιφάνειας.

Εάν ληφθεί υπόψη μόνο η πυκνότητα, χωρίς να υπάρχει ροή, το αποτέλεσμα θα ήταν η ανάπτυξη μιας οριζόντιας διεπιφάνειας με το γλυκό νερό να βρίσκεται πάνω από το αλμυρό. Στην περίπτωση ωστόσο που η ροή είναι σχεδόν οριζόντια, η σχέση Ghyben-Herzberg παρέχει αρκετά αποδεκτά αποτελέσματα. Εντούτοις σημαντικά λάθη μπορεί να προκύψουν κοντά σε ακτογραμμές όπου υπεισέρχονται οι συνισταμένες της κάθετης ροής.

Το βάθος της διεπιφάνειας είναι μικρότερο από εκείνο της σχέσης Ghyben-Herzberg αν η ροή στο στρώμα του γλυκού νερού έχει μία προς τα κάτω συνιστώσα, όπως στην περίπτωση της τροφοδοσίας (recharge) ενώ είναι μεγαλύτερο σε παράκτιες περιπτώσεις αποφόρτισης νερού στη θάλασσα με κίνηση προς τα άνω. Στην εικόνα 2.7 φαίνεται καθαρά η απόκλιση της θεωρίας από την πράξη.

Το πιο πάνω επιχείρημα ταιριάζει σε έναν απεριόριστο, παράκτιο υδροφορέα αλλά μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση ενός περιορισμένου υδροφορέα σε παρόμοια τοποθεσία με την αντικατάσταση της πιεζομετρικής επιφάνειας με τον υδροφόρο ορίζοντα. Η σχέση Ghyben-Herzberg απαιτεί και στις δύο περιπτώσεις, ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες ισορροπίας γλυκού/αλμυρού νερού, την κατάλληλη επιφάνεια (είτε τον υδροφόρο ορίζοντα είτε την πιεζομετρική επιφάνεια) να είναι πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και επίσης να κλίνουν προς τον ωκεανό.



Εικόνα 2.7: Απόκλιση της πραγματικής θέσης της διεπιφάνειας σε σχέση με το πρότυπο Ghyben-Herzberg, [3].

2.5.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

Ο Μ.Κ. Hubbert (1940) πραγματεύτηκε την θεωρία της κίνησης του υπογείου ύδατος και από αυτή τη βάση οι Ν.Ι. Luszczynski και W.V. Swarzenski παρήγαγαν την σχέση Ghyben-Herzberg για να καλύψουν περιπτώσεις όπου το υποκείμενο αλμυρό νερό βρίσκεται σε κίνηση με ύψη είτε πάνω είτε κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Το αποτέλεσμα ήταν η ανάπτυξη της ακόλουθης σχέσης για συνθήκες μη ισορροπίας:

$$z = \frac{p_f}{p_s - p_f} h_f - \frac{p_f}{p_s - p_f} h_s \quad (1)$$

όπου το h_f είναι το υψόμετρο του επιπέδου του νερού σε ένα καλά γεμισμένο πηγάδι με γλυκό νερό πυκνότητας ρ_f το οποίο τερματίζεται σε ένα βάθος z και h_s είναι το υψόμετρο του επιπέδου του νερού σε ένα καλά γεμισμένο πηγάδι με αλμυρό νερό πυκνότητας ρ_s το οποίο επίσης τερματίζεται στο βάθος z .

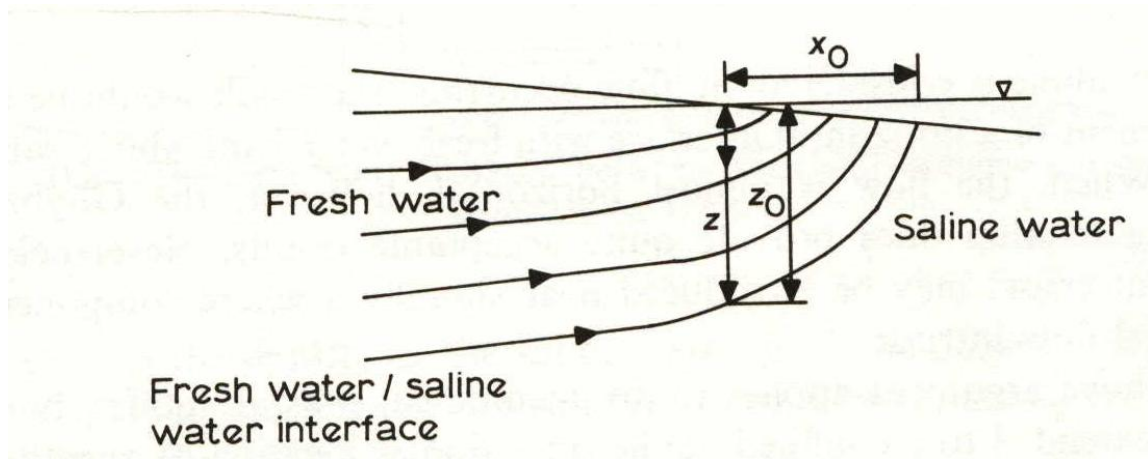
Όταν το $h_s=0$, τότε το αλμυρό νερό βρίσκεται σε ισορροπία με τη θάλασσα και ισχύει :

$$z = \frac{p_f}{p_s - p_f} h_f \quad (2)$$

Περισσότερο ακριβείς επιλύσεις για το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού/αλμυρού νερού έχουν προταθεί και μία από αυτές αποτελεί η εξίσωση (3) που ακολουθεί :

$$z^2 = \frac{2qx}{\Delta p K} + \left(\frac{q}{\Delta p K} \right)^2 \quad (3)$$

Στην εξίσωση (3) το z και x παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 2.8, όπου το Δp προκύπτει ως αποτέλεσμα $(\rho_s - \rho_f)$, το K συμβολίζει την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και το q είναι η ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους της ακτογραμμής.



Εικόνα 2.8: Το σχέδιο ροής που αναπτύσσεται από γλυκό νερό σε έναν απεριόριστο παράκτιο υδροφόρα, [3].

Το αντίστοιχο σχήμα του υδροφόρου ορίζοντα είναι :

$$h_f = \left(\frac{2\Delta p q x}{K} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Το πλάτος x_0 της υποθαλάσσιας ζώνης διαμέσου της οποίας το γλυκό νερό απορρέει στην θάλασσα μπορεί να εξαχθεί για $z=0$ δίνοντας:

$$x_0 = -\frac{q}{2\Delta p K} \quad (5)$$

Το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από την ακτογραμμή z_0 προκύπτει όταν $x=0$ και κατά συνέπεια :

$$z_0 = \frac{q}{\Delta p K} \quad (6)$$

Για την αποδοτικότερη απεικόνιση του μετώπου της υφαλμύρισης θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Modflow σε συνδυασμό με το Seawat των οποίων τα αποτελέσματα θα βαθμονομηθούν σύμφωνα με τη σχέση Ghyben-Herzberg.

Βιβλιογραφία

- [1] Καλλέργης Γ.Α. (1986) “Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία”, Έκδοση ΤΕΕ.
- [2] Λατινόπουλος Π.Δ. (2004) “Προστασία και εξυγίανση των υπόγειων νερών”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Α.Π.Θ.
- [3] Νάνου – Γιάνναρου Α. 2001, Συμπόσιο “Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη Ανάπτυξη”, Πάρος 6-7 Ιουλίου 2001
- [4] Τριχάκης Ιωάννης 2004, “Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ. ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης”.
- [5] Μαριολάκος Η. 1998, Γεωοικολογική Αντιμετώπιση της Υφαλμύρισης των Υπόγειων Υδροφορέων, Ημερίδα “Υφαλμύριση Υπόγειων Υδάτων” Αθήνα.
- [6] Βουδούρης Κ. 2003, “Υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων από διείσδυση θαλασσινού νερού”, Θεσσαλονίκη.
- [7] Λατινόπουλος Π. 2007, “Προστασία και εξυγίανση των υπογείων νερών”. Σημειώσεις Π.Μ.Σ. Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Θεσσαλονίκη.
- [8] Bowen R. 1986, “Groundwater”, Elsevier Applied Science Publishers Ltd. Διεύθυνση Υδρογεωλογίας του τομέα υδατικών πόρων και περιβάλλοντος του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ)
- [9] Σούλιος Γ. 2004, “Γενική Υδρογεωλογία” Τρίτος τόμος, Θεσσαλονίκη.
- [10] <http://ga.water.usgs.gov/edu/graphics/watercyclegreekhgh.jpg>
- [11] <http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>
- [12] http://hays.outcrop.org/images/keller3e/12_13ab.jpg
- [13] <http://www.solinst.com/Res/papers/101C4Salt.htm>
- [14] http://archive.enet.gr/online/online_obj?pid=90&tp=T&id=33712168

3. Κώδικες μαθηματικής προσομοίωσης της ροής

Για την απεικόνιση του μετώπου της υφαλμύρισης στην περιοχή μελέτης έγινε χρήση του προγράμματος Visual-Modflow σε συνεργασία με τον κώδικα προσομοίωσης Seawat. Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να δειχθεί ο τρόπος χρήσης του προγράμματος και να μελετηθεί, στο μέτρο του δυνατού, και ο τρόπος λειτουργίας τους.

3.1 Μοντέλα

Μαθηματικό μοντέλο κατά την ευρεία έννοια είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηρίστηκα ενός φυσικού συστήματος με μαθηματική μορφή.

Σε γενικές γραμμές περιγράφεται από μια συναρτησιακή σχέση της μορφής:

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

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

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

Τα μαθηματικά ομοιώματα αποτελούν ένα δυναμικό, αξιόπιστο και διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο που παρέχει σημαντική βοήθεια στην υδρογεωλογική μελέτη και κύρια στη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής, [1].

3.2 Μαθηματική προσομοίωση ροής υπογείων υδάτων

Στην περίπτωση των υπόγειων νερών, το μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την λειτουργία του φυσικού συστήματος δηλαδή του υδροφόρου σχηματισμού κάνοντας διάφορες παραδοχές κατά την επίλυση του.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των υπολογιστικών μοντέλων έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον όχι μόνο των επιστημόνων αλλά και πολλών υπηρεσιών και φορέων που ασχολούνται με θέματα διαχείρισης φυσικών πόρων. Αυτά τα μοντέλα των υπόγειων νερών συνήθως εφαρμόζονται στα πλαίσια λήψης αποφάσεων στη διαχείριση των 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).

Τα μοντέλα παρέχουν τη δυνατότητα γρήγορης, ακριβούς, ευέλικτης αναπαράστασης και μελέτης ενός φυσικού συστήματος και συμβάλλουν στη διερεύνηση και μελέτη προβλημάτων, 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 στον ορθολογικότερο σχεδιασμό συλλογής τους.

Η θεωρία της κίνησης του νερού στα πορώδη μέσα βασίζεται στον νόμο του Darcy που διατυπώθηκε το 1856 ύστερα από σχετικά πειράματα. Η ροή του υπογείου νερού σε υδροφόρους σχηματισμούς περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατηρήσεις τη μάζας και ποικίλουν ανάλογα με το είδος του υδροφόρου και τις συνθήκες ροής, [3].

Για την επίλυση των εξισώσεων των μαθηματικών μοντέλων που είναι οι διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται οι αριθμητικές μέθοδοι, γι' αυτό στην βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος αριθμητικό μοντέλο αντί της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του αντιστοίχου μαθηματικού μοντέλου.

Με το αριθμητικό μοντέλο ταυτόχρονα εισάγονται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών επιπλέον από αυτών που εισήχθησαν στο μαθηματικό.

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

3.3 Οι αριθμητικές μέθοδοι

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

α. *Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)*. Στην μέθοδο αυτή η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται επάνω στα κόμβους του πλέγματος που μπορεί να είναι στο κέντρο κάθε κελιού ή στις κορυφές. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στα προβλήματα δυο ή τριών διαστάσεων. Γενικά όμως θεωρείται η καλύτερη λόγω της δέσμευσης που θέλει τον κάνναβο να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και της δυσκολίας, σε ορισμένες περιπτώσεις, στην ακριβή μαθηματική διακριτοποίηση των εξισώσεων. Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη.

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

Συγκρίνοντας τις δυο παραπάνω μεθόδους οι πεπερασμένες διαφορές προγραμματίζονται ευκολότερα. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή ενός καννάβου πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερα δεδομένα.

Τα πεπερασμένα στοιχεία σε αντίθεση με τις πεπερασμένες διαφορές, προσεγγίζουν καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, όπως ρήγματα, ενώ ακόμη μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού.

Μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί.

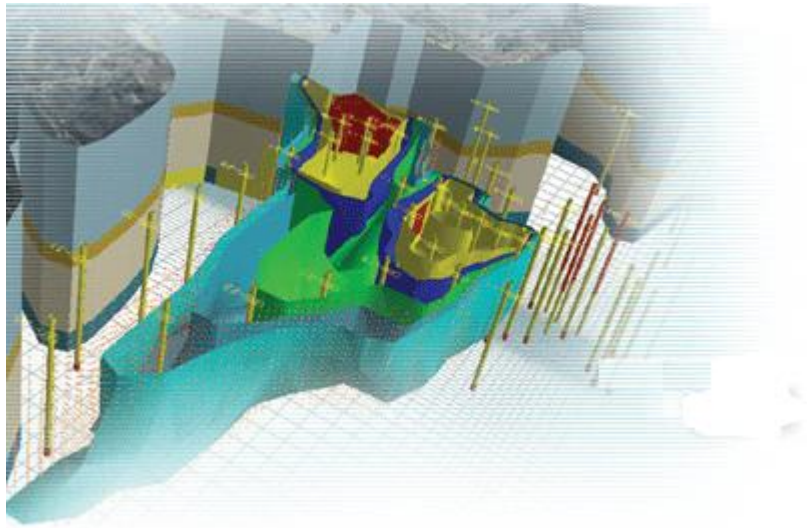
Αντίθετα στα πεπερασμένα στοιχεία το υδραυλικό φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation functions).

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

Με την μέθοδο αυτή εξετάζεται η ελεύθερη επιφάνεια ενός υδροφόρου στην περίπτωση της μόνιμης ροής. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται ως δισδιάστατο γίνεται η παραδοχή ότι σε κάθε σημείο, με τις ίδιες οριζοντογραφικές συντεταγμένες, σε όλα τα οριζόντια επίπεδα, τα υδραυλικά στοιχεία έχουν την ίδια τιμή, [2].

3.4 Το μοντέλο Modflow

3.4.1 Γενικά



Εικόνα 3.1: Προσομοίωση υπόγειας ροής μέσω προγράμματος Modflow, [5].

Για την προσομοίωση ενός εξ' ολοκλήρου πορώδους σχηματισμού απαιτείται η επιλογή ενός κώδικα προσομοίωσης που να βασίζεται όπως είναι φυσικό στο νόμο του Darcy. Ο πιο γνωστός κώδικας προσομοίωσης που βασίζεται στον νόμο Darcy και έχει εφαρμοστεί σε πολυάριθμες μελέτες προβλημάτων ροής υπογείων νερών τόσο στον διεθνή όσο και στον Ελλαδικό χώρο είναι ο κώδικας MODFLOW, [1].

Σε ορισμένες περιπτώσεις έχει επιχειρηθεί η εφαρμογή του κώδικα σε κερματισμένους (fractured aquifers) και καρστικούς (karst aquifers) υδροφόρους που η συμπεριφορά τους αποκλίνει σημαντικά από τον νόμο του Darcy, με την παραδοχή ότι ο καρστικός αποτελεί ένα ισοδύναμο πορώδες μέσο (EPM, Equivalent Porous Medium) και η εφαρμογή του οποίου υπήρξε επιτυχής, [4].

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

3.4.2 Μαθηματικό υπόβαθρο

Το MODFLOW επιλύει αριθμητικά την διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής (εξίσωση 7) με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (FDM), σε τρεις διαστάσεις και σε συνθήκες μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής. Αυτό έχει την δυνατότητα της προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών και οριακών συνθηκών.

Οι τύποι των υδροφόρων σχηματισμών που μπορούν να προσομοιωθούν μπορεί να είναι υπό πίεση (confined), ελεύθεροι (unconfined) ή μερικώς υπό πίεση υδροφόροι. Το MODFLOW έχει ελεγχθεί για την αριθμητική του ακρίβεια έχοντας χρησιμοποιηθεί διεθνώς σε ένα ευρύ φάσμα υδραυλικών και υδρογεωλογικών εφαρμογών και τείνει να γίνει ένα από τα πλέον αποδεκτά μέσα από όλα τα διαθέσιμα ανάλογα προγράμματα.

Η εξίσωση (7) μαζί με τον προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης και των συνθηκών στα όρια του υδροφόρου συστήματος, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Με την αριθμητική μέθοδο FDM, το συνεχές χωρικό και χρονικό πεδίο μελέτης αντικαθίσταται από μια πεπερασμένη σειρά διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο και οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους που υπολογίζονται από διαφορές στις τιμές της στάθμης στα σημεία αυτά.

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

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφόρου συστήματος είναι απαραίτητη και πραγματοποιείται με την μορφή ενός δικτυού από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κυψελίδες (cells), η θέση των οποίων περιγράφεται με την μορφή γραμμών στηλών και στρωμάτων. Η στάθμη του υπόγειου νερού υπολογίζεται σε ένα σημείο της κυψελίδας που ονομάζεται κόμβος, [3].

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιεί το modflow είναι, [1]:

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

Όπου,

H το υδραυλικό φορτίο.

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού κατά μήκος των διευθύνσεων x, y, z .

W ο ρυθμός εμπλουτισμού του υδροφόρου ορίζοντα και αντιπροσωπεύει πηγές ή/και καταβόθρες.

S_s η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου.

t ο χρόνος.

3.5 Στάδια του προγράμματος

Το Visual MODFLOW είναι το πληρέστερο και πιο εύχρηστο περιβάλλον μοντελοποίησης για τις πρακτικές εφαρμογές στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις ροής και μεταφορά ρύπων σε υπόγεια νερά. Η απλή δομή των επιλογών και τα εύχρηστα γραφικά εργαλεία σας επιτρέπουν:

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

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

Το Visual MODFLOW διαιρείται σε τρεις χωριστές ενότητες, [6]:

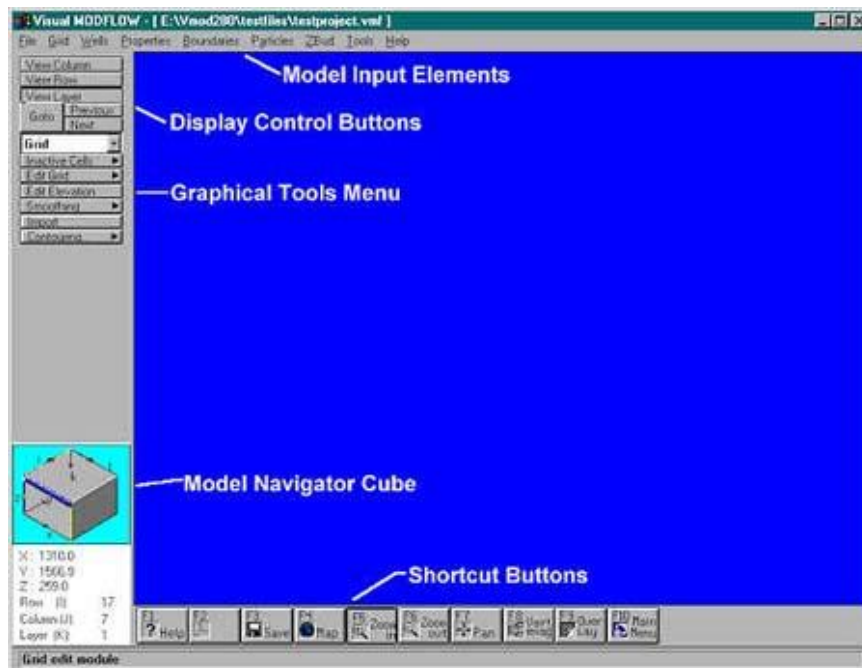
- Το τμήμα εισαγωγής.
- Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων.
- Το τμήμα αποτελεσμάτων.

Το *τμήμα εισαγωγής* επιτρέπει στο χρήστη για να ορίσει γραφικά όλες τις απαραίτητες παραμέτρους εισαγωγής για την οικοδόμηση του μοντέλου.

Το *τμήμα επεξεργασίας δεδομένων* επιτρέπει στο χρήστη να τροποποιήσει τις διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με το «τρέξιμο». Αυτές περιλαμβάνουν την επιλογή των αρχικών τιμών στάθμης, τον τρόπο επίλυσης κ.λ.π.

Το *τμήμα αποτελεσμάτων* επιτρέπει στο χρήστη να επιδείξει όλα τα αποτελέσματα του μοντέλου. Οι επιλογές παραγωγής επιτρέπουν σε σας για να επιλέξουν, να προσαρμόσουν, να επιστρώσουν τις διάφορες επιλογές επίδειξης, και τις εικόνες εξαγωγής για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων διαμόρφωσης.

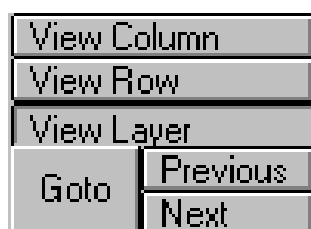
Κάθε ενότητα έχει το ίδιο βασικό σχεδιάγραμμα οθόνης (Εικόνα 3.2):



Εικόνα 3.2: Βασικό σχεδιάγραμμα οθόνης

Τα κουμπιά ελέγχου επίδειξης:

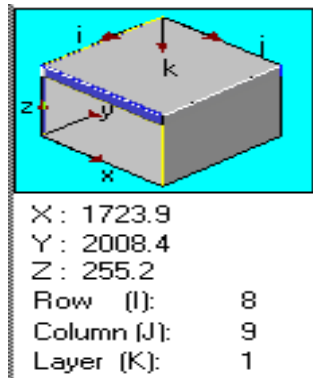
Η δυνατότητα να αλλάζει γρήγορα και εύκολα μεταξύ κάτοψης και τομής επιτρέπει στο χρήστη να κερδίσει μια καλύτερη προοπτική στις τρισδιάστατες πτυχές των παραμέτρων εισαγωγής και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης.



Εικόνα 3.3: Κουμπιά ελέγχου επίδειξης

Ο κύβος πλοήγησης:

Ο κύβος πλοηγών παρέχει μια τρισδιάστατη σχηματική αναπαράσταση του πλέγματος και των στρωμάτων. Αυτός ο κύβος πλοήγησης δίνει μια γρήγορη οπτική αναφορά της θέσης μέσα στην περιοχή.



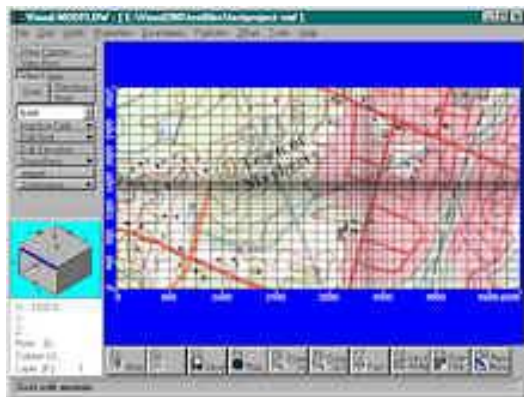
Εικόνα 3.4: Κύβος πλοήγησης

3.5.1 Το τμήμα εισαγωγής

Το εξής τμήμα περιγράφει την ακολουθία οθονών εισαγωγής δεδομένων του MODFLOW και τα εργαλείων οικοδόμησης που παρέχονται για τη δημιουργία των δεδομένων εισόδου.

Σχέδιο πλέγματος:

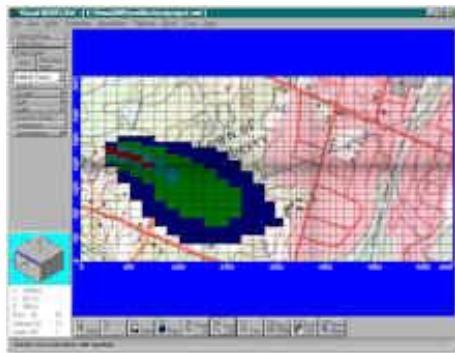
Το Visual MODFLOW επιτρέπει την περιστροφή της περιοχής που δημιουργείται πάνω από το χάρτη για να ευθυγραμμίσει το πλέγμα με τα χαρακτηριστικά της περιοχής και την κατεύθυνση ροής των υπόγειων νερών.



Εικόνα 3.5: Σχέδιο πλέγματος

2. Ιδιότητες μεταφοράς:

Εκείνες οι φυσικές και χημικές ιδιότητες που έχουν επιπτώσεις στη θέση που θα κατευθυνθεί και στον χώρο που θα καταλάβει ένας ρύπος στα υπόγεια νερά . Οι ιδιότητες μεταφορών περιλαμβάνουν τη διασπορά (D_x , D_y και D_z), την πυκνότητα, το συντελεστή διασποράς και τις αρχικές συγκεντρώσεις.



Εικόνα 3.8: Ιδιότητες μεταφοράς

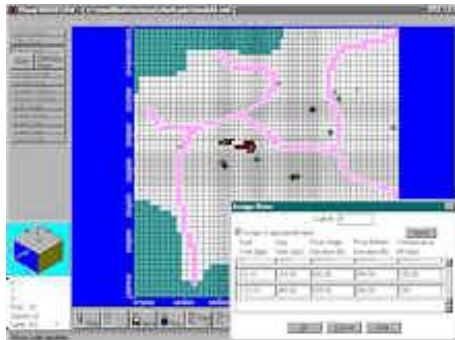
Για τη περίπτωση πολλαπλών στρωμάτων διαφορετικών τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας, είναι σημαντικό να είναι σε θέση να επιδείξει και να τροποποιήσει τις διάφορες ιδιότητες στην κάτοψη και την τομή για να υπάρξει μια σωστή προοπτική για τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής.



Εικόνα 3.9: Πολλαπλά στρώματα

Οριακές συνθήκες:

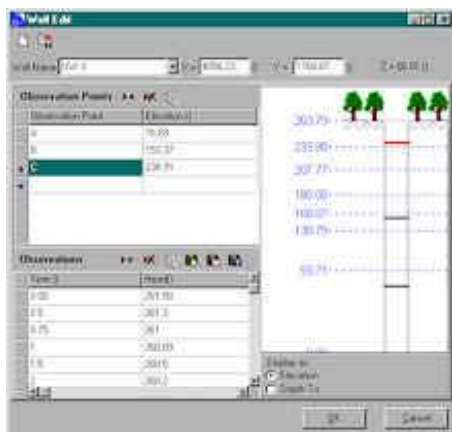
Οι οριακές συνθήκες περιλαμβάνουν και τις σταθερές συνθήκες και τις μεταβαλλόμενες αρχικές τιμές στάθμης σε ποτάμια, ρήγματα, επαναφόρτιση υδροφορέα και εξατμισοδιαπνοή.



Εικόνα 3.10: Οριακές συνθήκες

Φρεάτια παρατήρησης:

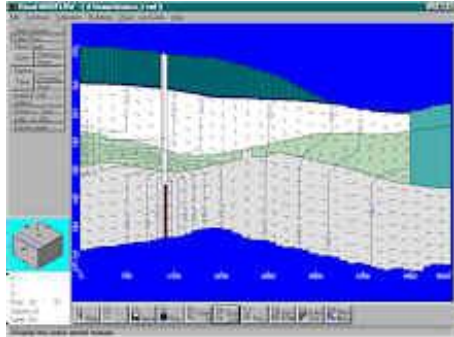
Το Visual MODFLOW επιτρέπει τον ορισμό πολλαπλής στάθμης φρεατίων παρατήρησης, ακριβώς όπως στην πραγματικότητα .



Εικόνα 3.11: Φρεάτια παρατήρησης

Διαστρωματοποίηση:

Αυτό το πακέτο επιτρέπει τη δημιουργία διαφορετικών ζωνών με διαφορετικές ροές για τις περιοχή ενδιαφέροντος.



Εικόνα 3.12: Διαστρωματοποίηση

3.5.2 Το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων

Το Visual MODFLOW επιτρέπει την προσαρμογή των διαφόρων ιδιοτήτων συμπεριλαμβανομένου:

- των αρχικών εκτιμήσεων στάθμης
- τον αριθμό χρονικών βημάτων
- τον τρόπο επίλυσης και τις ιδιότητες σύγκλισης
- των ιδιοτήτων επαναφόρτισης
- των τύπων στρώματος - ζώνης (π.χ., περιορισμένο, ελεύθερο)
- την επιλογή ανισοτροπίας

Προηγμένες ιδιότητες

Επιτρέπουν τη επιλογή ανάμεσα στο ποια αρχεία θα χρησιμοποιήσετε από το Visual MODFLOW και ποια αρχεία θα αντικαταστήσουν.

Βαθμονόμηση ενός μοντέλου Visual MODFLOW

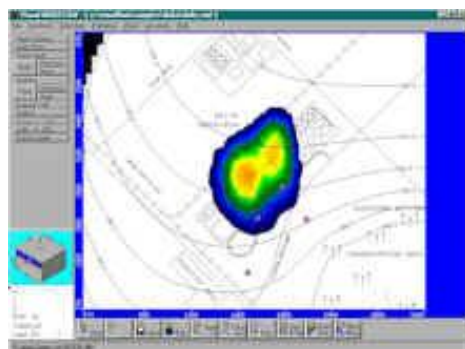
Το Visual MODFLOW έχει μια εκτενή επιλογή ενσωματωμένων τρόπων βαθμονόμησης. Όλοι οι τρόποι βαθμονόμησης είναι πλήρως μετατρέψιμοι όσον αφορά τους τρόπους απεικόνισης των αξόνων.

3.5.3 Το τμήμα αποτελεσμάτων

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

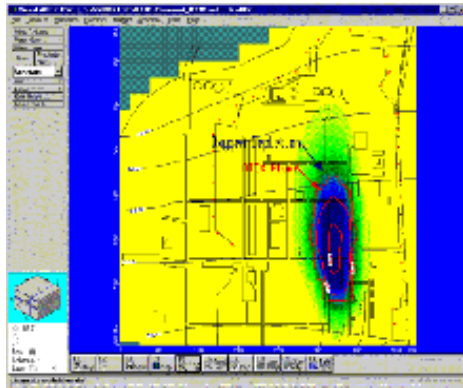
Περίγραμμα περιοχής:

Η επιλογή αυτή επιτρέπει την περιγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε κάτοψη και τομή. Οι επιλογές χάραξης περιγράμματος είναι οι ακόλουθες: Ύψος στάθμεων, ανυψώσεις υδροφόρου ορίζοντα, διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ των στρωμάτων, ροή μεταξύ των στρωμάτων, ανυψώσεις στρωμάτων (κορυφή, κατώτατο σημείο και πάχος), και επαναφόρτιση.



Εικόνα 3.13: Περίγραμμα περιοχής

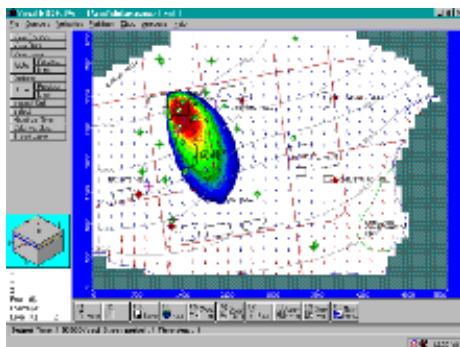
Το Visual MODFLOW προσαρμόζει τα διάφορα περιγράμματα για να είναι σε θέση να συγκρίνει διάφορες περιοχές. Η σκίαση με χρώμα είναι επίσης διαθέσιμη για παρουσίαση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.14: Σκίαση με χρώμα

Ταχύτητες:

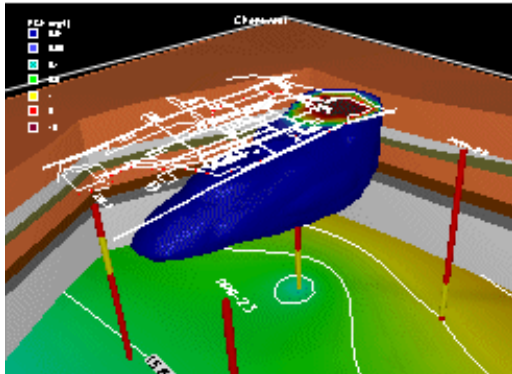
Τα διανύσματα ταχύτητας ροής παρέχουν μια σημαντική αναπαράσταση της κατεύθυνσης ροής υπόγειων νερών μέσα σε ένα στρώμα, μια σειρά ή μια στήλη. Κάθε διάνυσμα ταχύτητας έχει το κατάλληλο χρώμα που δείχνει εάν ρέει προς τα πάνω ή προς τα κάτω.



Εικόνα 3.15: Παρουσίαση ταχυτήτων

Τρισδιάστατη απεικόνιση:

Τα αρχεία προγράμματος MODFLOW μπορούν να απεικονιστούν σε τρισδιάστατο σχέδιο. Όλα οι παράμετροι εισαγωγής και τα αποτελέσματα διαμόρφωσης διαβάζονται και επιδεικνύονται χρησιμοποιώντας την σκιασμένη χάραξη περιγράμματος .



Εικόνα 3.16: Τρισδιάστατη απεικόνιση

3.6 Κώδικας προσομοίωσης Seawat

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

Η εξίσωση μεταφοράς - υδροδυναμικής διασποράς που επιλύεται αριθμητικά από τον παραπάνω κώδικα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (8)$$

Όπου,

C	είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, $[ML^{-3}]$,
t	ο χρόνος, $[T]$
x_i	η απόσταση κατά μήκος των καρτεσιανών συντεταγμένων, $[L]$
D_{ij}	ο συντελεστής της υδροδυναμικής διασποράς, $[L^2T^{-1}]$
v_i	η ταχύτητα διήθησης (<i>seepage velocity</i>), $[LT^{-1}]$
q_s	η συνιστώσα ροής (παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφόρου) που περιγράφει τις πηγές και τις καταβόθρες (<i>source/sink term</i>), $[T^{-1}]$
θ	το ενεργό πορώδες (<i>αδιάστατο</i>) και,
$\sum_{k=1}^N R_k$	ο όρος χημικών αντιδράσεων, $[ML^{-3}T^{-1}]$

Το δεξιό τμήμα της παραπάνω εξίσωσης περιλαμβάνει τέσσερις όρους που από αριστερά προς τα δεξιά περιγράφουν αντίστοιχα τους μηχανισμούς της υδροδυναμικής διασποράς, της μεταφοράς της πηγής – καταβόθρας και των χημικών αντιδράσεων. Σε ότι αφορά στην αριθμητική του επίλυση ο σχετικός κώδικας χρησιμοποιεί για τον όρο της μεταφοράς "Lagrangian" προσέγγιση (πεπερασμένες διαφορές), ενώ οι υπόλοιποι όροι προσεγγίζονται αριθμητικά με "Eulerian" μεθόδους.

3.7 Επαλήθευση - Ρύθμιση

Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα Η/Υ το οποίο περιέχει αλγόριθμους που επιλύουν το μαθηματικό μοντέλο αριθμητικά. Η εξίσωση καθώς και τα αποτελέσματα πρέπει πρώτα να επαληθευτούν. Η επαλήθευση της εξίσωσης αποδεικνύει ότι αυτή περιγράφει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την αριθμητική τους λύση με την αντίστοιχη αναλυτική, αν υπάρχει, για να αποδειχθεί έτσι ότι επιλύει ορθά τις σχετικές εξισώσεις που συνιστούν το μαθηματικό μοντέλο.

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

Στην συγκεκριμένη εργασία η ρύθμιση του μοντέλου έγινε μέσω της δοκιμής και αποτυχίας. Συνεπώς έγιναν διάφορες δοκιμές μέχρι ο πόδας της σφήνας υφαλμύρισης να βρίσκεται κάτω από την τιμή του υδραυλικού ύψους (2,5m) που ικανοποιούσε τον νόμο Ghyben-Herzberg. Συγχρόνως όμως, επειδή δεν υπάρχουν επίσημες μετρήσεις χλωριόντων για την περιοχή μελέτης, ο νόμος των Ghyben-Herzberg χρησιμοποιείται και σαν επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

Η ρύθμιση των πιεζομετρικών καμπύλων έγινε χρησιμοποιώντας σαν δεδομένο, μοντέλο προσομοίωσης ροής που αναπτύχθηκε για την περιοχή της Χερσονήσου, [7].

Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε στην περιοχή Χερσονήσου του Ηρακλείου αφού η περιοχή αποτυπώθηκε γραφικά μέσω του προγράμματος G.I.S. Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και η θέση κάθε σημείου με συντεταγμένες εισάχθηκαν σαν δεδομένα στο Modflow για την αποτύπωση της υπόγειας ροής στη συγκεκριμένη περιοχή.

Βιβλιογραφία

- [1] Mc Donald M., and Harbaugh A., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Tech. Water-Resources Inv., Bk. 6, Chap. A1, Washington, USGS.
- [2] Λεονταρίτης, Ι. 1985. Συνδυασμένη διαχείριση και επιφανειακών υδατικών πόρων αναφορά στον υδροφόρα Θεσσαλίας. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Παν/μιο Θεσσαλονίκης.
- [3] Τάντος Βασίλειος, 2006, “Περιβαλλοντική Υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου - Κορίνθου. Κατασκευή Μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής”, Διπλωματική, Πάτρα.
- [4] Παναγόπουλος, Γ. Π. 2004. Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα των υδροφόρων οριζόντων της ΝΔ Τριφυλίας. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [5] <http://www.scisoftware.com/products/title1.gif>
- [6] www.scisoftware.com
- [7] Maria P. Papadopoulou, Emmanouil A. Varouchakis, George P. Karatzas (2008) Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer.

4. Περιοχή Μελέτης

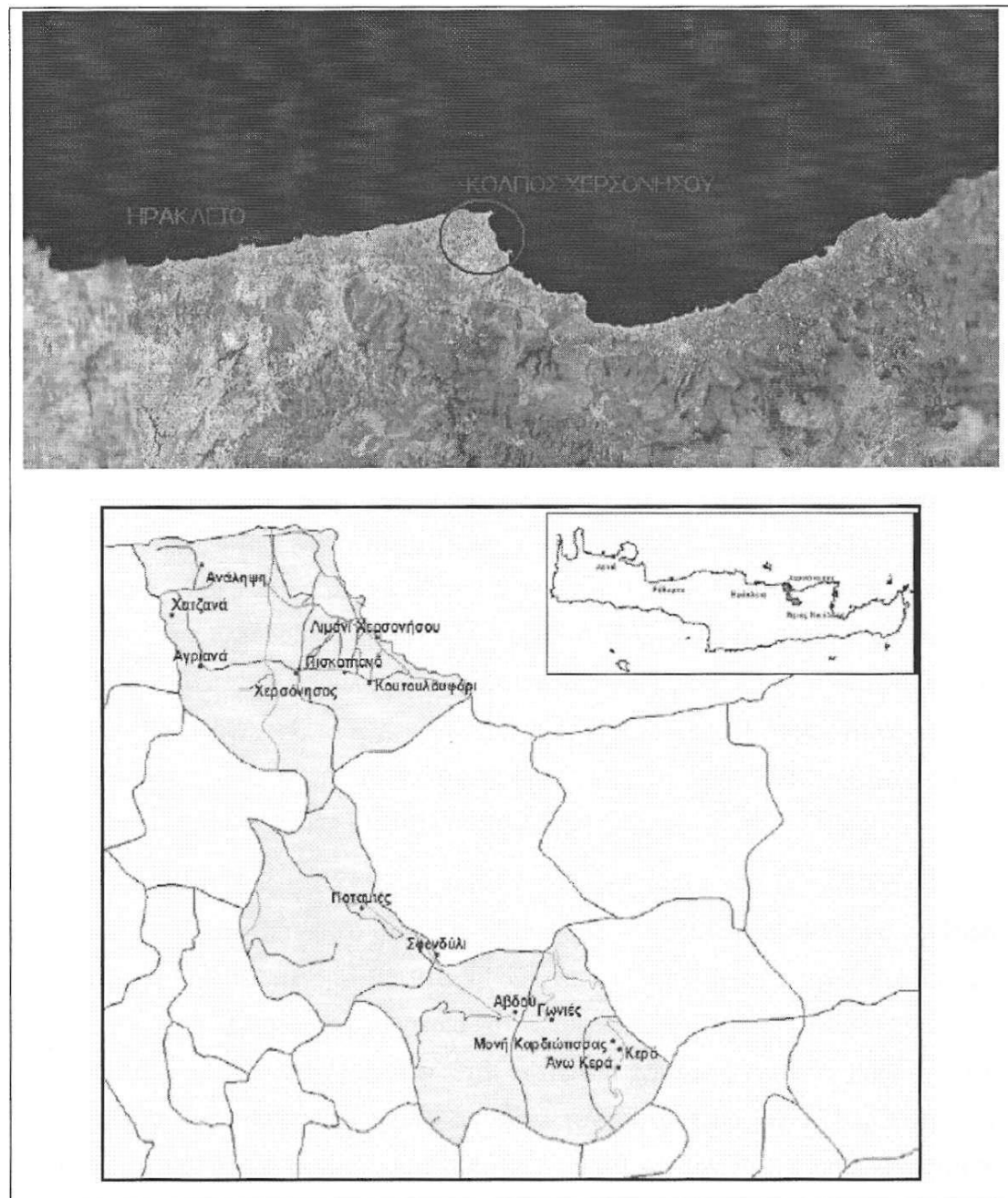
4.1 Γενικά

Ο Δήμος Χερσονήσου ανήκει στην περιφέρεια Κρήτης, στο νομό Ηρακλείου, στην επαρχία Πεδιάδας και βρίσκεται στα βορειοανατολικά του νομού. Συνορεύει με τους δήμους Γουβών στα δυτικά, Μαλίων στα ανατολικά, Καστελλίου στα νοτιοδυτικά και Οροπέδιο Λασιθίου στα νότια. Η έκταση του είναι 70.984 τετραγωνικά μέτρα και έχει πληθυσμό 8.497 κατοίκους (σύμφωνα με την απογραφή του 2001). Στα διοικητικά όρια του Δήμου περιλαμβάνονται τα δημοτικά διαμερίσματα Λιμένα Χερσονήσου, Χερσονήσου, Ποταμιών, Αβδού, Γωνιών και Κεράς. Ο Λιμένας Χερσονήσου, με 2.981 κατοίκους το 2001, σήμερα αποτελεί κωμόπολη.

Τμήμα της Χερσονήσου είναι παραθαλάσσιο (εκεί παρατηρείται η μεγαλύτερη τουριστική δραστηριότητα), ενώ τα υπόλοιπα διαμερίσματα βρίσκονται στην ενδοχώρα και η τουριστική τους ανάπτυξη είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη, με κύρια οικονομική δραστηριότητα τη γεωργία.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1960 η κύρια απασχόληση του πληθυσμού ήταν η γεωργία και η κτηνοτροφία σε ποσοστό 90-95%. Σήμερα παρατηρείται μία πλήρης αντιστροφή των δεδομένων με τη συντριπτική πλειοψηφία των κατοίκων να απασχολείται στον τριτογενή τομέα της παροχής υπηρεσιών. Η περιοχή της Χερσονήσου είναι ένας από τους πλέον δημοφιλείς και ανεπτυγμένους τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης αλλά και της χώρας. Με βάση τα στοιχεία του 1999 υπήρχαν 118 ξενοδοχεία με συνολικά 19.566 κλίνες κύριων τουριστικών καταλυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν στο 17,7 % των κλινών της Κρήτης και στο 3,3 % της Ελλάδας.

Γενικά μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα των ανεπτυγμένων τουριστικών περιοχών της Ελλάδας, αλλά και της Μεσογείου γενικότερα, [10].



Εικόνα 4.1: Ο λιμένας Χερσονήσου και η ευρύτερη περιοχή του Δήμου Χερσονήσου, [1].

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου. Περιλαμβάνει τη βιομηχανική περιοχή (ΒΙΠΕ) και τις ανατολικές συνοικίες της πόλης ενώ εκτείνεται στα νότια μέχρι τις συνοικίες Άνω Φορτέτσα – Νέα Αλάτσατα – Καλλιθέα – Πρασάς. Ανατολικά φτάνει μέχρι τον Καρτερό ποταμό και κοντά στην ακτή το όριο μεταφέρεται λίγο πιο ανατολικά περιλαμβάνοντας και τον οικισμό του Καρτερού.(Εικόνα 4.1)

4.2 Κλιματολογικά στοιχεία

Κλίμα

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

Το κλίμα της περιοχής της Χερσονήσου είναι τυπικά μεσογειακό, με περίοδο βροχών το χειμώνα από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάρτιο. Το καλοκαίρι είναι θερμό και ξηρό ενώ οι βροχοπτώσεις μπορεί να θεωρηθούν ικανοποιητικές κατά την διάρκεια του έτους. Η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή ανέρχεται στους 19°C, με σημαντικές εποχιακές διακυμάνσεις. Έτσι κατά την χειμερινή περίοδο παρατηρείται πτωτική τάση με τον Ιανουάριο να αποτελεί τον ψυχρότερο μήνα, ενώ κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμοκρασία αυξάνει αισθητό και τον Ιούλιο σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές της.

Βροχοπτώσεις

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

Ακολουθούν στοιχεία για τη θερμοκρασία της Ε.Μ.Υ. για το μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου Κρήτης.

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754											
Γεωγραφικό μήκος 25,11 / Γεωγραφικό πλάτος 35,2											
Ύψος σταθμού 38 m											
Μήνας	Ώρες ηλιοφάνειας (h)	Βαρομετρική πίεση (mm Hg)	Μέση θερμοκρασία αέρα (°C)	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°Q)	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	% Σχετική Υγρασία	Μέση Νέφωση	Βροχο-πτώση (mm)	Ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	Διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)
1	108,8	1017,1	12,2	24,8	0,2	71	5,3	90,1	67,33	35,22	3,8
2	128,4	1016	12,5	29,2	-0,5	69	5,1	67,6	82,54	40,67	4
3	170,3	1014,9	13,8	34,8	1,7	66	4,8	58,2	124,87	58,28	4
4	234,5	1013,3	16,8	36	4,4	64	3,7	28,5	161,88	62,74	3,4
5	314,3	1013,6	20,8	39	7	64	2,9	14,2	213,96	62,15	2,3
6	353,3	1012,6	24,4	45,7	8,7	59	1,4	3,5	230,23	56,20	3
7	384,7	1011	26,4	41	15	59	0,6	1,0	248,99	54,12	4
8	356,7	1011,4	26,3	40,7	14	60	0,7	0,6	221,15	51,13	4
9	285,2	1014,6	23,7	38,5	10,6	63	1,8	17,7	174,12	42,92	3,4
10	197,2	1016,7	20,3	36,2	7,9	67	3,6	64,9	114,20	44,54	3,2
11	161,5	1017,5	17,1	31,9	1,9	70	4,7	59,0	81,54	33,62	3
12	121,1	1016,8	13,9	26,7	2	70	5,1	77,9	64,60	30,79	4
Σύν.	2816								1785,43	572,39	

Πίνακας 4.2: Κλιματολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης, [9].

Ανεμολογικά στοιχεία

Από επεξεργασία των στοιχείων από το μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου για την περίοδο 1955 έως 1998 προέκυψε ότι :

- Η συχνότητα των ανέμων είναι κυρίως Βόρειοι και Βορειοδυτικοί σε ποσοστά 16,9% και 28.9% αντίστοιχα ενώ σημαντική είναι και η συχνότητα των Νότιων ανέμων σε ποσοστό 14.6%. Νηνεμία επικρατεί σε ποσοστό 17.5%.
- Η ένταση των ανέμων είναι κυρίως της τάξης 2, 3 και 4 Beaufour, με συνολικό ποσοστό εμφάνισης 64.68% ενώ τη μεγαλύτερη συχνότητα έχουν οι άνεμοι των 3 Beaufour με ποσοστό 22.3%.
- Ακραία καιρικά φαινόμενα με ανέμους της τάξης των 10 Beaufour είναι σπάνια αλλά όταν συμβαίνουν είναι νότιας και νοτιοδυτικής κυρίως διεύθυνσης.

Ανεμολογικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου Κρήτης

BEAUFOUR	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	ΣΥΝΟΛΟ
0									17.527	17.527
1	0.855	0.537	0.372	0.613	1.468	0.603	0.307	0.646		5.401
2	4.360	2.279	0.9653	2.312	5.149	1.884	1.183	3.725		21.845
3	4.941	1.435	0.603	1.183	2.695	0.865	1.490	9.082		22.294
4	4.229	0.438	0.142	0.657	2.241	0.679	1.326	10.649		20.541
5	1.665	0.142	0.033	0.351	1.589	0.449	0.362	3.571		8.162
6	0.690	0.033	0.011	0.208	0.898	0.208	0.088	1.019		3.155
7	0.164	0.011	0.011	0.066	0.274	0.055	0.022	0.142		0.745
8	0.055	0.000	0.000	0.033	0.110	0.011	0.011	0.044		0.264
9	0.011	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.011		0.044
10	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000		0.022
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
SUM	16.970	4.875	2.125	5.445	14.626	4.754	4.789	28.885	17.527	100.000

Πίνακας 4.3: Ανεμολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης, [9].

4.3 Γεωλογία – Υδρογεωλογία

Γεωλογία

Το μεγαλύτερο τμήμα της Κρήτης (3/4 της επιφάνειας περίπου) είναι ορεινό. Τα βασικά ορεινά συγκροτήματα του νησιού είναι προς τα δυτικά τα Λευκά όρη (2.454 μ.), στο κεντρικό τμήμα ο Ψηλορείτης (2.456 μ.) και προς τα ανατολικά το όρος Δίκτη (2.147 μ.) και τα όρη Σητείας (1.476 μ.). Προς τα δυτικά και νότια οι υπώρειες των ορέων είναι απότομες και φθάνουν με μεγάλη κλίση προς τη θάλασσα, ενώ προς τα βόρεια του νησιού το ανάγλυφο είναι πιο ήπιο και λοφώδες (πεδιάδες Χανίων, Ρεθύμνου και Μαλλίων). Η μεγαλύτερη πεδιάδα του νησιού βρίσκεται στο νότιο-κεντρικό τμήμα του (πεδιάδα Μεσσαράς), ενώ στο νότιο ανατολικό αναπτύσσεται η πεδιάδα της Ιεράπετρας. Υπάρχουν τέλος αρκετά οροπέδια τα κυριότερα των οποίων είναι του Λασιθίου και του Ομαλού.

Η Κρήτη αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστολίθων και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους, δολομίτες, με παρεμβολές σχιστόλιθων, ένα αλλόχθονο σύστημα αποτελούμενο από διάφορα επιμέρους καλύμματα επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς, [2].

Υδρογεωλογία

Το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνό στο δυτικό τμήμα του νησιού, ενώ στο ανατολικό δεν είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένο. Το απότομο ανάγλυφο και η συχνή εναλλαγή διαπερατών και αδιαπέραστων γεωλογικών σχηματισμών σε συνδυασμό με το μικρό εύρος του νησιού έχει ευνοήσει το σχηματισμό χειμάρρων και την εμφάνιση πηγών και όχι τον σχηματισμό μεγάλων ποταμών.

Οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί, που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή μελέτης, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Στους υδροπερατούς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι, τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμίτες του νεογενούς.
- Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν οι ψυλλίτες, χαλαζίτες και φλύσχης του προνεογούς καθώς και οι μάργες και άργιλοι του νεογενούς.

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωλογική έρευνα, καθώς εντός αυτών αναπτύσσονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Παρ' όλα αυτά όμως για τη διαμόρφωση, τη διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού νερού ιδιαίτερο ρόλο παρουσιάζουν και οι υδατοστεγείς σχηματισμοί, [2].

4.3.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Αποτελούνται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους καθώς και από ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό υδροπερατότητας όπου τελικοί αποδέκτες του νερού της κατείσδυσης είναι οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Τα πετρώματα που δομούν τους δύο κύριους ορεινούς όγκους Δίκη και Ψηλορείτη είναι τα ανθρακικά, που λόγω του μεγάλου υψομέτρου δέχονται μεγάλες ποσότητες νερού από τη βροχή και το χιόνι. Επίσης λόγω της μεγάλης περατότητας που παρουσιάζουν (μέχρι και 50.73% των ετήσιων βροχοπτώσεων) συχνά διαμορφώνονται στο εσωτερικό τους υπόγειοι υδροφορείς με πλούσια αποθέματα νερού, όπως διαφαίνεται από τις πολλές πηγές (Ζαρού, Μαλίων κ.ά.).

Επιπλέον οι υδροφορείς αυτοί τροφοδοτούν με σημαντικό ποσοστό νερού τα υπόγεια και πλευρικά υδροφόρα στρώματα των νεογενών αποθέσεων που έρχονται σε άμεση επαφή, κυρίως στις παρυφές των ορεινών όγκων. Η ποιότητα του νερού στους ανθρακικούς σχηματισμούς είναι συνήθως καλή. Προβλήματα μόνο υπάρχουν σε περίπτωση που έρχονται σε επαφή με τη θάλασσα, οπότε και αναπτύσσεται μέτωπο υφαλμύρινσης, όπως συμβαίνει στην περιοχή της Χερσονήσου. Στην περιοχή Μαλίων και Χερσονήσου μικρό πρόβλημα παρατηρείται και στο τέλος της ξηράς περιόδου, αλλά με τις πρώτες βροχές το ποσοστό σε χλώρια επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα, [2].

Νεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

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

Η διαμόρφωση των υπόγειων υδροφορέων εντός των σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από το συντελεστή κατείσδυσης, από τον όγκο που καταλαμβάνουν και από τη δυνατότητα τροφοδοσίας τους με νερό, είτε απευθείας από τη βροχή είτε πλευρικά από υδροφόρους προνεογενείς σχηματισμούς, με τους οποίους έρχονται σε άμεση επαφή. Σε αρκετές περιπτώσεις διαμορφώνονται αξιόλογοι υπόγειοι υδροφορείς κυρίως σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και γύψους. Τα γυψούχα νερά είναι βέβαια ακατάλληλα για ύδρευση αλλά καλύπτουν σημαντικές αρδευτικές ανάγκες, [2].

Τεταρτογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Συναντώνται κυρίως σε ποτάμεις αποθέσεις, ψαμμίτες άμμου και κορήματα, που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους διακρίνονται από μεγάλη διαπερατότητα. Συνήθως, επειδή παρουσιάζουν μικρό πάχος, αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους ελεύθερος υδροφορέας, [2].

4.3.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς προνεογενείς σχηματισμούς ανήκουν τα πετρώματα της φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς, ο φλύσχης και οι σχηματισμοί των οφιολίθων και κρυσταλλοσχιστόδων. Οι σχηματισμοί αυτοί στο σύνολο τους χαρακτηρίζονται ως υδατοστεγείς, εξαίρεση όμως αποτελεί το σαθρό κάλυμμα τους καθώς και κάποιο δευτερογενές πορώδες που οφείλεται σε τεκτονικά αίτια.

Η στεγανότητα των πετρωμάτων αυτής της κατηγορίας, σε συνδυασμό με την τεκτονική δομή της περιοχής, επηρεάζει σημαντικά τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τη διακίνηση του υπόγειου νερού και το διαχωρισμό της περιοχής σε υδρογεωλογικές ενότητες, ενώ σαν στεγανό διάφραγμα επιτρέπει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων σε διάφορα υψόμετρα. Η ποιότητα του νερού, που εντοπίζεται στους σχηματισμούς αυτούς, είναι καλή και καλύπτει τοπικές υδρευτικές ανάγκες, [2].

Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς του νεογενούς ανήκουν οι μάργες και οι άργιλοι, που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους, είναι αδιαπέρατοι, πράγμα που αποκλείει τη διαμόρφωση αξιοποιήσιμων υπόγειων υδροφορέων. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα ανεπάρκειας νερού σε παραπλήσιες περιοχές. Επίσης προκαλούν αυξημένη επιφανειακή απορροή, με αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να καταλήγουν στη θάλασσα ανεκμετάλλετες, [2].

4.3.3. Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων

Η διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, τον γεωλογικό σχηματισμό που είναι πέρατος από το νερό και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη τεκτονική μορφή (ή το επίπεδο θάλασσας όταν πρόκειται για υπόβαθρο ανθρακικών πετρωμάτων). Όταν και οι τρεις παραπάνω παράγοντες είναι ευνοϊκοί, τα νερά της βροχής κατεισδύουν στα πετρώματα, συγκεντρώνονται στους πόρους (καρστικά και τεκτονικά διάκενα), διαμορφώνοντας υπόγειους υδροφορείς, υδρογεωλογικές ενότητες και λεκάνες υδρογεωλογικών ενοτήτων.

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

1. Υδρογεωλογική ενότητα καροτικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη.
2. Υδρογεωλογική ενότητα καροτικού υδροσυστήματος Δίκτη.
3. Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων.
4. Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου.

Η υδρογεωλογική ενότητα που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι εκείνη του καροτικού υδροσυστήματος Δίκτη, η οποία περιλαμβάνει τις γεωλογικές ενότητες και τους υπόγειους υδροφορείς, που τροφοδοτούνται από τον ορεινό όγκο, άσχετα αν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν ή όχι στον βασικό κορμό του.

Γενικά ο ορεινός όγκος Δίκτη ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό Λασιθίου, ενώ στο νομό Ηρακλείου ανήκει το δυτικό τμήμα. Δομείται κύρια από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη. Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας, πάνω στην οποία έχουν απωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της φυλλιτικής - χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων - κρυσταλλοσχιστοδών. (Η ενότητα των οφιολίθων - κρυσταλλοσχιστοδών δεν εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης.)

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

- Υπόγειοι υδροφορείς των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής

ενότητας Πίνδου.

- Υπόγειοι υδροφορείς των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής

ενότητας Τρίπολης.

- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή Ανώπολης -

Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γαλιπέ -Σκοτεινό.

- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται νότια της Χερσονήσου -

Χαρασό - Κόξαρης - Καλού Χωριού.

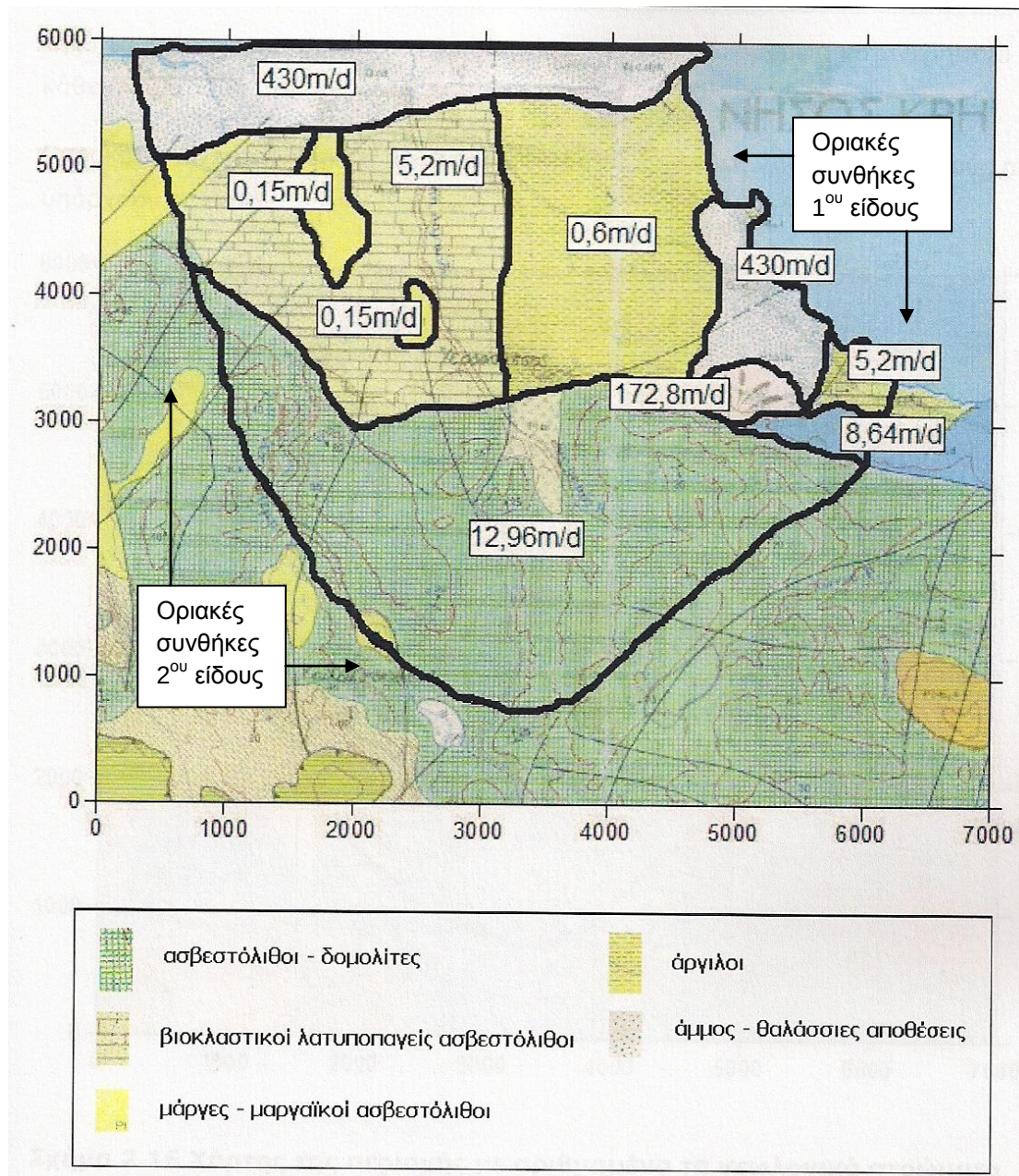
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας

Χερσονήσου.

- Ανθρακικοί σχηματισμοί της περιοχής Μαλίων.

Όλες οι ερευνητικές γεωτρήσεις, που έχουν γίνει στην προσπάθεια της κοινότητας για εντοπισμό υπόγειων υδροφορέων για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών, έδωσαν υφάλμυρο νερό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης, που έρχονται σε άμεση επαφή με τη θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστολιθικών του Ιουρασικού και των ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής, [2].

4.4 Προσομοίωση του φυσικού συστήματος της περιοχής ενδιαφέροντος



Εικόνα 4.4: Ο υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής πάνω στον οποίο διακρίνονται οι αυτόνομες υδρογεωλογικές ενότητες, καθεμία από τις οποίες διακρίνεται από διαφορετική υδραυλική αγωγιμότητα, [9].

Η προσομοίωση του φυσικού συστήματος της περιοχής ενδιαφέροντος γίνεται με τη δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης του οποίου η ανάπτυξη προϋποθέτει την εισαγωγή στοιχείων που περιγράφουν την γεωλογία, την υδρογεωλογία, τις συνοριακές και τις αρχικές συνθήκες που ισχύουν στην περιοχή.

Το μοντέλο υπολογίζει το υδραυλικό ύψος, την ταχύτητα του υπόγειου νερού στη x και την y κατεύθυνση καθώς και τη συγκέντρωση διαλυμένης ουσίας στο υπόγειο νερό. Θεωρήθηκε ότι το βάθος του υδροφορέα κατά μήκος της ακτογραμμής είναι 100m. Στον Πίνακα 4.5 αναφέρονται τα πετρώματα της περιοχής μελέτης και οι τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας αυτών όπως βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Στο ομοίωμα της περιοχής που δημιουργήθηκε, προστέθηκαν στοιχεία εισροής, οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες και το μοντέλο προσομοίωσε την κίνηση του νερού μέσα στους υπόγειους υδροφορείς παρέχοντας στοιχεία για το υδραυλικό ύψος και την ταχύτητα του νερού.

ΕΙΔΟΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ
Άμμος	430m/d
Χαλαρά Αργιλοαμμώδη	260m/d
Ασβεστόλιθοι – Δολομίτες	8,64m/d
Βιοκλαστικοί Λατυποπαγείς Ασβεστόλιθοι	5,2m/d
Μάργες – Μαργαϊκοί Ασβεστόλιθοι	0,15m/d

Πίνακας 4.5: Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας πετρωμάτων, [3], [4].

Τέλος δημιουργήθηκαν δύο σειρές κελιών που αντιπροσωπεύουν τα ρήγματα της περιοχής.

Σε κάθε σειρά κελιών εφαρμόστηκε οριακή συνθήκη ροής εξαρτημένης με το υδραυλικό φορτίο (Head dependent flux) η οποία απεικονίζεται στο προσομοίωμα με το πακέτο Drain του Visual-MODFLOW (Drain Package) το οποίο εισάγει στις εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών τους όρους εκείνους που αντιπροσωπεύουν τη ροή στις τάφρους, [7].

Οι επιπτώσεις των δύο βασικών ρηγμάτων στην περιφερειακή ροή του υδροφόρου ορίζοντα μελετώνται σε αυτό το έργο. Και τα δύο ρήγματα συνδέονται άμεσα με τη θάλασσα. Το καθένα επεκτείνεται σε διαφορετικές κατευθύνσεις, το ένα στην κατεύθυνση βορρά-νότου και το δεύτερο στην κατεύθυνση ανατολή-δύση, και διασταυρώνονται λίγα χιλιόμετρα εσωτερικά της ακτής. Για τους σκοπούς της μελέτης αυτής, το πακέτο Drain του Visual-MODFLOW, [13] χρησιμοποιήθηκε για την προσέγγιση της υδραυλικής συμπεριφοράς των δύο ρηγμάτων, [8].

Για την περιγραφή της διαφοράς υδραυλικού φορτίου μεταξύ του ρήματος και του πορώδους μέσου χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής αγωγιμότητας σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$C=R*K$$

όπου C είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας, R είναι το μήκος κάθε κελιού και K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε κάθε κελί, [11, 12].

Για την εισαγωγή των τιμών εισροής χρησιμοποιήθηκε το πακέτο General-Head Boundary (GHB). Η εισερχόμενη και εξερχόμενη ροή από κάθε κελί παρέχεται σε βαθμό ανάλογο με την διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ του κελιού και του σημείου αναφοράς της εξωτερικής πηγής. Οι οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους εισάγονται στο μοντέλο με το συγκεκριμένο πακέτο προσομοιάζοντας την ύπαρξη μίας εξωτερικής πηγής (όπως λίμνη), με γνωστό υδραυλικό ύψος, στα όρια της περιοχής μελέτης, [13].

4.5 Οριακές Συνθήκες

Με κατάλληλες οριακές συνθήκες έγινε προσπάθεια βαθμονόμησης του μοντέλου ώστε το όριο της ζώνης να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση. Οι οριακές συνθήκες που επιλέχθηκαν είναι 1ου και 2ου είδους. Το επίπεδο αναφοράς ορίστηκε 100m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Η οριακή συνθήκη που εφαρμόστηκε κατά μήκος της παραλιακής ζώνης ήταν 1ο είδους με υδραυλικό ύψος ίσο με 0m. Οριακή συνθήκη 2ου είδους εφαρμόστηκε στα σημεία που υπάρχουν διαπερατά πετρώματα στα όρια της περιοχής μελέτης. Από τα σημεία αυτά γίνεται η παραδοχή ότι εισρέει στην περιοχή σταθερός όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου, [5].

Σύμφωνα με τις εικόνες 4.1 και 4.4 στη βόρεια πλευρά φαίνεται η οριακή συνθήκη πρώτου είδους (σταθερό υδραυλικό ύψος). Στην νότια και νοτιοανατολική πλευρά υπάρχουν περιοχές από τις οποίες αναμένεται να υπάρξει εισροή νερού στην περιοχή μελέτης. Οι συνθήκες αυτές θα θεωρηθούν ως οριακές συνθήκες δευτέρου είδους (σταθερή παροχή).

Τα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν από την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές συνθήκες για τα σενάρια μελλοντικών προβλέψεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Το πρώτο σενάριο επιχειρεί να παρουσιάσει μια δυσμενή κατάσταση όπου ο ανθρώπινος παράγοντας αυξάνει την επίδρασή του στην ταχύτητα εισχώρησης του αλμυρού νερού (διπλασιασμός παροχών αντλήσεων και δημιουργία νέων πηγαδιών) ενώ το δεύτερο επιχειρεί να επιτύχει υδραυλική αναχαίτιση της υφαλμύρινης (υποδιπλασιασμός και μηδενισμός παροχών αντλήσεων).

Βιβλιογραφία

- [1] Princeton Transport Code Manual.
- [2] Υδρογεωλογική μελέτη Βορείου Νομού Ηρακλείου, Έργο Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Ι.Γ.Μ.Ε., Παράρτημα Κρήτης.
- [3] Lerman A. (1979) "Geochemical processes in water and sediment environments", Wiley Interscience.
- [4] Shaw E.M. (1988), "Hydrology in practice" 2nd edition, Chapman and Hall.
- [5] Μαρία Π. Παπαδοπούλου, Γεώργιος Π. Καρατζάς και Ιωάννης Τριχάκης. (2005), Προσομοίωση Υπόγειας Ροής Παράκτιου Υδροφορέα Στη Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου Κρήτης.
- [6] Babu D.K., G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfield and S.A. Stohoff (1997) "Chemical transport by three dimensional groundwater flows", Princeton University 84-WR-3.
- [7] Παπαμαστοράκης Δ. Κριτσωνάκης Μ. Ζαχαριουδάκης Γ. Ποιοτική Εκτίμηση ρίσκου Ρύπανσης των Υπογείων Νερών με την χρήση Μαθηματικών.
- [8] Maria P. Papadopoulou, Emmanouil A. Varouchakis, George P. Karatzas (2008) Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer.
- [9] Χαλμούκης (2007) Εφαρμογή της Γεωστατιστικής Μεθόδου Kriging για τον Προσδιορισμό της Υδραυλικής Αγωγιμότητας του Υπόγειου Υδροφορέα στην Περιοχή Χερσονήσου του Ηρακλείου Κρήτης.
- [10] Στεφανόπουλος Κ. (2004), Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης στην περιοχή Χερσονήσου - Ηρακλείου Κρήτης με χρήση προσομοίωσης και μετρήσεων πεδίου, Χανιά.
- [11] Charbeneau, R. J. (2000). Grundwater Hydraulics and Pollutant Transport, Upper Saddle River, NJ: Prattice Hall.

[12] Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). User guide to modularization concepts and the Ground Water Flow Progress, Modflow-2000 the US Geological Survey modular ground-water model, US Geological Survey Open-File Report 00-92, pp. 121.

[13] Visual Modflow (1995-2006). Modular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model, Version 4.2, Waterloo Hydrogeologic, Inc.

5. Σενάρια

5.1 Δεδομένα

Η ρύθμιση του μοντέλου της υπόγειας ροής του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα Χερσονήσου πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες δυναμικά εξισορροπημένου ισοζυγίου. Οι συνθήκες αυτές αντιπροσωπεύουν μια χρονική σταθεροποίηση της υδροστατικής επιφάνειας που αντιστοιχεί σε συνθήκες ισορροπίας μεταξύ των εισροών και εκροών του συστήματος. Στην πραγματικότητα, τέτοιες συνθήκες σπάνια παρατηρούνται.

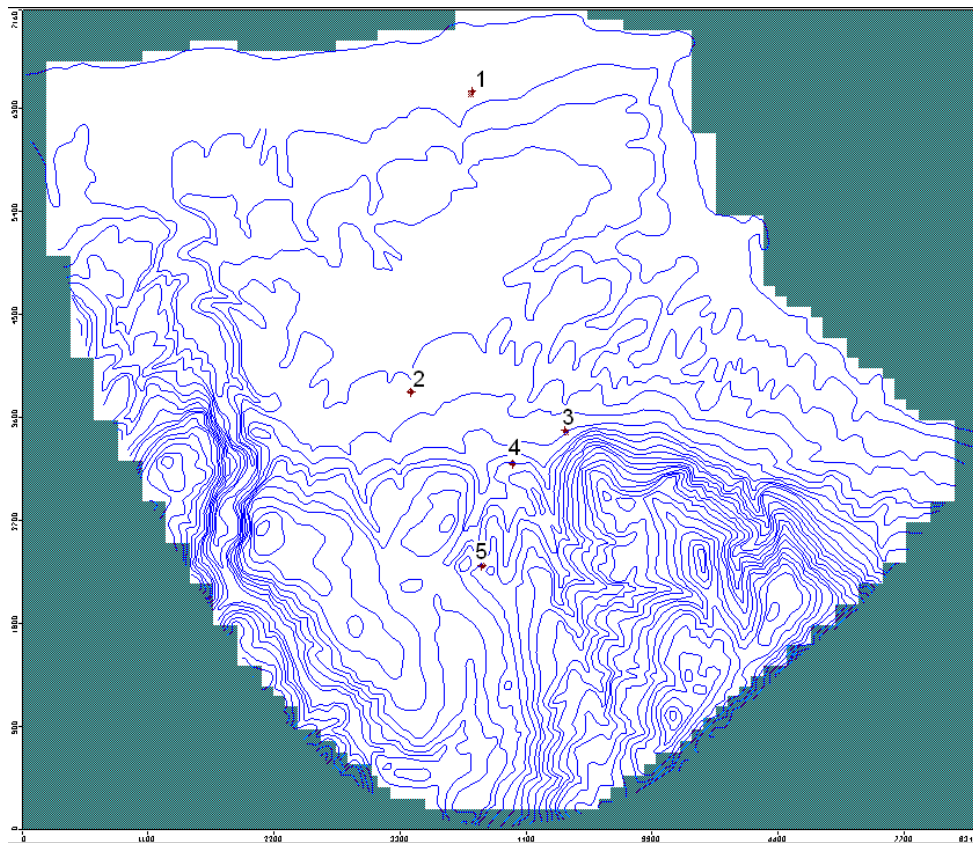
Για αυτό, όλα τα αποτελέσματα που θα δειχθούν έχουν εξαχθεί μετά από την σταθεροποίηση της ροής.

Το γεγονός ότι το Modflow συνεργάζεται με GIS μας έδωσε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τον χάρτη της περιοχής με τις ανάλογες υδραυλικές αγωγιμότητες.

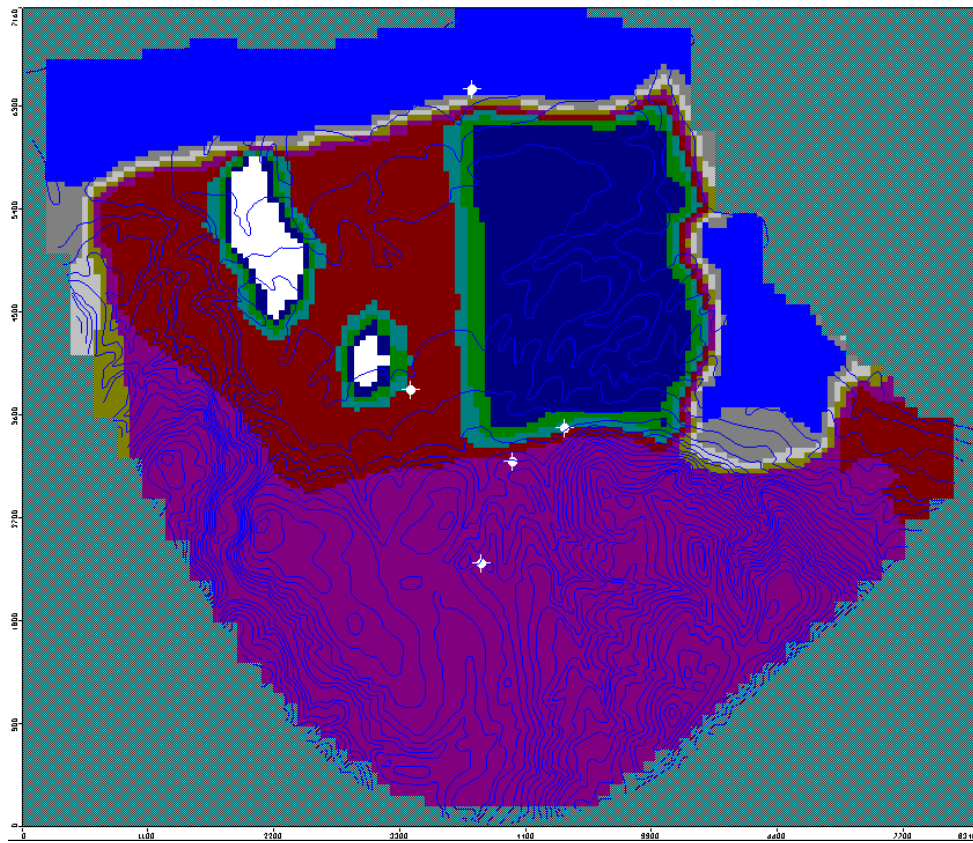
Έχοντας τον χάρτη σαν δεδομένο έγινε η εισαγωγή των παρακάτω στοιχείων χειροκίνητα:

- Εισροή υδάτων στον υδροφόρο ορίζοντα από παρακείμενους υδροφορείς και κατακρημνίσεις.
- Εισροή συγκεκριμένης συγκέντρωσης άλατος(22000mg/l).
- Οριοθέτηση ρηγμάτων.
- Πηγάδια άντλησης.
- Εισαγωγή τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας με την μέθοδο Kriging [2]
- Εισαγωγή παροχών αντλήσεων πηγαδιών άντλησης (περεταίρω ανάλυση στο υποκεφάλαιο 5.2)

	Ξηρή Περίοδος	Υγρή Περίοδος
Πηγάδι 1:	1620 m ³ /d	720 m ³ /d
Πηγάδι 2:	2268 m ³ /d	1008 m ³ /d
Πηγάδι 3:	540 m ³ /d	240 m ³ /d
Πηγάδι 4:	2268 m ³ /d	1008 m ³ /d
Πηγάδι 5:	200 m ³ /d	92 m ³ /d



Εικόνες 5.1: Αρίθμηση των πηγαδιών άντλησης



Εικόνα 5.2: Τοποθεσία των πηγαδιών άντλησης

5.2 Ανάλυση περιπτώσεων

Για την ευκολότερη επίδειξη των αποτελεσμάτων, ο διαχωρισμός θα γίνει σε **3 περιπτώσεις**. Η πρώτη περίπτωση θα παρουσιάζει την περιοχή χωρίς την ύπαρξη των ρηγμάτων ενώ η δεύτερη θα εμπεριέχει τα ρήγματα και η Τρίτη περίπτωση θα παρουσιάζει τα αποτελέσματα μετά την στρωματοποίηση της περιοχής μελέτης (δύο layers). Σε κάθε περίπτωση θα εξεταστούν δύο σενάρια. Σενάρια που θα πραγματεύονται την μετέπειτα αντιμετώπιση των υδατικών πόρων. Σκοπός της εκάστοτε περίπτωσης είναι η αναπαράσταση του μετώπου υφαλμύρινσης για διαφορές χρονικές περιόδους και σενάρια.

Για να μελετηθεί η επίδραση των ρηγμάτων πραγματοποιείται η πρώτη περίπτωση (απουσία ρηγμάτων) και εν συνεχεία συγκρίνεται με τις λοιπές περιπτώσεις (παρουσία ρηγμάτων). Επίσης σε κάθε περίπτωση, πριν την έναρξη των σεναρίων πραγματοποιείται μια προσομοίωση του μετώπου της υφαλμύρινσης σε 10 και σε 20 χρόνια από την σταθεροποίηση της ροής (τωρινή κατάσταση), χωρίς καμία αλλαγή στο πλήθος και στην παροχή αντλήσεων, με σκοπό τη μελέτη της μεταβολής του μετώπου για ένα 'ουδέτερο' σενάριο. Το να μην υπάρξει καμία μεταβολή στα πηγάδια άντλησης είναι σχεδόν αδύνατο, άρα η υπόθεση πραγματοποιείται για την παρατήρηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης χωρίς την περεταίρω παρέμβαση, μιας και οι αντλήσεις παραμένουν ανεπηρέαστες.

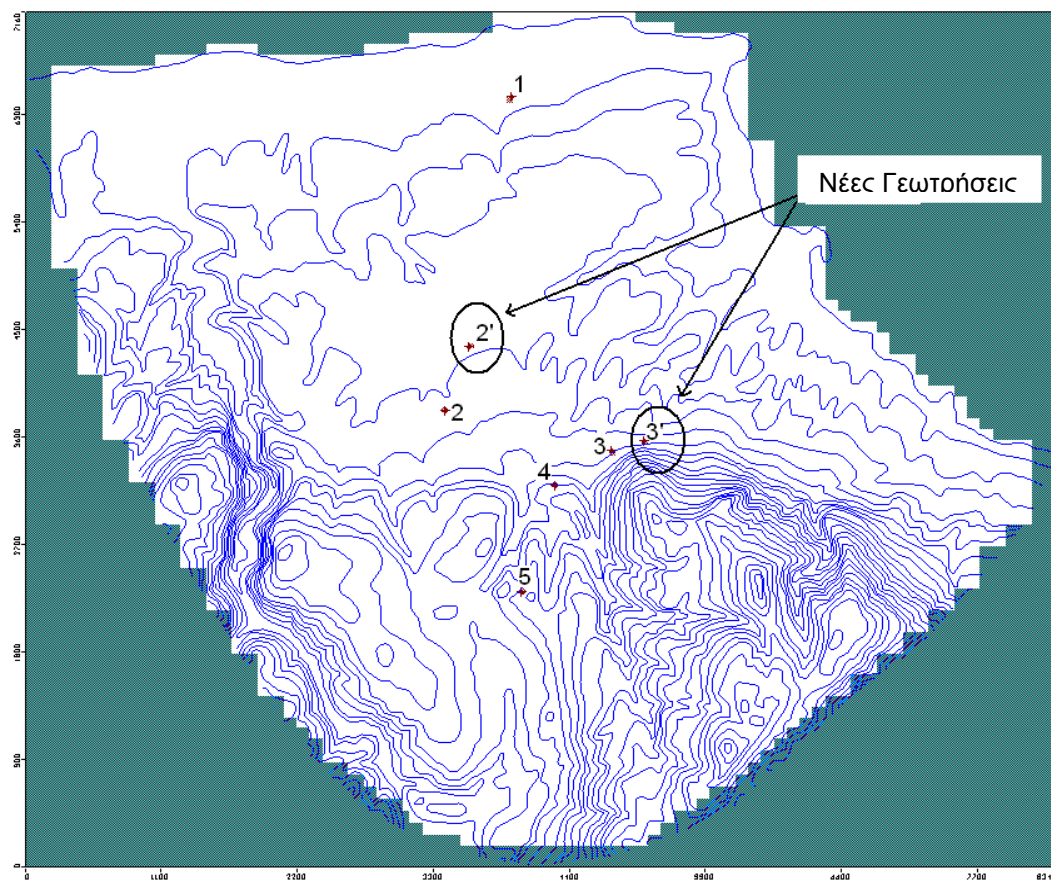
Τέλος οι τιμές παροχών άντλησης που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν ο ετήσιος μέσος όρος. Όπως αντίστοιχα έγινε και η εισαγωγή των τιμών υδραυλικού φορτίου που προσομοιάζουν τις πλευρικές εισροές (μέσος όρος χειμερινών και θερινών τιμών).

Αναλυτικότερα:

Πηγάδι 1:	1170 m ³ /d
Πηγάδι 2:	1638 m ³ /d
Πηγάδι 3:	390 m ³ /d
Πηγάδι 4:	1638 m ³ /d
Πηγάδι 5:	146 m ³ /d

5.2.1 Σενάρια

Το πρώτο σενάριο θα πραγματεύεται το ενδεχόμενο να επιδεινωθεί ο τρόπος χρήσης του γλυκού νερού. Θα γίνεται δηλαδή η υπόθεση ότι μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα, όπου δεν υπάρχει καμία αλλαγή στον τρόπο άντλησης, διπλασιάζονται οι παροχές άντλησης ή ότι δημιουργούνται νέες γεωτρήσεις κοντά στις ήδη υπάρχουσες.



Εικόνα 5.3: Νέες γεωτρήσεις

Οι γεωτρήσεις 2' και 3' θα έχουν τις ίδιες παροχές άντλησης με στις 2 και 3 αντίστοιχα.

Το δεύτερο σενάριο θα πραγματοποιείται το ενδεχόμενο να υπάρξει βελτίωση στον τρόπο χρήσης του νερού. Και σε αυτό το σενάριο γίνεται η υπόθεση ότι για ένα συγκεκριμένο διάστημα δεν υπάρχει καμία αλλαγή στον τρόπο άντλησης ή στο πλήθος των πηγαδιών.

Κύρια διαφορά με το πρώτο σενάριο είναι ότι οι παροχές άντλησης υποδιπλασιάζονται ή μηδενίζονται.

5.2.2 Επιπρόσθετες υποθέσεις

Στις περισσότερες περιπτώσεις θα παρουσιαστεί και μια επιπλέον αλλαγή. Η απενεργοποίηση όλων των γεωτρήσεων.

Αυτή η υπόθεση είναι απίθανη μελετήθηκε όμως για να δείξει την δυσκολία ανάκαμψης στις υδροφορέα αφού έχει υποστεί το πρόβλημα του φαινομένου στις υφαλμύρινσης.

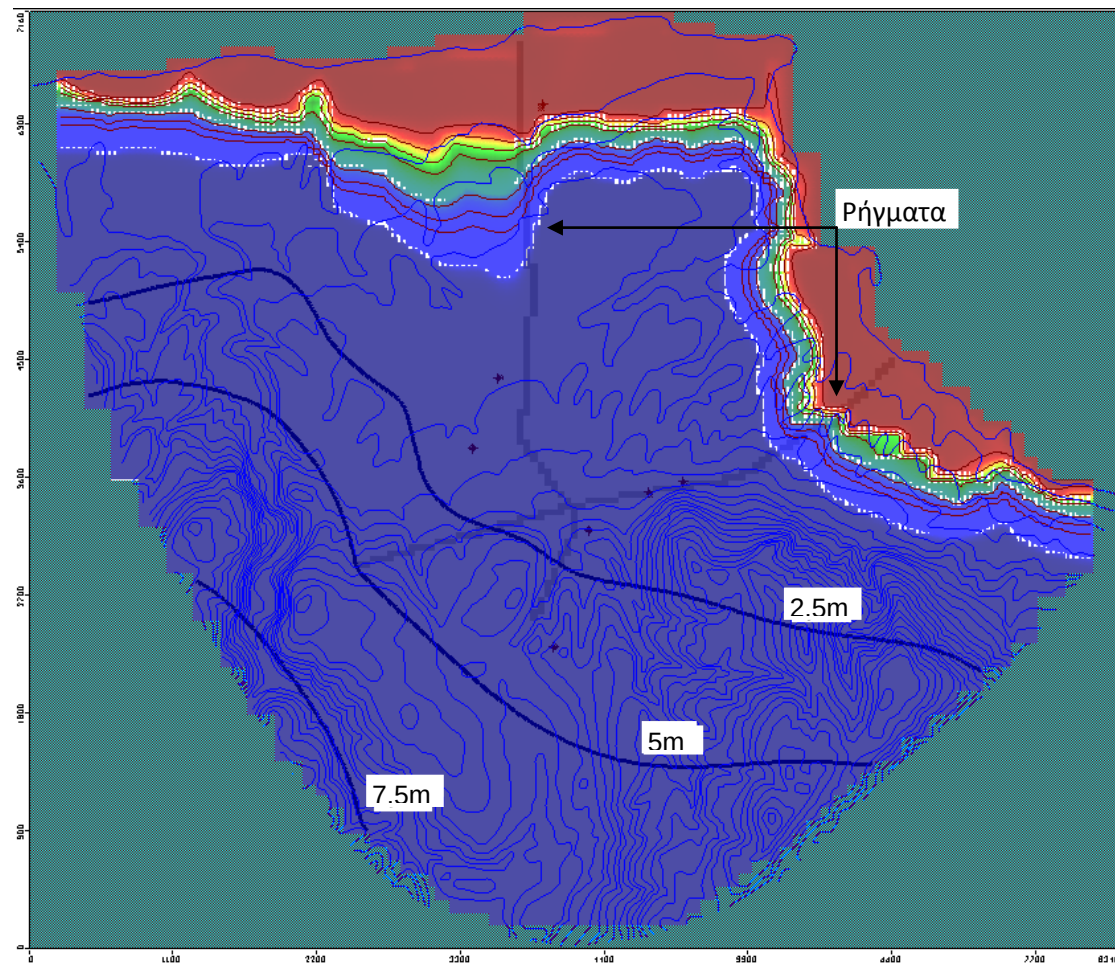
Τέλος στην τελευταία περίπτωση (δύο ζώνες) θα εξεταστεί η μεταβολή του μετώπου της υφαλμύρινσης εποχιακά (ανά εξάμηνο) και όχι μόνο για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Σκοπός του συγκεκριμένου τρόπου διερεύνησης είναι να μελετηθεί η επίδραση των εποχιακών αλλαγών (διαφορά στην ποσότητα εισροών) σε σχέση με την ταχύτητα εισχώρησης του αλμυρού νερού.

Για την συγκεκριμένη υπόθεση θα παρθούν ξεχωριστά για κάθε περίοδο οι τιμές των παροχών άντλησης (υποκεφάλαιο 5.1) και αντίστοιχα οι τιμές υδραυλικού φορτίου για της πλευρικές εισροές και τα ρήγματα οι οποίες τιμές, χειμερινές και θερινές, διαφέρουν μεταξύ τους κατά 10-15%.

5.3 Τρόπος παρουσίασης

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι εικόνες θα έχουν την εξής μορφή:



Εικόνα 5.4: Παράδειγμα παρουσίασης κάτοψης

Οι άξονες x και y απεικονίζουν την πραγματική απόσταση από το σημείο 0,0 στον χάρτη.

Οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες αναπαριστούν γραφικά το ανάγλυφο του εδάφους.

Φαίνονται στις ισοπιεζομετρικές καμπύλες των στάθμεων του υδροφόρου ορίζοντα ανά 2,5 μέτρα(στο σχήμα φαίνονται των 2,5 , 5 και 7,5 μέτρων) στις και οι θέσεις όλων των πηγαδιών.

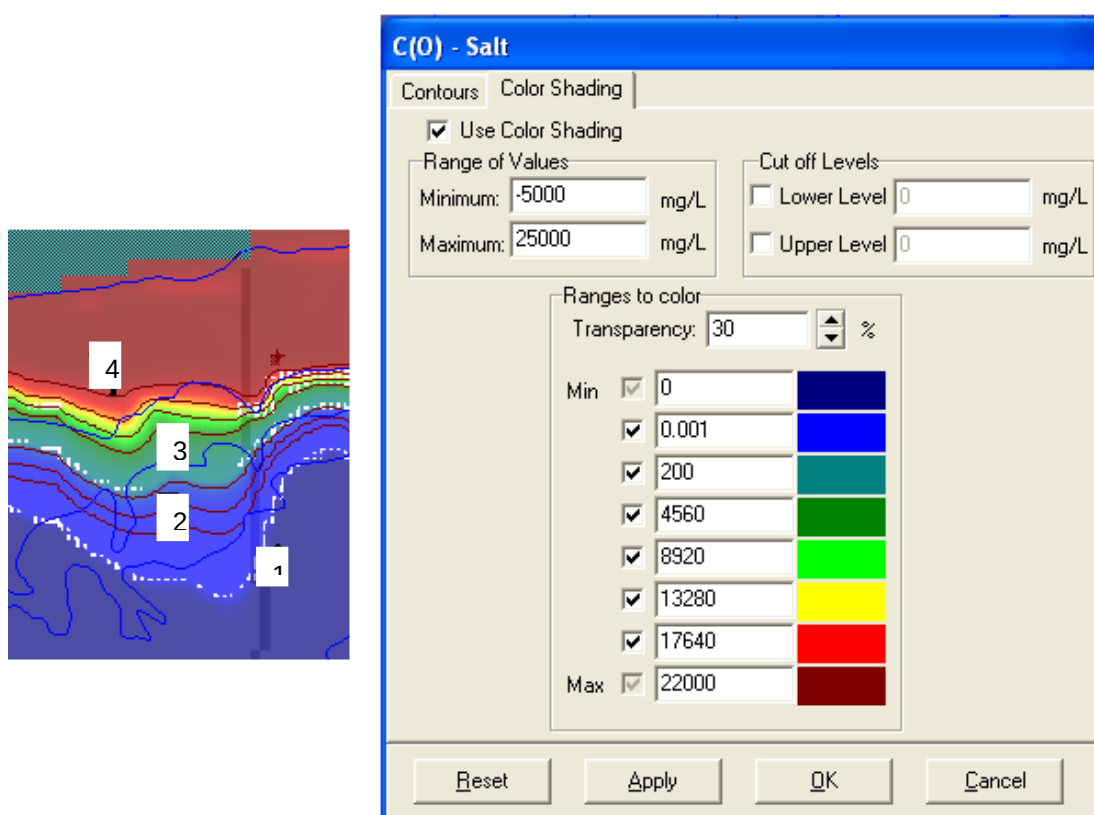
Τέλος στο κέντρο βρίσκεται ένα ρήγμα με κατεύθυνση βόρεια προς νότια και το δεύτερο ανατολικά προς δυτικά.

Το σκούρο μπλε που καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο μέρος της εικόνας (Εικόνα 5.4), πρόκειται για νερό με συγκέντρωση άλατος 0 έως 0,001mg/l . Συνεπώς στην γραμμή (1) (Εικόνα 5.5) η συγκέντρωση άλατος είναι 0,001mg/l.

Οι τρεις κόκκινες γραμμές (2) υποδηλώνουν συγκεντρώσεις 1, 10 και 100 mg/l και στο τέλος στις τρίτης αρχίζει μια λωρίδα πράσινου χρώματος (3) που κυμαίνεται από 200 έως 4560 mg/l.

Η τιμή 200 mg/l λαμβάνεται υπόψη γιατί είναι το όριο κάτω από το οποίο απαγορεύεται η άντληση για αρδευτικούς σκοπούς. (EPA Standards for Freshwater), [1].

Από εκεί και μετά οι κόκκινες γραμμές λαμβάνουν τις τιμές 5000, 10000, 15000 και 20000 mg/l (4) και τα χρώματα την διακύμανση που φαίνεται παρακάτω.



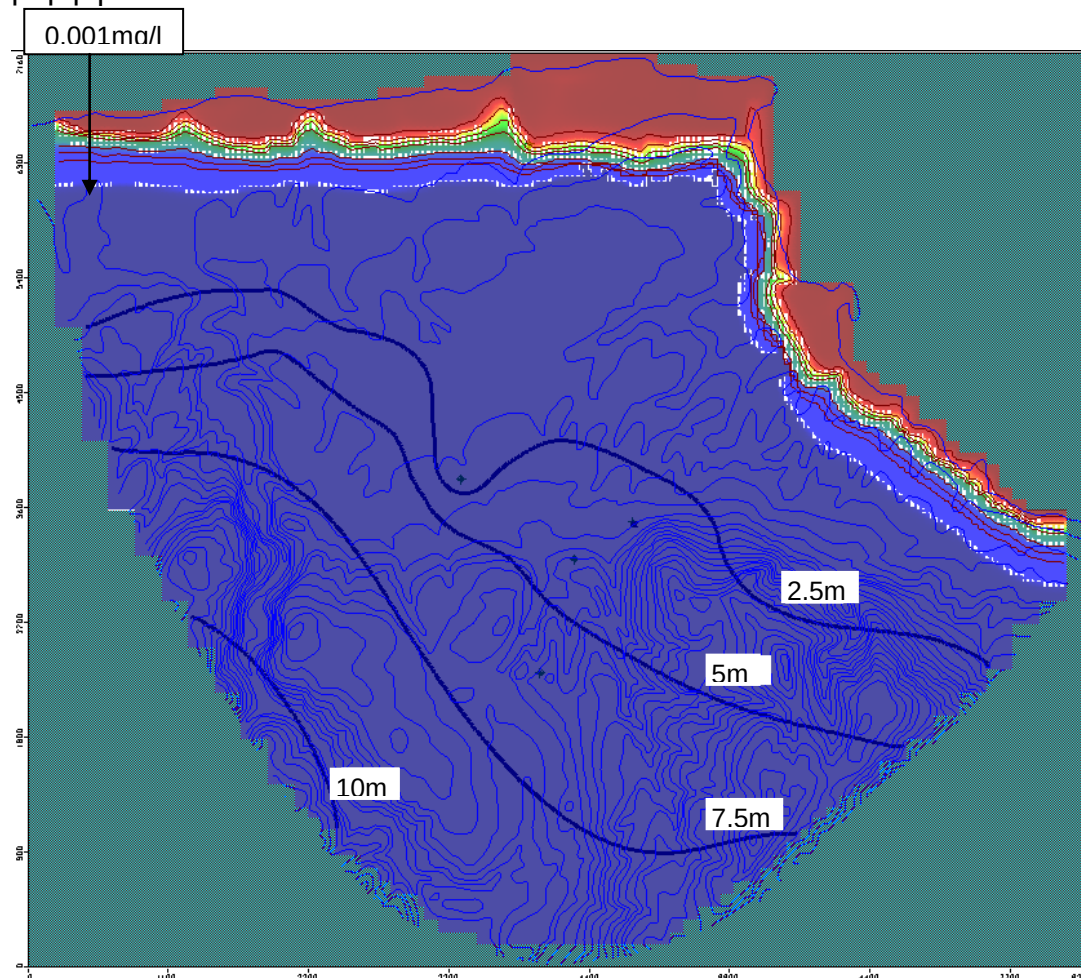
Εικόνα 5.5: Επεξήγηση διακύμανσης χρωμάτων

5.4 Πρώτη Περίπτωση (Χωρίς Ρήγματα)

Στο μοντέλο της πρώτης περίπτωσης εξετάζεται το πεδίο σαν να αποτελείται από ένα στρώμα και δεν έχει τα ρήγματα. Η πρώτη περίπτωση γίνεται καθαρά για δοκιμαστικούς λόγους μιας και δεν είναι πιστή αναπαράσταση της μορφολογίας του εδάφους λόγω έλλειψης των ρηγμάτων. Γίνεται για να ελεγχτεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και η ικανότητα του μοντέλου να ανταποκριθεί, με τον συγκεκριμένο τρόπο επίλυσης, στα διάφορα σενάρια και χρονικές περιόδους. Επίσης γίνεται για την μελέτη της επίδρασης των ρηγμάτων στην εισχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης.

5.4.1 Μετά το πέρας 10 ετών

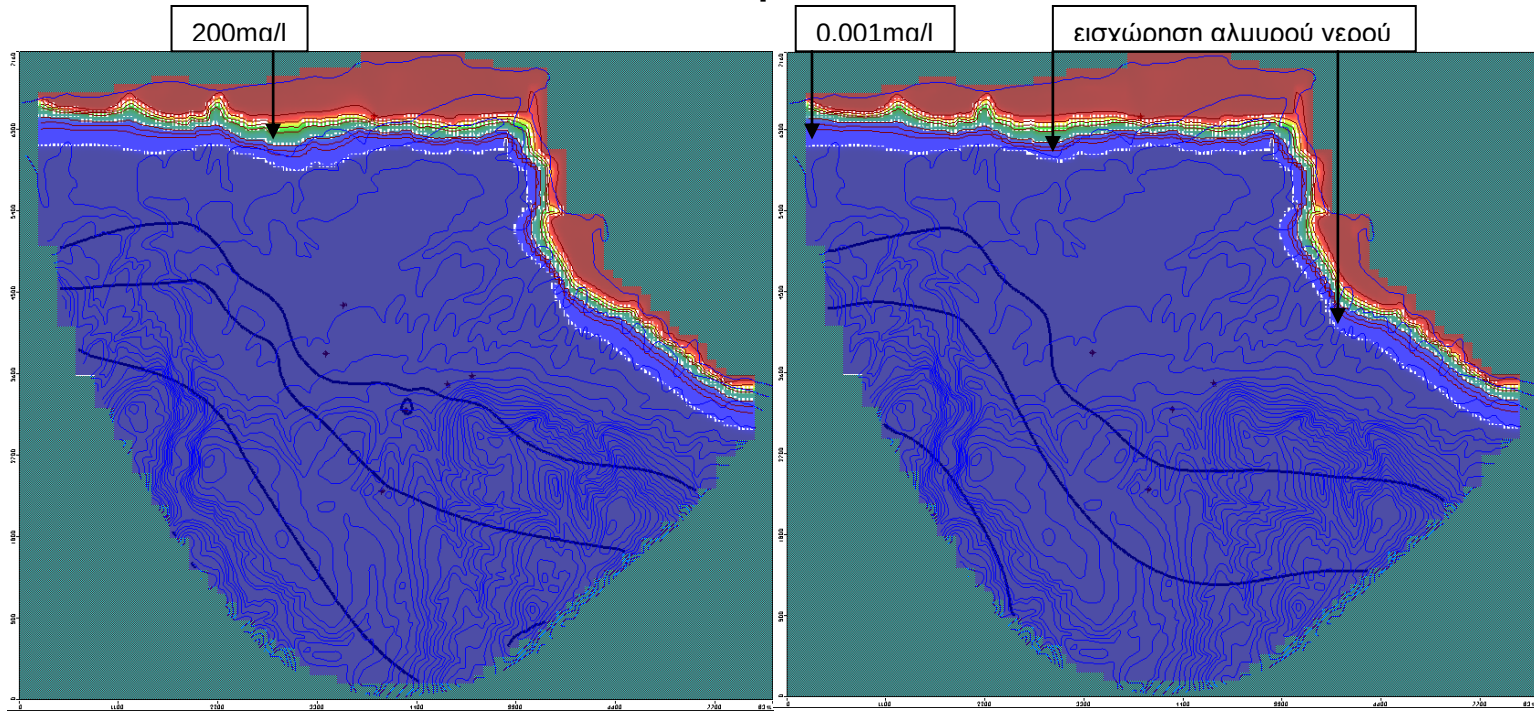
Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δεδομένα, σε διάστημα **10 ετών**, μετά από την σταθεροποίηση της ροής, ο υδροφόρος ορίζοντας θα έχει τη παρακάτω μορφή.



Εικόνα 5.6: 10 χρόνια – Πρώτη περίπτωση(χωρίς ρήγματα)

Η κατάσταση μετά το πέρας **10 ακόμα ετών** θα έχει ως εξής:

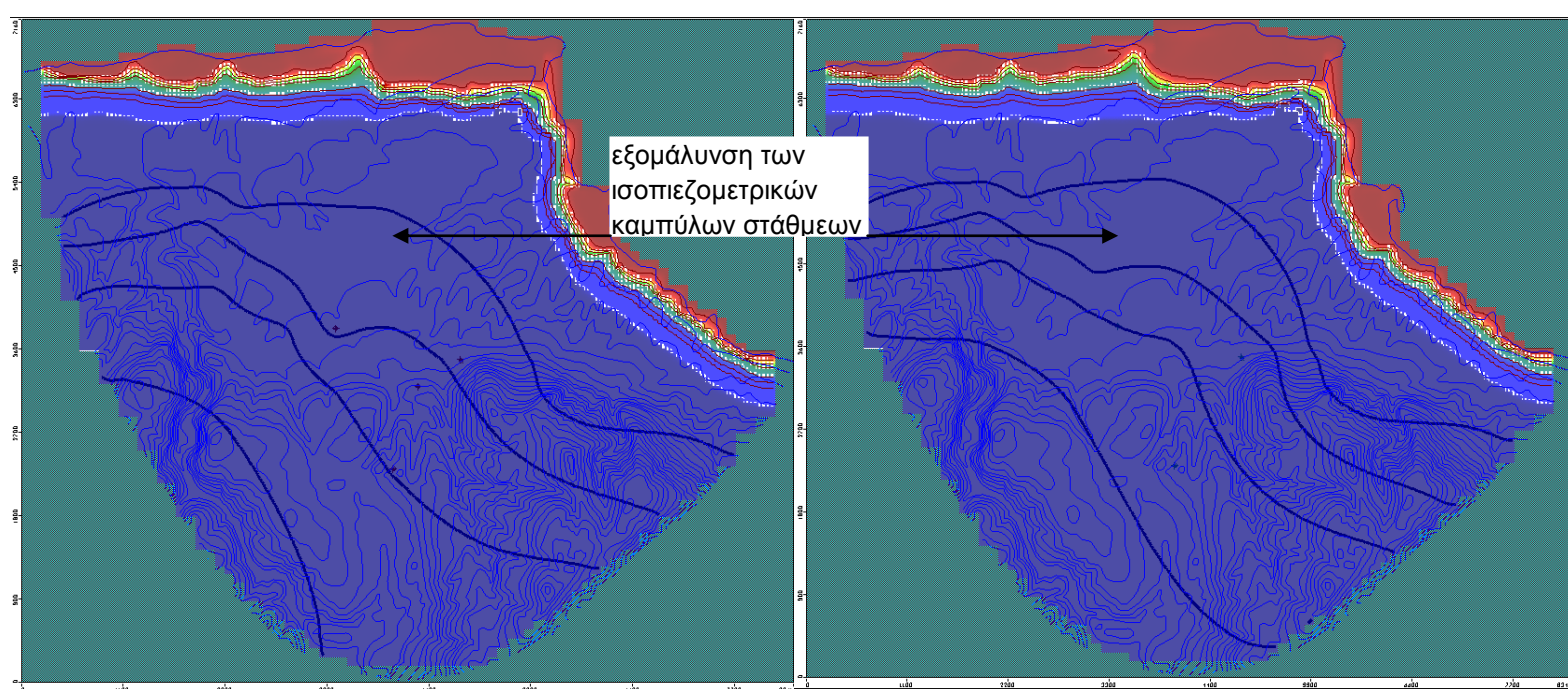
Σενάριο 1



Εικόνα 5.7: Νέα πηγάρδια

Εικόνα 5.8: Διπλασιασμός παροχών άντλησης

Σενάριο 2



Εικόνα 5.9: Υποδιπλασιασμός

Εικόνα 5.10: Μηδενισμός παροχών άντλησης

Στο πρώτο σενάριο και για τις δύο διαφορετικές υποθέσεις δεν υπάρχει κάποια αξιοπρόσεκτη διαφορά, παρά μόνο μερικές δεκάδες μέτρα εισχώρηση σε μερικά σημεία στο βόρειο και ανατολικό τμήμα (Εικόνα 5.8). Σημεία στα οποία η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη (Εικόνα 4.4) και κάνει ευκολότερη την είσοδο του αλμυρού νερού.

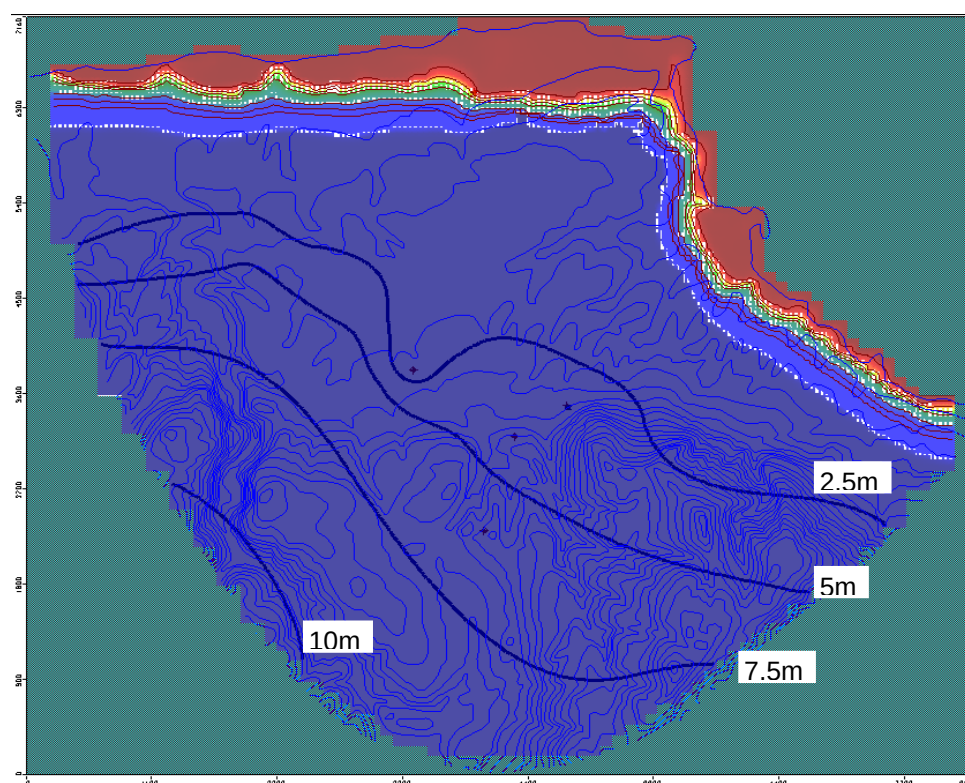
Στο δεύτερο σενάριο φαίνεται καθαρά η εξομάλυνση των ισοπιεζομετρικών καμπύλων στάθμεων, τουλάχιστον στην υπόθεση του μηδενισμού (Εικόνα 5.10), αλλά παρά την εμφανή μείωση της διείσδυσης του αλμυρού νερού, το μέτωπο της υφαλμύρισης εξακολουθεί να κινείται προς τα νότια ακόμα και μετά τον πλήρη μηδενισμό των αντλήσεων για 10 χρόνια.

5.4.2 Μετά το πέρας 20 ετών

Παρόμοια κατάσταση παρατηρείται και μετά από 20 χρόνια (από την κατάσταση ισορροπίας της ροής).

Στο δεύτερο σενάριο, σε αντίθεση με τα 10 χρόνια, το μέτωπο μετακινήθηκε ελάχιστα σε κάποια σημεία και σε άλλα καθόλου (Εικόνα Δ).

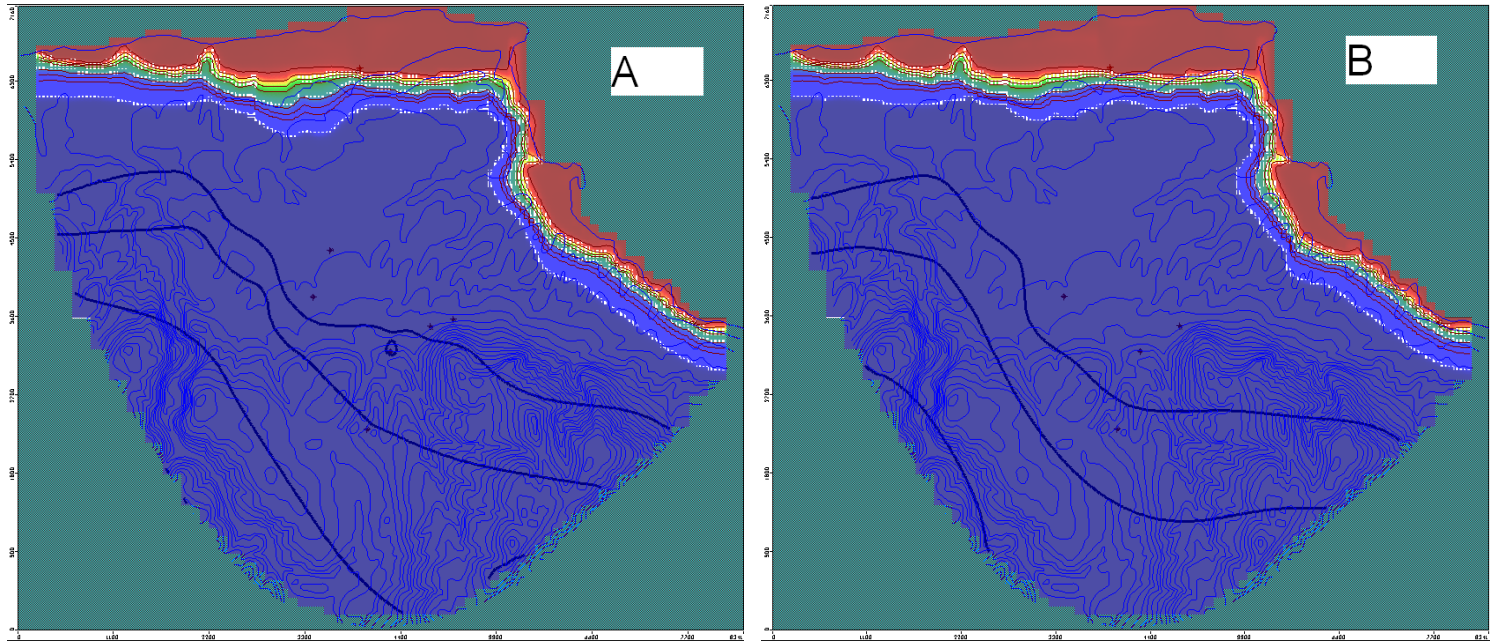
Συνεπώς αν το δεύτερο σενάριο πραγματοποιηθεί για πάνω από 10 χρόνια μπορεί να επιφέρει κάποια θετική αλλαγή όσον αφορά το πρόβλημα της υφαλμύρισης.



Εικόνα 5.11: Μεταβολή σε 20 Χρόνια - Πρώτη Περίπτωση

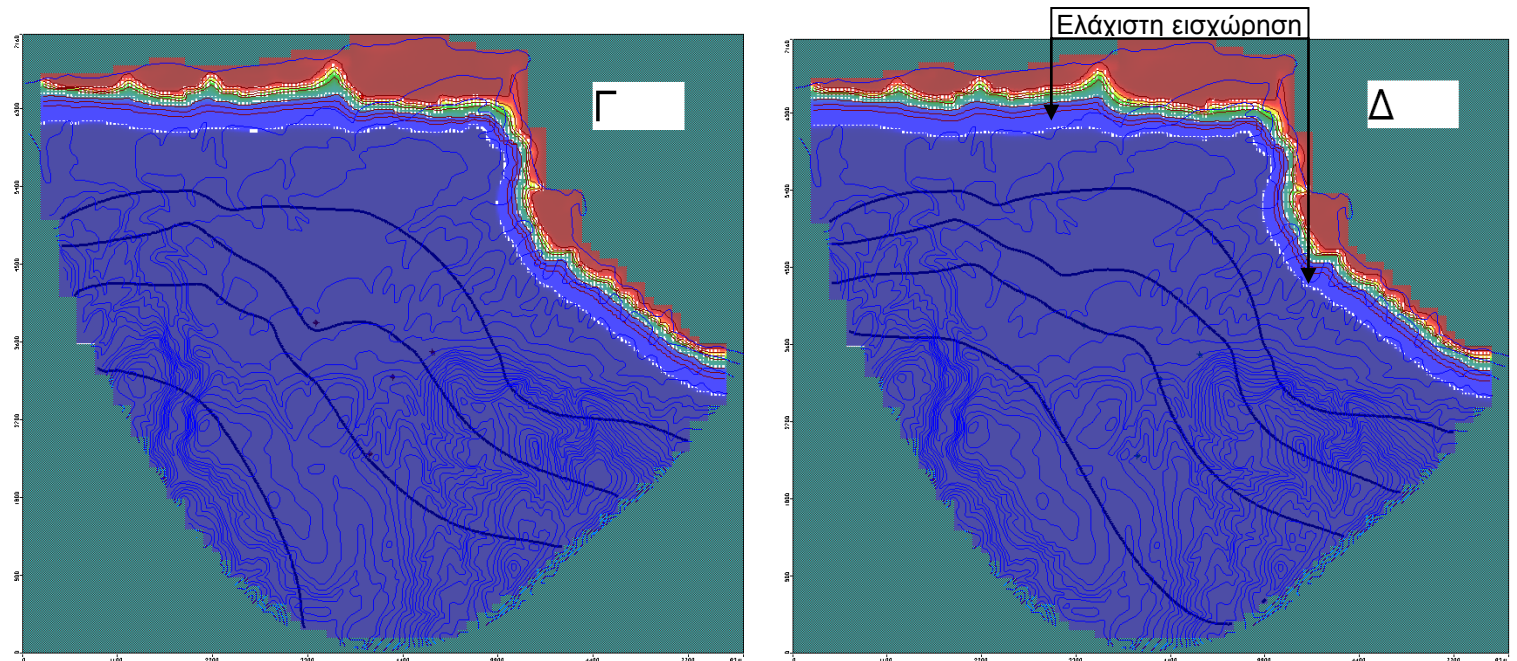
Η κατάσταση μετά το πέρας 20 ακόμα ετών θα έχει ως εξής:

Σενάριο 1



Εικόνα 5.12: Σενάριο 1 - Νέα πηγάδια(A) και Διπλασιασμός παροχών(B)

Σενάριο 2



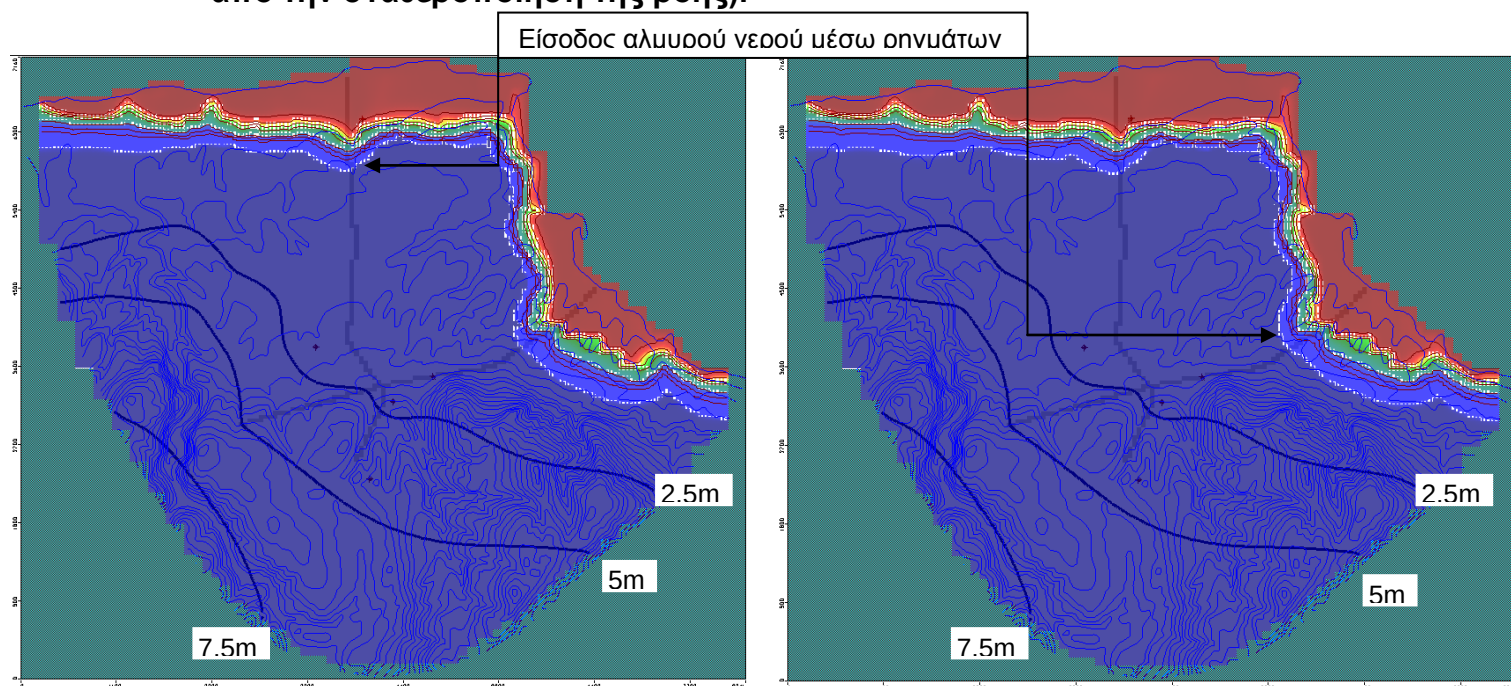
Εικόνα 5.13: Σενάριο 2 - Υποδιπλασιασμός(Γ) και Μηδενισμός παροχών(Δ)

5.5 Δεύτερη Περίπτωση (Υπαρξη Ρηγμάτων)

Η πρώτη περίπτωση δεν είναι αντιπροσωπευτική της περιοχής διότι δεν εμπεριέχονται τα ρήγματα σαν δεδομένα εισαγωγής.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πεδίο έρευνας αποτελείται από ένα στρώμα και δυο ρήγματα.

Αν ο υδροφορέας παραμείνει χωρίς καμία μεταβολή για 10 χρόνια θα έχει σχεδόν την ίδια μορφή με το αν παραμείνει αμετάβλητος για 20 χρόνια (**μετά από την σταθεροποίηση της ροής**).



Εικόνα 5.14: Μεταβολή σε 10 Χρόνια **Εικόνα 5.15:** Μεταβολή σε 20 Χρόνια

Παρατηρώντας τις εικόνες 5.14 και 5.15, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο παρόλα που διαφέρουν αρκετά τα αποτελέσματα μας με την πρώτη εξεταζόμενη περίπτωση(χωρίς ρήγματα).

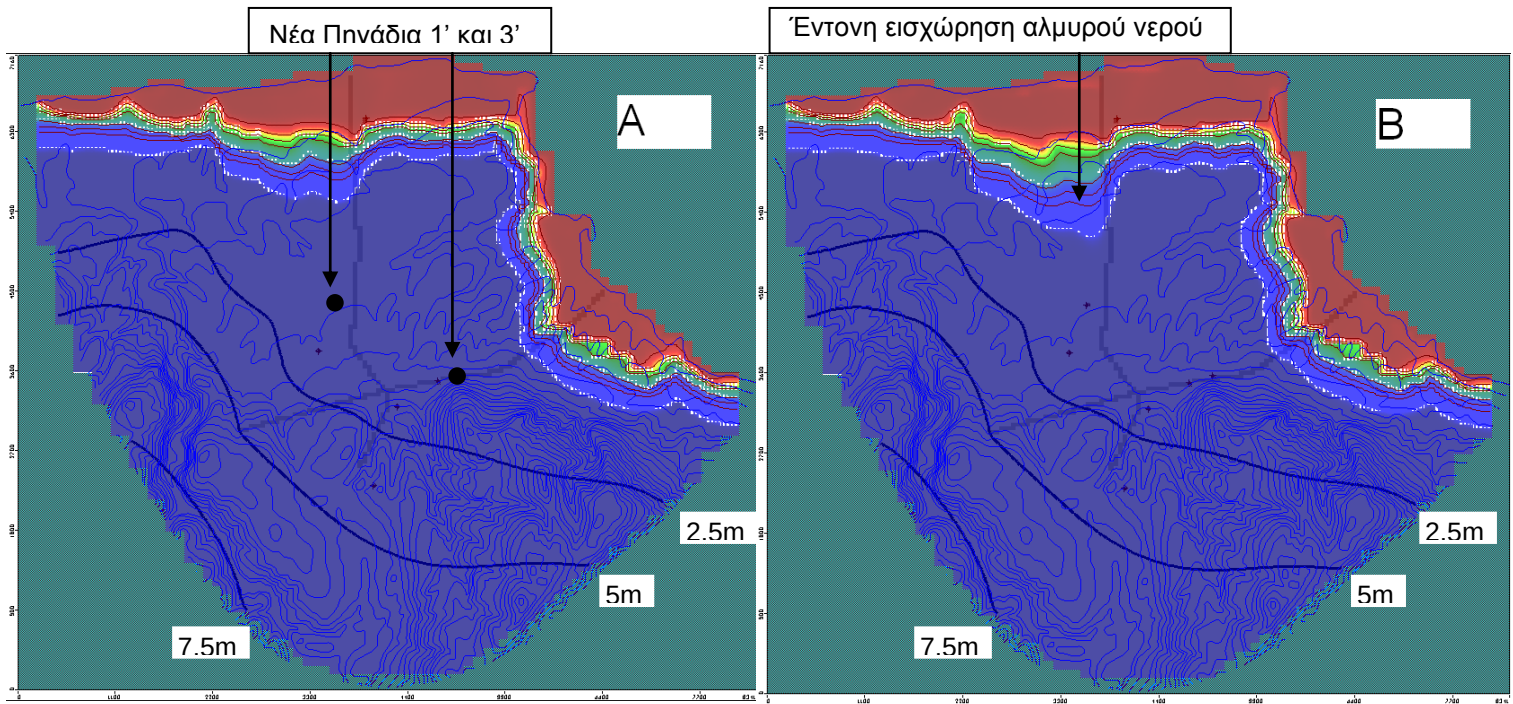
Στις εικόνες 5.14 και 5.15 διαπιστώνονται τα σημεία εισόδου του αλμυρού νερού στα ρήγματα τα οποία δεν εμφανίζουν κάποια ιδιαίτερη αντίσταση στην είσοδο του αλμυρού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα λόγω υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας.

Επίσης παρατηρείται πτώση στάθμης του υδροφορέα σε σχέση με την πρώτη περίπτωση, γι αυτό το λόγο δεν εμφανίζεται και η ισοπιεζομετρική καμπύλη των 10 μέτρων.

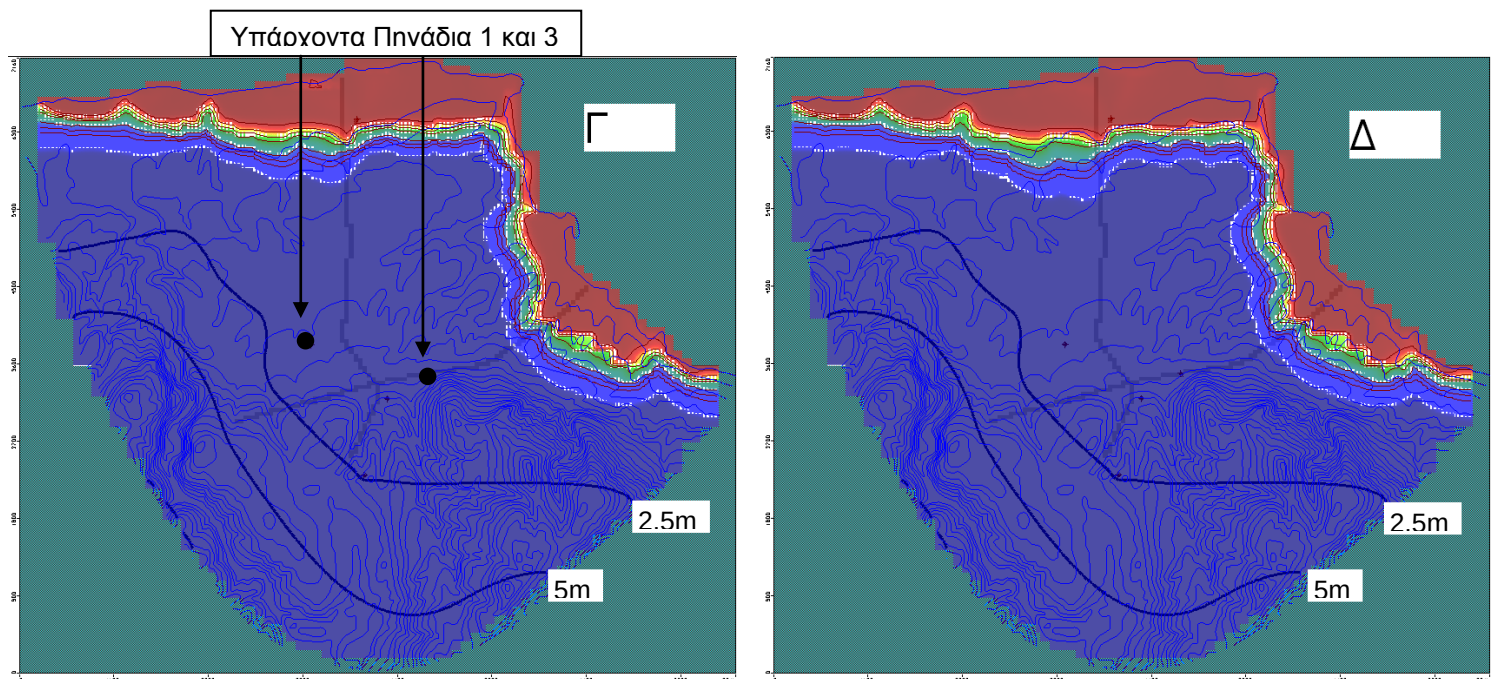
Σενάριο 1

Σε διάστημα 10 ετών (Α,Γ)

Σε διάστημα 20 ετών (Β,Δ)



Εικόνα 5.16: Δημιουργία νέων Πηγαδιών - Δεύτερη Περίπτωση

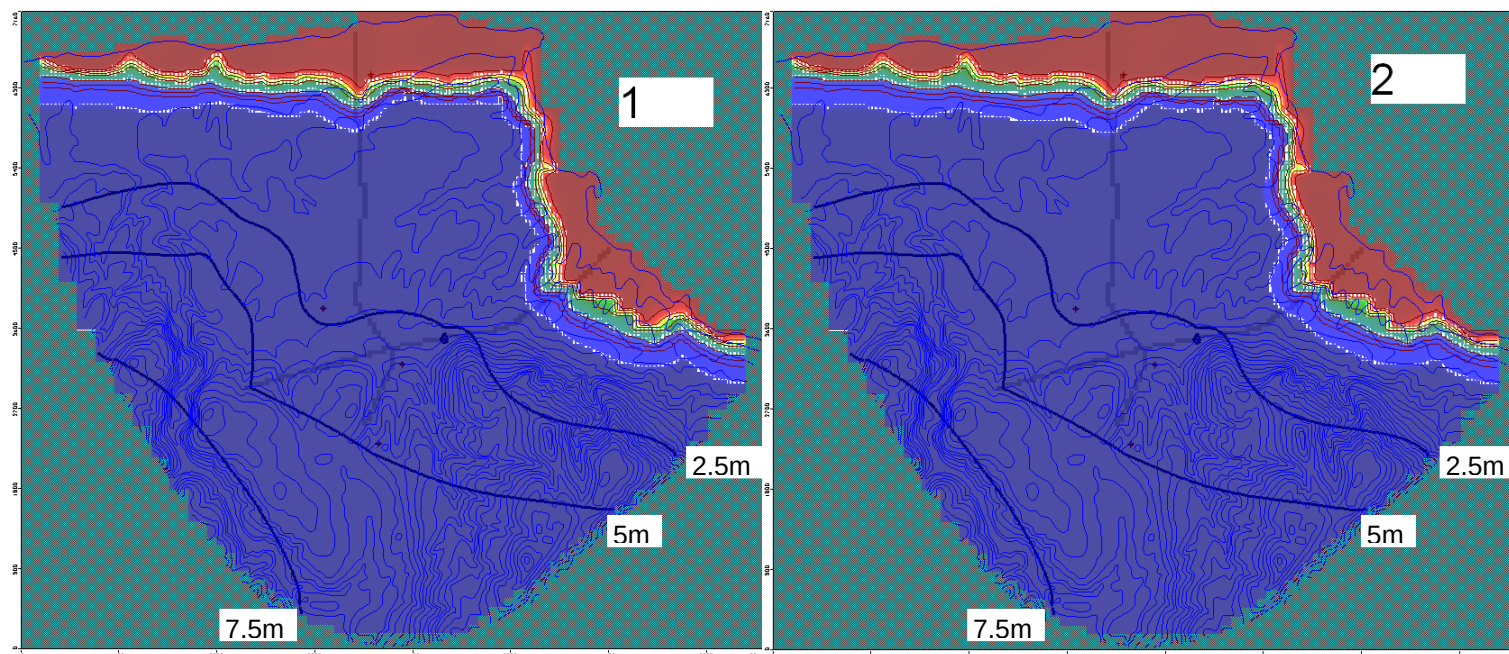


Εικόνα 5.17: Διπλασιασμός παροχών - Δεύτερη Περίπτωση

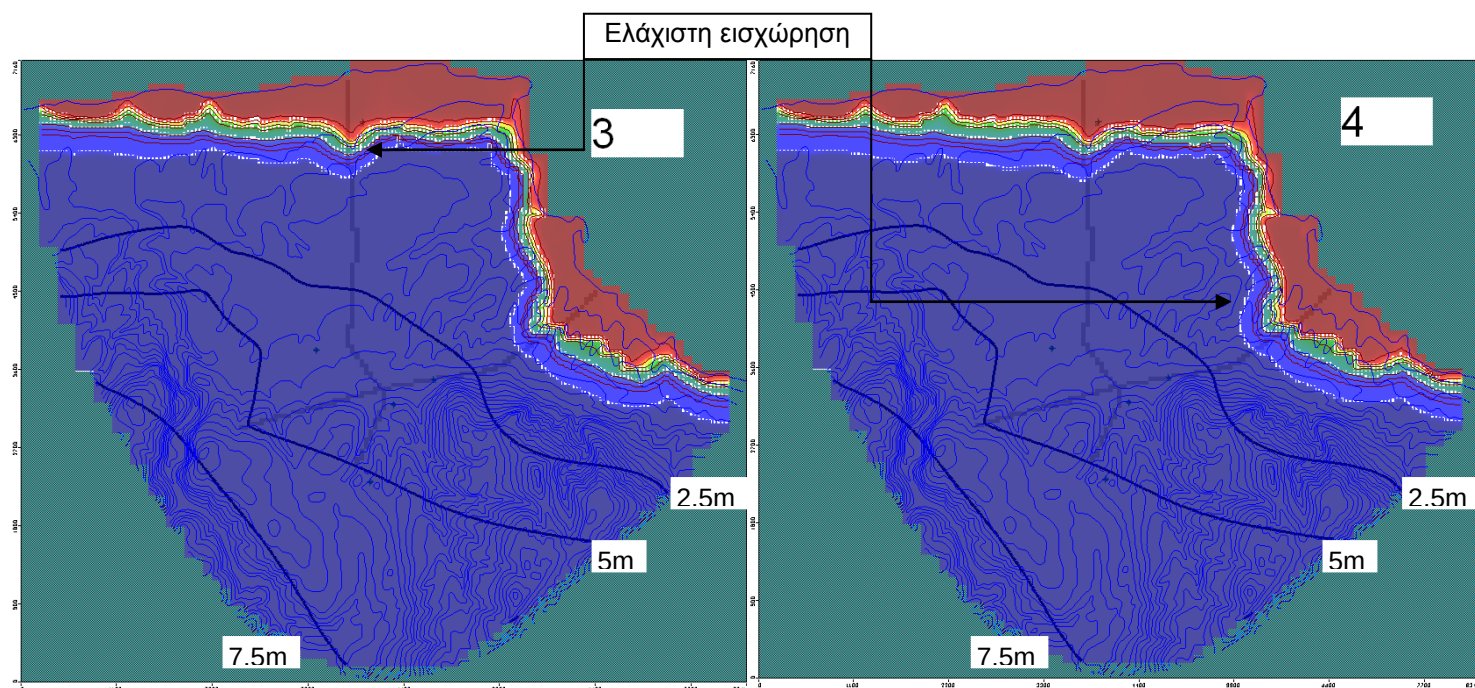
Σενάριο 2

Σε διάστημα 10 ετών

Σε διάστημα 20 ετών



Εικόνα 5.18: Υποδιπλασιασμός παροχών άντλησης - Δεύτερη Περίπτωση



Εικόνα 5.19: Μηδενισμός αντλήσεων - Δεύτερη Περίπτωση

Γενικά, στην δεύτερη περίπτωση που ερευνήθηκε τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αναμενόμενα.

Η παρουσία των ρηγμάτων γίνεται ιδιαίτερα εμφανής, ιδιαίτερα μετά το πέρας των 20 ετών (Εικόνα 5.16 Β).

Η παρουσία των νέων πηγαδιών 1' και 3' (με παροχές αντίστοιχες των πηγαδιών 1 και 3) φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο το μέτωπο της υφαλμύρινης σε σχέση με την υπόθεση του διπλασιασμού των παροχών άντλησης όλων των πηγαδιών (Εικόνες 5.16 και 5.17). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά βρίσκονται πιο κοντά στην ακτή και σύμφωνα πάντα με το μοντέλο, τα πηγάδια αυτά αντλούν υφάλμυρο νερό έστω και αν πρόκειται για ελάχιστες συγκεντρώσεις. Σε αυτό το αποτέλεσμα εκτενέστερη ανάλυση θα παρουσιαστεί στο 6^ο κεφάλαιο.

Στην υπόθεση του διπλασιασμού των παροχών άντλησης (Εικόνα 5.17) τα πηγάδια 1 και 3 βρίσκονται αρκετά μακριά από το μέτωπο της υφαλμύρινης αδυνατώντας έτσι να επηρεάσουν δραστικά την ταχύτητα εισχώρησης του αλμυρού νερού παρά την διπλασία παροχή άντλησης τους. Παρόλα αυτά επηρεάζουν σε ένα μεγάλο βαθμό την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνοντας κατά πολύ το ύψος της.

Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει ότι ακόμα και αν δεν έχουν την δυνατότητα οι γεωτρήσεις σε μια περιοχή να επηρεάσουν την σφήνα της υφαλμύρινης, ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά μετά την πάροδο μερικών ετών εξαιτίας της παρουσίας των ρηγμάτων.

Όσον αφορά το δεύτερο σενάριο, είτε μετά από χρονικό διάστημα 10 ετών είτε 20 ετών, η μείωση ή ο μηδενισμός των αντλήσεων επηρεάζει περισσότερο το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα παρά τον ρυθμό εισχώρησης του αλμυρού νερού.

Η απότομη καμπύλη της ισοπιεζομετρικής καμπύλης των 5 μέτρων για το δεύτερο σενάριο (Εικόνες 5.18 και 5.19) αποδεικνύει ότι το ρήγμα λειτουργεί σαν ανοιχτός αγωγός, γεγονός που συμβάλει αρνητικά στο πρόβλημα της υφαλμύρινης.

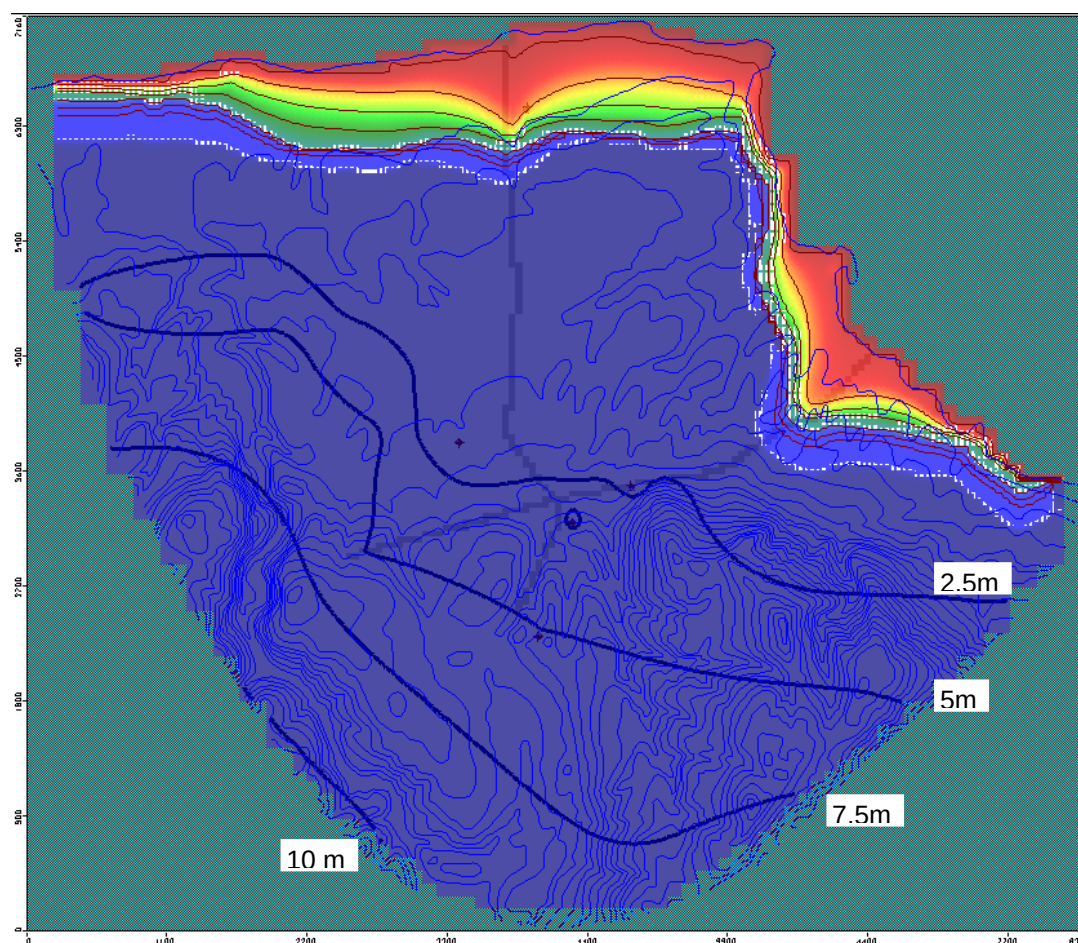
5.6 Τρίτη Περίπτωση (Υπαρξη Ρηγμάτων – Δύο Ζώνες)

Σε αντίθεση με τη Δεύτερη Περίπτωση, στην Τρίτη, το πεδίο μελέτης χωρίστηκε σε δύο ζώνες για καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων

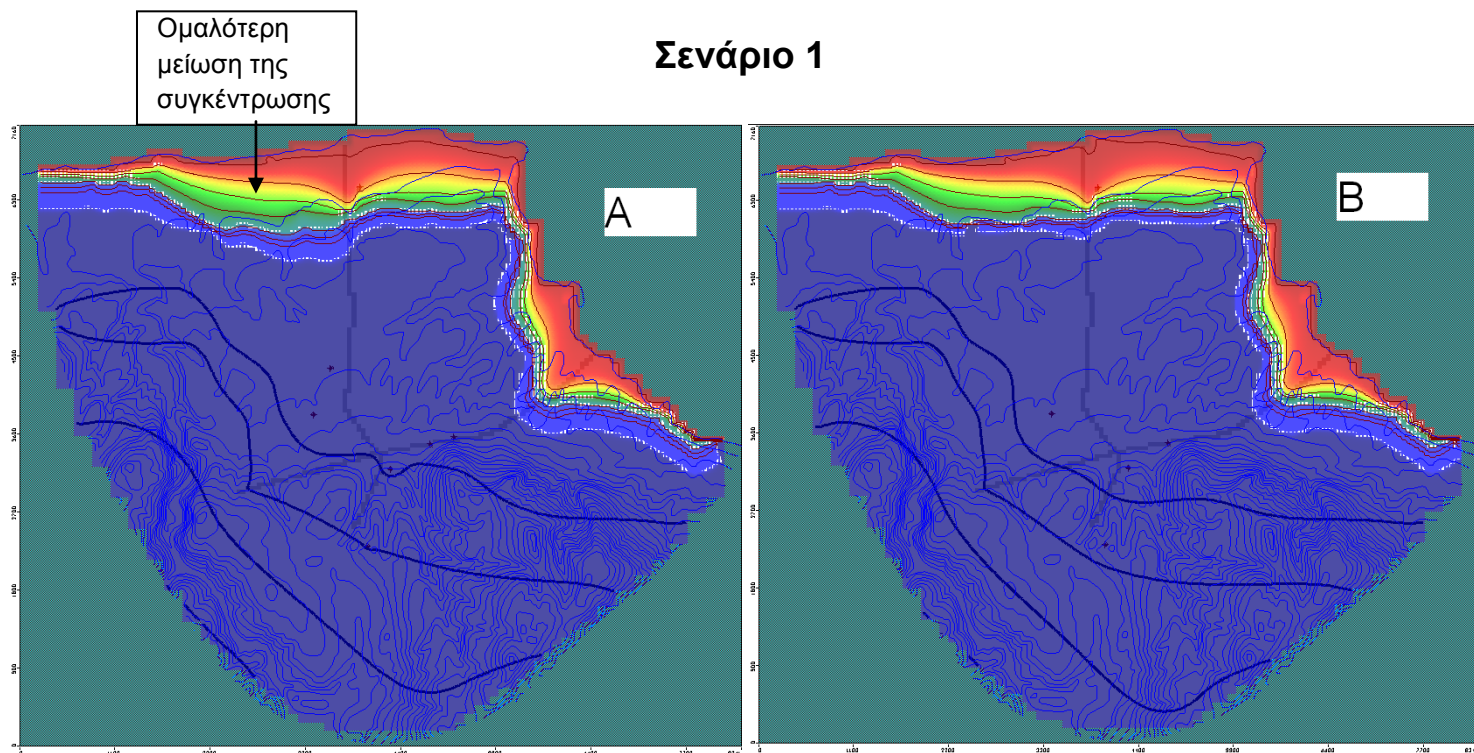
- Στην πρώτη ζώνη, όπου λαμβάνουν χώρα οι εισροές γλυκού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.
- Στην δεύτερη ζώνη, μέσα στην οποία υπάρχουν τα ρήγματα, εισροές από παρακείμενους υδροφορείς και γίνεται η εισχώρηση του θαλασσινού νερού.

Λόγω της στρωματοποίησης της περιοχής στην τρίτη περίπτωση, η απεικόνιση της περιοχής είναι πιο αντιπροσωπευτική.

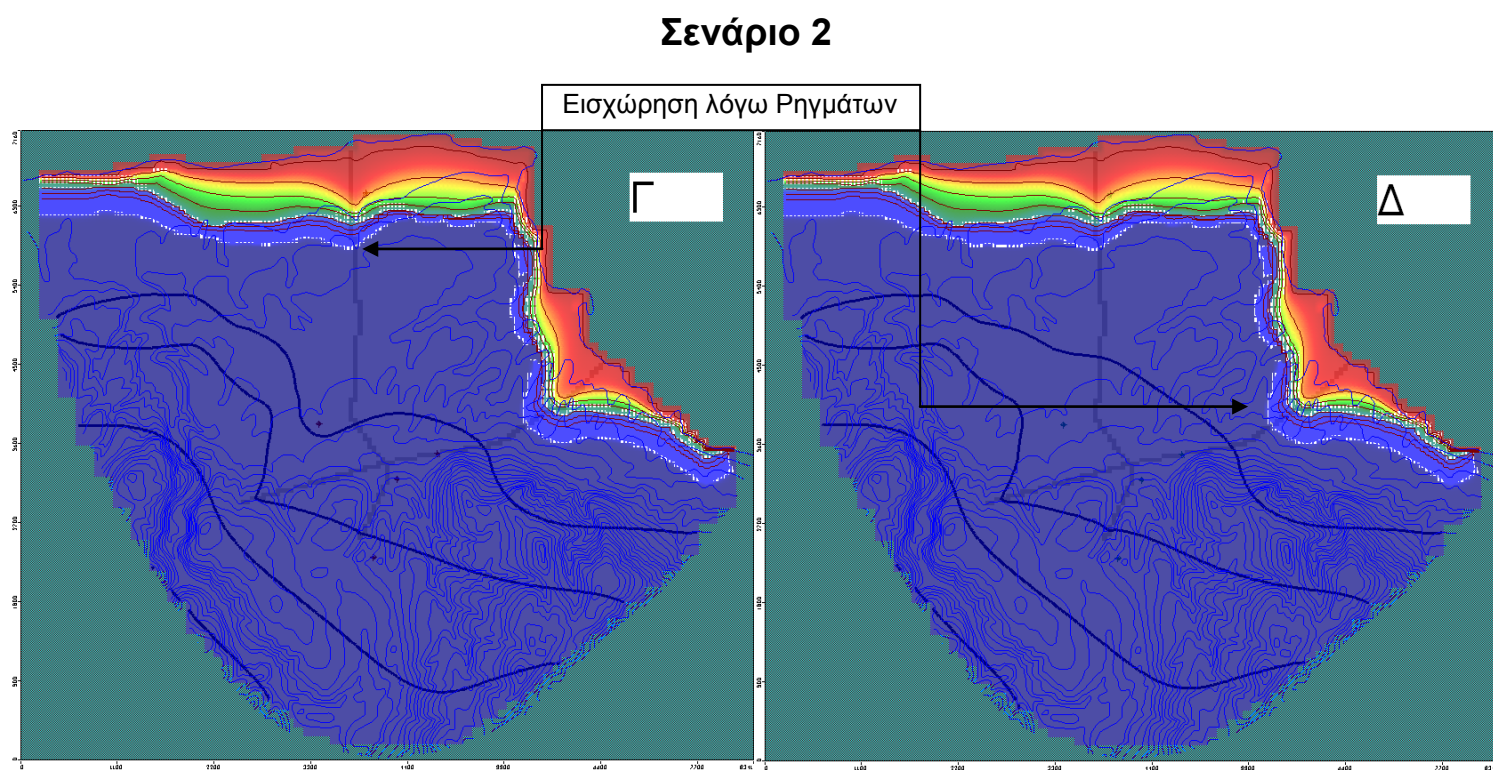
5.6.1 Μεταβολή του μετώπου μετά από 10 χρόνια και μετά την σταθεροποίηση της ροής



Εικόνα 5.20: Μεταβολή σε διάστημα 10 ετών – Τρίτη Περίπτωση



Εικόνα 5.21: Νέα πηγάδια(Α) και Διπλασιασμός παροχών άντλησης(Β)



Εικόνα 5.22: Υποδιπλασιασμός(Γ) και Μηδενισμός(Δ) παροχών άντλησης

Η πρώτη και η δεύτερη περίπτωση (χωρίς την παρουσία και με την παρουσία ρηγμάτων αντίστοιχα) παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα αποδεικνύοντας ότι παρά την ελαχιστοποίηση των αντλήσεων η εισχώρηση του θαλασσινού εξακολουθεί να υφίσταται.

Η πτώση της συγκέντρωσης από την υψηλότερη τιμή της σε τιμές κοντά στα 200 mg/l στη δεύτερη περίπτωση(μία ζώνη) γίνεται πιο απότομα και σε πολύ μικρή απόσταση (Εικόνα 5.7) ενώ στην τρίτη περίπτωση, η προσθήκη μίας ακόμη ζώνης κάνει το μοντέλο να δουλεύει πιο αποδοτικά και να παρουσιάζει πιο λογικά αποτελέσματα, φαίνεται δηλαδή να είναι πιο αντιπροσωπευτικό στη γενικότερη απεικόνιση του φαινομένου μιας και η μείωση της συγκέντρωσης του άλατος γίνεται πιο ομαλά (Εικόνα 5.21 Α).

5.6.2 Εποχιακές μεταβολές

Μια επιπλέον προσέγγιση που θα μελετηθεί είναι το κατά πόσο αλλάζει η εικόνα του υδροφορέα και η σφήνα της υφαλμύρινσης ανάλογα με την εποχή.

Για όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις πάρθηκε ένας μέσος όρος παροχών άντλησης και εισροών(υπόγειες και υπέργειες) για όλο το έτος.

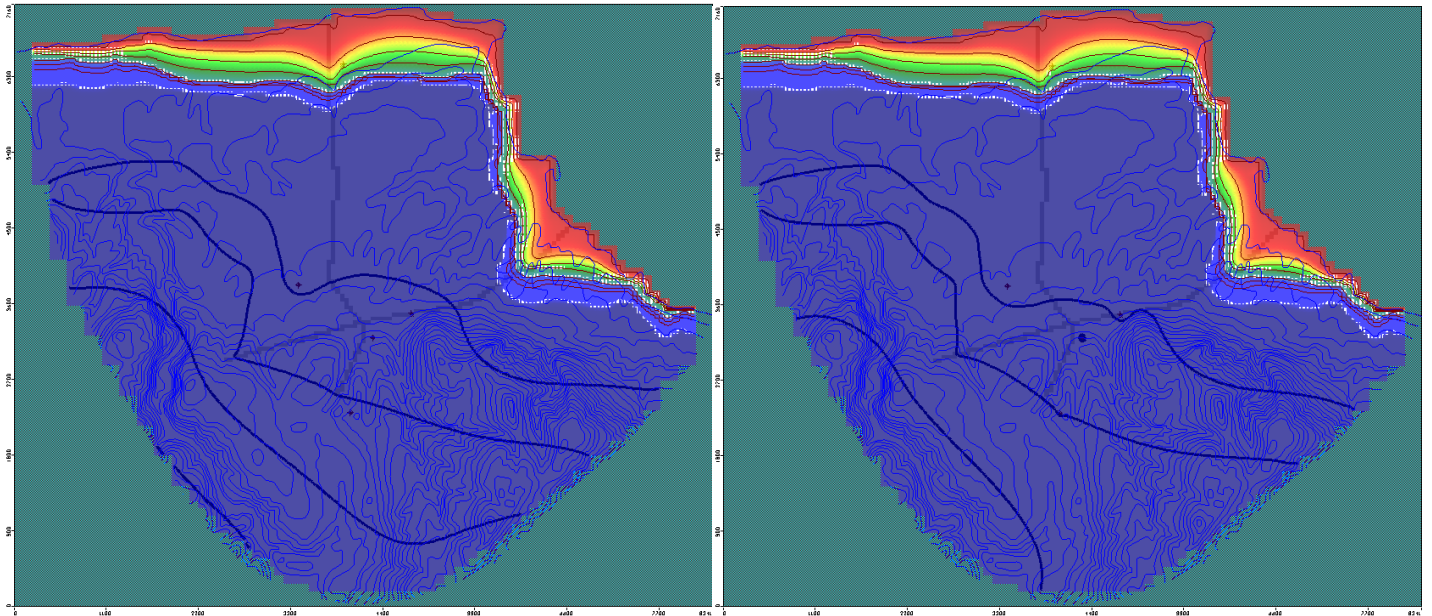
Σε αυτήν την περίπτωση οι παραπάνω τιμές αλλάζουν ανά έξι μήνες και θα γίνει παρουσίαση μόνο του πρώτου και του δέκατου έτους διότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα θα παραμένει η ίδια για κάθε σημείο κάθε φορά που τελειώνει η υγρή περίοδος (Οκτώβριος – Απρίλιος), είτε περάσει ένα είτε δέκα χρόνια.

Και επειδή η εισχώρηση του αλμυρού νερού είναι ελάχιστη. Αντίστοιχη παρουσίαση θα γίνει και για τις θερινές περιόδους.

Μετά το πέρας 1 έτους

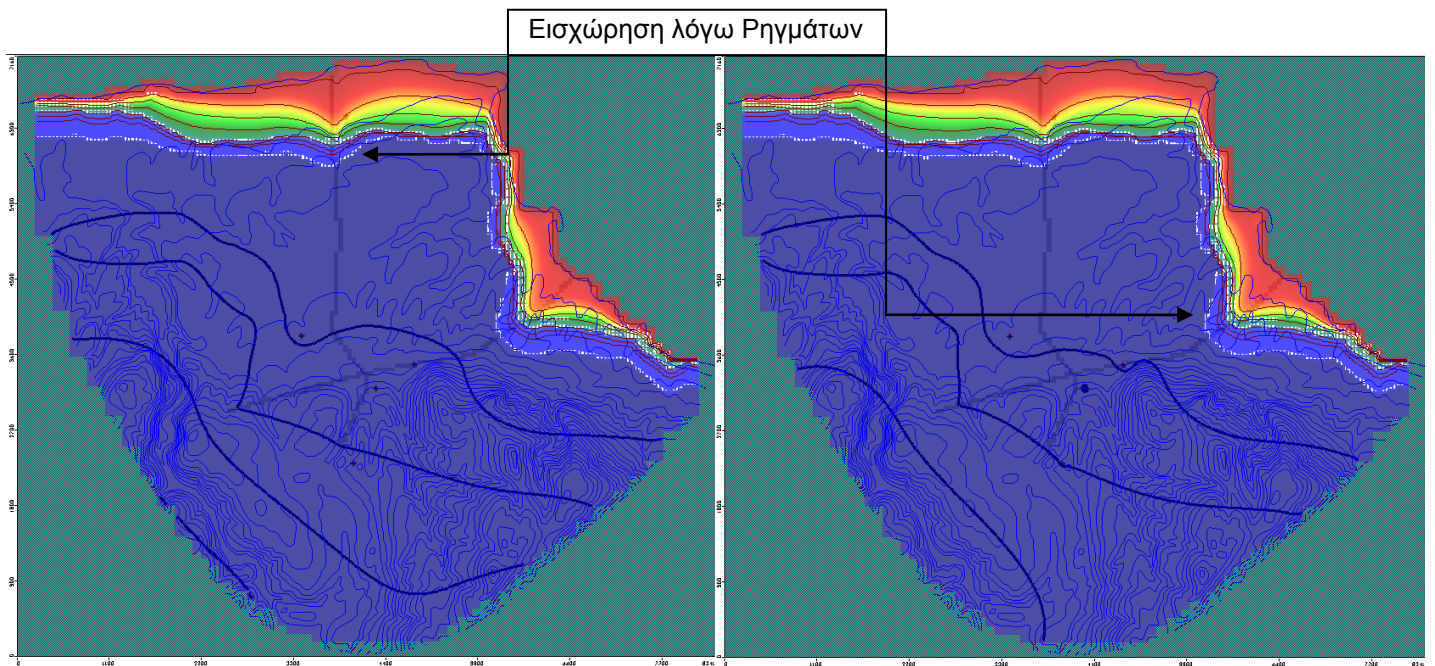
Υγρή Περίοδος

Ξηρή Περίοδος



Εικόνα 5.23: Εποχιακή μεταβολή σε διάστημα ενός έτους

Μετά το πέρας 10 ετών

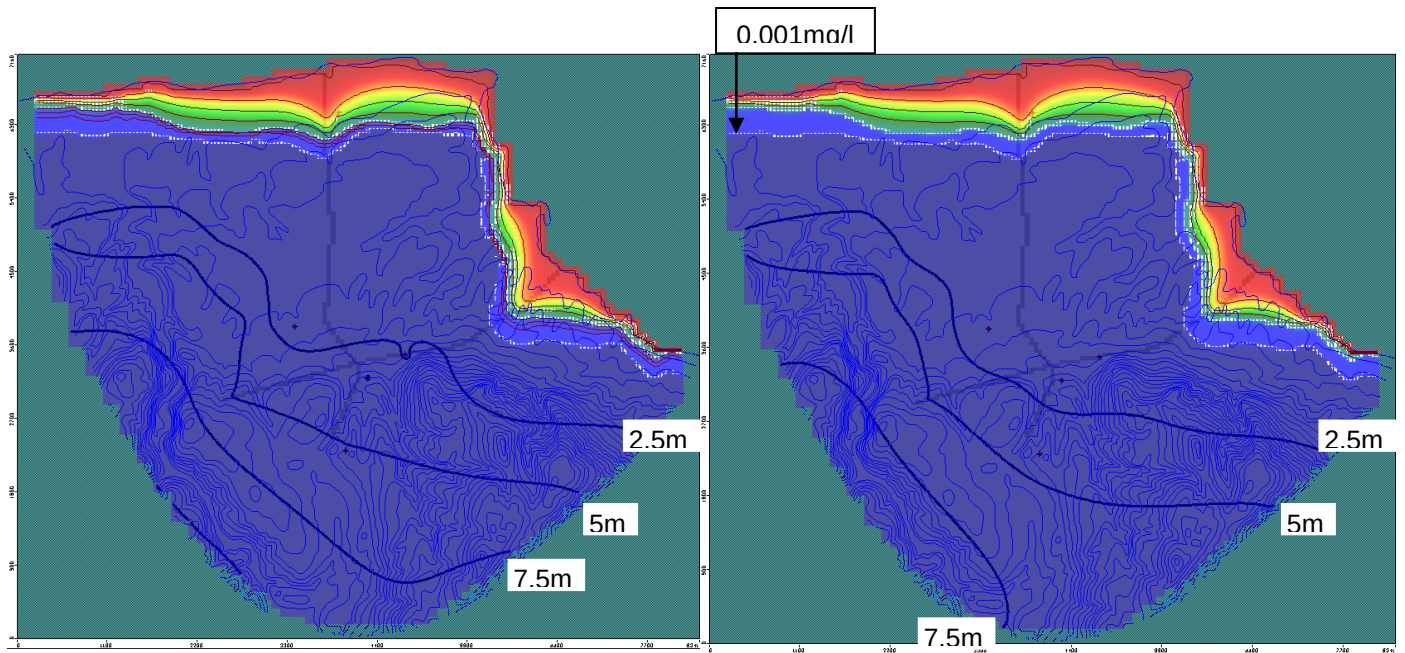


Εικόνα 5.24: Εποχιακή μεταβολή σε διάστημα 10 ετών

Διπλασιασμός αντλήσεων μετά από 1 έτος

Υγρή Περίοδος

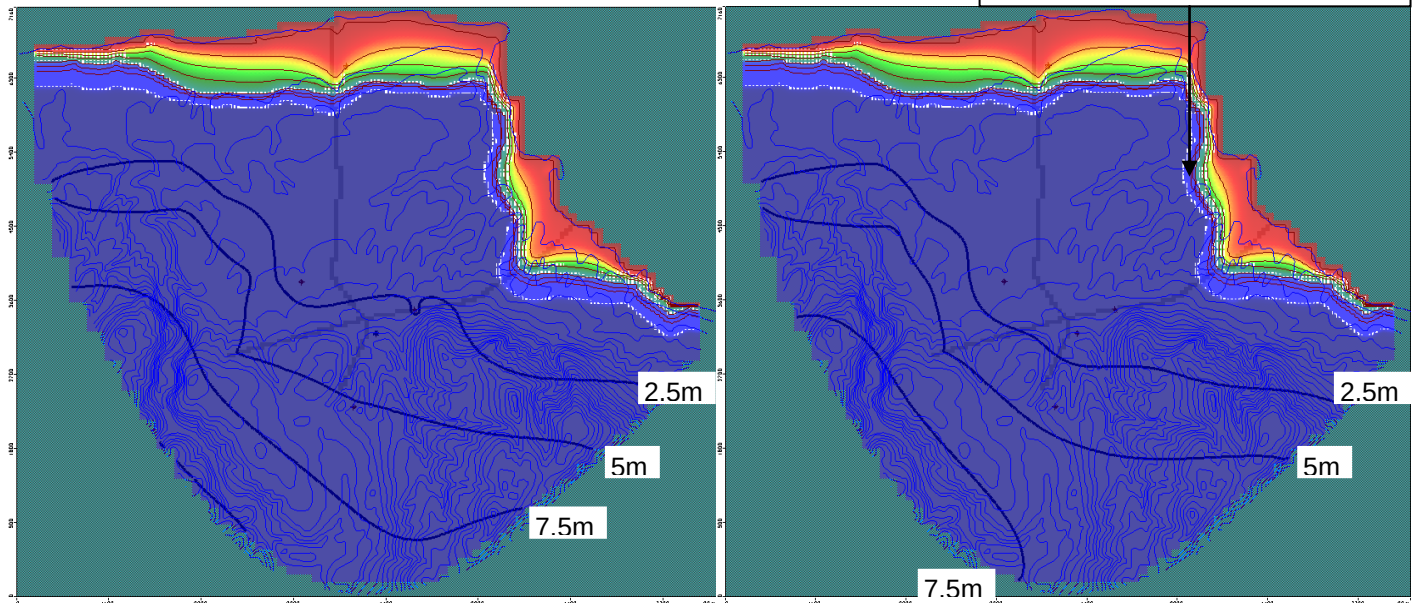
Ξηρή Περίοδος



Εικόνα 5.25: Εποχιακή μεταβολή σε διάστημα ενός χρόνου με διπλασιασμό

Διπλασιασμός αντλήσεων μετά από 10 έτη

Εισχώρηση λόνω Διπλασιασμού



Εικόνα 5.26: Εποχιακή μεταβολή σε διάστημα 10 ετών με διπλασιασμό

Ο ρυθμός εισχώρησης του αλμυρού νερού δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τις διαφορετικές εισροές του υδροφορέα και τις αυξομειώσεις των παροχών κατά τη διάρκεια του έτους.

Εξάλλου οι έξι μήνες είναι μικρό χρονικό διάστημα για να προκαλέσει κάποια εμφανή αλλαγή.

Όλες οι παρουσιάσεις των αποτελεσμάτων γίνονται με ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης τα 0,001mg/l. Στον έλεγχο της μεταβολής του μετώπου υφαλμύρισης ανάλογα με την περίοδο, είτε ξηρή είτε υγρή, θα μπορούσαν να φανούν τυχών αλλαγές στο μέτωπο υφαλμύρισης αν η μικρότερη συγκέντρωση που παρουσιαζόταν ήταν πάρα πολύ μικρή δηλαδή της τάξης των 10^{-15} mg/l.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι μειωμένες εισροές της ξηρής περιόδου και κυρίως οι αυξημένες παροχές άντλησης επέφεραν σημαντικές αλλαγές στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα (πχ εικόνα 5.26, η ισοπιεζομετρική καμπύλη των 2.5 μέτρων μετακινήθηκε αισθητά προς το εσωτερικό της περιοχής) ακόμα κι αν πρόκειται για ένα τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Η επίδραση του διπλασιασμού των παροχών φαίνεται μετά το πέρας 10 ετών, και κυρίως για την ξηρή περίοδο, στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης (Εικόνα 5.26).

Η παρουσία των ρηγμάτων επιδρά αρνητικά στην ποιότητα του αντλούμενου νερού δυσχεραίνοντας το ήδη υπάρχων πρόβλημα της υφαλμύρισης καθιστώντας απαραίτητη την επιβολή υδατικής πολιτικής και ορθολογικής διαχείρισης.

Βιβλιογραφία

Για τις τιμές των παροχών άντλησης, των στάθμεων του υδροφόρου ορίζοντα εντός και εντός ρηγμάτων, των εισροών και εκροών χρησιμοποιήθηκε το ερευνητικό έργο “ Μοντελοποίηση υπόγειας ροής, Αναχαίτιση υφαλμύρισης στη περιοχή Χερσονήσου Νομού Ηρακλείου” Παπακωνσταντίνου Κ. (2005) Γεωλόγος-Μηχανικός Πετρελαίων.

[1] Κοσσίδα Μάγκυ 2004 Υπόγεια Νερά και Μοντέλα Προσομοίωσης Εφαρμογή MODFLOW, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[2] Χαλμούκης (2007) Εφαρμογή της Γεωστατιστικής Μεθόδου Kriging για τον Προσδιορισμό της Υδραυλικής Αγωγιμότητας του Υπόγειου Υδροφορέα στην Περιοχή Χερσονήσου του Ηρακλείου Κρήτης.

6.Συμπεράσματα – Προτάσεις

Βασική προϋπόθεση για την για την διεξαγωγή συμπερασμάτων και τρόπων ελαχιστοποίησης της εισχώρησης του αλμυρού νερού είναι η επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου. Γεγονός που θα επιτρέψει την περαιτέρω μελέτη στην συγκεκριμένη περιοχή αλλά και την εξέλιξη του μοντέλου όπως και την χρήση του για παρόμοιες μελέτες σε παράκτιες περιοχές.

6.1 Αποτελεσματικότητα του Seawat

Το Modflow δέχεται μια πλειάδα τιμών και παραγόντων δίνοντας το ανάλογο αποτέλεσμα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι η θέση του μετώπου της υφαλμύρισης. Το κατά πόσο αποτελεσματικό είναι το αποτέλεσμα και κατ' επέκταση ο κώδικας προσομοίωσης Seawat γίνεται μέσω της επαλήθευσης. Αφού όμως, δεν υπάρχουν επίσημα στοιχεία για τα χλωριόντα του υπογείου νερού της περιοχής μελέτης, έγινε η παραδοχή της επαλήθευσης μέσω του νόμου των Ghyben – Herzberg.

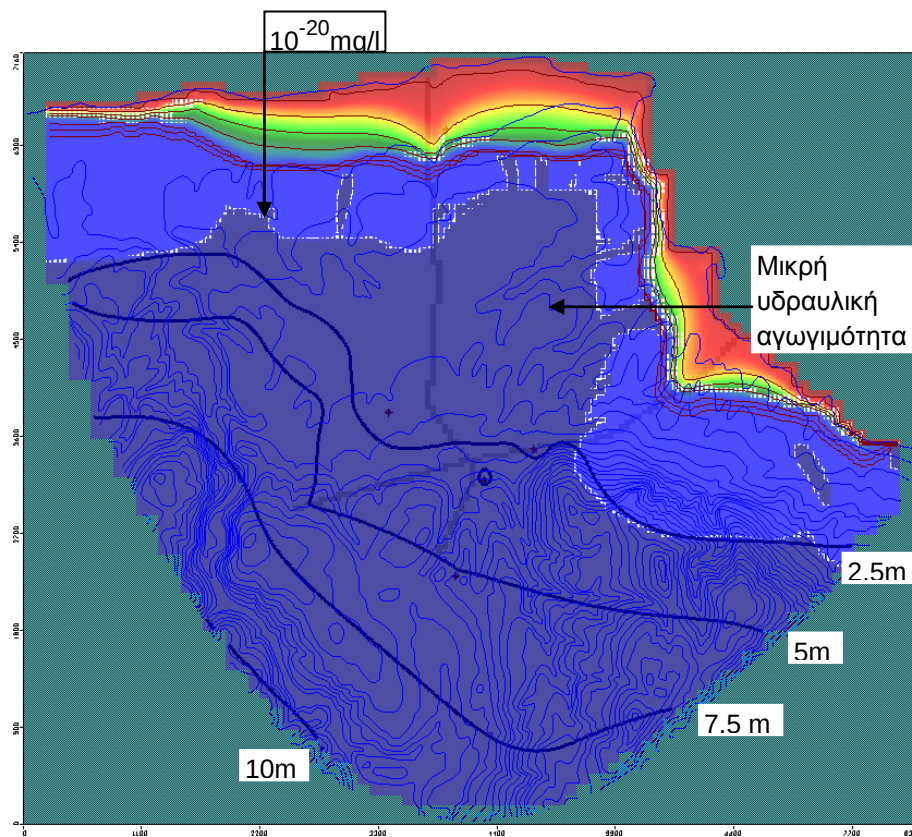
Σαν “μύτη – πόδας” της υφαλμύρισης ορίζεται το σύνολο των σημείων στο οποίο βρίσκεται το όριο γλυκού - αλμυρού νερού.

Αν και η τιμή που χρησιμοποιήθηκε σαν κατώτατη (0.001mg/l) στην μέχρι τώρα παρουσίαση των αποτελεσμάτων ήταν αρκετά χαμηλή, δεν παύει να χαρακτηρίζει το νερό ως υφάλμυρο.

Για τον λόγο αυτό πρέπει να υπάρξει στην κάτοψη ένα σύνολο σημείων με συγκέντρωση που τείνει στα 0mg/l και να συγκριθεί η θέση του με την κατάλληλη ισοπιεζομετρική καμπύλη που επαληθεύει τον παραπάνω νόμο.

Στην περιοχή της Χερσονήσου το ύψος της επιφάνειας της θάλασσας είναι 100 μέτρα (θεωρούμε τον πυθμένα της θάλασσας σαν επίπεδο αναφοράς), άρα η σφήνα της υφαλμύρινης πρέπει να βρίσκεται κάτω από την ισοπιεζομετρική καμπύλη των 2.5 μέτρων (Σύμφωνα με την εξίσωση Ghyben-Herzberg).

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την γραμμή της συγκέντρωσης 10^{-20} mg/l, η οποία βρίσκεται κάτω από την ισοπιεζομετρική καμπύλη των 2.5 μέτρων εκτός από το κεντρικό τμήμα της περιοχής που η μικρή υδραυλική αγωγιμότητα εμποδίζει την είσοδο του αλμυρού νερού.



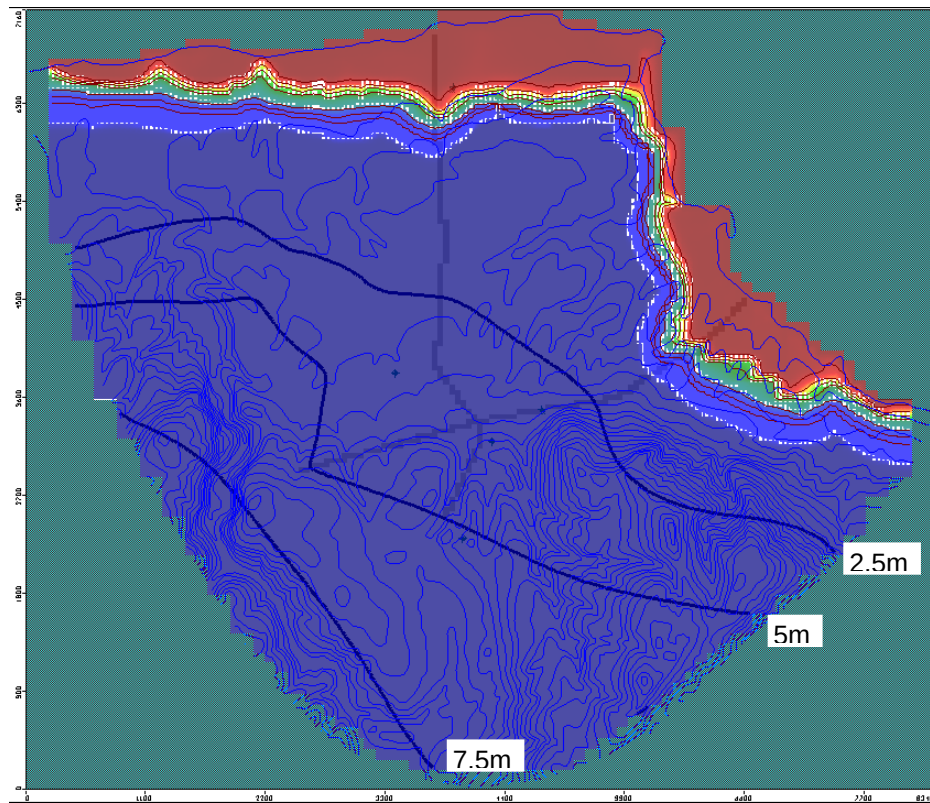
Εικόνα 6.1: Σχέση σφήνας υφαλμύρινης και στάθμη υδροφορέα

6.2 Συμπεράσματα

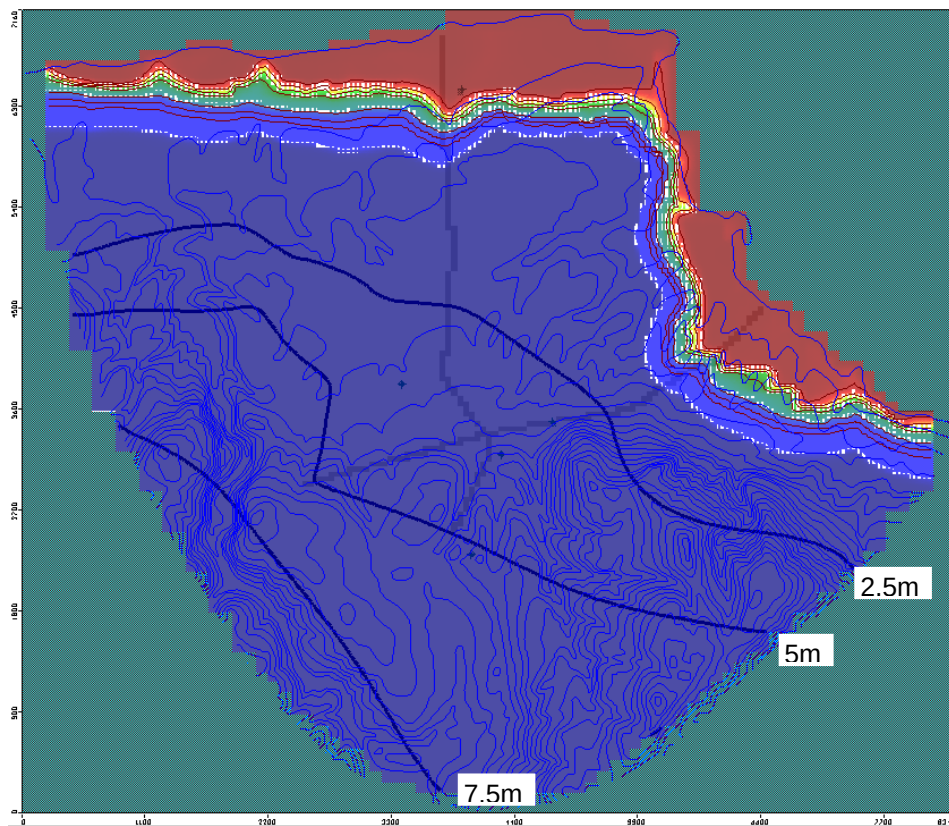
Σύμφωνα με τα δεδομένα για το πλήθος και την τοποθεσία των πηγαδιών άντλησης προκύπτει ότι ο ρυθμός εισχώρησης του αλμυρού νερού επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Τα πηγάδια βρίσκονται αρκετά μακριά από το μέτωπο της υφαλμύρισης για να έχουν άμεση επιρροή σε αυτό.

Στην δεύτερη περίπτωση (ύπαρξη ρηγμάτων) το πρόγραμμα παρουσιάζει την μορφή του υδροφορέα χωρίς καμία άντληση (δεύτερο σενάριο) για 10 χρόνια και για 20 χρόνια (εικόνες 6.2 και 6.3). Παρόλη την παντελή απουσία αντλήσεων για ένα τόσο μεγάλο χρονικό διάστημα το μέτωπο της υφαλμύρισης συνεχίζει να κινείται. Γεγονός που αποδεικνύει ότι ακόμα και αν δεν έχουν την δυνατότητα οι γεωτρήσεις σε μια περιοχή να επηρεάσουν άμεσα την σφήνα της υφαλμύρισης, το μέτωπο της υφαλμύρισης μπορεί να εισχωρήσει στην ηπειρωτική περιοχή μετά την πάροδο μερικών ετών εξαιτίας της παρουσίας των ρηγμάτων. Επίσης η απότομη καμπύλη της ισοπιεζομετρικής καμπύλης των 5 μέτρων για το δεύτερο σενάριο (Εικόνες 5.18 και 5.19) αποδεικνύει ότι το ρήγμα λειτουργεί σαν ανοιχτός αγωγός, γεγονός που συμβάλει αρνητικά στο πρόβλημα της υφαλμύρισης.



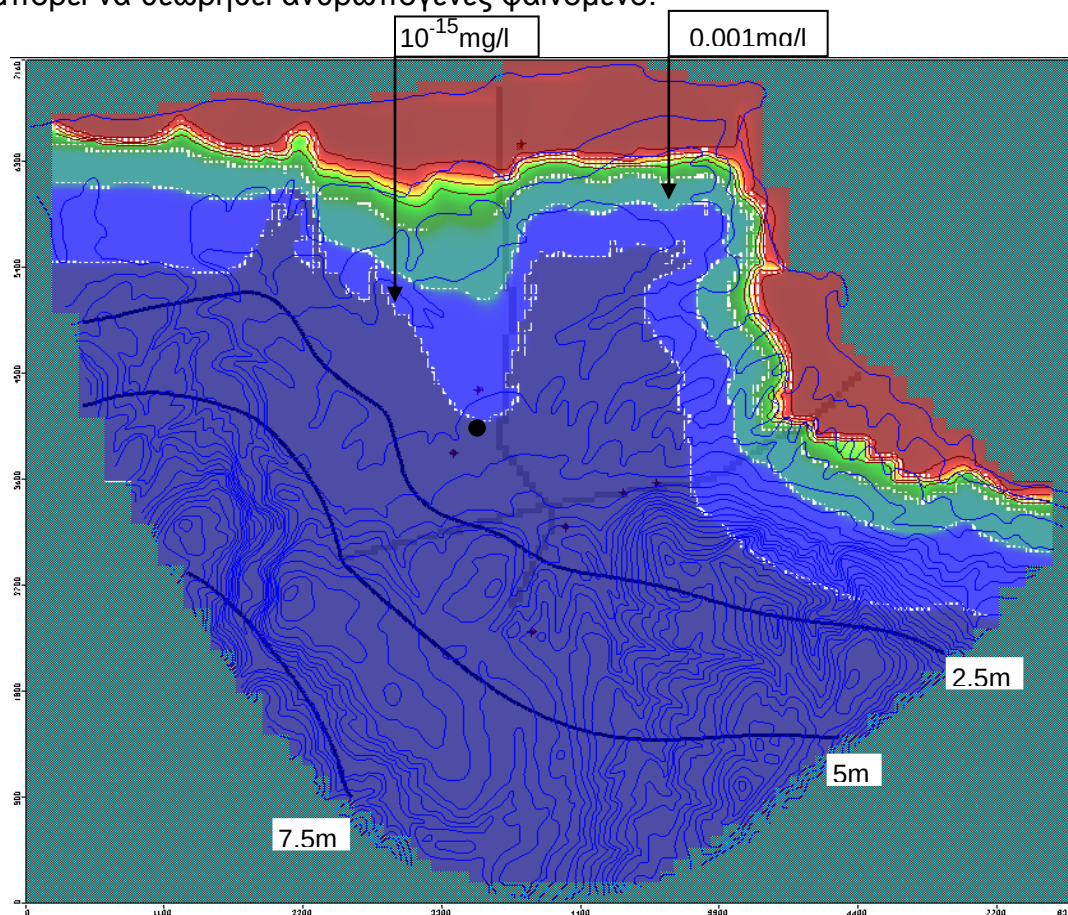
Εικόνα 6.2: Μηδενισμός παροχών αντλήσεων για διάστημα 10 ετών



Εικόνα 6.3: Μηδενισμός παροχών αντλήσεων για διάστημα 20 ετών

Μόνο αν υποθέσουμε ότι υπάρχει μια αρνητική διαχείριση, των αποθεμάτων νερού (διπλασιασμός παροχών, νέα πηγάδια), φαίνεται να επηρεάζεται ο ρυθμός εισχώρησης.

Στην περίπτωση δημιουργίας νέων πηγαδιών πιο κοντά, από τα υπόλοιπα (πρώτο σενάριο), στην ακτή και μετά από 20 χρόνια, η θέση του μετώπου μπορεί να θεωρηθεί ανθρωπογενές φαινόμενο.



Εικόνα 6.4: Δημιουργία νέων πηγαδιών για διάστημα 20 ετών

Η συγκέντρωση που φαίνεται ότι αντλεί το πηγάδι 1' είναι 10^{-15} mg/l. Αρκετά μικρή για να απαγορευτεί η άντληση, αλλά το γεγονός ότι ένα πηγάδι αντλεί υφάλμυρο νερό αυτής της συγκέντρωσης τότε σε μερικά χρόνια η συγκέντρωση ενδεχομένως να αυξηθεί σε σημείο όπου μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλο για άρδευση γιατί όταν αντλεί και την ελάχιστη ποσότητα υφάλμυρου νερού συμβάλει άμεσα στην αύξηση του ρυθμού εισχώρησης του αλμυρού νερού στο υδροφόρα.

Συνεπώς η εξάλειψη ή ο περιορισμός του προβλήματος απαιτεί δραστικά μέτρα.

6.3 Προτάσεις

Κυρίαρχο φαινόμενο που παρατηρείται στο ελλαδικό χώρο είναι αφενός η μείωση των γεωλογικών αποθεμάτων νερού και αφετέρου η υφαλμύρινηση, φαινόμενα, που σαν γενεσιουργό αιτία έχουν τον ανθρώπινο παράγοντα και τις σύγχρονες δραστηριότητές του στην παράκτια ζώνη. Οι δραστηριότητες αυτές μειώνουν τα αποθέματα νερού και παράλληλα ρυπαίνουν (με τη διείσδυση του θαλάσσιου μετώπου στην ενδοχώρα) τους υδροφορείς, με τελικό αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των διαθεσίμων αποθεμάτων του. Κατά συνέπεια, η γνώση αυτών των αποθεμάτων που βρίσκονται μέσα στους φυσικούς ταμιευτήρες είναι αυτονόητη και απαραίτητη, έτσι ώστε να γίνει εφικτό και πραγματοποιήσιμο το οποιαδήποτε σχέδιο ορθολογικής εκμετάλλευσης και προστασίας τους.

Το φαινόμενο της υφαλμύρινης απαντά σ' όλους τους τύπους των υδροφόρων στρωμάτων, έχει δε μεγαλύτερη ένταση στις περιπτώσεις όπου τα υδροφόρα στρώματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα. Η επίλυση του προβλήματος λοιπόν, αφενός της διαχείρισης, της διατήρησης της καλής ποιότητας των υδατικών πόρων και η σταδιακή αποκατάσταση αφετέρου της διαταραγμένης ισορροπίας γλυκού - αλμυρού νερού καθίσταται απαραίτητη και αναγκαία.

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που εμπλέκονται στις μεθόδους προστασίας των υπόγειων νερών από τη θαλάσσια διείσδυση, όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα, το νομικό καθεστώς, οι απαιτήσεις για την ύπαρξη αποχέτευσης και ισορροπίας των αλάτων, οι δυνατότητες συντήρησης των πλημμυρικών απορροών η αποθηκευτική ικανότητα κ.α. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να αξιολογηθούν, όταν σκοπεύουμε να επιλέξουμε την μέθοδο που παρέχει τα περισσότερα πλεονεκτήματα για τον έλεγχο της θαλάσσιας διείσδυσης. Η μελέτη των παραγόντων αυτών (φυσικών και τεχνητών) που διαταράσσουν την υδραυλική ισορροπία της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού είναι το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό μιας επιτυχούς μεθόδου ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης, [1].

Η λύση του προβλήματος γίνεται όλο και πιο δύσκολη σε περιοχές επιρρεπείς στην ξηρασία μιας και αυξάνεται συνεχώς η κατανάλωση νερού. Η κατάσταση αυτή, θα συνεχίσει να γίνεται περισσότερο σοβαρή μελλοντικά, δεδομένου ότι προβλέπεται αύξηση της ζήτησης νερού για τα επόμενα χρόνια, μιας και είναι δεδομένη η τουριστική ανάπτυξη, η κατασκευή μεγάλων ξενοδοχειακών συγκροτημάτων, μαρίνων και λοιπών υδροφόρων δραστηριοτήτων.

Για τον περιορισμό του κινδύνου αλλοίωσης της ποιότητας του αντλούμενου νερού, οι αντλήσεις θα πρέπει να γίνονται με μικρές παροχές της τάξης των 15 m³/h και περιορισμένες σε έκταση περιόδους (12-14 ώρες/24ωρο). Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλές περιπτώσεις η υφαλμύριση των υδροφόρων είναι φαινόμενο συχνά μη αντιστρεπτό και αν πάση περιπτώσει η απορρύπανσή τους είναι εξαιρετικά δαπανηρή και δύσκολη, [2].

Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν προκειμένου να εξαλειφτεί ή έστω να περιοριστεί σε όσο μεγαλύτερο βαθμό γίνεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι η επιβολή υδατικής πολιτικής και ορθολογικής διαχείρισης που θα έχει τους εξής στόχους:

- Την προστασία των υδατικών πόρων από την πρόωρη εξάντληση και υφαλμύριση.
- Την δημιουργία χαμηλότοκου χρηματοδοτικού προγράμματος και υπηρεσίας διαχείρισης του, για την κάλυψη όλων των απαιτούμενων αγορών και την υλοποίηση των εγχειρημάτων στα πλαίσια της επίτευξης των στόχων.
- Την κατασκευή υδραυλικών φραγμών γλυκού νερού κοντά στην ακτή, για τους υπόγειους υδροφόρους που έχουν ήδη υφαλμυρινθεί, και γενικότερα επιβολή σωστής διαχείρισης για την αποκατάσταση της διαταραγμένης ισορροπίας γλυκού - αλμυρού νερού.
- Την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων, την παρέμβαση και την διακοπή λειτουργίας στην περίπτωση υπερεκμετάλλευσης και μη εγκεκριμένων υδροληπτικών έργων καθώς και την επιβολή αυστηρών κυρώσεων στους παραβάτες.

- Ένα διαχειριστικό πρόγραμμα για την συστηματική παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

- Το σχεδιασμό και την εκτέλεση έργων σύλληψης, αποθήκευσης και διανομής του νερού με κύριο σκοπό την αξιοποίηση των επιφανειακών απορροών.

- Την απαγόρευση της τσιμεντόστρωσης και της ασφαλτόστρωσης υδατορεμάτων γιατί με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η επιφανειακή απορροή.

- Την προμήθεια με νερό σε επαρκή ποσότητα και όσο το δυνατόν ικανοποιητική ποιότητα, ανάλογα με τις χρήσεις (ύδρευση άρδευση, τουρισμός).

- Τη δημιουργία προϋποθέσεων για την αντιμετώπιση ακραίων υδρογεωλογικών φαινομένων.

- Την προσπάθεια ευαισθητοποίησης του κοινωνικού συνόλου με σκοπό την αλλαγή στην νοοτροπία του κοινωνικού συνόλου όσον αφορά τη χρήση των υδατικών πόρων.

- Την εφαρμογή μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού ως μέσον ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης, έτσι έχουμε μια αύξηση της υδραυλικής κλίσης στην περιοχή εμπλουτισμού και μια αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς την κατεύθυνση της θάλασσας στην περιοχή ανάμεσα στις γεωτρήσεις άντλησης και τη θάλασσα.

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους αντιμετώπισης της υπαλμύρινης είναι ο εξορθολογισμός της άντλησης, ο συνολικός όγκος της οποίας δε θα πρέπει να υπερβαίνει τη φυσική αναπλήρωση σε νερό.

6.3.1 Τεχνητός εμπλουτισμός

Σε μια λεκάνη ή περιοχή, υπό φυσικές συνθήκες, χωρίς παρέμβαση του ανθρώπου, το νερό των κατακρημνισμάτων που φθάνει στα υδροφόρα στρώματα και τα τροφοδοτεί, είτε άμεσα με την κατείσδυση, είτε έμμεσα με τη διήθηση από τις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου, είναι ο φυσικός εμπλουτισμός. Το ύψος του είναι ορισμένο κάθε υδρολογικό έτος και εξαρτάται από τη γεωλογική σύσταση, από το βροχομετρικό ύψος και το βροχομετρικό σύστημα (ετήσια κατανομή της βροχής). Ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ποσότητα αυτή του νερού, να προκαλέσει δηλαδή «τεχνητό εμπλουτισμό». Επομένως ως τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την αύξηση των ποσοτήτων μετεωρικού νερού που εισέρχεται στα υδροφόρα στρώματα με χρήση διαδικασιών, τεχνικών, εγκαταστάσεων - διατάξεων από τον άνθρωπο. Στην πιο ευρεία έννοια θα λέγαμε ότι τεχνητός εμπλουτισμός είναι η εισαγωγή πρόσθετων ποσοτήτων νερού στα υδροφόρα στρώματα.

Η αναπλήρωση γίνεται συνήθως με δύο τρόπους. Με χρήση φυσικών υδάτων, Το πρόσθετο αυτό νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακό νερό ή από νερό από παρακείμενα υδροφόρα στρώματα, [3]. Εναλλακτικά με χρήση επεξεργασμένων υγρών λυμάτων (μετά από τριτοβάθμια επεξεργασία σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού) και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εκροής του υδροφορέα και την απώθηση του μετώπου του θαλασσινού νερού. Η χρήση επεξεργασμένων απόβλητων από τη βιομηχανία μπορεί να αποδειχθούν πιο οικονομική λύση από την άντληση ειδικά όταν αυτή γίνεται από μεγάλο βάθος. Ιδιαίτερα αν ο εμπλουτισμός λαμβάνει χώρα κοντά στην ακτή, συχνά δημιουργείται ένα τοπικό φράγμα φρέσκου νερού, το οποίο προστατεύει την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα στην ενδοχώρα.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνητού εμπλουτισμού.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός έχει πολλές θετικές επιπτώσεις καθώς συντελεί στη βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, στη προστασία της ύπαρξης και της λειτουργίας πηγών και υδροτόπων. στην αποφυγή συνίζησης και άρα ποσοτικής υποβάθμισης υδροφορέων, στην αποφυγή ή αναχαίτιση διείσδυσης θαλασσινού νερού στα παράκτια υδροφόρα στρώματα. Επίσης οι υπόγειοι ταμιευτήρες δεν διατρέχουν τους κινδύνους φυσικών καταστροφών των επιφανειακών ταμιευτήρων (κατολισθήσεις, πλημμύρες, άμεσες μολύνσεις κλπ). Δεν αχρηστεύεται λόγω υπεράντλησης τυχόν υπάρχουσα υποδομή από γεωτρήσεις, αγωγούς κλπ. Μειώνονται οι απώλειες νερού από εξατμίσεις.

Όμως εκτός από πλεονεκτήματα υπάρχουν και μειονεκτήματα, απαιτείται συνεχής και επιμελής παρακολούθηση των συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού. Υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης - ρύπανσης υπόγειου νερού, αν έστω και μια φορά, χρησιμοποιηθεί μολυσμένο-ρυπασμένο νερό. Δεν συναντώνται συχνά στη φύση κατάλληλες συνθήκες υπό οικονομικά συμφέροντες όρους για εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού. Συχνά παρατηρείται υποβάθμιση της αποδοτικότητας του εδάφους και υποβάθμιση του υπόγειου νερού, που προκαλείται από τον τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων, λόγω μεταφοράς αλάτων κατά την επέκταση προς τα πάνω της κορεσμένης ζώνης, [1].

Άλλες μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος είναι οι παρακάτω:

- Δημιουργία υπόγειου φράγματος

Η κατασκευή ενός στεγανού διαφράγματος, παράλληλα προς την ακτή και σε όλο το πάχος του υδροφόρου εμποδίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Τα κύρια προβλήματα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η ευπάθεια του φράγματος στους σεισμούς και τη χημική διάβρωση.

- Φραγμός από υπεράντληση στην ακτή

Η συνεχής άντληση από μια σειρά γεωτρήσεων κοντά στη θάλασσα, προκαλεί ροή του θαλασσινού νερού προς τη συστοιχία των πηγαδιών, ενώ το γλυκό νερό ρέει από το εσωτερικό της λεκάνης προς τη θάλασσα (προς τα πηγάδια άντλησης). Το αντλούμενο υφάλμυρο νερό ρίχνεται στη θάλασσα.

- Οριζόντια πηγάδια

Αξιοποιούν τα λεπτά στρώματα γλυκού νερού που βρίσκονται πάνω από υφάλμυρους υδροφορείς.

6.4 Επίλογος

Σε κάθε μαθηματικό ομοίωμα, απαιτείται η γνώση των παραδοχών και περιορισμών που αυτό εμπεριέχει, καθώς επίσης και η σε βάθος αξιολόγηση των δυνατοτήτων του.

Το πρόγραμμα Visual-Modflow σε συνεργασία με τον κώδικα Seawat προσομοίωσε επιτυχώς το μέτωπο της υφαλμύρισης, στην περιοχή της Χερσονήσου, και την επίδραση των ρηγμάτων στην εξέλιξή του.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η κάτοψη του μετώπου της υφαλμύρισης στην περίπτωση όπου η περιοχή μελέτης ήταν χωρισμένη σε δύο ζώνες και αποδείχθηκε πιο ρεαλιστική σε σχέση με την δεύτερη περίπτωση (μία ζώνη). Επομένως υπάρχει η πιθανότητα το πλήθος των ζωνών της περιοχής μελέτης να είναι ανάλογο της ποιότητας της απεικόνισης του μετώπου της υφαλμύρισης.

Συμπερασματικά, καθοριστικό ρόλο στην εισχώρηση του αλμυρού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα έχουν τα ρήγματα τα οποία δυσχεραίνουν το πρόβλημα της υφαλμύρισης όταν η παρουσία τους συνδυαστεί με υψηλές αντλήσεις, αλλά και χωρίς την ύπαρξη πηγαδιών άντλησης επηρεάζουν αρνητικά το μέτωπο της υφαλμύρισης λόγω της υψηλής τους υδραυλικής αγωγιμότητας.

Βιβλιογραφία

- [1] Διαμαντής, Ι.-Πλιάκας, Φ.-Πεταλάς, Χ. (1999). Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέα της περιοχής Βαφείκων του Νομού Ξάνθης.
- [2] Καλλέργης, Γ. 1986, .Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία., Εκδόσεις ΤΕΕ.
- [3] Σούλιος Γ. 1996 Γενική Υδρογεωλογία, Πρώτος τόμος, Ανατύπωση. University Studio Press, Θεσσαλονίκη.