

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών  
Υγειονομική και Περιβαλλοντική Μηχανική  
Διπλωματική Εργασία

Μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης με  
χρήση του μοντέλου SWI2:  
Εφαρμογή σε παράκτιο υδροφορέα της  
Χερσονήσου

Αθηνά Παππά

Εξεταστική επιτροπή

Γεώργιος Καρατζάς (επιβλέπων)  
Νικόλαος Νικολαΐδης  
Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Χανιά, Ιούλιος 2015

## **Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γ.Π. Καρατζά, καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την πολύτιμη βοήθειά του καθώς και για την ευδόκιμη καθηγεσία του στα θέματα υδάτινων πόρων, που αποτέλεσαν κίνητρο και έμπνευση για την ολοκλήρωση αυτού του πονήματος.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Δρ. Ζ. Δόκου , επιστημονική συνεργάτη του εργαστηρίου Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής για τη άψογη συνεργασία μας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται και προς τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ.κ. Ν. Νικολαΐδη και Ν. Παρανυχιανάκη.

## Περίληψη

Με την παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια μελέτης της αποτελεσματικότητας πιθανών τρόπων αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρισης στον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής της Χερσονήσου Ηρακλείου με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων. Η υφαλμύριση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν στους υπόγειους παράκτιους υδροφορείς, καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του νερού λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε αυτό.

Η μελέτη έγινε με χρήση μοντέλων για τον υπολογισμό της υπόγειας ροής και της θέσης της υφαλμύρισης. Η αξιοπιστία του μοντέλου για τον υπολογισμό της θέσης της υφαλμύρισης εξετάστηκε μέσω αντιπαραβολής της αναλυτικής και της αριθμητικής επίλυσης ενός απλοποιημένου προβλήματος και από τη σύγκριση προέκυψε ότι το μοντέλο μπορεί να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν μεταξύ άλλων για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υφαλμύρισης είναι ο εμπλουτισμός του υδροφόρα, η βελτιστοποίηση των αντλήσεων από τις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις και η άντληση θαλασσινού νερού από τον υδροφόρα.

Κατά τον εμπλουτισμό του υδροφόρα προτάθηκε η χρήση νερού προερχόμενο από την εκροή του βιολογικού καθαρισμού της Χερσονήσου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την διάνοιξη και λειτουργία ενός ή συστάδας πηγαδιών, τα οποία θα λειτουργούν σε θέσεις όπου το φαινόμενο εμφανίζεται πιο έντονο και θα εγγέουν το νερό στον υδροφόρα. Διατηρώντας τη συνολική παροχή εμπλουτισμού σταθερή, είτε ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται από ένα ή πέντε πηγάδια, πιο αποτελεσματικό μέτρο ήταν ο εμπλουτισμός μέσω ενός πηγαδιού σε θέση όπου το πρόβλημα είναι οξύ, αλλά η τοποθεσία δεν γειτνιάζει άμεσα με τη θάλασσα προκειμένου η διείσδυση του θαλασσινού νερού να είναι τόσο έντονη που να μην μπορεί να ανατραπεί η ισορροπία μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού.

Η μέθοδος της βελτιστοποίησης των αντλήσεων περιλαμβάνει την προσαρμογή των παροχών, των ήδη υπάρχοντων αντλητικών πηγαδιών, σε επίπεδα τα οποία υπολογίστηκαν, προκειμένου να επιτευχθεί μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρισης σε επιθυμητές θέσεις μακριά από αυτά. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, με το μέτωπο της υφαλμύρισης να μετατοπίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις μακριά από τα πηγάδια της ενδοχώρας. Παρόλα αυτά όμως, από κοινωνικής πλευράς, η απότομη μείωση των παροχών των αντλητικών πηγαδιών θα επιφέρει αναστάτωση και προβλήματα στην τοπική

κοινωνία, μέρος των δραστηριοτήτων της οποίας βασίζεται στο νερό από τον υδροφορέα.

Τέλος, με τη λειτουργία πηγαδιών άντλησης θαλασσινού νερού επιδιώκεται η απομάκρυνση από τον υδροφορέα ποσοτήτων θαλασσινού νερού. Η διαχείριση αυτών των ποσοτήτων νερού προτείνεται να περιλαμβάνει την αξιοποίησή τους από κτίρια της περιοχής για λόγους κλιματισμού. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η διάνοιξη πολλαπλών πηγαδιών για αυτό το σκοπό. Η λειτουργία τους στο βόρειο τομέα της περιοχής, όπου το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο, επέφερε αποτελέσματα, επηρεάζοντας σε τοπικό επίπεδο το πάχος της ζώνης της υφαλμύρισης.

Συνοπτικά, τα σενάρια που εξετάστηκαν περιελάμβαναν την διάνοιξη και λειτουργία πηγαδιών εμπλουτισμού και άντλησης και την ταυτόχρονη και σε συνδυασμό εφαρμογή τους και με άλλες μεθόδους περιορισμού της υφαλμύρισης. Ο βέλτιστος συνδυασμός αυτών των μεθόδων για την καλύτερη αντιμετώπισης του προβλήματος περιλαμβάνει πολλαπλά τεχνικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια.

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to assess the effectiveness of potential solutions for hindering the saltwater intrusion problem of the coastal aquifer of Hersonisos at Herakleion, Greece. Saltwater intrusion is considered as one of the most important problems of coastal aquifers due to the fact that the groundwater quality is greatly affected by intrusion of saltwater.

The groundwater flow and saltwater intrusion assessment have been performed by the use of a numerical model. The reliability of the model for the calculation of the position of the intrusion has been examined by comparing the results of the analytical and numerical solution of a simplified problem. According to the findings of this comparison, the numerical solution of the problem, calculated by the model, can be an accurate method for assessing the saltwater intrusion phenomenon.

In order to counteract the intrusion problem, numerous solutions have been proposed, including the artificial recharging of the aquifer by injecting treated waste water, the application of optimised pumping rates at the existing wells and pumping of saltwater from the aquifer near the coast.

For the application of artificial aquifer recharging, it is proposed to use the treated waste water of Hersonisos treatment plant. The injection of treated waste water can be performed by one or a series of wells, especially at locations facing severe problems because of the saltwater intrusion. At scenarios tested, the total discharge of injected water was maintained steady either implemented by one or multiple wells. The most effective scenario occurred when the recharging well was positioned at area with intrusion problem, more to the inland, where the balance between the salt and fresh water could change.

Another method proposed against saltwater intrusion includes the implementation of optimised pumping capacities at the existing pumping wells. The new capacities have been calculated at such levels so that the intrusion is at a safe distance from the pumping wells. The results of this scenario are satisfying, since the target of protecting the pumping wells against the salt intrusion, is accomplished. However, drastic reduction of the discharge of some wells will negatively affect the local society because part of their activities is counting on the amounts of water abstracted from the local aquifer.

Another solution is the pumping of saltwater from the aquifer at certain locations where the problem is vivid. By abstracting saltwater volumes, the depth of the intrusion zone becomes smaller. The water abstracted can be used for cooling the local buildings. At scenarios tested the function of multiple saltwater pumping wells at the north part of the domain had locally reduced the size of the salt water zone.

All in all, the scenarios tested in this thesis include new recharging and saltwater abstracting wells that function independently or in combination with other methods. The most suitable combination of all these methods for counteracting the intrusion problem depends on technical, social and financial criteria.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 - Τα υπόγεια ύδατα και η διαχείρισή τους .....	10
1.1 Υπόγεια ύδατα .....	10
1.2 Διαχείριση και Αξιοποίηση υδάτινων πόρων σύμφωνα με τη νομοθεσία .....	11
Κεφάλαιο 2 – Το πρόβλημα της υφαλμύρισης .....	14
2.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στην Ελλάδα.....	14
2.2 Αίτια του φαινομένου της υφαλμύρισης .....	14
2.3 Είδη υφαλμύρισης .....	15
2.4 Μαθηματική προσέγγιση της μελέτης της υφαλμύρισης.....	16
2.5 Η «ανύψωση» της διεπιφάνειας στα παράκτια έργα άντλησης νερού.....	18
2.6 Το «πόδι» της διεπιφάνειας .....	19
2.7 Μέθοδοι αντιμετώπισης υφαλμύρισης .....	21
2.7.1 Τροποποίηση του «γενικού σχεδίου άντλησης».....	21
2.7.2 Τεχνητός εμπλουτισμός.....	21
2.7.3 Δημιουργία υπόγειου φράγματος.....	22
2.7.4 Φράγμα από άντληση υφάλμυρου νερού κοντά στην ακτή.....	23
2.7.5 Φραγμός από τεχνητό εμπλουτισμό .....	23
Κεφάλαιο 3 – Η περιοχή μελέτης .....	25
3.1 Γενικά .....	25
3.2 Κλιματολογικά στοιχεία .....	26
3.3 Χλωρίδα και πανίδα.....	29
3.4 Γεωλογία και υδρογεωλογία .....	29
3.4.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί .....	30
3.4.2 Υδατοστεγείς Σχηματισμοί .....	31
3.4.3 Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων .....	31
Κεφάλαιο 4 – Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής .....	34
4.1 Εισαγωγή.....	34
4.2 Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειου νερού .....	35
4.3 Μεθοδολογία εφαρμογής των μοντέλων .....	36
4.4 Εξισώσεις ροής υπόγειων υδάτων .....	38
4.4.1 Αριθμητική ανάλυση προβλημάτων στάθμης υδροφόρων.....	38
4.4.2 Νόμος του Darcy .....	39
4.5 Οι εξισώσεις συστημάτων μοντέλου υπόγειας ροής.....	41
4.5.1 Εξισώσεις του συστήματος .....	41
4.5.2 Παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος .....	43

4.6 Μαθηματικά μοντέλα .....	46
4.7 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών .....	49
Κεφάλαιο 5 – Το υπολογιστικό περιβάλλον και τα λογισμικά της μοντελοποίησης .....	52
5.1 Το υπολογιστικό περιβάλλον mfLab .....	52
5.2 Το λογισμικό MODFLOW .....	52
5.2.1 Βασικές αρχές και παραδοχές του λογισμικού MODFLOW .....	52
5.2.2 Υπορουτίνες κώδικα MODFLOW .....	55
5.2.3 Μηχανές επίλυσης MODFLOW .....	57
5.2.3.1 Πακέτο προαπαιτούμενης συζυγούς βαθμίδας .....	57
5.2.3.2 Πακέτο Ισχυρά πεπλεγμένης μεθόδου .....	57
5.2.3.3 Πακέτο επιτυχούς εκτόνωσης .....	57
5.2.3.4 Μηχανή επίλυσης WHS .....	58
5.2.4 Προσδιορισμός οριακών συνθηκών .....	58
5.2.4.1 Τύποι οριακών συνθηκών .....	59
5.2.5 Δημιουργία ομοιώματος .....	59
Κεφάλαιο 6 – Το πακέτο εφαρμογών Seawater Intrusion (SWI2) .....	60
6.1 Εννοιολογικό μοντέλο .....	60
6.2.Εξισώσεις που διέπουν τη ροή υπογείων υδάτων με μεταβλητή πυκνότητα .....	63
6.3 Μαθηματική εξαγωγή της κάθετα ολοκληρωμένης και μεταβαλλόμενης πυκνότητας ροής υπογείων υδάτων σε υδροφορέα .....	64
6.4 Εναλλακτική εξαγωγή της οριζόντιας, καθέτως ολοκληρωμένης, εξίσωσης της ροής υπογείου νερού μεταβαλλόμενης πυκνότητας .....	68
Κεφάλαιο 7 – Διαδικασίες μοντελοποίησης και αποτελέσματα .....	72
7.1 Στάδιο 1 – Επίτευξη αρχικών συνθηκών .....	74
7.2 Στάδιο 2- Εισαγωγή αντλήσεων .....	77
Κεφάλαιο 8 - Σύγκριση αποτελεσμάτων επίλυσης προβλήματος με χρήση μοντέλου και με χρήση αναλυτικής μεθόδου .....	80
8.1 Αναλυτική επίλυση .....	80
Κεφάλαιο 9: Σενάρια αντιμετώπισης της υφαλμύρισης .....	84
9.1 Εμπλουτισμός υδροφορέα .....	84
9.1.1 Εμπλουτισμός υδροφορέα από ένα πηγάδι .....	85
9.1.2 Εμπλουτισμός υδροφορέα από 5 πηγάδια συνολικής δυναμικότητας ίσης με το 1 πηγάδι .....	88
9.2 Βελτιστοποιημένοι ρυθμοί άντλησης .....	89
9.3 Πηγάδια άντλησης θαλασσινού νερού .....	90
9.4 Συνδυασμοί μεθόδων αντιμετώπισης υφαλμύρισης .....	92



9.5 Αξιοποίηση αλμυρού νερού .....	94
9.5.1 Τα συστήματα ATES .....	95
9.5.2 Λειτουργία των ATES .....	95
Κεφάλαιο 11 – Συμπεράσματα.....	98
Βιβλιογραφία .....	101
Ξένη Βιβλιογραφία .....	101
Ελληνική Βιβλιογραφία .....	102

## Κεφάλαιο 1 - Τα υπόγεια ύδατα και η διαχείρισή τους

Το νερό, ένα από τα κυρίαρχα στοιχεία του πλανήτη, υπήρξε επίκεντρο επιστημονικών, θρησκευτικών, μυθολογικών και φιλοσοφικών αναζητήσεων του ανθρώπου, καθώς και βασικό στοιχείο στη διαμόρφωση λαϊκών παραδόσεων. Είναι βασικό και απαραίτητο για την ανάπτυξη και για την επιβίωση του ανθρώπου, όμως είναι και μια περιβαλλοντική παράμετρος που επηρεάζεται άμεσα από την υπερκατανάλωση και τη ρύπανση (<http://www.geo.auth.gr/763/ch9.htm>).

Η ποσότητα του νερού στον πλανήτη παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη και ανέρχεται στα  $1600 \times 10^6 \text{ km}^3$  και η ποσότητα του νερού που απαντάται ελεύθερο στην επιφάνεια του πλανήτη ανέρχεται σε  $1370 \times 10^6 \text{ km}^3$  με το 97.2% αυτής να παραμένει ανεκμετάλλευτο, λόγω αλατότητας και το 2.1% να μην μπορεί να αξιοποιηθεί λόγω της μορφής πάγου που έχει ή λόγω του ότι είναι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί. Κατά συνέπεια από τις τεράστιες υγρές ποσότητες του πλανήτη, μόνο 0.6% είναι διαθέσιμο στον άνθρωπο αντιπροσωπεύοντας  $8.2 \times 10^6 \text{ km}^3$  νερού.

Από το διαθέσιμο στον άνθρωπο νερό, το επιφανειακό νερό (ποταμοί - λίμνες) αντιπροσωπεύει το 12%, ενώ το υπόλοιπο, περίπου  $7.2 \times 10^6 \text{ km}^3$  νερού είναι υπόγειο. Το υπόγειο νερό όμως δεν είναι όλο άμεσα διαθέσιμο, καθώς το μισό από αυτήν την ποσότητα βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 800 m, ενώ πρέπει να αφαιρεθεί και ένα ποσοστό 0.6% της συνολικής ποσότητας του υπόγειου νερού, που αποτελούν η υγρασία και οι διάφορες απώλειες. Επομένως προκύπτει ότι διαθέσιμο για κατανάλωση είναι  $0.1 \times 10^6 \text{ km}^3$  επιφανειακού νερού και  $3 \times 10^6 \text{ km}^3$  υπόγειου νερού. Συνολικά το ποσό των χρησιμοποιούμενων υδατικών πόρων (γλυκό νερό πλην των παγετώνων) αποτελείται κατά 95% από το υπόγειο νερό (Καλλέργης, 2001).

### 1.1 Υπόγεια ύδατα

Από τους υδατικούς πόρους οι επιφανειακοί είναι απολύτως διακριτοί, μιας και συγκεντρώνονται στις λεκάνες απορροής. Τα όριά τους είναι τοπογραφικά και μπορούν να χαραχτούν με τη βοήθεια τοπογραφικών χαρτών. Το νερό ρέει προς την κατεύθυνση που κλίνει τοπογραφικά η μορφολογία. Τα επιφανειακά νερά δεν μπορούν να διασχίσουν τους τοπογραφικούς υδροκρίτες (εκτός των περιπτώσεων μεγάλων πλημμυρών) και οι θέσεις των υδροκριτών αυτών είναι σταθερές, τουλάχιστον στην χρονική κλίμακα του μηχανικού. Από την άλλη μεριά, οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δεν είναι ευδιάκριτοι και συχνά ούτε διακριτοί μεταξύ τους. Τα όρια των υδροφορέων είναι φυσικά και όχι τοπογραφικά, ενώ σε δοσμένο σημείο μπορεί να υπόκεινται της επιφάνειας του εδάφους περισσότεροι υδροφορείς. Καθένας

υδροφορέας μπορεί να έχει διαφορετικά χημικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, να έχει διαφορετική πηγή ή περιοχή εμπλουτισμού και διαφορετική περιοχή εκφόρτισης. Επιπλέον, οι υπόγειοι υδροκρίτες δεν συμπίπτουν κατά κανόνα με τους επιφανειακούς.

Οι ποσότητες του υπόγειου νερού είναι επιφανειακής προέλευσης με κύριες πηγές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών να περιλαμβάνουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την επιφανειακή απορροή και τις φυσικές και τεχνητές λίμνες. Ο τεχνητός εμπλουτισμός που αποτελεί μέρος της αναπλήρωσης των υδροφόρων οριζόντων, προέρχεται από το πλεόνασμα του αρδευτικού νερού, τις διαρροές και διηθήσεις από τα κανάλια μεταφοράς και από τα έργα τεχνητού εμπλουτισμού (Καλλέργης, 2001).

## **1.2 Διαχείριση και Αξιοποίηση υδάτινων πόρων σύμφωνα με τη νομοθεσία**

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι ένα σύνολο ενεργειών που στις χώρες της Ευρώπης ρυθμίζεται από την Κοινοτική Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60.

Η Κοινοτική Οδηγία – Πλαίσιο 2000/60 για τα Νερά είναι το εργαλείο για την μακροπρόθεσμη αειφόρο διαχείριση των υδάτων και των οικοσυστημάτων στην επικράτεια της Ευρώπης και αποτελεί μία ολιστική και καινοτόμο προσπάθεια προστασίας και διαχείρισης των υδατικών πόρων που προέκυψε μετά από μία μακροχρόνια περίοδο συζητήσεων και διαπραγματεύσεων μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Τα κύρια σημεία στα οποία συνοψίζεται η Οδηγία είναι:

- ο προσδιορισμός της περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού ή συνόλου λεκανών απορροής με την μορφή μιας υδρολογικής περιφέρειας και οι διοικητικές διευθετήσεις για την συγκρότηση αρμόδιας τοπικής αρχής της λεκάνης και για τον συντονισμό δράσεων αφετέρου. Στα πλαίσια της οδηγίας το νερό έχει φυσικά και υδρολογικά όρια, όχι όμως πολιτικά και διοικητικά.
- ο χαρακτηρισμός και η συνολική περιγραφή της κατάστασης της υδρολογικής περιφέρειας και η ανάλυση των πιέσεων και των επιπτώσεων αυτών στην κατάσταση των συστημάτων επιφανειακών και υπογείων υδάτων συμπεριλαμβανομένης και της οικονομικής ανάλυσης των χρήσεων νερού.
- η εγκατάσταση και λειτουργία αντιπροσωπευτικών δικτύων παρακολούθησης της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης υδάτων.
- η κατάστρωση των Διαχειριστικών Σχεδίων που θα περιλαμβάνουν τα απαραίτητα διαχειριστικά μέτρα για την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας.

Οι κεντρικοί άξονες του πλαισίου της Οδηγίας είναι:

- η αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης, η προστασία και η βελτίωση της κατάστασης των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των άμεσα εξαρτώμενων από αυτά χερσαίων οικοσυστημάτων και υγροτόπων.
- η προώθηση της βιώσιμης χρήσης του νερού βάσει μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδάτινων πόρων.
- η ενίσχυση της προστασίας και βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος με ειδικά μέτρα για την προοδευτική μείωση των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών ουσιών προτεραιότητας και με την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη αυτών.
- η διασφάλιση για προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων και αποτροπή της περαιτέρω μόλυνσή τους.
- ο μετριασμός των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες.

Τα καινοτόμα σημεία που εισάγει η Οδηγία 2000/60 στη διαχείριση των υδάτων είναι:

- η εισαγωγή στην αντίληψη προστασίας των υδάτων.
- η θέσπιση χρονικού ορίου εντός του οποίου τα υδάτινα σώματα θα έχουν «καλή οικολογική κατάσταση».
- η οργάνωση της διαχείρισης του νερού σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης του ποταμού.
- η συνδυασμένη αντιμετώπιση ποσότητας και ποιότητας υδάτων.
- η διαδικασία πολιτικής τιμολόγησης της χρήσης του νερού.
- η συμμετοχή και ενεργός ανάμιξη των πολιτών (Κουντούρη, 2008 - Νόμος 3199/2003).

Ο λόγος σύστασης της Οδηγίας είναι η επίτευξη «καλής κατάστασης» όλων των υδατικών συστημάτων (εσωτερικών επιφανειακών, μεταβατικών, παράκτιων και υπόγειων υδάτων) το αργότερο έως το έτος 2015. Ο χαρακτηρισμός ενός υδάτινου σώματος σε «υψηλή» ποιοτική κατάσταση προϋποθέτει την τήρηση των συνθηκών αναφοράς για όλα τα εξεταζόμενα ποιοτικά στοιχεία καθώς και για τις υδρομορφολογικές συνθήκες. Οι συνθήκες αναφοράς μπορούν να προσδιοριστούν με τη χρήση χωρικών μεθόδων, ομοιωμάτων εισηγήσεων εμπειρογνώμων, ή και ακόμα και με συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Ο εκ των προτέρων καθορισμός τους θεωρείται απαραίτητο βήμα για την μετέπειτα ταξινόμηση της οικολογικής κατάστασης των υδάτων (Βασιλείου, 2009) .

Σύμφωνα με την Οδηγία όλα τα υδάτινα σώματα θα πρέπει να αξιολογηθούν και να καταταγούν σε πέντε κατηγορίες- κλάσεις ποιότητας (υψηλή, καλή, μέτρια, φτωχή, κακή). Η υψηλή ποιότητα αντιστοιχεί σε ένα πρακτικά αδιατάρακτο οικοσύστημα και οι υπόλοιπες κατηγορίες αντιπροσωπεύουν μικρότερες ή μεγαλύτερες αποκλίσεις από την υψηλή κατάσταση (Μιμίκου, 2002).

Σαν συμπέρασμα, με βάση την κοινοτική οδηγία , η σωστή διαχείριση και ανάπτυξη των υπόγειων υδατικών πόρων προϋποθέτει σωστό σχεδιασμό σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, καθώς η χρήση των πόρων από έναν ιδιοκτήτη γης, επηρεάζει την υδροδότηση και άλλων ιδιοκτητών γης. Επομένως, η διαχείριση θα πρέπει να βασίζεται σε επιλογή στόχων ώστε να αναπτυχθεί λειτουργικά ολόκληρη η λεκάνη. Μόνο μετά την αποτίμηση των διαθέσιμων συνολικών υδατικών πόρων και τη σύνταξη εναλλακτικών σχεδίων διαχείρισης, θα πρέπει να λαμβάνονται αποφάσεις από τα κατάλληλα δημόσια όργανα (Υ.Π.Χ.Δ.Ε., 2008- Οδηγία 2000/60/ΕΚ).

Σε ότι αφορά τα υπόγεια ύδατα, η ανάπτυξη τους αρχίζει με τη δημιουργία μερικών γεωτρήσεων άντλησης σε ολόκληρη τη λεκάνη. Με την πάροδο του χρόνου όμως, κατασκευάζονται περισσότερες γεωτρήσεις και έτσι αυξάνονται οι απολήψεις. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των γεωτρήσεων η ανάπτυξη της λεκάνης φτάνει και ξεπερνά τη φυσική αναπλήρωση. Αν συνεχισθεί η ανάπτυξη της λεκάνης, χωρίς ένα σχέδιο διαχείρισης, είναι πιθανόν να εξαντληθούν οι υπόγειοι υδατικοί πόροι. Η εκρηκτική αύξηση της ζήτησης νερού την τελευταία εικοσαετία σε παγκόσμια κλίμακα, οδήγησε στη συνειδητοποίηση ότι οι τεράστιες υπόγειες υδατοδεξαμενές, που σχηματίζονται από τους υδροφόρους, αποτελούν πολύτιμες υδατοαποθήκες που η σωστή διαχείρισή τους είναι πρωταρχικής σημασίας. Στόχος της διαχείρισης των υδατικών πόρων είναι η σύνταξη ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σχεδίων και η επιλογή και εφαρμογή ενός από αυτά, για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες σε νερό των διάφορων καταναλωτών (Βασιλείου, 2009).

## Κεφάλαιο 2 – Το πρόβλημα της υφαλμύρισης

Η υφαλμύριση είναι ένα αρκετά σημαντικό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο λόγω του ότι ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων με γλυκό νερό. Η αύξηση του πληθυσμού και η οικονομική ανάπτυξη έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των αναγκών σε αποθέματα φρέσκου νερού. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων είναι έντονο και στην Ελλάδα, ενώ όλα δείχνουν ότι στο μέλλον θα οξυνθεί (Καρτεράκης, 2005).

### 2.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, το νερό που χρησιμοποιείται για την ύδρευση, την άρδευση και την κάλυψη των τουριστικών και βιομηχανικών αναγκών, προέρχεται κυρίως από υπόγειους υδροφορείς. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η ζήτηση του νερού αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων και την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, καθιστώντας το σταδιακά ακατάλληλο, λόγω της δημιουργίας της υφαλμύρισης. Απόδειξη της κατάστασης που επικρατεί, είναι το γεγονός ότι η στάθμη του νερού σε επιβαρημένους υπόγειους υδροφορείς στην Ελλάδα υποχωρεί με ρυθμό περίπου 5m ετησίως ή 200m σε 40 χρόνια και το βάθος άντλησης φτάνει τα 300m. Από αυτά τα στοιχεία προκύπτει ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι απόδειξη της άναρχης και ανορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού. Η εξέλιξη του φαινομένου επηρεάζει την ποιότητα ζωής των κατοίκων στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας, κυρίως λόγω της μεγάλης ακτογραμμής (Καλλέργης, 2001 - Καρτεράκης, 2005).

### 2.2 Αίτια του φαινομένου της υφαλμύρισης

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης ενός παράκτιου υπόγειου υδροφορέα πιθανόν να οφείλεται σε κάποια από τις παρακάτω αιτίες:

A. Φυσικές αιτίες, λόγω της ύπαρξης θαλασσινού νερού στα κατώτερα γεωλογικά στρώματα.

B. Ανθρωπογενείς αιτίες, που οφείλονται είτε σε διήθηση διασταλαγμάτων από τις χωματερές είτε, πιο συχνά, στην υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων. Κατά το φαινόμενο αυτό, το θαλασσινό νερό εισχωρεί στον υδροφορέα και μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, κάνοντας τη διαδικασία αντιστροφής του φαινομένου και αποκατάστασης του υδροφορέα ιδιαίτερα δύσκολη. Επιπλέον παράγοντας, που δεν επιτρέπει την γρήγορη εξυγίανση του

υδροφορέα, είναι και η χαμηλή ταχύτητα του υπόγειου νερού. Ο κύριος λόγος για τον οποίο η υφαλμύριση είναι ένα φαινόμενο το οποίο προκαλεί μεγάλη ανησυχία, είναι το γεγονός ότι η αλατότητα είναι επικίνδυνη και προκαλεί προβλήματα. Εκτός από το ότι είναι επιβλαβής για την υγεία των ανθρώπων, καταστρέφει επίσης τις καλλιέργειες και η παρατεταμένη χρήση νερού με αυξημένη αλατότητα αχρηστεύει τα χωράφια. Επίσης, η αλατότητα μπορεί να διαβρώσει σωλήνες και λέβητες που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές χρήσεις. Με βάση τα παραπάνω δικαιολογείται η ανησυχία των κατοίκων των παράκτιων περιοχών για τυχόν έξαρση του φαινομένου της υφαλμύρισης (Τρούσα, 2009-Καρτεράκης, 2005).

### 2.3 Είδη υφαλμύρισης

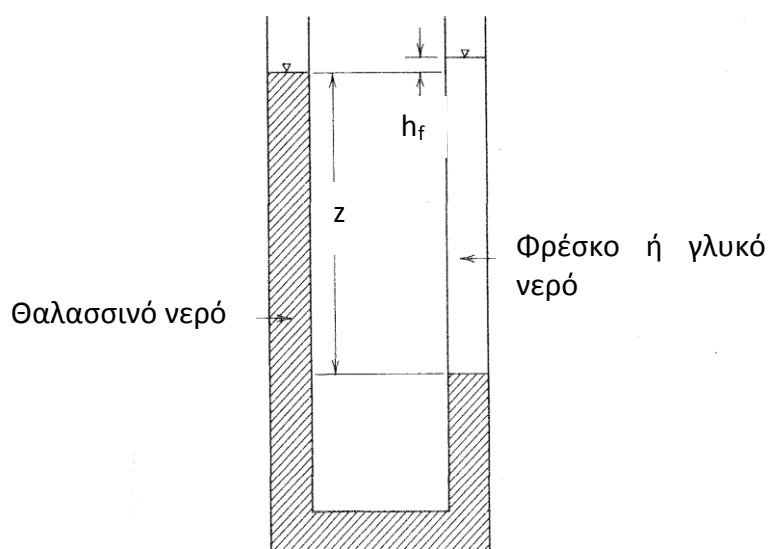
Τα είδη της υφαλμύρισης μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο διαταράσσεται η ισορροπία γλυκού και θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η υφαλμύριση χαρακτηρίζεται ως παθητική όταν οι παράμετροι που επηρεάζουν φυσικά την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα μειωθούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται η θέση της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού και να μετατοπίζεται προς την ενδοχώρα, παρουσιάζοντας αποκλίσεις ανάλογα με την εποχική διαφοροποίηση των κατακρημνίσεων. Γενικότερα, η θέση της υφαλμύρισης επηρεάζεται από τις κατακρημνίσεις, τις μακροχρόνιες κλιματικές αλλαγές και από τη σχετική θέση του επιπέδου της θάλασσας. (Τρούσα, 2009)

Η υφαλμύριση χαρακτηρίζεται ως ενεργή όταν είναι αποτέλεσμα τεχνητής παρέμβασης ως προς τις ποσότητες του νερού που προέρχονται από τον υδροφορέα, όπως στην περίπτωση των υπεραντλήσεων. Η σημειακή άντληση του υπόγειου νερού δημιουργεί ένα βαθύ κώνο κατάπτωσης. Με αυτό τον τρόπο η διεπιφάνεια της ζώνης της υφαλμύρισης μετακινείται γρηγορότερα προς την ενδοχώρα.

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης και η θέση της διεπιφάνειας επηρεάζονται ιδιαίτερα από τη διαφορά πυκνότητας του γλυκού και του αλμυρού νερού. Η κίνηση και η διασπορά του ρευστού εξαρτάται από την πυκνότητα στη ζώνη υφαλμύρισης, η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει του χώρου και του χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Επίσης, οι ανομοιογενείς υδραυλικές παράμετροι των υδροφορέων, κυρίως σε περιπτώσεις καρστικών υδροφορέων, καθιστούν τις συνθήκες ανάμειξης διαφορετικές σε σχέση με αυτές στους ομοιογενείς και ισοτροπικούς υδροφορείς. (Τρούσα, 2009).

## 2.4 Μαθηματική προσέγγιση της μελέτης της υφαλμύρισης

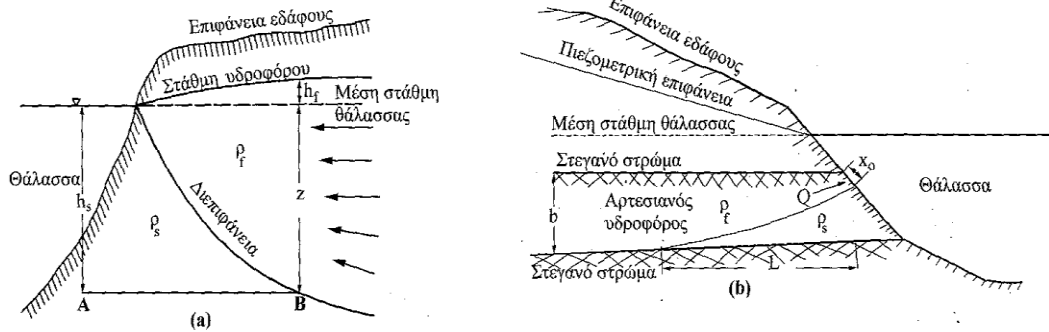
Η εργαστηριακή μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία δύο υγρών και πραγματοποιείται σε διατάξεις παρόμοιες με αυτή της Εικόνας 2.1. Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού μπορεί να αναπαρασταθεί σε έναν σωλήνα σχήματος U (Εικόνα 2.1) στον οποίο παρέχεται στις δύο εισόδους του σωλήνα αλμυρό και γλυκό νερό, χωρίς να αναμιγνύονται μεταξύ τους. Οι πιέσεις σε κάθε μεριά του σωλήνα θα πρέπει να είναι ίσες.



**Εικόνα 2.1** Υδροστατική ισορροπία μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αναπαριστώμενη με σωλήνα σχήματος U (Todd, 1980).

Στο πεδίο και με δεδομένο την μη ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού, σχηματίζεται ανάμεσά τους μια διεπιφάνεια που το σχήμα της καθορίζεται από το υδροδυναμικό ισοζύγιο, οπουδήποτε τα δυο ρευστά βρίσκονται σε επαφή. Η εικόνα 2.2 δείχνει μια παράκτια διατομή ενός ελεύθερου υδροφόρου. Κατά τους Ghyben και Herzberg, υπάρχει ένα σημείο, όπου συναντώνται οι διατομές της ακτής, της διεπιφάνειας, της στάθμης της θάλασσας και του υδροφόρου.





**Εικόνα 2.2 Κατανομή γλυκού και αλμυρού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) αρτεσιανό παράκτιο υδροφορέα, όπου  $x_0$ , το μέτωπο εκφόρτισης γλυκού νερού. (Καλλέργης, 2001, Todd, 1980)**

Η ολική υδροστατική πίεση στο σημείο A (Εικόνα 2.2)

$$p_A = \rho_s g h_s = \rho_s g z \quad (2.1)$$

Στο σημείο B η πίεση θα είναι

$$p_B = \rho_f g (z + h_f) \quad (2.2)$$

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

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = h_f \frac{\rho_f}{\Delta \rho} \quad (2.3)$$

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

$$\frac{\rho_f}{\Delta \rho} = c = 40 \text{ οπότε } z = \frac{\rho_f}{\Delta \rho} h_f = 40 h_f \quad (2.4)$$

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

$$\eta \mu \gamma_i = \frac{dh}{ds} = \frac{v_g}{k} \quad (2.5)$$

Όπου

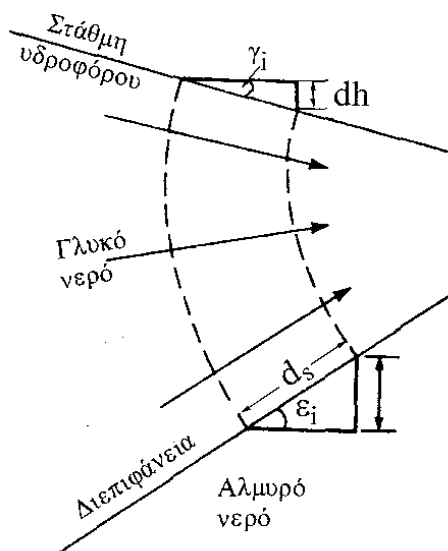
$\gamma_i$  = η κλίση της πιεζομετρικής επιφάνειας

$v_g$  = η φαινόμενη ταχύτητα του υπόγειου νερού

$k$  = η υδραυλική αγωγιμότητα

Η κλίση της διεπιφάνειας,  $\varepsilon_i$ , όπως φαίνεται από την Εικόνα 2.3, δίνεται από την σχέση

$$\eta\mu\varepsilon_i = \frac{\nu_g \rho_f}{k\Delta\rho} \quad (2.6)$$



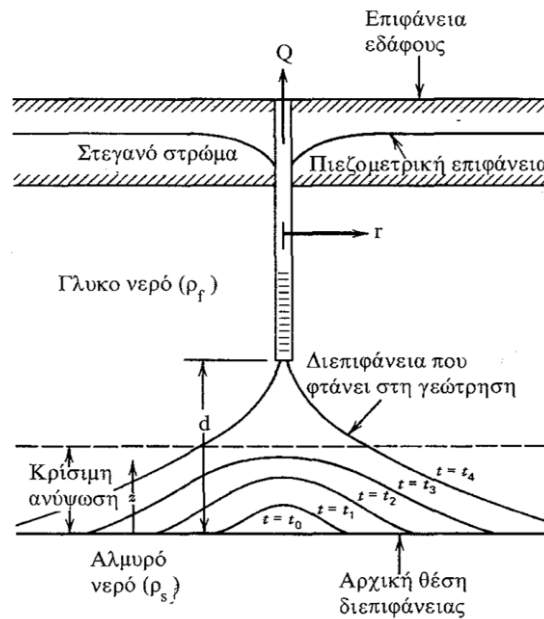
**Εικόνα 2.3** Σχέση ανάμεσα στις κλίσεις της υδροστατικής επιφάνειας και της διεπιφάνειας (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980).

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

## 2.5 Η «ανύψωση» της διεπιφάνειας στα παράκτια έργα άντλησης νερού

Ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σε περιπτώσεις αντλήσεων είναι το φαινόμενο ‘upconing’ ή φαινόμενο δημιουργίας κώνου ανόδου διεπιφάνειας. Όταν ένας υδροφορέας περιέχει ένα υποκείμενο στρώμα αλμυρού νερού και αντλείται από μια υδρογεώτρηση που εισχωρεί μόνο στο ανώτερο μέρος του, το οποίο περιέχει γλυκό νερό, τότε παρατηρείται μια τοπική «ανύψωση» της διεπιφάνειας, κάτω από την γεώτρηση (Εικόνα 2.4), με τη μορφή ενός ανεστραμμένου «κώνου

κατάπτωσης» (urconing), δηλαδή ενός κώνου ανόδου της διεπιφάνειας. Στην περίπτωση της Εικόνας 2.4 η διεπιφάνεια είναι, τη στιγμή έναρξης της άντλησης ( $t = t_0$ ), οριζόντια. Με τη συνεχιζόμενη άντληση, η διεπιφάνεια ανεβαίνει σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα, μέχρι ενδεχόμενα να φτάσει στην υδρογεώτρηση.



**Εικόνα 2.4 Διάγραμμα της «ανύψωσης» (urconing) αλμυρού νερού, σε αντλούμενη υδρογεώτρηση (Καλλέργης, 2001).**

Λόγω της δημιουργίας του κώνου ανόδου της διεπιφάνειας, η άντληση θα πρέπει να διακοπεί. Μετά τη διακοπή, το βαρύτερο, αλμυρό νερό έχει την τάση να επιστρέψει στην αρχική του θέση (Καλλέργης, 2001).

## 2.6 Το «πόδι» της διεπιφάνειας

Το σημείο, στο οποίο η διεπιφάνεια συναντά το στεγανό πυθμένα του παράκτιου υδροφορέα, αποτελεί το «πόδι» της διεπιφάνειας (toe of the interface), όπως δείχνει η Εικόνα. 2.5.



$L_{opt}$  = η απόσταση εκείνη η οποία ελαχιστοποιεί τις  $Q_o$

$$c = \frac{\rho_f}{\Delta\rho}$$

Η μεταβολή της στάθμης του υδροφορέα έχει δύο συνέπειες

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

Λαμβάνοντας υπόψη ότι όταν το υπόγειο νερό περιέχει έστω και 4% θαλασσινό νερό, τότε θεωρείται ακατάλληλο για τις πιο πολλές χρήσεις, η αξιοποίηση των αποθεμάτων παράκτιων υδροφορέων (φακών γλυκού νερού πάνω σε αλμυρό) θα πρέπει να γίνεται με τρόπο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόσταση του «ποδιού» της διεπιφάνειας από την ακτή. Ο εμπλουτισμός R σε m<sup>3</sup>/χρόνο υπολογίζεται αρκετά δύσκολα. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι υπολογισμού του, είναι η μέθοδος του υδρολογικού ισοζυγίου, η μέθοδος του ισοζυγίου αλάτων, οι ισοτοπικές μέθοδοι, τα λυσίμετρα, η μέθοδος του ισοζυγίου ενέργειας, η μέθοδος του καθολικού ισοζυγίου κ.α. (Καλλέργης, 2001- Todd, 1980).

## 2.7 Μέθοδοι αντιμετώπισης υφαλμύρισης

Οι μέθοδοι που προτείνονται για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρισης ποικίλουν και επιλέγονται κατά περίπτωση με βάση την έκταση του φαινομένου, τη γεωλογία της περιοχής, τη χρήση του νερού κλπ. Ορισμένες από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 2.7.1 Τροποποίηση του «γενικού σχεδίου άντλησης»

Μια από τις μεθόδους που προτείνονται είναι η τροποποίηση του αντλητικού σχεδίου της περιοχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με απομάκρυνση των γεωτρήσεων από την ακτή, όπου το πρόβλημα είναι συνήθως πιο έντονο. Στη συνέχεια μπορεί να γίνει διασπορά τους προς την ενδοχώρα, με σκοπό να αποκατασταθεί η υδραυλική κλίση προς την ακτή. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοσθεί μείωση των παροχών άντλησης των εν λειτουργία γεωτρήσεων με σκοπό την μεταφορά του μετώπου προς θέσεις όπου το φαινόμενο θα περιορίζεται.

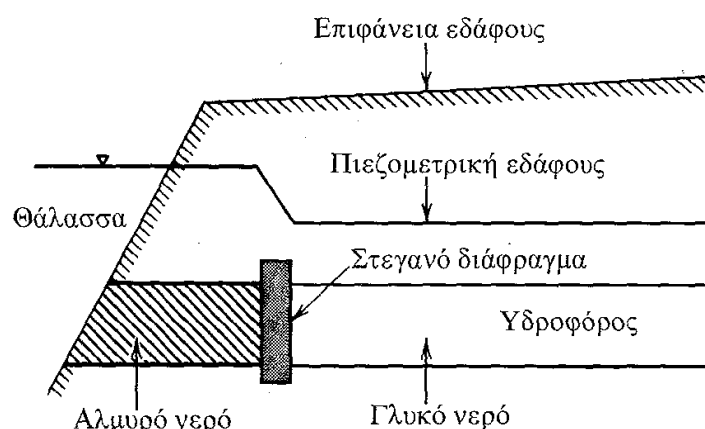
### 2.7.2 Τεχνητός εμπλουτισμός

Κατά τον τεχνητό εμπλουτισμό επιδιώκεται η ανύψωση της στάθμης του νερού στις γεωτρήσεις και η διατήρησή της σε αυτά τα επίπεδα λόγω της επιφανειακής

κατάκλισης από την τάφρο εμπλουτισμού κατά μήκος της ακτής ή από τις λεκάνες εμπλουτισμού στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφορέων, και τη χρήση υδρογεωτρήσεων εμπλουτισμού σε περίπτωση των αρτεσιανών υδροφορέων. Επομένως η χρήση συμπληρωματικής πηγής νερού για τον εμπλουτισμό είναι απαραίτητη.

### 2.7.3 Δημιουργία υπόγειου φράγματος

Η κατασκευή ενός στεγανού διαφράγματος (Εικόνες 2.6, 2.7), παράλληλα προς την ακτή και σε όλο το πάχος του υδροφορέα, εμποδίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτού του σεναρίου έχει ορισμένα προβλήματα που σχετίζονται με το υψηλό κόστος της κατασκευής και την ευπάθεια του διαφράγματος στους σεισμούς και τη χημική διάβρωση.



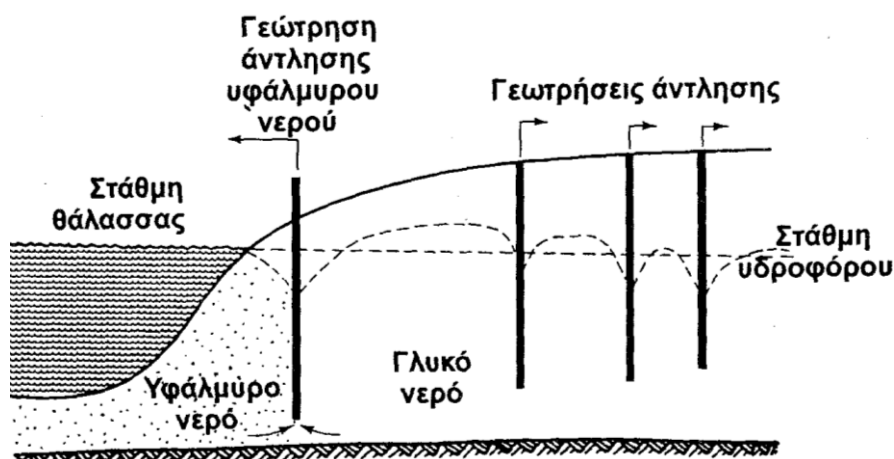
Εικόνα 2.6 Αντιμετώπιση της διείσδυσης της θάλασσας με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, παράλληλα στην ακτή (Todd, 1980).



Εικόνα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα ενός υπόγειου διαφράγματος, για την παρεμπόδιση ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού, σε παράκτιο καρστ (Todd, 1980).

#### 2.7.4 Φράγμα από άντληση υφάλμυρου νερού κοντά στην ακτή

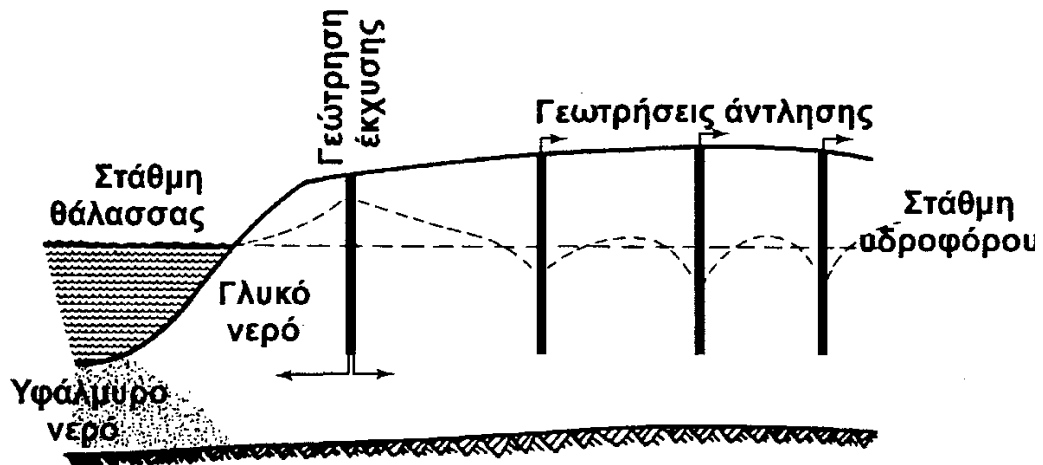
Από τη συνεχόμενη άντληση από σειρά γεωτρήσεων κοντά στη θάλασσα (Εικόνα 2.8), δημιουργείται ροή του θαλασσινού νερού προς τη συστοιχία των γεωτρήσεων ενώ το γλυκό νερό ρέει από το εσωτερικό της λεκάνης προς τη θάλασσα (προς τις αντλούμενες γεωτρήσεις). Το αντλούμενο νερό είναι υφάλμυρο και ρίχνεται στη θάλασσα.



Εικόνα 2.8 Δημιουργία υδραυλικής τάφρου με άντληση υφάλμυρου νερού η οποία εμποδίζει τη διείσδυση της θάλασσας λόγω της λειτουργίας παραγωγικών γεωτρήσεων (Καλλέργης, 2001)

#### 2.7.5 Φραγμός από τεχνητό εμπλουτισμό

Με την εφαρμογή της μεθόδου του φραγμού από τεχνητό εμπλουτισμό δημιουργείται ένα ύψωμα υψηλής πιεζομετρικής στάθμης, κατά μήκος μιας συστοιχίας γεωτρήσεων εμπλουτισμού, που βρίσκεται κοντά και παράλληλα στην ακτή (Εικόνα 2.9). Το νερό του εμπλουτισμού ρέει προς τη θάλασσα αλλά και προς το εσωτερικό της λεκάνης, για αυτό το λόγο θα πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας.



Εικόνα 2.9 Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη υφαλμύρισης παράκτιου ελεύθερου υδροφόρου (Καλλέργης, 2001)

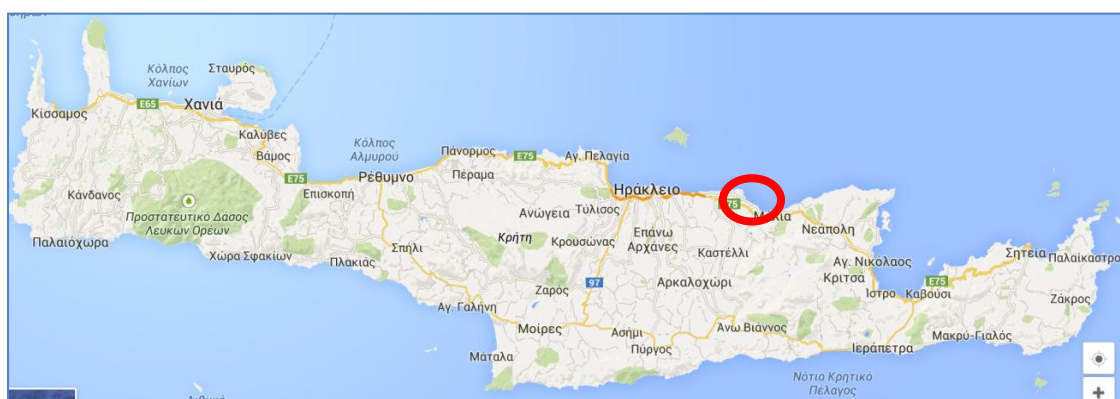
Ένας συνδυασμός φραγμών από άντληση και εμπλουτισμό είναι απόλυτα εφικτός, ελαττώνει τις απαιτούμενες παροχές άντλησης και εμπλουτισμού αλλά απαιτεί μεγάλο αριθμό υδρογεωτρήσεων (Καλλέργης, 2001).



## Κεφάλαιο 3 – Η περιοχή μελέτης

### 3.1 Γενικά

Ο Δήμος Χερσονήσου (Εικόνα 3.1) βρίσκεται στη βόρεια παράλια του Νομού Ηρακλείου, 25km από την πόλη του Ηρακλείου και περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα: Λιμένας Χερσονήσου, Χερσόνησος, Ποταμιές, Αβδού, Γωνιές και Κερά με τους επιμέρους οικισμούς που περιλαμβάνει καθένα από αυτά. Ο μόνιμος πληθυσμός του Δήμου είναι 10.491 κάτοικοι από τους οποίους 5.727 είναι άνδρες και 4.764 είναι γυναίκες.



Εικόνα 3.1α Η θέση της Χερσονήσου στο νησί της Κρήτης



Εικόνα 3.1β: Ο λιμένας Χερσονήσου και η ευρύτερη περιοχή του Δήμου Χερσονήσου([www.googlemap.com](http://www.googlemap.com))

Το παραθαλάσσιο τμήμα της Χερσονήσου είναι αυτό στο οποίο υπάρχει πιο έντονη τουριστική δραστηριότητα, ενώ στην ενδοχώρα η κύρια οικονομική δραστηριότητα είναι η γεωργία. Σήμερα, η συντριπτική πλειοψηφία των κατοίκων δραστηριοποιούνται κυρίως στον τριτογενή τομέα της παροχής υπηρεσιών, καθώς η Χερσόνησος είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης.

### 3.2 Κλιματολογικά στοιχεία

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό με την τάση να γίνεται ηπειρωτικό προς στους ορεινούς όγκους με μέση ετήσια θερμοκρασία στους 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, 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 και η περίοδος των βροχών διαρκεί 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 ενώ παρουσιάζονται και σημαντικές εποχιακές διακυμάνσεις, με τον Ιανουάριο να αποτελεί τον ψυχρότερο μήνα, ενώ κατά την καλοκαιρινή περίοδο η θερμοκρασία αυξάνεται αισθητά και τον Ιούλιο σημειώνονται οι υψηλότερες τιμές της.

Ακολουθούν στοιχεία της Ε.Μ.Υ. για τη θερμοκρασία από το μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου Κρήτης (Πίνακας 3.1).

#### **Βροχοπτώσεις**

Η περίοδος των βροχοπτώσεων από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο παρουσιάζει ετήσιο ύψος βροχής 483.2 mm. Εντός του έτους όμως η κατανομή τους είναι ανομοιόμορφη, με ελάχιστο ύψος βροχής να παρατηρείται τους καλοκαιρινούς μήνες κυρίως τον Ιούλιο με 0.6 mm και μέγιστο τον Ιανουάριο με 90.1 mm βροχής. Οι χιονοπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή είναι ένα φαινόμενο ιδιαίτερα σπάνιο.

Πίνακας 3.1 Κλιματολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης

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 (oC)	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (oC)	Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (oC)	% Σχετική Υγρασία	Μέση Νέφωση	Βροχο- πτωση (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								

## 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%.

Τα ακραία καιρικά φαινόμενα με ανέμους της τάξης των 10 Beaufour είναι σπάνια αλλά όταν συμβαίνουν είναι νότιας και νοτιοδυτικής κυρίως διεύθυνσης. Αναλυτικότερα, τα ανεμολογικά στοιχεία από το μετεωρολογικό σταθμό Ηρακλείου Κρήτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2

**Πίνακας 3.2: Ανεμολογικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης**

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

### 3.3 Χλωρίδα και πανίδα

Στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν τα οικοσυστήματα της πεδινής και ημιορεινής ζώνης ενώ κυριαρχεί η αυτοφυής υποβαθμισμένη βλάστηση. Η χλωρίδα της υπό μελέτη περιοχής αναπτύσσεται από δέντρα, θάμνους και από ποώδη βλάστηση. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται φρύγανα, αστιβίδες, θυμάρι, αφάνες, ασπάλαθοι, θρύμινια αλλά και αραιές στοιβάδες από ξυλώδη βλάστηση σκληρόφυλλων και αείφυλλων, όπως: σχοίνος, χαρουπιά, ερείκη, πρίνος κ.ά. Η πληθυσμιακή ισορροπία των άλλοτε ευρέως διαδεδομένων ειδών πανίδας της περιοχής σήμερα έχει διαταραχθεί. Οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης, είναι μεν ευνοϊκές για την ανάπτυξη της πανίδας ιδιαίτερα στα αρθρόποδα, τα έντομα, τα αραχνοειδή και τα μαλάκια (σαλιγκάρια). Όμως, λόγω της αλόγιστης εκμετάλλευσης των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, της σημαντικής υποβάθμισης των φυτικής βλάστησης, της παράνομης θήρευσης και της τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής, ο αριθμός των ζώων στις ανώτερες τάξεις (πτηνά και θηλαστικά) είναι περιορισμένος. Επίσης δεν υπάρχουν σπάνια ή προστατευόμενα είδη, ενώ τα κύρια είδη της πανίδας είναι ο λαγός, το κουνάβι, η κουκουβάγια, η σαύρα καθώς και διάφορα είδη πτηνών.

### 3.4 Γεωλογία και υδρογεωλογία

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

- ♦ Στους υδροπερατούς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι, οι άμμοι, τα κροκαλοπαγή, και οι ψαμμίτες του νεογενούς.
- ♦ Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν οι φυλλίτες, χαλαζίτες και φλύσχης του προνεογενούς 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.

### 3.4.1 Υδροπερατοί Σχηματισμοί

#### Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Αποτελούνται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους καθώς και από ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό υδροπερατότητας, κυρίως στις ζώνες διαρρήξεων και αποκάρσωσης, όπου τελικοί αποδέκτες του νερού της κατείσδυσης είναι οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Τα πετρώματα που δομούν τους δύο κύριους ορεινούς όγκους Δίκτη 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 υφαλμύρισης, 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 χλωριόντα επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα .

#### 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.

## **Τεταρτογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί**

Συναντώνται κυρίως σε ποτάμιες 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.

### **3.4.2 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 σύνολό 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 .

#### **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 ανεκμετάλλευτες.

### **3.4.3 Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων**

Η διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, τον γεωλογικό σχηματισμό που είναι περατός 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:

Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη.

Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη.

Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων.

Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου.

Η υδρογεωλογική ενότητα που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι εκείνη του καρστικού 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 (Καρτεράκης, 2005).

## Κεφάλαιο 4 – Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής

### 4.1 Εισαγωγή

Η κατανόηση των μηχανισμών ροής των υπογείων υδάτων οδήγησε στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων με σκοπό για την προσομοίωση της ροής. Τα μοντέλα υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται με σκοπό την προσομοίωση των μηχανισμών που ελέγχουν τη λειτουργία και εξέλιξη ενός υδροφόρου συστήματος, το σχεδιασμό και τη μελέτη σεναρίων διαχείρισης των υπόγειων υδροφορέων και την εφαρμογή μέτρων προς την κατεύθυνση της βέλτιστης χρήσης των υδάτινων πόρων.

Ως μοντέλο ορίζεται η απλοποιημένη διατύπωση των φυσικών και ανθρωπογενών μεταβολών ενός συστήματος, μέσω υποθέσεων και παραδοχών με μορφή μαθηματικών εξισώσεων. Η συναρτησιακή σχέση που περιγράφει ένα μοντέλο ορίζεται ως

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

Εξαρτημένες χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση ενός συστήματος (π.χ. υδραυλικό φορτίο), ως ανεξάρτητες χαρακτηρίζονται οι μεταβλητές που περιγράφουν το χώρο και τον χρόνο και οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν τις εξωτερικές επιδράσεις (stresses).

Προϋπόθεση για την προσομοίωση της ροής των υπογείων υδάτων με χρήση μαθηματικών μοντέλων είναι η κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας του εξεταζόμενου υδροφορέα. Σε αυτό συντελούν η συλλογή δεδομένων και μετρήσεων πεδίου σχετικά με τα γεωλογικά, υδρολογικά, υδρογεωλογικά, κλιματολογικά και τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής έρευνας. Η αξιολόγηση όλων των δεδομένων και των πληροφοριών οδηγεί στη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου.

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια αναπαράσταση του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος και λαμβάνει υπόψη του χαρακτηριστικά των υδροφόρων στρωμάτων σχετικά με τη μορφολογία τους, τις υδραυλικές τους ιδιότητες (περατότητα) και το υδατικό ισοζύγιο (εισροές και εκροές). Η μαθηματοποίηση αυτών των μηχανισμών, που αποτελεί και στόχο του εννοιολογικού μοντέλου, προϋποθέτει υιοθέτηση ορισμένων παραδοχών σχετικά με ορισμένα χαρακτηριστικά των υδροφόρων στρωμάτων, για τις οποίες θα πρέπει να γίνεται αναφορά, καθώς μπορούν κατά περίπτωση να μεταβάλλουν την ισχύ του μοντέλου (Γιαννέλη, 2009) .

## 4.2 Ταξινόμηση μοντέλων υπόγειου νερού

Τα διάφορα είδη μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί είναι:

**Παραμετρικά-Δυναμικά ομοιώματα:** Τα παραμετρικά ομοιώματα περιγράφουν την παρούσα κατάσταση και είναι στατικά. Τα δυναμικά ομοιώματα επιτρέπουν την πρόβλεψη στο μέλλον και με βάση τη μεθοδολογία της δόμησής τους διακρίνονται σε φυσικά, αναλογικά και μαθηματικά.

**Φυσικά μοντέλα:** Τα φυσικά μοντέλα αναπαριστούν πιστά τα φυσικά συστήματα ροής, είναι κατασκευασμένα σε κλίμακα και η απόδοσή τους εξετάζεται σε εργαστηριακό περιβάλλον, όπως π.χ. της υπόγειας ροής στο εργαστήριο. Οι δυσκολίες στην πρακτική τους εφαρμογή σχετίζεται με την πολυπλοκότητα των φυσικών συστημάτων που αναπαριστούν.

**Αναλογικά μοντέλα:** Τα αναλογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται όταν είναι δύσκολη η αναλυτική επεξεργασία ενός φαινομένου και το σύστημα διέπεται από μερικές διαφορικές εξισώσεις με οριακές συνθήκες όμοιες με το πρωτότυπο. Πρόκειται ουσιαστικά για εργαστηριακές προσομοιώσεις των υδροφορέων με πιο γνωστά τα ηλεκτρικά ομοιώματα, τα ανάλογα άμμου κλπ. Δεν αποτελούν πλέον μια δημοφιλή μέθοδο προσομοίωσης, κυρίως λόγω του ότι τα αριθμητικά μοντέλα παρέχουν πολλές δυνατότητες. Όμως, τα αναλογικά μοντέλα πλεονεκτούν έναντι των αριθμητικών στο γεγονός ότι δεν χρειάζονται διακριτοποίηση στο χρόνο, κάτι το οποίο αποτελεί πιθανή αιτία λάθους.

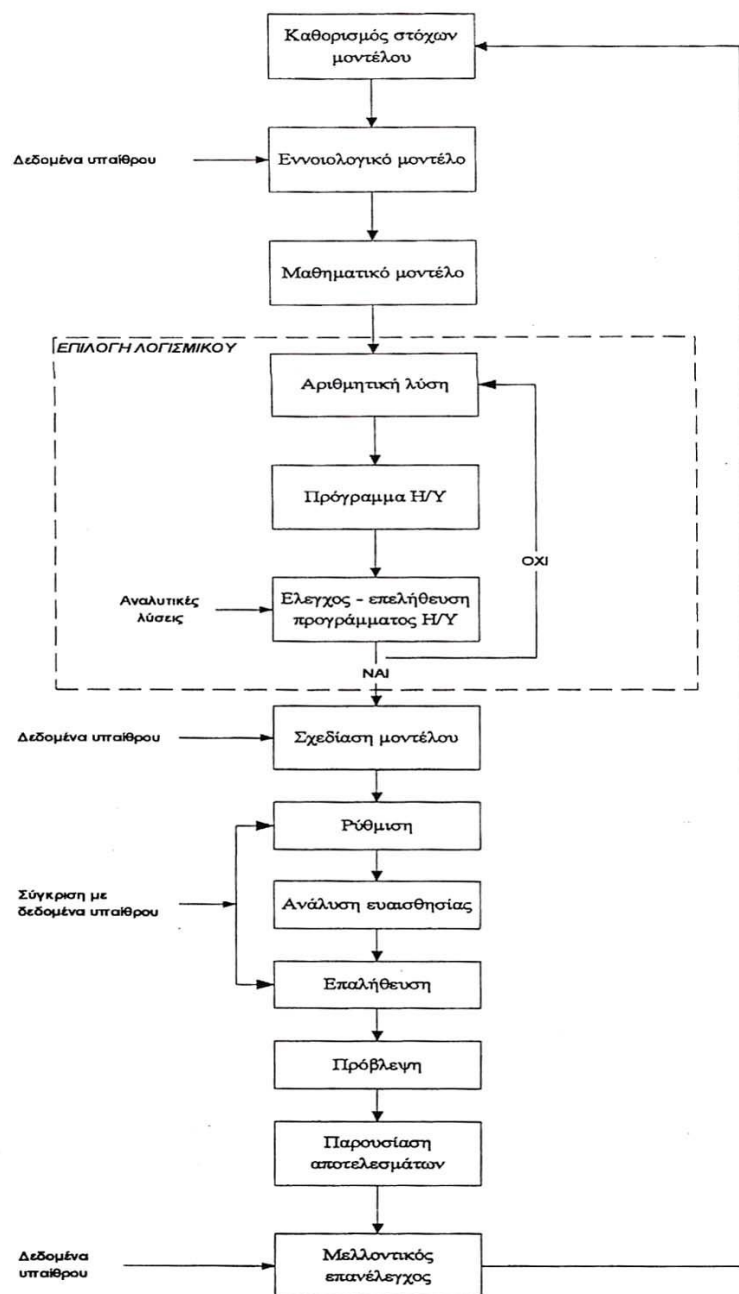
**Μαθηματικά μοντέλα:** Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως στην υδρογεωλογία. Μπορούν να διαχειριστούν μεγάλο όγκο πληροφοριών και απαιτούν την πλήρη κατανόηση των διαδικασιών οι οποίες θα προσομοιωθούν. Διακρίνονται σε μοντέλα επεξεργασίας δεδομένων, καθορισμού παραμέτρων, ροής και μεταφοράς και μοντέλα διαχείρισης. Βασικός τους στόχος είναι η προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού με χρήση διαφορικών εξισώσεων. Βασίζονται στη επίλυση βασικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή του υπόγειου νερού όπως του Darcy, Boussinesq, Laplace, Bernoulli, εξίσωση της συνέχειας, της ροής υπογείων υδάτων και θερμότητας. Είναι κατάλληλα για προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστο σχήμα, ανισότροπων και με μεταβαλλόμενες παραμέτρους όπως αντλήσεις και τροφοδοσίες (Τάντος, 2006).

Κατά την προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού, βασικές διαδικασίες θεωρούνται η ροή του υπόγειου νερού λόγω υδραυλικών βαθμίδων και η άντληση ή ο εμπλουτισμός του υδροφορέα. Για την μοντελοποίηση ενός υδροφόρου συστήματος και την επίλυση των εξισώσεων που ελέγχουν τις διαδικασίες, απαιτούνται και αριθμητικές τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων που σχετίζονται με την περιοχή και τον υδροφορέα. Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου γίνεται αναλυτικά ή μαθηματικά, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των συνθηκών και των διαδικασιών που λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο.

Το μεγαλύτερο όμως πρόβλημα κατά την σύνταξη των μαθηματικών μοντέλων είναι η ετερογένεια στην κλίμακα του πεδίου, με τα δεδομένα εισόδου να προέρχονται από εκτιμήσεις που συχνά απέχουν από την πραγματικότητα.

#### 4.3 Μεθοδολογία εφαρμογής των μοντέλων

Για την εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων στα υπόγεια νερά έχουν θεσπιστεί κάποια πρότυπα και κανόνες από της αρχές της προηγούμενης δεκαετίας από το National Research Council (1990). Τα στάδια που πρέπει να ακολουθούνται για την εφαρμογή ενός μοντέλου είναι τα παρακάτω (Εικόνα 4.1):



Εικόνα 4.1. Μεθοδολογία εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων υπογείου νερού (Τσελέπη, 2009).

Καθορισμός των αντικειμενικών στόχων του μοντέλου: Οι στόχοι καθορίζουν την επιλογή των εξισώσεων και του λογισμικού.

Ανάπτυξη εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model): Κατά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου ορίζονται οι υδροστρωματογραφικές ενότητες, τα όρια και οι υδραυλικές παράμετροι του συστήματος, συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου και εκτιμώνται ποσοτικά οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

Επιλογή εξισώσεων και λογισμικού: Το λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα Η/Υ που περιέχει αλγορίθμους για την αριθμητική επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου. Τόσο οι εξισώσεις, όσο και το λογισμικό πρέπει να επαληθευτούν, έτσι ώστε οι εξισώσεις να αποδεικνύουν ότι περιγράφουν επαρκώς τις διαδικασίες που συμβαίνουν στο πορώδες μέσο. Η ορθότητα του λογισμικού ελέγχεται με σύγκριση της αριθμητικής με την αντίστοιχη αναλυτική λύση, αν υπάρχει, προκειμένου να επαληθευτούν οι εξισώσεις που επιλέχθηκαν για το αριθμητικό μοντέλο.

Σχεδιασμός και κατασκευή μοντέλου: Στο στάδιο αυτό καθορίζονται γίνεται η διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, ορίζονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι αρχικές τιμές των υδραυλικών παραμέτρων.

Ρύθμιση (Calibration): Κατά το στάδιο αυτό το μοντέλο μέσα από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων ρυθμίζεται έτσι ώστε να μπορεί να αναπαράγει πραγματικές ροές (fluxes) και τις μεταβλητές κατάστασης (state variables), προσεγγίζοντας έτσι καλύτερα τα πραγματικά υδραυτικά φορτία ροές. Μια συνηθισμένη μέθοδος που εφαρμόζεται για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων είναι η μέθοδος της δοκιμής και του σφάλματος (trial and error).

Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis): Η ανάλυση ευαισθησίας έχει ως στόχο τον έλεγχο της σημασίας της αβεβαιότητας κατά τη ρύθμιση του μοντέλου, σχετικά με τον καθορισμό των παραμέτρων, των τάσεων και των οριακών συνθηκών.

Επαλήθευση του μοντέλου (validation/verification): Κατά την επαλήθευση του μοντέλου, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι ρύθμισης προκειμένου να παραχθεί ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων με σκοπό την απόδοση περισσότερης εμπιστοσύνης στο μοντέλο.

Πρόβλεψη (prediction) : Κατά το στάδιο της πρόβλεψης εφαρμόζονται μελλοντικά σενάρια στο ήδη ρυθμισμένο μοντέλο, μεταβάλλοντας μόνο τις πιέσεις που εκτιμάται ότι θα αλλάξουν στο μέλλον και εκτιμάται η ποσοτική συμπεριφορά του συστήματος.

Επανελέγχος του μοντέλου (postaudit): Πρόκειται για διαδικασία που πραγματοποιείται μετά από αρκετό χρονικό διάστημα από τη ρύθμιση του μοντέλου και περιλαμβάνει την επαλήθευση ή μη των αποτελεσμάτων του μοντέλου με βάση τα νέα δεδομένα υπαίθρου

που έχουν συλλεχθεί. Αν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, ταυτίζονται με τις προβλέψεις του μοντέλου, τότε το μοντέλο επαληθεύεται για την συγκεκριμένη περιοχή (Τάντος, 2006) .

#### 4.4 Εξισώσεις ροής υπόγειων υδάτων

Η ροή του υπόγειου νερού στο πορώδες μέσο ενός υδροφορέα περιγράφεται από εξισώσεις που ποικίλουν ανάλογα με το είδος της ροής και του υδροφορέα. Η ροή μπορεί να διακριθεί σε μονοδιάστατη, δισδιάστατη, τρισδιάστατη και ακτινική. Επίσης, η ροή διακρίνεται σε ροή σταθερής κατάστασης ή μόνιμη ροή και σε ροή ασταθούς κατάστασης ή μη μόνιμη ροή. Οι υδροφορείς διακρίνονται σε περιορισμένους (confined), ελεύθερους (unconfined) και περιορισμένους με διαρροή (leaky) και για τις περιπτώσεις αυτές υπάρχουν και οι αντίστοιχες εξισώσεις, με το βασικό μοντέλο ροής να βασίζεται στην αρχή της συνέχειας (Τάντος, 2006) .

##### 4.4.1 Αριθμητική ανάλυση προβλημάτων στάθμης υδροφόρων

Η ροή του υπόγειου νερού περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

Darcy	$\vec{v} = -K \text{ grad } h = K \text{ Ai}$	(4.1)
-------	---	-------

Laplace	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$	Ή $\nabla^2 h = 0$ (4.2)
---------	---	--------------------------

Συνέχειας	$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$	Ή $\text{div } \vec{v} = 0$ (4.3)
-----------	---	-----------------------------------

Εξίσωση Ροής	$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial h}{\partial t} = q(x, y, z, t)$	(4.4)
--------------	--	-------

Bernoulli	$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = \text{σταθερό}$	(4.5)
-----------	--	-------

Boussinesq	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{k} \frac{\partial h}{\partial t}$	Ή $\nabla^2 h = \frac{S}{k} \frac{\partial h}{\partial t}$ (4.6)
------------	---	--

Όπου

$\bar{v}$	=	η φαινόμενη ταχύτητα Darcy
$K$	=	η υδραυλική αγωγιμότητα
$h$	=	το φορτίο στο σημείο (x,y,z)
$A$	=	η εγκάρσια διατομή του υδροφόρου κάθετα προς τη κατεύθυνση ροής
$T$	=	η μεταβιβασιμότητα
$z$	=	η κατακόρυφη απόσταση από δεδομένο επίπεδο αναφοράς
$S$	=	ο συντελεστής υδροχωρητικότητας
$P$	=	η υδροστατική πίεση
$g$	=	η επιτάχυνση της βαρύτητας
$\rho$	=	η πυκνότητα του ρευστού
$t$	=	ο χρόνος
$i$	=	η υδραυλική κλίση
$q$	=	η παροχή στο σημείο (x,y,z).

(Καλλέργης, 2001).

#### 4.4.2 Νόμος του Darcy

Ο Henry Darcy, μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή είναι ο νόμος του Darcy και η μαθηματική έκφραση είναι :

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (4.7)$$

Όπου

$Q$  = η παροχή ( $L^3/ T$ )

$A$  = η επιφάνεια ( $L^2$ )

$K$  = η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$  = η απώλεια φορτίου ( $L$ )

$L$  = το μήκος της στήλης ( $L$ )

$q$  = η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή ( $L/T$ )

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που

ελαττώνεται το φορτίο. Η έκφραση  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως  $\Delta h/dL$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds  $< 1$ , έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για  $Re = 10$ . Στην περίπτωση των υπόγειων νερών η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου Darcy χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που υπάρχει μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως κοντά σε φρέαρ άντλησης ή σε περιπτώσεις που υπάρχει τυρβώδης ροής όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Στεφανόπουλος, 2004, Καρατζάς, 2002).

Στην αριθμητική ανάλυση, οι λύσεις (των διαφορικών εξισώσεων) βρίσκονται με την αντικατάσταση των διαφορικών μορφών που παρουσιάζονται στις βασικές διαφορικές εξισώσεις της ροής του υπόγειου νερού, με πεπερασμένα φυσικά μεγέθη.

Έτσι, εισάγονται προσεγγιστικές θεωρήσεις, δηλαδή κάθε πεδίο μελέτης θεωρείται ότι αποτελείται από πολύ μικρά αλλά πεπερασμένα μεγέθη ( $\Delta x$ ) ( $\Delta y$ ), αντί μιας σειράς από άπειρα μικρές επιφάνειες ( $dx$ ) ( $dy$ ). Με τον τρόπο αυτό εισάγεται μια σημαντικά μικρή και πεπερασμένη σειρά επί μέρους συνιστώντων στοιχείων.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη δισδιάστατη ροή σε έναν ομοιογενή και ισότροπο υδροφόρο με άπειρη έκταση, που υπόκειται σε σταθερό εμπλουτισμό  $W$  είναι

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{W}{T} \quad (4.8)$$

Η εξίσωση αυτή δηλώνει ότι η μεταβολή της ροής του νερού πέρα από ένα σημείο ( $x, y$ ) είναι ίση με τη μεταβολή του εμπλουτισμού (τροφοδοσίας) στο σημείο αυτό.

Τα διαφορετικά μεγέθη  $dx$  και  $dy$  επεκτείνονται σε ένα ισοδύναμο πεπερασμένο μέγεθος  $a$ , ενώ το μέγεθος  $dt$  θεωρείται ισοδύναμο προς το μέγεθος  $\Delta t$ . Έτσι ένα σημείο θεωρείται σαν μια μικρή περιοχή τέτοιου μήκους και πλάτους, ώστε να είναι ασήμαντη, σε σχέση με το μέγεθος του υδροφορέα.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη δυσδιάστατη ροή σε έναν ετερογενή υδροφορέα με άπειρη έκταση, που δέχεται σταθερό εμπλουτισμό  $W$  είναι

$$T \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} = S \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) - W \quad (4.9)$$

(Καλλέργης, 2001)



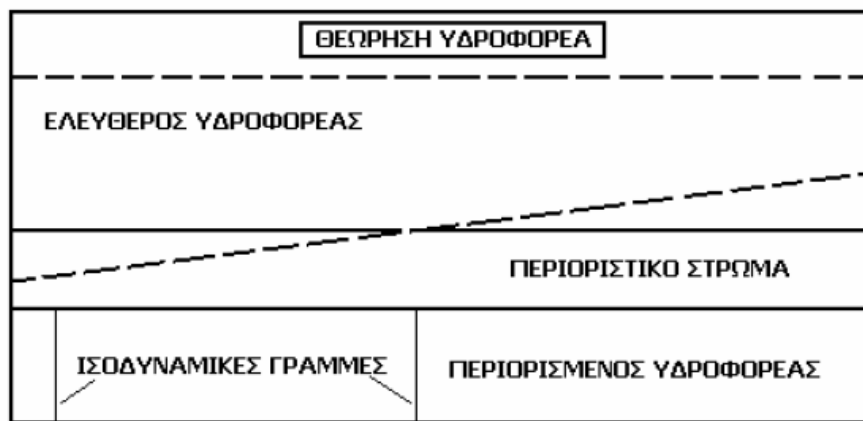
## 4.5 Οι εξισώσεις συστημάτων μοντέλου υπόγειας ροής

Η μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου περιλαμβάνει τις εξισώσεις του συστήματος, τις οριακές και αρχικές συνθήκες.

### 4.5.1 Εξισώσεις του συστήματος

Πριν τη διαφόριση μιας εξίσωσης του συστήματος υπάρχουν δύο θεωρήσεις για τα συστήματα υπόγειων υδάτων που θα πρέπει να αναφερθούν, η θεώρηση υδροφορέα και η θεώρηση συστήματος ροής.

Η θεώρηση του υδροφορέα (Εικόνα 4.2). βασίζεται στις ιδιότητες που διέπουν τους ελεύθερους και περιορισμένους υδροφορείς. Οι υδροφορείς αποτελούνται από πορώδες υλικό, μέσα στο οποίο μπορούν να αποθηκευτούν και να μεταφερθούν ποσότητες νερού σε πηγάδια. Κατά την θεώρηση ενός περιορισμένου υδροφορέα, ο οποίος καλύπτεται από ένα περιοριστικό στρώμα πορώδους υλικού που καθυστερεί την κίνηση του νερού, η ροή του νερού θεωρείται οριζόντια μέσα στους υδροφορείς και κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων. Η θεώρηση αυτή αποτελεί τη βάση για την αναλυτική επίλυση εξισώσεων όπως των Thiem, Theis και Jacob.



Εικόνα 4.2 Θεωρήσεις συστημάτων υπογείων υδάτων - Θεώρηση υδροφορέα (Anderson and Woessner, 1992)

Χρησιμοποιώντας τη θεώρηση του υδροφορέα γίνεται η προσομοίωση ενός συστήματος δισδιάστατης ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς. Στους περιορισμένους υδροφορείς η διαρροή μπορεί να προσομοιωθεί με μια ψευδοτριασδιάστατη προσέγγιση στην οποία η κάθετη ροή διαμέσω των περιοριστικών στρωμάτων αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής, που προσθέτει ή αφαιρεί ποσότητες νερού από τους υπερκείμενους ή υποκείμενους υδροφορείς. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την υδραυλική κλίση, το πάχος και την κάθετη διαπερατότητα του περιοριστικού στρώματος, ενώ η οριζόντια ροή σε αυτά δεν υπολογίζεται καθώς τα περιοριστικά στρώματα δεν είναι σαφώς προσομοιωμένα.

Στην περίπτωση της θεώρησης συστήματος ροής (Εικόνα 4.3) δε χρειάζεται η ταυτοποίηση των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων, αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος.



**Εικόνα 4.3 Θεωρήσεις συστημάτων υπογείων υδάτων - Θεώρηση συστήματος ροής (Anderson and Woessner, 1992)**

Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα και έτσι επιτρέπει το χειρισμό της ροής είτε σαν δισδιάστατη είτε σε τρεις διαστάσεις. Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (4.10)$$

όπου

$K_x, K_y, K_z$  είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας

$S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα

$R^*$  είναι ένας γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικό (εμπλουτισμός) και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση άντλησης  $R^* = -W$ .

(Anderson and Woessner, 1992 , Τριχάκης, 2004)

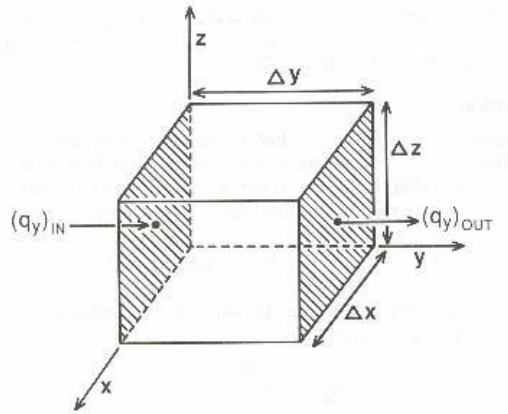
Η βασική φιλοσοφία στην κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου συνίσταται στην ανάπτυξη της εξίσωσης 'διατήρησης της ρευστής μάζας' σε έναν στοιχειώδη (μικρό) κύβο του πορώδους μέσου με υπολογισμό των εισροών, των εκροών και της αποθήκευσης ή της αφαίρεσης ρευστού από τον κύβο.

#### 4.5.2 Παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος

Ο όγκος του μοναδιαίου αυτού κύβου ισούται με  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ . Η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό άντλησης  $q$ . Ουσιαστικά πρόκειται για ένα διάνυσμα που μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών του  $q_x, q_y$  και  $q_z$ . Δηλαδή:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (4.11)$$

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



**Εικόνα 4.4 Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος (Anderson and Woessner, 1992).**

Σύμφωνα με το υδατικό ισοζύγιο, που εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας, ισχύει ότι: Θεωρώντας ότι η ροή έχει κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα  $y$  του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια  $\Delta x \cdot \Delta z$  και ισούται με  $(q_y)_{IN}$  ενώ η εκροή είναι  $(q_y)_{OUT}$ .

Έτσι, ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \quad \text{ή} \quad \frac{[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}]}{\Delta y} \cdot (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (4.12)$$

Με μετατροπή της εξίσωσης σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα  $y$  είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (4.13)$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $z$ . Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (4.14)$$

Επιπλέον, για να επιτραπεί η ύπαρξη ή μιας πηγής εμπλουτισμού μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ο όρος  $R \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ . Οπότε τελικά η αλλαγή της αποθήκευσης είναι:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^* \right) (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (4.15)$$

Θεωρώντας ότι το  $\Delta V$  είναι θετικό όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό (δηλαδή ότι το νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται) και λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα  $S_s$ , η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα, προκύπτει:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (4.16)$$

Αντίστοιχα ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου δίδεται:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (4.17)$$

Από τον συνδυασμό των παραπάνω και διαίρεσή τους δια  $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$  προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού έχοντας σταθερή την πυκνότητα του νερού:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (4.18)$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση αφού το  $q$  δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται και ο νόμος του Darcy, που συσχετίζει το  $q$  και το άμεσα μετρήσιμο υδραυλικό ύψος  $h$ . Για τις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$q_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.19)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω τελικά προκύπτει η εξίσωση 4.10

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

από την οποία θέτοντας  $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$ , πολλαπλασιάζοντας με το  $b$ , προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας  $b \cdot S_s = S$  και  $b \cdot R^* = R$  προκύπτει

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (4.20)$$

Από τα παραπάνω είναι σαφές ότι για την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου της ροής σε υδροφορέα απαιτείται η ανάπτυξη της εξίσωσης 'συνέχειας' και ακολούθως η αντικατάσταση στην προηγούμενη εξίσωση κάποιας μορφής της εξίσωσης του Darcy.

Θεωρείται ότι τα  $K_x, K_y$  και  $K_z$  (ή  $T_x, T_y$ ) είναι συγγραμμικά με τους άξονες  $x, y$  και  $z$ . Αν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος, που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ), η οποία γράφεται ως εξής:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια μίας δοκιμής άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται μετάθεση των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του πίνακα, που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Μέσω της στροφής των συντεταγμένων είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα (Anderson and Woessner, 1992, Τριχάκης, 2004).

Μία σημαντική παράμετρος σε προβλήματα που περιλαμβάνουν αλμυρό νερό, όπως το πρόβλημα της υφαλμύρισης, είναι και η πυκνότητα. Αν η επιρροή της είναι σημαντική τότε

χρειάζεται μια διαφορετική εξίσωση του συστήματος και ένας ειδικός αριθμητικός κώδικας για την περίπτωση (Anderson and Woessner, 1992, Καρτεράκης, 2005).

#### 4.6 Μαθηματικά μοντέλα

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

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

Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, χρησιμοποιείται πλέγμα ορθογωνικής μορφής για τη διακριτοποίηση του χώρου και οι εξισώσεις επιλύονται πάνω στους κόμβους του πλέγματος που μπορεί να είναι είτε στο κέντρο του κάθε κελιού (block centered grid) είτε στις κορυφές (mesh centered grid). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία σε προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων και η αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί είναι απλή και άμεσα εφαρμόσιμη.

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

Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, το πεδίο εφαρμογής αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υποπεριοχών (πεπερασμένα στοιχεία) και οι εξισώσεις λύνονται στο εσωτερικό κάθε στοιχείου με χρήση του λογισμού των διαφορών ή τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων. 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 κάνναβου 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).

Κατά την σύγκριση των παραπάνω μεθόδων προκύπτει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να προγραμματιστεί πιο εύκολα, καθώς σε γενικές γραμμές για κατασκευή ενός κάνναβου απαιτούνται λιγότερα δεδομένα. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις κατά τις οποίες η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι καλύτερη

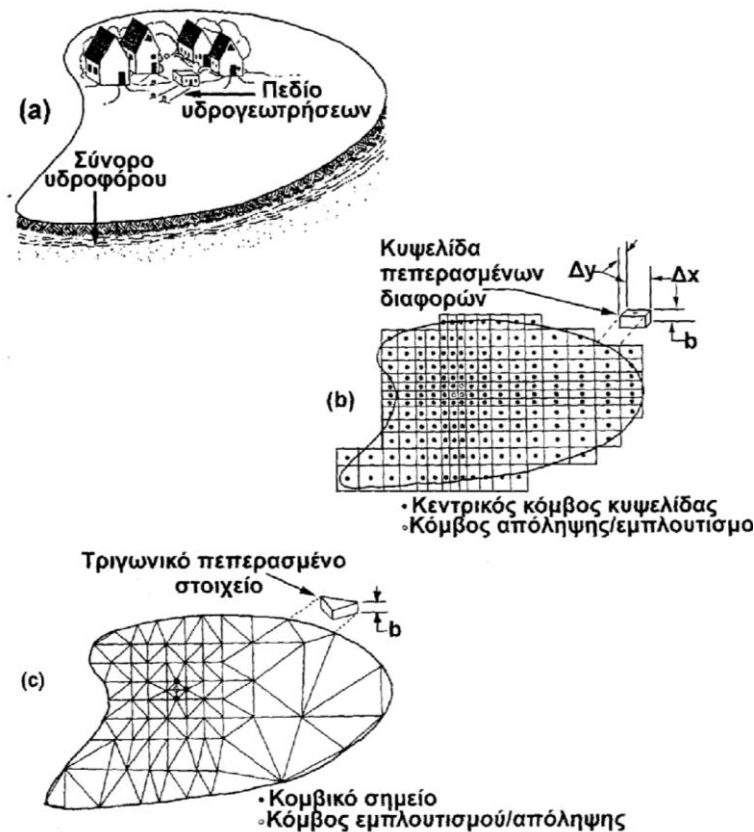
επιλογή λόγω του ότι προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα όρια και γεωλογικές δομές όπως ρήγματα και σημειακές πηγές και καταβόθρες.

#### **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.

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

Σχετικά με τα δύο είδη μαθηματικών μοντέλων, τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (Εικόνα 4.5b) και τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα 4.5c) στην Εικόνα 4.5 δίνεται μια παραστατική παρουσίαση τους. Οι μεταβλητές, όπως εκφράζονται μέσα από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις, αλλάζουν συνεχώς. Έτσι, οι συνεχείς μεταβλητές αντικαθίστανται με ξεχωριστές διακριτές μεταβλητές που προσδιορίζονται σε επιλεγμένα σημεία, τους 'κόμβους' (nodes), που βρίσκονται μέσα στο χώρο του συστήματος που περιγράφεται από το αριθμητικό μοντέλο. Οι μεταβλητές αυτές δίνονται από έναν πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν μια συγκεκριμένη παράμετρο, όπως π.χ. το φορτίο  $h$ .



Εικόνα 4.5 Δισδιάστατος κάναβος στις μεθόδους «πεπερασμένων διαφορών» και πεπερασμένων στοιχείων» με τις αντίστοιχες κυψελίδες (βρόχους) τους (Καλλέργης, 2001).

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

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

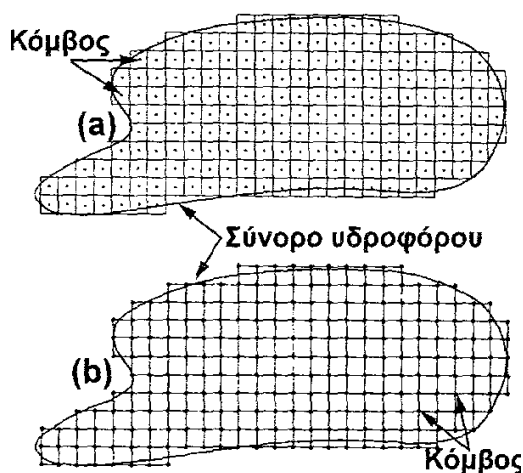
Οι πιο πάνω μεταβλητές μπορούν να μεταβληθούν κατά βούληση ώστε να διαπιστωθεί η αντίστοιχη συμπεριφορά του υδροφόρου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τις πιο πάνω προγνώσεις είναι η ικανότητα της εκτέλεσης 'ανάλυσης ευαισθησίας' των παραμέτρων του υδροφόρου συστήματος και διαδοχικών δοκιμών των εναλλακτικών υποθέσεων σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες.



#### 4.7 Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής MODFLOW που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της ροής σε αυτή την περιοχή είναι ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του κάνναβου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την επίλυση των εξισώσεων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών αναλύεται στη συνέχεια.

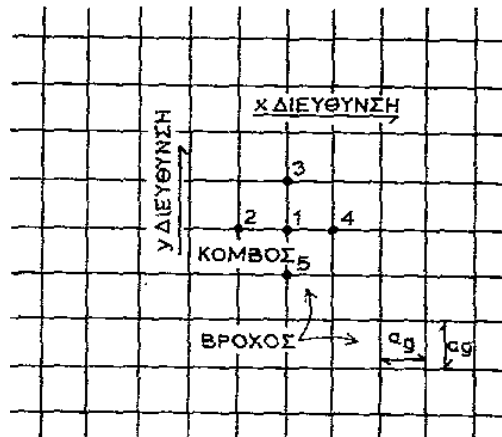
Αρχικά, διακρίνονται δυο διαφορετικές διατάξεις των κόμβων (Εικόνα 4.6) στο πλέγμα (δίκτυο) των βρόχων. Οι κόμβοι στους οποίους θα υπολογιστούν οι μεταβλητές του υδροφόρου μπορεί να βρίσκονται στο κέντρο κάθε βρόχο (Block-centered grid) ή στις τέσσερις κορυφές των τετράγωνων βρόχου (mesh-center grid).



**Εικόνα 4.6 (a) «Κεντροβαρική» (Block-centered grid) και (b) «κατά κορυφή» διάταξη των κόμβων στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών (mesh-center grid) (Καλλέργης, 2001)**

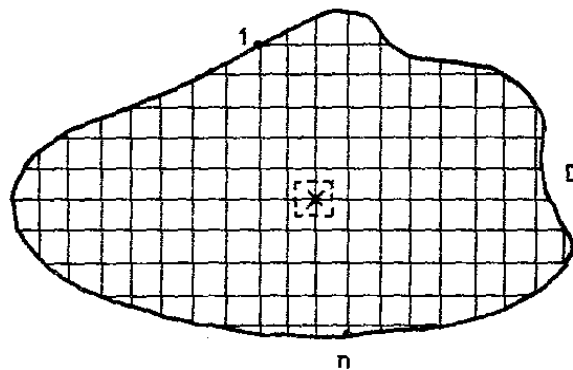
Η επιλογή ανάμεσα στις δύο διατάξεις γίνεται ανάλογα με τις οριακές συνθήκες. Όταν είναι γνωστή η παροχή εγκάρσια προς το όριο (συνθήκη Neumann) είναι πιο πρακτική η χρήση της 'κεντροβαρικής' διάταξης των κόμβων ενώ όταν είναι γνωστό το φορτίο στο όριο (συνθήκη Dirichlet) πρέπει να επιλέγεται η διάταξη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

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



**Εικόνα 4.7 Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών που χρησιμοποιείται στην αριθμητική ανάλυση. Ονοματολογία. (Καλλέργης, 2001)**

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



**Εικόνα 4.8 Πλέγμα τετράγωνων βρόχων (Καλλέργης, 2001)**

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

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

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

μέσων τιμών των παραπάνω παραμέτρων στο βρόχο, που περιβάλλει το θεωρούμενο κόμβο.

Οι αρχικές συνθήκες είναι το αρχικό φορτίο  $h$  σε όλους τους κόμβους του δικτύου και οι οριακές συνθήκες του  $h$ , οι  $\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}$  στους κόμβους μόνο των ορίων. Συνεπώς η λύση του προβλήματος συνίσταται στην καταγραφή των εξισώσεων, διαδοχικά για καθένα από τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι αριθμούνται 1 έως  $n$ .

Το σύνολο των εξισώσεων αυτών αποτελεί ένα γραμμικό σύστημα  $m$  εξισώσεων με  $m$  αγνώστους. Ένα τέτοιο πρόβλημα δέχεται μια και μοναδική λύση, η οποία συνίσταται στον προσδιορισμό του  $h$  (Καλλέργης, 2001).

## Κεφάλαιο 5 – Το υπολογιστικό περιβάλλον και τα λογισμικά της μοντελοποίησης

### 5.1 Το υπολογιστικό περιβάλλον *mfLab*

Το περιβάλλον *mfLab* (<http://code.google.com/p/mfLab>) επιλέχθηκε ως μέσο για την προεπεξεργασία και επεξεργασία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα MODFLOW/SW2. Το *mfLab* είναι ένα περιβάλλον ανοιχτού κώδικα που διασυνδέει το υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab, με τους κώδικες προσομοίωσης υπόγειας ροής ModFlow(<http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>), MT3DMS (<http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/>) και Seawat (<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>). Βασικό στοιχείο του περιβάλλοντος *mfLab* είναι οι πάνω από 300 ρουτίνες Matlab, μέσω των οποίων προκύπτουν τα εισερχόμενα αρχεία για τα παραπάνω μοντέλα και οι οπτικοποιήσεις των αποτελεσμάτων. (Olsthoorn, 2013)

### 5.2 Το λογισμικό MODFLOW

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

Η αξιοπιστία της προσομοίωσης που προσφέρει το MODFLOW είναι συνάρτηση της ομοιογένειας του υδροφόρου συστήματος που προσομοιώνεται αλλά κυρίως της αξιοπιστίας των στοιχείων εισόδου στο πρόγραμμα, όπως οι υδραυλικές και υδρολογικές παράμετροι, το υδραυλικό φορτίο, οι οριακές συνθήκες κλπ. Το MODFLOW αυτό καθ' εαυτό είναι ένα πρόγραμμα που αποτελείται από διάφορα «πακέτα», δηλαδή από ανεξάρτητες «υπορουτίνες» που εκτελούν ειδικές λειτουργίες προσομοίωσης, στηριζόμενες στην τεχνική των «πεπερασμένων διαφορών». Η ενδεχόμενη κατά συνέπεια αναξιοπιστία ενός στοιχείου εισόδου είναι αρκετή για να δώσει συνολικά αναξιόπιστα αποτελέσματα. Για την αντιμετώπιση είτε της ανεπάρκειας είτε της ετερογένειας πρωτογενών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται διάφορα γεωστατιστικά εργαλεία. (Ahlfeld, 2000)

#### 5.2.1 Βασικές αρχές και παραδοχές του λογισμικού MODFLOW

Οι βασικές αρχές του λογισμικού MODFLOW σχετίζονται με το γεγονός ότι το υδρογεωλογικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση (steady case). Η επίλυση των εξισώσεων βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο κέντρο

κάθε κυψελίδας. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα να συμπεριληφθούν συνδυασμοί υδροφόρων στρωμάτων με το μέσο να είναι ομοιογενές ή ανισότροπο και η ροή να προσομοιωθεί σε τρισδιάστατη μορφή.

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του κώδικα MODFLOW σχετίζονται με:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.
- Τις αρχικές συνθήκες (initial heads), δηλαδή οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους του κάρναβου.
- Τις οριακές συνθήκες, είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του κάρναβου.
- Τις υδραυλικές παραμέτρους (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας).
- Τις παροχές αντλήσεων ή εμπλουτισμού.
- Το ρυθμό τροφοδοσίας από κατείδυση βροχόπτωσης.

Σε όλες τις παραπάνω παραμέτρους θα πρέπει να γίνει προσαρμογή των μονάδων μέτρησης στο ίδιο σύστημα.

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα πραγματοποιείται με τη μορφή ενός δικτύου από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κυψελίδες (cells). Η θέση αυτών περιγράφεται με τη μορφή γραμμών, στηλών και στρωμάτων. Η στάθμη του υπόγειου νερού υπολογίζεται για ένα σημείο της κάθε κυψελίδας που ονομάζεται κόμβος. Στην προσομοίωση με το MODFLOW ο υπολογισμός του φορτίου γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων.

Οι τύποι των κυψελίδων που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις συνθήκες στα όρια, είναι οι ακόλουθοι:

α) σταθερού φορτίου (constant head). Στα όρια αυτά η στάθμη παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποδίδονται με τον κωδικό -1.

β) κυψελίδες μηδενικής ροής (no flow boundary ή inactive). Στα όρια μηδενικής ροής περιλαμβάνονται οι κυψελίδες όπου καμία ροή νερού από και προς αυτές δεν λαμβάνει χώρα, δηλαδή όταν οι εισροές είναι μηδενικές. Αποδίδονται με τον κωδικό 0.

γ) κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell). Ο τύπος κυψελίδων μεταβαλλόμενου φορτίου είναι αυτός κατά τον οποίο η στάθμη μεταβάλλεται με το χρόνο. Αποδίδονται με τον κωδικό 1.

δ) κυψελίδες σταθερής εισροής ή constant flux ή GHB (general head boundaries). Στα όρια αυτά η εισροή παραμένει σταθερή και η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες.

Το πλήθος των κυψελίδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μιας περιοχής είναι απεριόριστο και ουσιαστικά περιορίζεται μόνο από τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Το μέγεθος του μοντέλου προσδιορίζεται με τον αριθμό γραμμών, τον αριθμό στηλών και τον αριθμό στρωμάτων (NROW, NCOL, NLAY).

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

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \Delta V \quad (5.1)$$

όπου:

- $S_s$  = η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού
- $Q_i$  = ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα
- $\Delta V$  = ο όγκος της κυψελίδας
- $\Delta \Phi$  = η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα  $\Delta t$

Για την επίλυση, το πρόγραμμα MODFLOW χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει δυνατότητα χρήσης τεσσάρων διαφορετικών μεθόδων:

1. Ισχυρά πεπλεγμένη (Strongly Implicit Procedure 1, S.I.P. 1)
2. Σταδιακή υπερχαλάρωση των κόμβων (Slice Successive Overlaxation 1, S.O.R.1)
3. Υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient 2, P.C.G.2)
4. Μηχανή επίλυσης WHS

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.2)$$

όπου:

- $T_{xx}, T_{yy}, T_{zz}$  = οι τιμές της μεταβιβασιμότητας κατά τον x, y, z αντίστοιχα (L<sup>2</sup> /T)
- $H$  = το υδραυλικό φορτίο (L)
- $W$  = παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (T-1)

$S_s$	= ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου ( L-1)
$T$	= ο χρόνος (T)

### 5.2.2 Υπορουτίνες κώδικα MODFLOW

Ο κώδικας MODFLOW έχει σπονδυλωτή δομή και αποτελείται από αυτοτελείς ρουτίνες-πακέτα κάθε ένα εκ των οποίων εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία. Τα πακέτα που συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των υπογείων ροών είναι τα:

#### 1. Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)

Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο σχετίζονται με τον αριθμό των γραμμών και στηλών, τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων, τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα κάθε περιόδου, τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης και τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κάνναβου.

#### 2. Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής (Block-Centered Flow Package, BCF)

Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν τον τύπο του υδροφόρου, τις συνθήκες ροής, τις διαστάσεις των κυψελίδων του κάνναβου, τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες ή της μεταβιβασιμότητας για τους υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες, το συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες.

#### 3. Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα που ορίζεται ως κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις ή ως τεχνητός εμπλουτισμός και μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα (top layer).

#### 4. Γεωτρήσεις (Well Package)

Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Οι θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης.

#### 5. Υδρορέματα (River, RIV)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τη ροή νερού μεταξύ υδρορέματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφόρου. Τα υδρορέματα τροφοδοτούν τον υδροφόρο ή τροφοδοτούνται από αυτόν, ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφόρου.

#### 6. Όριο γενικού φορτίου (General Head Boundary, G.H.B.)

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων (μπορεί να προσομοιώσει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα που βρίσκεται εκτός των ορίων της περιοχής, υποδηλώνοντας την ύπαρξη πλευρικής τροφοδοσίας). Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογη της διαφοράς της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική αυτή πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου και εξαρτάται από την αγωγιμότητα (conductance) των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες του μοντέλου με τις οποίες γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιαζόμενη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κυψελίδα:

- Το γενικό φορτίο: Είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο όπως για παράδειγμα η επιφάνεια μιας λίμνης ή μπορεί να ληφθεί από τη ρύθμιση του μοντέλου.
- Την αγωγιμότητα: Αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο όριο γενικού φορτίου και τα υπόγεια νερά της προσομοιούμενης περιοχής.

#### 7. Σταθερό φορτίο (Constant head)

Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά.

#### 8. Εξατμισοδιαπνοή Evapotranspiration (ET)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους

#### 9. Drains

Αυτό έχει σχεδιασθεί να προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

#### 10. Output Control

Στο πακέτο αυτό καθορίζεται ο τρόπος και η μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλα βοηθητικά προγράμματα για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Η εφαρμογή του κώδικα Modflow δίνει τη δυνατότητα χρήσης υποθετικών σεναρίων. Επιτρέπει να μελετηθούν διάφορες υποθετικές καταστάσεις και να γίνει πρόβλεψη της εξέλιξης διαφόρων φαινομένων (π.χ μελέτη εξέλιξης της πιεζομετρίας, μελέτη και πρόβλεψη της διασποράς ρύπων ή ενός μετώπου υφαλμύρισης κ.α.) (Visual MODFLOW, 2006)



### 5.2.3 Μηχανές επίλυσης MODFLOW

#### 5.2.3.1 Πακέτο προαπαιτούμενης συζυγούς βαθμίδας

Το πακέτο αυτό (Preconditioned Conjugate Gradient package, PCG2) χρησιμοποιεί τη μέθοδο της συζυγούς βαθμίδας για να επιλύσει τις ταυτόχρονες εξισώσεις που δημιουργούνται από το μοντέλο κάτω από γραμμικές και μη γραμμικές συνθήκες ροής. Το PCG2 περιλαμβάνει δύο προαπαιτούμενες επιλογές:

1. την τροποποιημένη μη ολοκληρωμένη προϋπόθεση Cholesky, η οποία είναι αποδοτική σε βαθμωτούς (scalar) υπολογιστές, και
2. την πολυωνυμική προϋπόθεση, η οποία απαιτεί από τον Η/Υ λιγότερη μνήμη και με συγκεκριμένες τροποποιήσεις είναι πιο αποδοτική στους ανυσματικούς (vector) υπολογιστές.

Η σύγκλιση της επίλυσης καθορίζεται χρησιμοποιώντας, τόσο τις μεταβολές των υδραυλικών φορτίων, όσο και τα κριτήρια υπολοίπου (residual criteria).

#### 5.2.3.2 Πακέτο Ισχυρά πεπλεγμένης μεθόδου

Η μέθοδος της Ισχυρά πεπλεγμένης μεθόδου (Strongly Implicit Procedure Package, SIP) χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλου συστήματος ταυτόσημων γραμμικών εξισώσεων με επανάληψη. Βασικό πλεονέκτημα της μηχανής επίλυσης SIP είναι ότι είναι πολύ σταθερή και γενικά καταλήγει σε σύγκλιση, συχνά όμως με πολύ αργό ρυθμό. Δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η μέθοδος PCG, αλλά απαιτεί λιγότερη μνήμη για να υπολογίσει την τελική επίλυση. Επειδή κάθε επίλυση περιλαμβάνει μέχρι επτά άγνωστες τιμές φορτίου και η ομάδα των άγνωστων τιμών αλλάζει από την μία εξίσωση στην επόμενη, διαμέσου του πλέγματος (grid), οι εξισώσεις για όλο το πλέγμα πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα, για κάθε χρονικό βήμα. Για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Η επίλυση συνίσταται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

#### 5.2.3.3 Πακέτο επιτυχούς εκτόνωσης

Η συγκεκριμένη μηχανή επίλυσης (Slice-successive Over-Relaxation package, SOR) χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων. Κατά την εφαρμογή της, το πλέγμα διαιρείται σε κάθετες "φέτες", ομαδοποιώντας τις εξισώσεις των κόμβων σε διακριτές ομάδες, στις οποίες κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε μία "φέτα". Σε κάθε επανάληψη, αυτές οι ομάδες εξισώσεων λειτουργούν διαδοχικά, δίνοντας αποτελέσματα

σε νέα ομάδα καθορισμένων τιμών φορτίων για κάθε "φέτα". Καθώς γίνεται η επεξεργασία των εξισώσεων για κάθε "φέτα", αυτές εκφράζονται πρώτα σε όρους της μεταβολής των υπολογιζόμενων φορτίων, μεταξύ των επιτυχημένων επαναλήψεων. Η ομάδα των εξισώσεων που αντιστοιχεί στην "φέτα" επιλύεται μέσω της απαλοιφής Gaussian, χρησιμοποιώντας τους όρους για μεταβαλλόμενες "φέτες" ως γνωστές ποσότητες. Στη συνέχεια, η κάθε μία από τις τιμές της μεταβολής του φορτίου που υπολογίζονται για τη "φέτα", πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή επιτάχυνσης,  $T$ , με τιμή γενικά μεταξύ 1 και 2. Τα αποτελέσματα θεωρούνται τελικές τιμές της μεταβολής του φορτίου στην επανάληψη για την "φέτα". Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι "φέτες" και προς τις τρεις διευθύνσεις ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), να επεξεργαστούν και να ολοκληρωθούν οι επαναλήψεις στην περιοχή ενδιαφέροντος. Τελικά, η συνολική ακολουθία επαναλαμβάνεται μέχρι οι διαφορές μεταξύ των μεταβολών φορτίου, οι οποίες υπολογίστηκαν στις επιτυχείς επαναλήψεις, να είναι μικρότερες από το επιλεγμένο κριτήριο σε όλους του κόμβους του πλέγματος.

#### 5.2.3.4 Μηχανή επίλυσης WHS

Η μηχανή επίλυσης WHS είναι η βασική μηχανή επίλυσης του ModFlow και χρησιμοποιεί την ρουτίνα επιτάχυνσης της σταθερής συζυγούς βαθμίδας (Bi-Conjugate Gradient STABilized, Bi-CGSTAB. Χρησιμοποιεί την μέθοδο των επαναλήψεων, προσεγγίζει την επίλυση μιας μεγάλης ομάδας μερικών διαφορικών εξισώσεων επαναληπτικά, μέσω μιας προσεγγιστικής επίλυσης. Επειδή η μητρική εξίσωση για τη ροή του υπόγειου νερού είναι αρχικά "ανεπαρκούς συνθήκης", είναι αναγκαία για αποτελεσματική επίλυση μια ενεργή προϋπόθεση για αυτές τις εξισώσεις. Στην μηχανή επίλυσης WHS είναι διαθέσιμα δύο "επίπεδα" παραγοντισμού. Ενώ η σύγκλιση της επίλυσης απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις με επίπεδο παραγοντισμού 1, η απαιτούμενη μνήμη για να "τρέχει" (run) η επίλυση αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού. Επίσης, η εργασία ανά επανάληψη αυξάνει με το επίπεδο παραγοντισμού 1, τόσο ώστε ο συνολικός χρόνος επίλυσης να μην είναι λιγότερος από αυτόν που απαιτείται για το επίπεδο παραγοντισμού 0 (Visual MODFLOW, 2006, Τσελέπη, 2009).

#### 5.2.4 Προσδιορισμός οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) ορίζονται στην περιοχή μελέτης προκειμένου να μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί του υδραυλικού ύψους κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που επικρατούν σε συγκεκριμένες ζώνες της περιοχής.

Είναι μια μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη-head) ή την παράγωγο αυτής (ροή-flux) στα όρια της περιοχής του προβλήματος. Για την επίτευξη όσο το δυνατό πιο αξιόπιστης προσομοίωσης της ροής, θα πρέπει να γίνει σωστή επιλογή

οριακών συνθηκών. Τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από τη φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος. Άλλα όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών. Αυτά τα αόρατα όρια είναι υδραυλικά όρια που περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και ποτάμια.

#### 5.2.4.1 Τύποι οριακών συνθηκών

Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών.

- **Συνθήκες Dirichlet:** Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.
- **Συνθήκες Neumann:** Όρια καθορισμένης ροής για τα οποία η παράγωγος της ροής (flux) κατά μήκος του ορίου είναι δεδομένη. Μια οριακή συνθήκη μηδενικής ροής (αδιαπέρατου φράγματος) δίνεται τοποθετώντας τη σταθερή ροή ίση με το μηδέν.
- **Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου:** Όρια εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος ροής για τα οποία η flux κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. Υπάρχουν αρκετοί τύποι ορίων ροής εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος.

(Anderson and Woessner, 1992)

#### 5.2.5 Δημιουργία ομοιώματος

Το πακέτο του MODFLOW (FLOW package) βάσει του οποίου συντάχθηκε το μοντέλο είναι το Block-Centered Flow (BCF), που σημαίνει ότι οι τιμές των παραμέτρων που εισάγονται και οι τιμές που προκύπτουν κατά την επίλυση του μοντέλου, υπολογίζονται στο κέντρο του κόμβου της κάθε κυψελίδας.

## Κεφάλαιο 6 – Το πακέτο εφαρμογών Seawater Intrusion (SWI2)

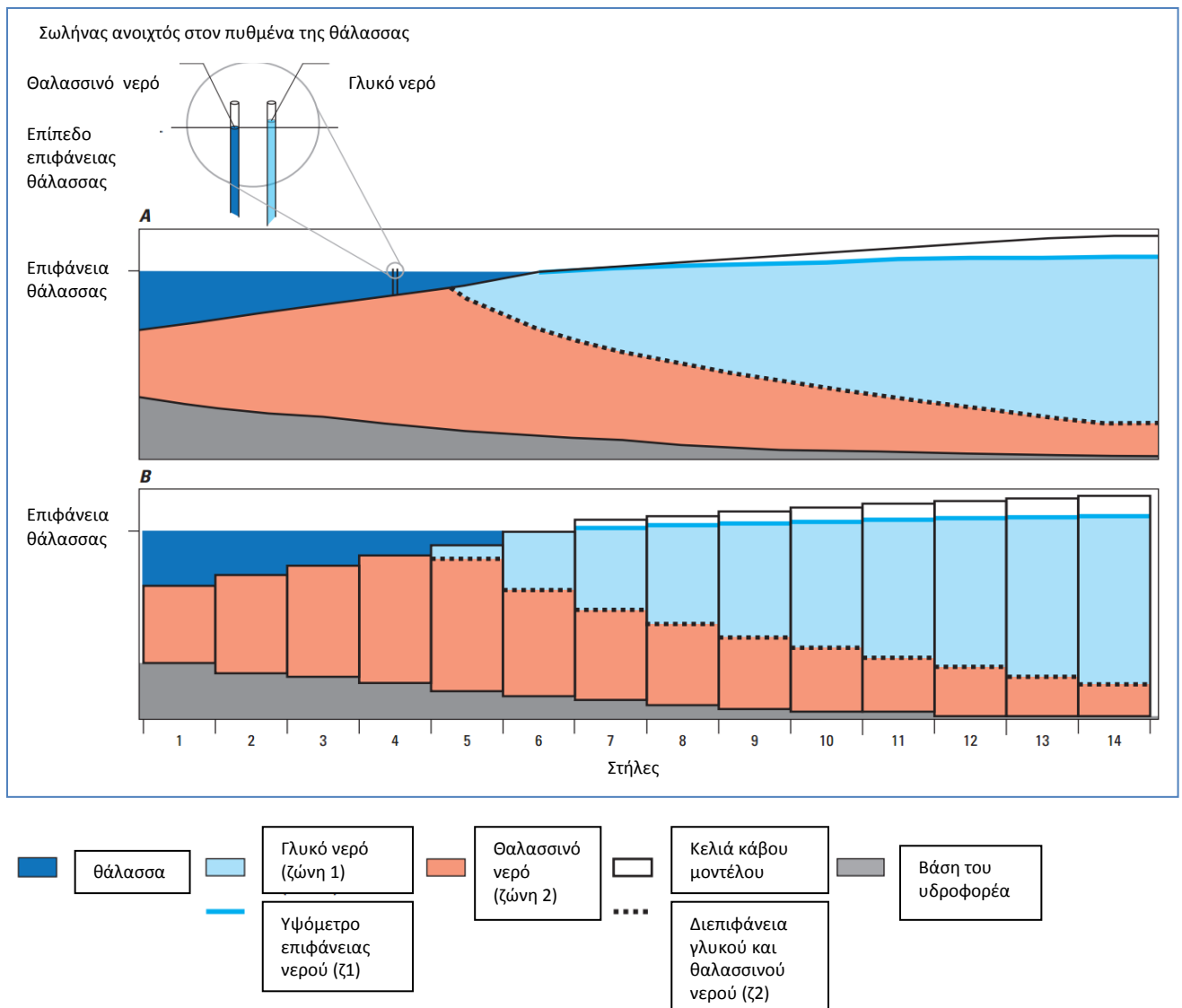
Το Seawater Intrusion (SWI2) είναι ένα πακέτο εφαρμογών για το πρόγραμμα MODFLOW. Το SWI2, μέσω της χρήσης του MODFLOW-2005 επιτρέπει την προσομοίωση της τρισδιάστατης ροής των υπόγειων υδάτων με μεταβλητή πυκνότητα, ολοκληρωμένη κάθετα. Η καθέτως ολοκληρωμένη ροή υπογείων υδάτων μεταβαλλόμενης πυκνότητας βασίζεται στην προσέγγιση του Dupuit, κατά την οποία ένας υδροφορέας μπορεί να διακριτοποιηθεί σε ζώνες διαφόρων πυκνοτήτων, διαχωρισμένες η μία από την άλλη με επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν διεπιφάνειες ή ισοεπιφάνειες πυκνότητας. Η αριθμητική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στο SWI2 δεν λαμβάνει υπ' όψιν τη διάχυση και διασπορά.

Το βασικό πλεονέκτημα από την εφαρμογή του SWI2, σε σύγκριση με μοντέλα που επιλύουν εξισώσεις ροής και μεταφοράς, είναι το γεγονός πως το SWI2 αντιπροσωπεύει την τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων μεταβαλλόμενης πυκνότητας κάθετα ολοκληρωμένης, χωρίς να χρειάζεται η κάθετη διακριτοποίηση του υδροφορέα. Εναλλακτικά υιοθετείται η προσέγγιση Dupuit και κάθε υδροφορέας διακριτοποιείται κάθετα σε ζώνες που έχουν διαφορετικές πυκνότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αριθμητική προσομοίωση με το SWI2 να χρειάζεται λιγότερα κελιά από τις προσομοιώσεις της επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς. Η υιοθέτηση της προσέγγισης Dupuit συνεπάγεται ότι μέσα στον υδροφορέα η αντίσταση στην κάθετη ροή δεν λαμβάνεται υπόψη και δεν υπάρχει κάθετη βαθμίδα των υδραυλικών υψών (υδροστατικές συνθήκες).

Οι εξισώσεις του SWI2 είναι κατάλληλες για νερό σε υγρή φάση, που έχει πυκνότητα μικρότερη ή ίση από το θαλασσινό νερό, ενώ μεταβολές του ιξώδους δεν λαμβάνονται υπόψη.

### 6.1 Εννοιολογικό μοντέλο

Η σχηματική αναπαράσταση της διατομής ενός παράκτιου υδροφορέα που παρουσιάζει υφαλμύριση παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.1. Το γλυκό νερό ρέει από δεξιά προς τα αριστερά με κατεύθυνση τη θάλασσα και διαχωρίζεται από το υποκείμενο θαλασσινό νερό από μια διεπιφάνεια. Ο παράκτιος υδροφορέας έχει διακριτοποιηθεί σε ένα στρώμα με 14 κελιά (Εικόνα 6.1B). Τα 10 κελιά στη δεξιά μεριά του μοντέλου περιέχουν και γλυκό και θαλασσινό νερό, ενώ τα 4 κελιά στην αριστερή μεριά περιέχουν μόνο θαλασσινό νερό. Θεωρούμε ένα σωλήνα στον πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα 6.1A) ο οποίος όταν είναι γεμάτος με θαλασσινό νερό, το επίπεδο του νερού στο σωλήνα είναι ίσο με το επίπεδο της θάλασσας. Όταν ο σωλήνας γεμίσει με γλυκό νερό, το νερό στο σωλήνα είναι πιο ψηλά από το επίπεδο της θάλασσας και αυτό ονομάζεται υδραυλικό ύψος γλυκού νερού.

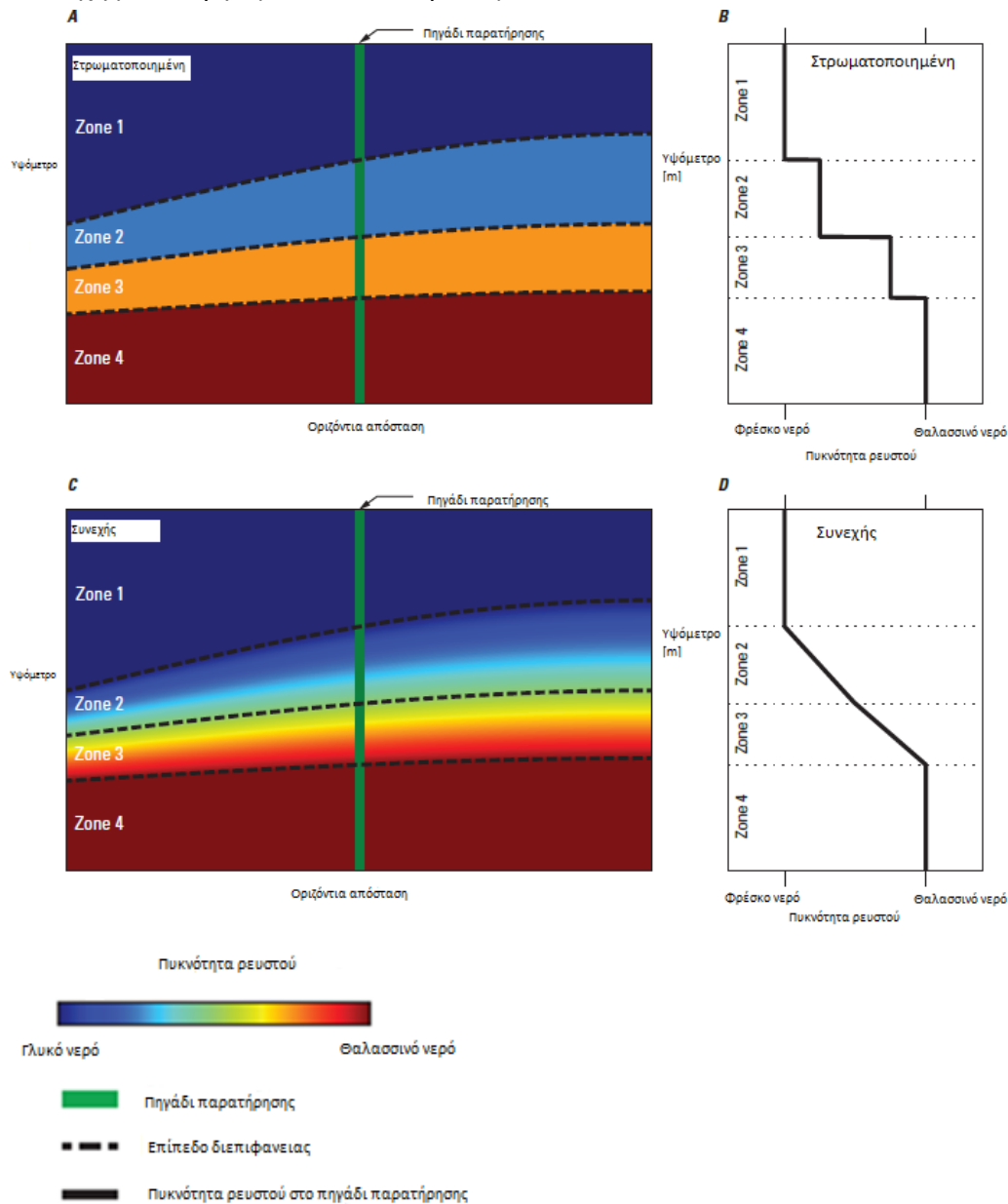


**Εικόνα 6.1 A) Διατομή ενός παράκτιου υδροφορέα με το γλυκό νερό να ρέει από δεξιά προς αριστερά, B) διατομή ενός παράκτιου υδροφορέα διακριτοποιημένου χρησιμοποιώντας μοντέλο ενός επιπέδου. Η θέση της διεπιφάνειας γλυκού και θαλασσινού νερού αποτυπώνεται στις εικόνες A και B.**

Στους παράκτιους υδροφορείς η πυκνότητα των υπογείων υδάτων είναι συνάρτηση της αλατότητας. Στο SWI2 η πυκνότητα κάθε υδροφορέα χωρίζεται κάθετα σε διακριτές ζώνες. Σχηματικά μια κάθετη διατομή αυτής της προσέγγισης φαίνεται στην Εικόνα 6.2A, όπου οι παχιές διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις επιφάνειες που διαχωρίζουν τις ζώνες. Το υψόμετρο κάθε επιφάνειας είναι μια συνάρτηση των οριζόντιων συντεταγμένων.

Το SWI2 έχει 2 επιλογές. Κατά την πρώτη επιλογή το νερό έχει σταθερή πυκνότητα σε κάθε ζώνη, η οποία είναι ασυνεχής από ζώνη σε ζώνη και κάθε επιφάνεια αντιπροσωπεύει μια διεπιφάνεια (εικόνα 6.2B). Πολλαπλές διεπιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν για παράδειγμα γλυκό από υφάλμυρο νερό και υφάλμυρο από θαλασσινό

νερό. Η επιλογή αυτή ορίζεται ως «στρωματοποιημένη επιλογή» (stratified option). Κατά τη δεύτερη επιλογή, η πυκνότητα του νερού αλλάζει γραμμικά κατά την κάθετη διεύθυνση σε κάθε ζώνη, είναι συνεχής από ζώνη σε ζώνη και οι επιφάνειες που περικλείουν τις ζώνες είναι ισοεπιφάνειες πυκνότητας (εικόνα 6.2C). Η πυκνότητα του νερού δεν διαφέρει μέσα στη ζώνη του γλυκού και αλμυρού νερού (εικόνα 6.2D). Η επιλογή αυτή ορίζεται ως «συνεχής επιλογή» (continuous option).



**Εικόνα 6.2 Διαθέσιμες επιλογές για την κατανομή της πυκνότητας στο SWI2: A) Κάθετη τομή υδροφορέα με χρήση ασυνεχούς, στρωματοποιημένης πυκνότητας, B) Κάθετη κατανομή της πυκνότητας όπου η πυκνότητας θεωρείται στρωματοποιημένη, C) Κάθετη τομή ενός υδροφορέα με χρήση της επιλογής της γραμμικά συνεχούς πυκνότητας, D) Κάθετη κατανομή της πυκνότητας όπου η πυκνότητας θεωρείται συνεχής και γραμμικά μεταβαλλόμενη**

## 6.2.Εξισώσεις που διέπουν τη ροή υπογείων υδάτων με μεταβλητή πυκνότητα

Από την θεώρηση ενός Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων  $x, y, z$ , με τον άξονα  $z$  να είναι θετικός με κατεύθυνση κάθετη προς τα επάνω, ο νόμος του Darcy για ροή μεταβαλλόμενης πυκνότητας μπορεί γραφτεί ως

$$q_x = -K \frac{\partial h_f}{\partial x} \quad q_y = -K \frac{\partial h_f}{\partial y} \quad q_z = -K \left( \frac{\partial h_f}{\partial z} + v \right) \quad (6.1)$$

Όπου

$q_x, q_y, q_z$  είναι οι συνιστώσες του διανύσματος της ειδικής παροχής [L/T]

$K$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

$h_f$  είναι το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού [L]

$v$  είναι η αδιάστατη πυκνότητα που ορίζεται ως

$$v = \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \quad (6.2)$$

Όπου

$\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού [M/L<sup>3</sup>]

$\rho_f$  είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού [M/L<sup>3</sup>]

Η παραγωγή που παρουσιάζεται παρακάτω ισχύει τόσο σε ισότροπο υδροφορέα, όσο και σε ανισότροπο υδροφορέα.

Το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού είναι συνάρτηση των τριών χωρικών συντεταγμένων και ορίζεται ως εξής:

$$h_f(x, y, z) = \frac{p(x, y, z)}{\rho_f g} + z \quad (6.3)$$

Όπου

$p$  είναι η πίεση του ρευστού [M/L T<sup>2</sup>] και

$g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας [L/ T<sup>2</sup>].

Η υδραυλική αγωγιμότητα του γλυκού νερού ορίζεται ως:

$$K = \frac{k \rho_f g}{\mu_f} \quad (6.4)$$

Όπου

$k$  είναι η ειδική διαπερατότητα του υδροφορέα [L<sup>2</sup>]

$\mu_f$  είναι το ιξώδες του γλυκού νερού [M/L T].

Οι διακυμάνσεις στις τιμές του ιξώδους δεν λαμβάνονται υπόψη λόγω του ότι το ιξώδες του γλυκού νερού είναι σχεδόν ίσο με αυτό του θαλασσινού νερού. Επίσης, η ποσοστιαία

διαφορά μεταξύ υδραυλικής αγωγιμότητας γλυκού και θαλασσινού νερού είναι μικρή και για αυτό το λόγο επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη.

### **Βασικές προσεγγίσεις και παραδοχές**

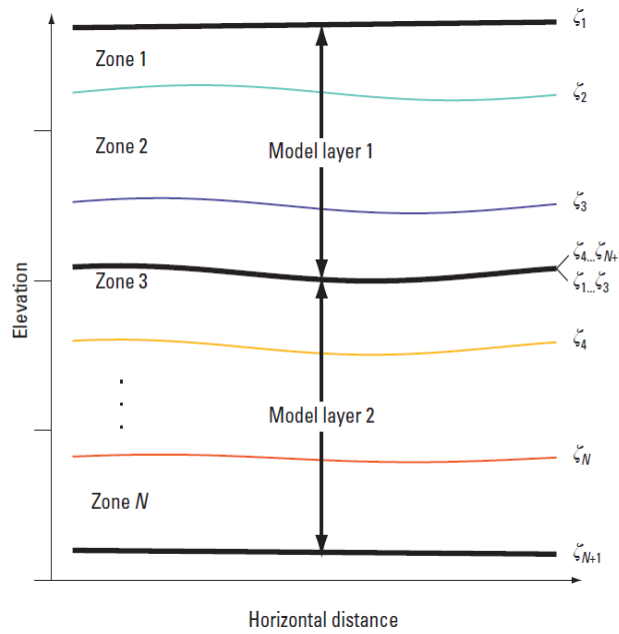
Τέσσερις είναι οι βασικές προσεγγίσεις που γίνονται κατά την μαθηματική εξαγωγή των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται στο πακέτο SWI2.

1. Υιοθετείται η προσέγγιση Dupuit, σύμφωνα με την οποία η αντίσταση της ροής σε έναν υδροφορέα παραλείπεται κατά την κάθετη διεύθυνση.
2. Κατά τον υπολογισμό της ροής, η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας αντικαθίσταται από την εξίσωση ισοζυγίου όγκου (προσέγγιση Boussinesq-Oberbeck). Οι επιδράσεις της πυκνότητας λαμβάνονται υπόψη μόνο στο νόμο του Darcy.
3. Τα φαινόμενα της διάχυσης και της διασποράς θεωρούνται αμελητέα.
4. Οι αντιστροφές πυκνότητας επιτρέπονται μεταξύ υδροφορέων αλλά όχι μέσα σε έναν υδροφορέα. Αντιστροφή πυκνότητας συμβαίνει όταν το αλμυρό και πιο πυκνό νερό υπέρκειται του γλυκού, λιγότερου πυκνού νερού και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία 'δαχτύλων'. Το πακέτο SWI2 έχει σχεδιαστεί για την μοντελοποίηση τοπικής υφαλμύρισης, η οποία ξεπερνάει σε επίπεδο μεγέθους τα 'δάχτυλα' που δημιουργούνται σαν αποτέλεσμα της αντιστροφής πυκνότητας.

### **6.3 Μαθηματική εξαγωγή της κάθετα ολοκληρωμένης και μεταβαλλόμενης πυκνότητας ροής υπογείων υδάτων σε υδροφορέα**

Η εξαγωγή της κάθετα ολοκληρωμένης ροής υπογείων υδάτων σε υδροφορείς, που παρουσιάζεται εδώ, βασίζεται σε εργασία του Bakker (2003) και σε μια εναλλακτική προσέγγιση που παρουσιάζεται αργότερα. Το νερό σε έναν υπόγειο υδροφορέα διακριτοποιείται κάθετα σε  $N+1$  επιφάνειες που περικλείουν  $N$  ζώνες που έχουν διαφορετικές πυκνότητες. Οι ζώνες και οι επιφάνειες αριθμούνται με χρήση κάτω δείκτη  $n$  και διεύθυνση από πάνω προς τα κάτω. Η ζώνη  $n$  περικλείεται άνωθεν από την επιφάνεια  $n$  και κάτωθεν από την επιφάνεια  $n+1$  (Εικόνα 6.3). Έτσι, η ζώνη 1 περικλείεται από πάνω από την επιφάνεια 1 και από κάτω από την επιφάνεια 2. Το υψόμετρο μιας επιφάνειας  $n$  δίνεται από την συνάρτηση  $\zeta_n(x, y)$ . Το υψόμετρο της άνω πλευράς (top) ενός υδροφορέα ορίζεται ως  $\zeta_1$ . Αυτό μπορεί να είναι το υψόμετρο της άνω πλευράς του υδροφορέα αν ο υδροφορέας είναι περιορισμένος ή το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα ως  $\zeta_{N+1}(x, y)$ .





**Εικόνα 6.3** Δύο υδροφορείς διαχωρίζονται σε μοντέλο δύο στρωμάτων, όπου παρουσιάζεται η αρίθμηση των ζωνών και των επιφανειών,  $\zeta_N$ , σε κάθε στρώμα του μοντέλου

Η ροή σε έναν υδροφορέα εκφράζεται με όρους υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού  $h(x, y)$  στην κορεσμένη επιφάνεια και στα υψόμετρα των επιφανειών μεταξύ των ζωνών ( $\zeta_2$  έως  $\zeta_N$ ). Η υιοθέτηση της προσέγγισης Duriuit συνεπάγεται ότι η κατακόρυφη κατανομή της πίεσης προσεγγίζεται ως υδροστατική και το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού,  $h_f$ , σε οποιοδήποτε υψόμετρο  $z$ , μπορεί να διατυπωθεί με όρους υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού  $h(x, y)$  είτε στο πάνω μέρος του υδροφορέα ή του υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται ως

$$h_f(x, y, z) = h(x, y) + \int_z^{\zeta_1} v(z, y, z') dz', \quad (6.5)$$

Όπου  $z'$  είναι η κάθετη συντεταγμένη [L].

Εφεξής, το  $h$  θα αναφέρεται στο υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στην κορυφή του υδροφορέα ή του υδροφόρου ορίζοντα. Το διάνυσμα της οριζόντιας ειδικής ροής  $\vec{q} = (q_x, q_y)$  [L/T], οριζόμενο ως συνάρτηση της κάθετης συντεταγμένης  $z$  σε έναν υδροφορέα και λαμβάνεται αντικαθιστώντας την εξ.6.5 στην εξ.6.1 :

$$\vec{q} = -K\nabla h - K\nabla \int_z^{\zeta_1} v(z, y, z') dz', \quad (6.6)$$

Όπου  $\nabla$  είναι το δισδιάστατο διάνυσμα κλίσης  $\nabla = \partial/\partial x, \partial/\partial y$ . Η κάθετα ολοκληρωμένη οριζόντια ροή για όλες τις ζώνες κάτω από την επιφάνεια  $n$  λέγεται  $\vec{U}_n$  και λαμβάνεται

ολοκληρώνοντας το διάνυσμα της οριζόντιας ειδικής παροχής από κάτω μέρος του υδροφορέα ( $\zeta_{N+1}$ ) μέχρι την επιφάνεια  $n$  ( $\zeta_n$ ),

$$\vec{U}_n = \int_{\zeta_{N+1}}^{\zeta_n} \vec{q} dz \quad (6.7).$$

Λόγω του ότι η επιφάνεια 1 είναι το κορεσμένο άνω μέρος του υδροφορέα, το  $\vec{U}_1$  αντιπροσωπεύει την συνολική οριζόντια ροή διαμέσω μιας περιοχής με μοναδιαίο πλάτος και ύψος ίσο με το πάχος του υδροφορέα [L<sup>2</sup>/T]. Η συνέχεια της ροής μέσα στον υδροφορέα μπορεί να γραφτεί για αυτό το λόγο ως εξής:

$$\nabla \vec{U}_1 = -S \frac{\partial h}{\partial t} - q_{z,t} + q_{z,b} + \gamma \quad (6.8)$$

Όπου

$S$  είναι ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (storage coefficient) του υδροφορέα  
 $q_{z,t}, q_{z,b}$  είναι οι κάθετες ειδικές παροχές [L/T] στην κορυφή και στον πυθμένα του υδροφορέα αντίστοιχα  
 $\gamma$  είναι όρος της πηγής [L/T]

Ομοίως, η συνέχεια της ροής κάτω από την επιφάνεια  $n$  μπορεί να γραφτεί ως:

$$\nabla \vec{U}_n = -n_e \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \gamma \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (6.9)$$

Όπου

$n_e$  είναι το ενεργό πορώδες [αδιάστατο]  
 $\gamma$  αντιπροσωπεύει τους όρους πηγών κάτω από την επιφάνεια  $n$  [L/T] and μπορεί να περιλαμβάνει διαρροή από υπερκείμενο ή υποκείμενο υδροφορέα.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 5 έως 9 προκύπτει ο ακόλουθος συνδυασμός μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η εξίσωση της συνέχειας της ροής κάτω από την επιφάνεια 1 είναι

$$\nabla(T\nabla h) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q_{z,t} - q_{z,b} - \gamma + R \quad (6.10)$$

Όπου  $T$  είναι η μεταβιβασιμότητα του υδροφορέα [L/T]

$R$  είναι ο ψευδο-όρος πηγής [L/T] κάτω από την επιφάνεια 1.

Ο ψευδο-όρος πηγής,  $R$ , είναι το αποτέλεσμα της ροής που προκαλείται από τις μεταβολές της πυκνότητας μέσα σε έναν υδροφορέα (στο επίπεδο προς μοντελοποίηση) και διαφέρει ανάμεσα στη στρωματοποιημένη και συνεχή επιλογή αναπαράστασης της μεταβαλλόμενης πυκνότητας (εικόνα 6.2).

Η εξίσωση της συνέχειας της ροής είναι

$$\delta_n \nabla (T_n^* \nabla \zeta_n) = n_e \frac{\partial \zeta_n}{\partial t} - \gamma_n + R_n \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (6.11)$$

Όπου

$T_n^*$  είναι η μεταβιβασιμότητα μεταξύ της επιφάνειας  $n$  και  $N+1$  [ $L^2/T$ ]

$\delta_n$  είναι η διαφορά μεταβαλλόμενης πυκνότητας μεταξύ των επιφανειών  $n$  και  $n+1$  [αδιάστατο]

$R_n$  είναι οι όροι ψευδο-πηγής κάτω από την επιφάνεια  $n$  [ $L/T$ ].

Για τη στρωματοποιημένη επιλογή (Εικόνα 6.2B),  $\delta_n$  για την πάνω ζώνη ( $n=1$ ) ορίζεται ως

$$\delta_1 = v_1, \quad (6.12)$$

όπου  $v_1$  είναι η αδιάστατη πυκνότητα της ζώνης 1. Για τις ζώνες  $n$  από 2 έως  $N$ , το  $\delta_n$

ορίζεται

$$\delta_n = v_n - v_{n-1} \quad (6.13)$$

όπου  $v_n$  είναι η αδιάστατη πυκνότητα της ζώνης  $n$ .

Για την στρωματοποιημένη επιλογή, το  $R$  στην εξίσωση 6.10 ορίζεται ως

$$R = - \sum_{n=1}^N \delta_n \nabla (T_n^* \nabla \zeta_n). \quad (6.14)$$

Για τη στρωματοποιημένη επιλογή, το  $R_n$  στην εξίσωση 6.11 ορίζεται ως

$$R_n = -\nabla(T \nabla h) - \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq n}}^N \delta_p \nabla (T_p^* \nabla \zeta_p) \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (6.15)$$

Όπου

$T_p^*$  είναι η μεταβιβασιμότητα μεταξύ της επιφάνειας  $p$  και  $N+1$  [ $L^2/T$ ]

$\delta_p$  είναι η διαφορά μεταβαλλόμενης πυκνότητας μεταξύ των επιφανειών  $p$  και  $p+1$  [αδιάστατο]

$\zeta_p$  είναι το υψόμετρο της επιφάνειας  $p$  [ $L$ ].

Για την επιλογή συνεχούς πυκνότητας (Εικόνα 6.2C), η αδιάστατη πυκνότητα ορίζεται για κάθε επιφάνεια  $n$  ( $\mu_n$ ), και το  $\delta_n$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 6.12 και 6.13, αλλά χρησιμοποιώντας την αδιάστατη πυκνότητα της ζώνης  $n$ , υπολογισμένη ως η μέση τιμή των οριζόμενων αδιάστατων πυκνοτήτων επιφάνειας χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$v_n = \frac{\mu_n - \mu_{n+1}}{2} \quad (6.16)$$

Για την συνεχή επιλογή, το  $R$  στην εξίσωση 10 ορίζεται ως

$$R = -\sum_{n=1}^N \delta_n \nabla (T_n^* \nabla \zeta_n) + \sum_{n=1}^N \varepsilon_n \nabla [T_n \nabla (\zeta_n - \zeta_{n+1})] \quad (6.17)$$

Όπου

$\varepsilon_n$  είναι μέτρο της μεταβλητότητας της αδιάστατης πυκνότητας στη ζώνη  $n$

$T_n$  είναι η μεταβιβασιμότητα στη ζώνη  $n$  [ $L^2/T$ ].

Για την συνεχή επιλογή, το  $R_n$  στην εξίσωση 6.11 ορίζεται ως

$$R_n = -\nabla (T \nabla h) - \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq n}}^N \delta_p \nabla (T_p^* \nabla \zeta_p) + \sum_{p=n}^N \varepsilon_p \nabla [T_p \nabla (\zeta_p - \zeta_{p+1})] \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (6.18)$$

Όπου

$\varepsilon_p$  είναι μέτρο της μεταβλητότητας της αδιάστατης πυκνότητας στη ζώνη  $p$

$T_p$  είναι η μεταβιβασιμότητα στη ζώνη  $p$  [ $L^2/T$ ].

Το  $\varepsilon_p$  ορίζεται ως  $\varepsilon_p = \frac{v_{p+1} - v_p}{6}$  (6.19)

Όπου  $\varepsilon_p$  είναι μέτρο της μεταβλητότητας της αδιάστατης πυκνότητας στη ζώνη  $p$ . Όταν  $\varepsilon_p = 0$  για όλες τις ζώνες, οι εξισώσεις 6.17 και 6.18 γίνονται όπως οι εξισώσεις 6.14 και 6.15, που χρησιμοποιούνται για την στρωματοποιημένη επιλογή.

#### 6.4 Εναλλακτική εξαγωγή της οριζόντιας, καθέτως ολοκληρωμένης, εξίσωσης της ροής υπογείου νερού μεταβαλλόμενης πυκνότητας

Για να διευκολυνθεί η κατανόηση των μαθηματικών διατυπώσεων του πακέτου SWI2, αναπτύσσεται μια εναλλακτική εξαγωγή των εξισώσεων, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ροής. Αυτές οι εναλλακτικές εξισώσεις τροποποιούνται μέσα σε ένα δισδιάστατο πλαίσιο, χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές, για να δείξουν την ισοδυναμία τους με τις μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Για έναν υδροφορέα με οριζόντια κορυφή (top) και πυθμένα και έχοντας δύο διακριτούς τύπους ρευστού (Εικόνα 6.4), η παροχή μεταξύ δυο πηγαδιών παρατήρησης για την ζώνη 1,  $Q_1$ , είναι

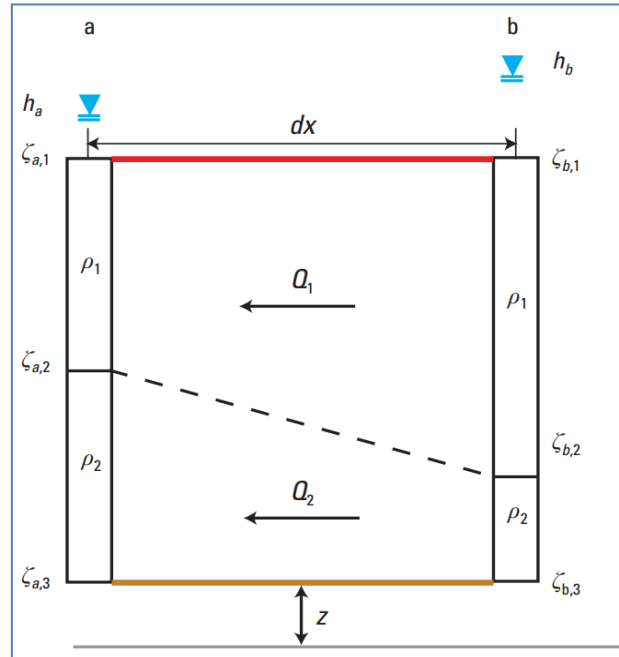
$$Q_1 = -K \bar{b}_1 dy \frac{(h_b - h_a)}{dx} \quad (6.20)$$

Όπου

$\bar{b}_1$  είναι το μέσο πάχος της ζώνης 1 μεταξύ των πηγαδιών  $a$  και  $b$  [ $L$ ]

$dy$  είναι το πλάτος του υδροφορέα κάθετα στη ροή

$h_b$  το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού στην κορυφή του υδροφορέα στο πηγάδι  $b$  [L]  
 $h_a$  το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού στην κορυφή του υδροφορέα στο πηγάδι  $a$  [L]  
 $dx$  είναι  $x_b - x_a$  [L].



Εικόνα 6.4 Οριζόντιος υδροφορέας με δυο ζώνες μεταξύ των πηγαδιών  $a$  και  $b$

Αντίστοιχα, η παροχή μεταξύ των πηγαδιών για τη ζώνη 2 είναι

$$Q_2 = -K \overline{b_2} dy \frac{(\hat{h}_{b,2} - \hat{h}_{a,2})}{dx} \quad (6.21)$$

όπου

$\overline{b_2}$  είναι το μέσο πάχος της ζώνης 2 μεταξύ των πηγαδιών  $a$  και  $b$  [L]

$\hat{h}_{b,2}$  είναι το υπολογισμένο υδραυλικό ύψος γλυκού νερού στη ζώνη 2 στο πηγάδι  $b$  [L]

$\hat{h}_{a,2}$  είναι το υπολογισμένο υδραυλικό ύψος γλυκού νερού στη ζώνη 2 στο πηγάδι  $a$  [L]

Προκειμένου να υπολογιστεί το μέσο υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού  $\hat{h}_{b,2}$  της ζώνης 2 στο πηγάδι  $b$ , μπορεί να εφαρμοσθεί η παρακάτω εξίσωση 6.5

$$h_f(x, y, z) = h(x, y) + \int_z^{\zeta_1} v(z, y, z') dz',$$

Οπότε

$$\hat{h}_{b,2} = h_b + v_1(\zeta_{b,1} - \zeta_{b,2}) + \frac{1}{2} v_2(\zeta_{b,2} - \zeta_{b,3}) \quad (6.22)$$

Επίσης για τον υπολογισμό του μέσου υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού  $\hat{h}_{a,2}$  για τη ζώνη 1 στο πηγάδι α ισχύει

$$\hat{h}_{a,2} = h_a + v_1(\zeta_{a,1} - \zeta_{a,2}) + \frac{1}{2} v_2(\zeta_{a,2} - \zeta_{a,3}) \quad (6.23)$$

Ο υπολογισμός των μέσων υδραυλικών υψών του γλυκού νερού στα πηγάδια της ζώνης 2 αναφέρεται στο μέσο της κάθετης απόστασης αυτής της ζώνης και έχει ως αποτέλεσμα τα υπολογισμένα  $\hat{h}_{a,2}$  και  $\hat{h}_{b,2}$  να διαφέρουν σε υψόμετρα στα δυο πηγάδια, αντιμετωπίζοντας τον κίνδυνο να υπάρχει παροχή σε συνθήκες χωρίς ροή.

Για να περιοριστεί το φαινόμενο, τα υδραυλικά ύψη προσαρμόζονται ως προς το ίδιο κάθετο υψόμετρο μεταβάλλοντας την εξίσωση 6.5. Η μεταβολή της εξίσωσης 6.5 γίνεται προκειμένου ο υπολογισμός των υδραυλικών υψών στα πηγάδια α και b να αναφέρονται στο ίδιο επίπεδο αναφοράς, υποθέτοντας υδροστατικές συνθήκες μέσα στον υδροφορέα. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν τα παρακάτω:

$$\hat{h}_{w,2} = \bar{h}_{w,2} + v_2(z_{w,2} - z_0) \quad (6.24)$$

Όπου

$\bar{h}_{w,2}$  είναι το μέσο υδραυλικό ύψος γλυκού νερού στη ζώνη 2 στο πηγάδι α ή b [L]

$z_{w,2}$  είναι το υψόμετρο του μέσου κάθετου σημείου της ζώνης 2 στα πηγάδι α ή b [L]

$z_0$  είναι το αυθαίρετο σημείο αναφοράς [L]

Αυτό το αυθαίρετο σημείο αναφοράς,  $z_0$ , μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Σε περίπτωση που  $z_0 = 0$ , τότε η εξίσωση 6.22 μπορεί να γραφτεί ως

$$\hat{h}_{b,2} = h_b + v_1(\zeta_{b,1} - \zeta_{b,2}) + \frac{1}{2} v_2(\zeta_{b,2} - \zeta_{b,3}) + \frac{1}{2} v_2(\zeta_{b,2} + \zeta_{b,3}) \quad (6.25)$$

Ή πιο απλά

$$\hat{h}_{b,2} = h_b + v_1(\zeta_{b,1} - \zeta_{b,2}) + v_2 \zeta_{b,2} \quad (6.26)$$

Επίσης η εξίσωση 6.23 μπορεί να γραφτεί ως

$$\hat{h}_{a,2} = h_a + v_1(\zeta_{a,1} - \zeta_{a,2}) + v_2 \zeta_{a,2} \quad (6.27)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 6.20, 6.21, 6.26 και 6.27, η συνολική παροχή του υδροφορέα όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3 μπορεί να γραφτεί ως

$$Q = Q_1 + Q_2 = -K \bar{b} dy \frac{(h_b - h_a)}{dx} - K \bar{b}_2 dy \frac{[v_1(\zeta_{b,1} - \zeta_{a,1}) - v_1(\zeta_{b,2} - \zeta_{a,2}) + v_2(\zeta_{b,2} - \zeta_{a,2})]}{dx} \quad (6.28)$$

Όπου

$b$  είναι το μέσο πάχος του υδροφορέα μεταξύ των πηγαδιών  $a$  και  $b$

Και

$$R = K \bar{b}_2 dy \frac{[v_1(\zeta_{b,1} - \zeta_{a,1}) - v_1(\zeta_{b,2} - \zeta_{a,2}) + v_2(\zeta_{b,2} - \zeta_{a,2})]}{dx} \quad (6.29)$$

όπου  $R$  είναι ο όρος που αντιπροσωπεύει τις ψευδο-πηγές.

(Bakker, 2013)

## Κεφάλαιο 7 – Διαδικασίες μοντελοποίησης και αποτελέσματα

Τα στοιχεία για την μοντελοποίηση της περιοχής βασίζονται σε μοντελοποίηση της περιοχής που είχε γίνει σε περιβάλλον Visual ModFlow σε προηγούμενη εργασία (Παππά, 2010). Με βάση αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αφορούν τη διακριτοποίηση της περιοχής ως προς το χώρο, τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης που υπάρχουν στην περιοχή και τις οριακές συνθήκες.

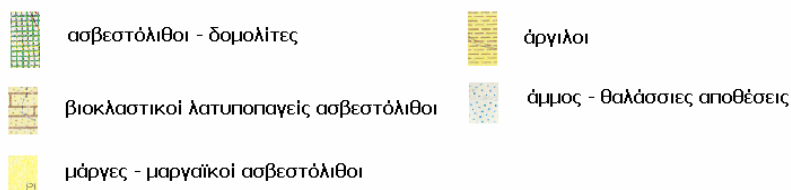
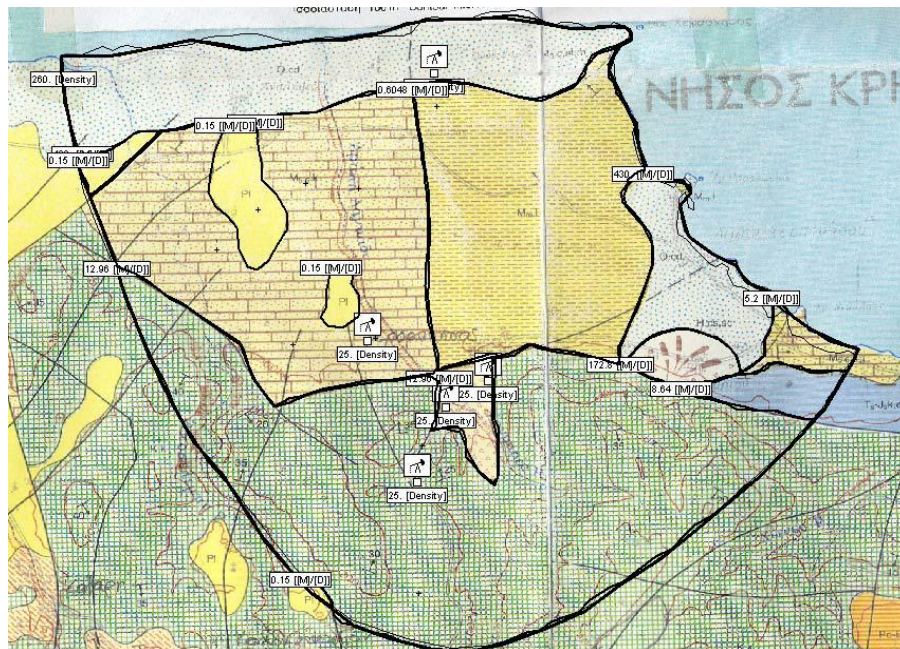
Ο υδροφορέας διακριτοποιήθηκε στην επιφάνεια του εδάφους σε κάνναβο αποτελούμενο από 105 στήλες και 106 γραμμές και η προσομοίωση έγινε μόνο με ένα στρώμα, θεωρώντας ελεύθερο υδροφορέα. Ως άνω όριο του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα υψόμετρα της περιοχής και ως επίπεδο αναφοράς και κάτω όριο χρησιμοποιήθηκαν τα 100m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, καθώς από παλαιότερη μελέτη το πάχος του υδροφορέα υπολογίσθηκε σε αυτό το βάθος. Το μέγεθος των κυψελίδων του κάνναβου διαφοροποιείται κατά τόπους και το πλέγμα γίνεται πιο πυκνό κοντά σε σημεία ενδιαφέροντος όπως τα πηγάδια άντλησης για να βελτιωθεί η προσέγγιση των χαρακτηριστικών του υδροφορέα μέσω της χρήσης των πεπερασμένων διαφορών.

Οι υδραυλικές αγωγιμότητες που εισάγονται στην περιοχή βασίζονται στα χαρακτηριστικά των επιμέρους γεωλογικών ενοτήτων. Τα πετρώματα της περιοχής (Εικόνα 7.1) είναι κυρίως ασβεστόλιθοι. Στο κέντρο της περιοχής υπάρχουν κυρίως βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι μέσα στους οποίους υπάρχουν 'φακοί' από μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Ανατολικά συναντώνται ιλυούχες άργιλοι και καλά διαβαθμισμένες άμμοι, ενώ κατά μήκος της ακτής υπάρχουν άμμοι και χαλαρά αργιλοαμμώδη. Οι τυπικές τιμές υδραυλικών αγωγιμοτήτων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1. (Karterakis, 2005)

**Πίνακας 7.1: Οι υδραυλικές αγωγιμότητες των πετρωμάτων στην περιοχή μελέτης**

Πετρώματα	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/d)
Ασβεστόλιθοι – Δομολίτες	12.96
Βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι	5.2
Μάργες - Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	0.15
Άργιλος	0.6048
Άμμος – θαλάσσιες αποθέσεις	430

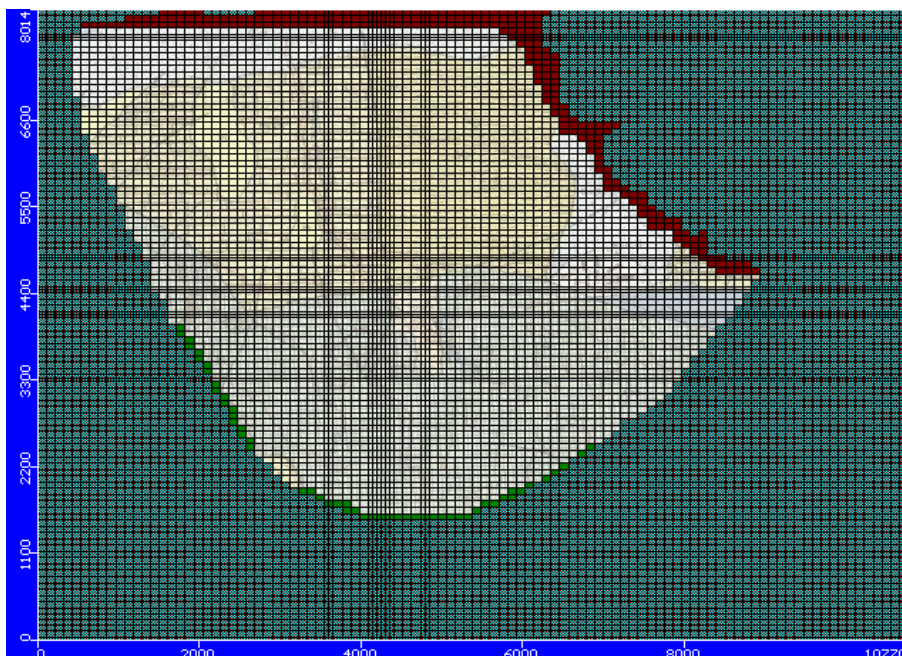




**Εικόνα 7.1: Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής (Καρτεράκης, 2005)**

Κατά μήκος του βόρειου ορίου της περιοχής καθορίστηκαν οι ζώνες σταθερού φορτιού (constant head) στα 100m. Οι ζώνες αυτές αντιπροσωπεύουν τη θάλασσα όπου το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό. Σε πραγματικές συνθήκες το υδραυλικό ύψος στο επίπεδο της θάλασσας είναι 0m. Όμως για τη λειτουργία αυτού του μοντέλου δόθηκε η τιμή των 100m που παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων που θα ακολουθήσουν. Στο νότιο άκρο της περιοχής καθορίστηκαν, κατόπιν δοκιμών, οι ζώνες GHB (General Head Boundaries) που αντιπροσωπεύουν την εισροή νερού στην περιοχή μελέτης από γειτονικά συστήματα έξω από τα όρια της περιοχής, με κατεύθυνση από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά με τιμές 108-113m.

Σχηματικά η αναπαράσταση των θέσεων των οριακών συνθηκών στην περιοχή μελέτης φαίνεται στην Εικόνα 7.2, όπου στο βόρειο τμήμα προσομοιώνεται η θάλασσα (κόκκινο χρώμα κελιών) ως οριακή συνθήκη constant head και στο νότιο τμήμα οι ζώνες GHB (general head boundaries) (πράσινο χρώμα κελιών).



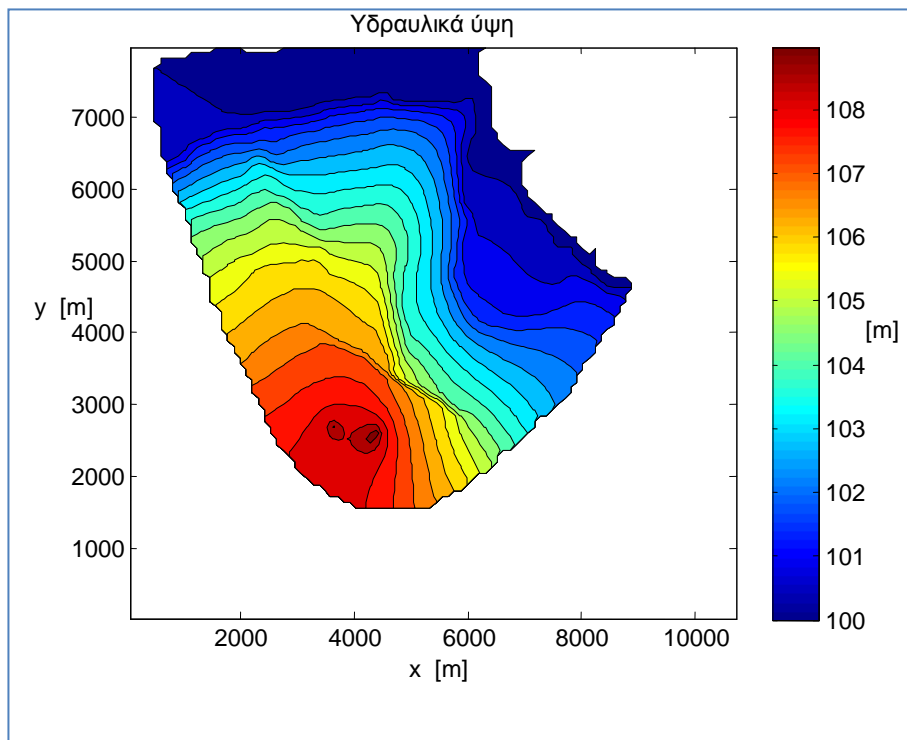
Εικόνα 7.2 Θέσεις και είδη οριακών συνθηκών (constant head-κόκκινο χρώμα, GHB-πράσινο χρώμα) της περιοχής προσομοίωσης

### 7.1 Στάδιο 1 – Επίτευξη αρχικών συνθηκών

Προκειμένου το μοντέλο να αποδώσει σωστά την κατάσταση που επικρατεί στην περιοχή στην παρούσα φάση, θα πρέπει αρχικά να εκτελεστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, με σκοπό μόλις πετύχει σταθερές συνθήκες, αυτές να αντιστοιχούν στη σωστή ισχύουσα κατάσταση. Τα μετέπειτα μοντέλα προσομοιάζουν την κατάσταση σε χρονικό διάστημα 30 χρόνων.

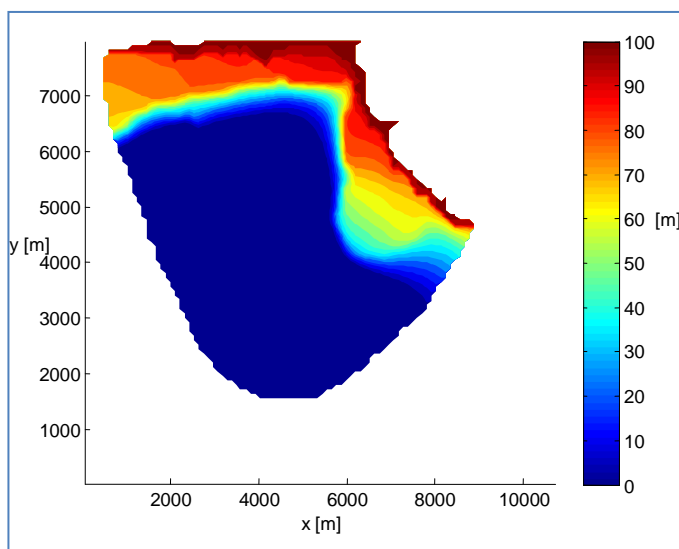
Θεωρούνται αρχικές συνθήκες (initial conditions) η θέση της διεπιφάνειας στο -1m από την επιφάνεια της θάλασσας, που αντιστοιχεί στα 99m από την βάση του μοντέλου, που θεωρείται το επίπεδο αναφοράς. Σε αυτή την προσπάθεια τα πηγάδια άντλησης δεν λαμβάνονται υπόψη και ισχύουν τα κλιματολογικά και γεωλογικά δεδομένα της περιοχής. Η προσομοίωση γίνεται για 700 χρόνια μέχρι το μοντέλο να επιτύχει τις σωστές αρχικές συνθήκες. Η θέση της διεπιφάνειας και τα υδραυλικά ύψη που υπολογίζονται σε αυτό το στάδιο θα αποτελέσουν τις νέες αρχικές συνθήκες για τα υπόλοιπα σενάρια, με σκοπό κάθε επόμενο σενάριο να έχει ως αρχή και μέτρο σύγκρισης, την παρούσα κατάσταση.

Από την εκτέλεση του Σταδίου 1, για την επίτευξη των αρχικών συνθηκών όπως αυτές προκύπτουν από προηγούμενες εργασίες (Karterakis et al., 2007), προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Οι αρχικές συνθήκες των υδραυλικών υψών στην περιοχή παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.3:



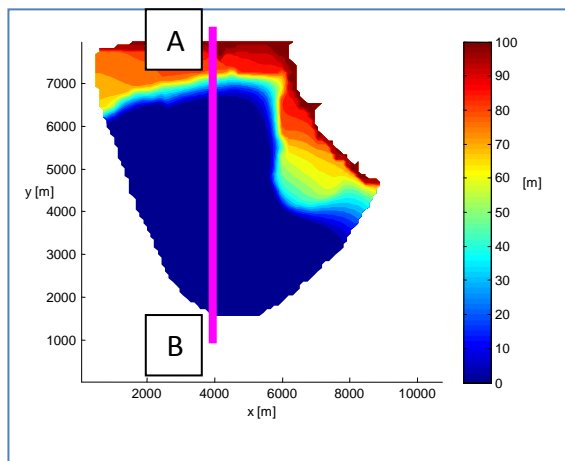
Εικόνα 7.3 Υδραυλικά ύψη για το Στάδιο 1 (αρχικές συνθήκες)

Η θέση της διεπιφάνειας (zeta) από τη βάση αναφοράς του μοντέλου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.4 :

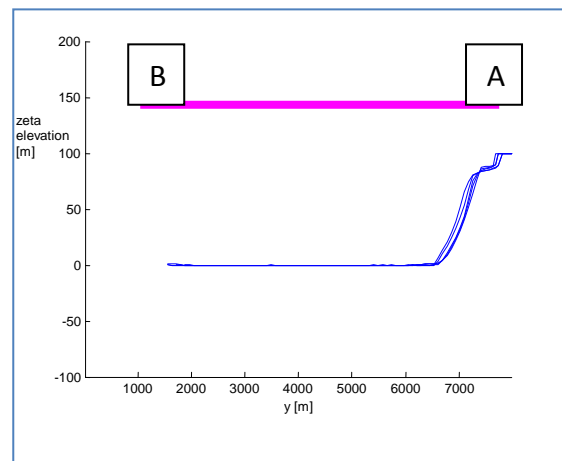


Εικόνα 7.4 Το ύψος της διεπιφάνειας της ζώνης υφαλμύρισης για το Στάδιο 1

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η κατάσταση στην περιοχή σχετικά με τη θέση της διεπιφάνειας παρουσιάζεται στις Εικόνες 7.5 και 7.6 η τομή της περιοχής σε επιλεγμένες θέσεις κατά μήκος της περιοχής μελέτης πάνω στην κατεύθυνση βορρά-νότου. Στην τομή αυτή παρουσιάζεται η διαμήκης εξέλιξη του φαινομένου στο πάχος του υδροφορέα:



Εικόνα 7.5 Κατεύθυνση τομής



Εικόνα 7.6 Εικόνα τομής της περιοχής με αποτύπωση της ζώνης υφαλμύρισης

Όπως φαίνεται και από τα γραφήματα, το πρόβλημα της υφαλμύρισης υπάρχει στην περιοχή ως αρχική κατάσταση, προτού ληφθούν υπόψη τα πηγάδια άντλησης (φυσική υφαλμύριση). Από την τομή προκύπτει ότι στη θέση A, που αντιστοιχεί σε σημείο δίπλα στη θάλασσα, η θέση της διεπιφάνειας βρίσκεται στα 100 m, δηλαδή στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας και στη θέση B, που αντιστοιχεί σε σημείο στο νότιο άκρο της περιοχής μελέτης, η θέση της διεπιφάνειας είναι στα 100 m, στο κάτω όριο του μοντέλου. Το μέτωπο της υφαλμύρισης εντοπίζεται περίπου στα 1300m από τη θάλασσα, μέχρι δηλαδή τις θέσεις όπου  $\text{zeta} > 0$ . Το φαινόμενο είναι πιο έντονο στις περιοχές με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, όπως στα βόρεια και βορειοανατολικά της περιοχής όπου υπάρχουν άμμος και θαλάσσιες αποθέσεις. Αντίθετα, περιοχές με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα αποτρέπουν την διεξόδου του θαλασσινού νερού.



## 7.2 Στάδιο 2- Εισαγωγή αντλήσεων

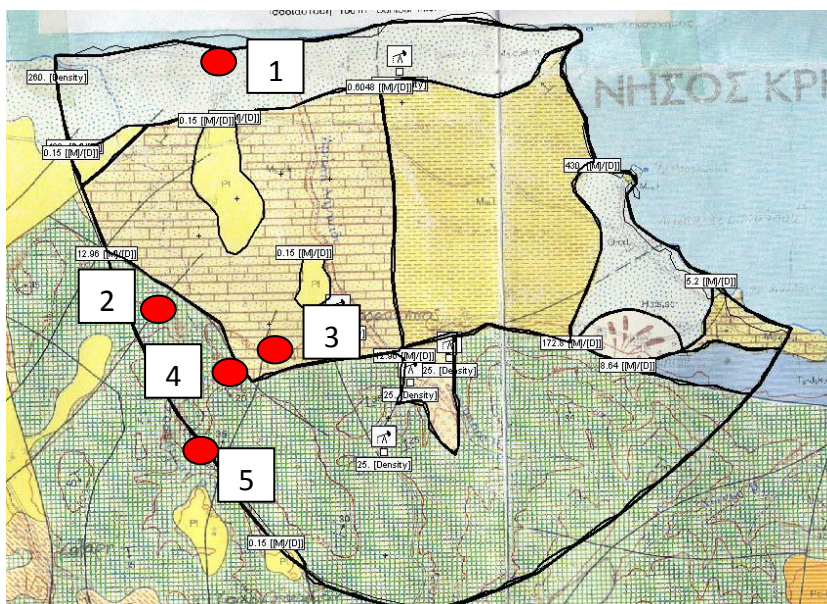
Κατά την εκτέλεση του μοντέλου για το Στάδιο 2, οι πραγματικές συνθήκες άντλησης λαμβάνονται υπόψη και για αυτό το λόγο τα πηγάδια άντλησης ενεργοποιούνται. Σε αυτό το στάδιο, οι υπολογισμοί ξεκινούν έχοντας ως αρχικές συνθήκες, τα υδραυλικά ύψη και το ύψος της διεπιφάνειας, όπως αυτά προέκυψαν από τα αποτελέσματα στο Στάδιο 1.

Η δυναμικότητα των πηγαδιών άντλησης παρουσιάζεται στον πίνακα 7.2

**Πίνακας 7.2 Αρχικές τιμές άντλησης πηγαδιών 1 έως 5**

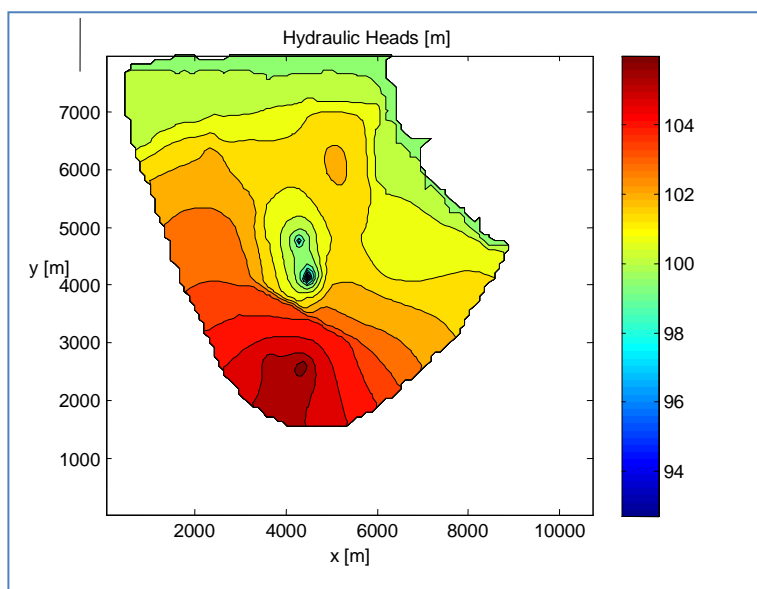
<b>Αρχικές Αντλήσεις</b>	
<b>Πηγάδια</b>	<b>Άντληση (m<sup>3</sup>/day)</b>
1	1800
2	2520
3	576
4	2520
5	146

Οι θέσεις των πηγαδιών άντλησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.7:



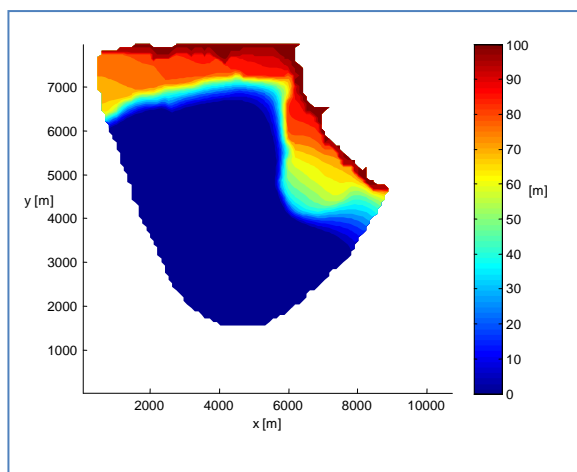
**Εικόνα 7.7 Οι θέσεις των πηγαδιών άντλησης**

Τα υδραυλικά ύψη όπως υπολογίστηκαν από το Στάδιο 2 φαίνονται στην Εικόνα 7.8:

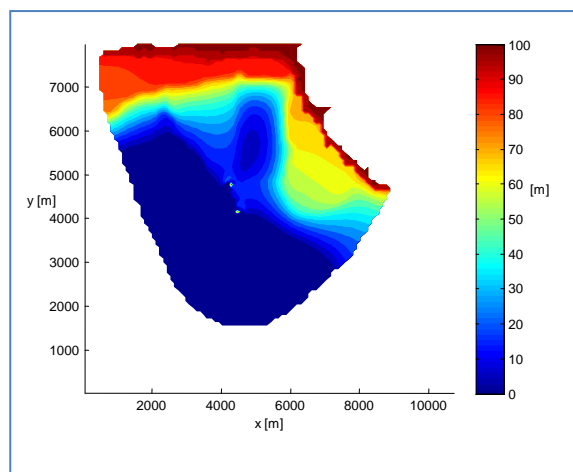


Εικόνα 7.8 Υδραυλικά ύψη από Στάδιο 2 με ενεργά τα πηγάδια άντλησης

Το βάθος της διεπιφάνειας όπως παρουσιάζεται στα Στάδια 1 και 2 αποτυπώνεται στα γραφήματα στην εικόνα 7.9:

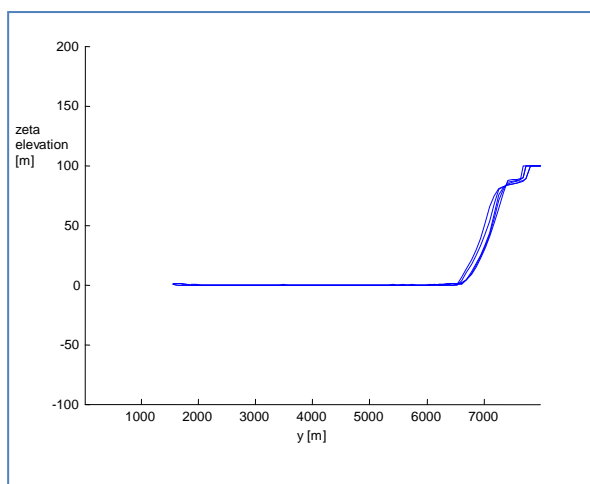


Εικόνα 7.9Α Αρχική θέση διεπιφάνειας από τη βάση του μοντέλου στο Στάδιο 1

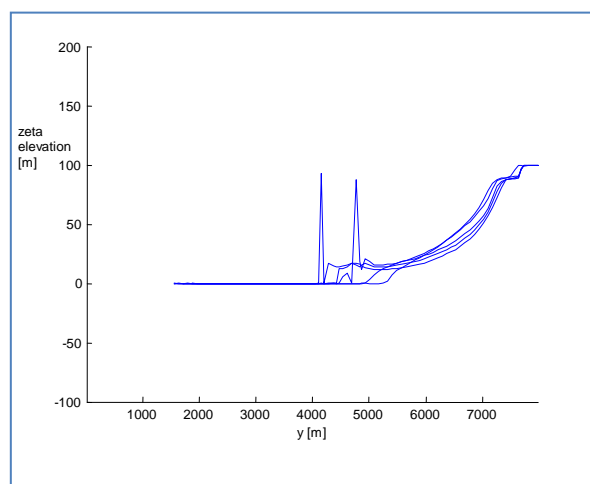


Εικόνα 7.9Β Θέση της διεπιφάνειας από τη βάση του μοντέλου στο Στάδιο 2, με ενεργά τα πηγάδια άντλησης.

Από την τομή της περιοχής η αποτύπωση της διεπιφάνειας στις θέσεις των πηγαδιών άντλησης παρουσιάζεται στα παρακάτω γραφήματα 7.10 και 7.11 :



**Εικόνα 1.10 Διατομή με αποτύπωση ύψους διεπιφάνειας από Στάδιο 1**



**Εικόνα 7.11 Διατομή με αποτύπωση ύψους διεπιφάνειας από Στάδιο 2**

Όπως φαίνεται από τα γραφήματα, με την λειτουργία των πηγαδιών άντλησης το πρόβλημα της υφαλμύρισης γίνεται πιο έντονο. Τα πηγάδια άντλησης προκαλούν πιο έντονη διείδυση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα σε θέσεις που βρίσκονται προς την ενδοχώρα, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται από την υφαλμύριση ακόμα και τα πηγάδια που βρίσκονται προς το μέσο της περιοχής μελέτης. Από τη εικόνα της τομής της περιοχής σε ορισμένες από τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης οι οποίες απεικονίζονται, η διεπιφάνεια φτάνει στα 100m ή αλλιώς στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του νερού που αντλείται, το οποίο επηρεάζεται από το θαλασσινό νερό της ζώνης υφαλμύρισης, περίπου στα 4000m την ακτή.

## Κεφάλαιο 8 - Σύγκριση αποτελεσμάτων επίλυσης προβλήματος με χρήση μοντέλου και με χρήση αναλυτικής μεθόδου

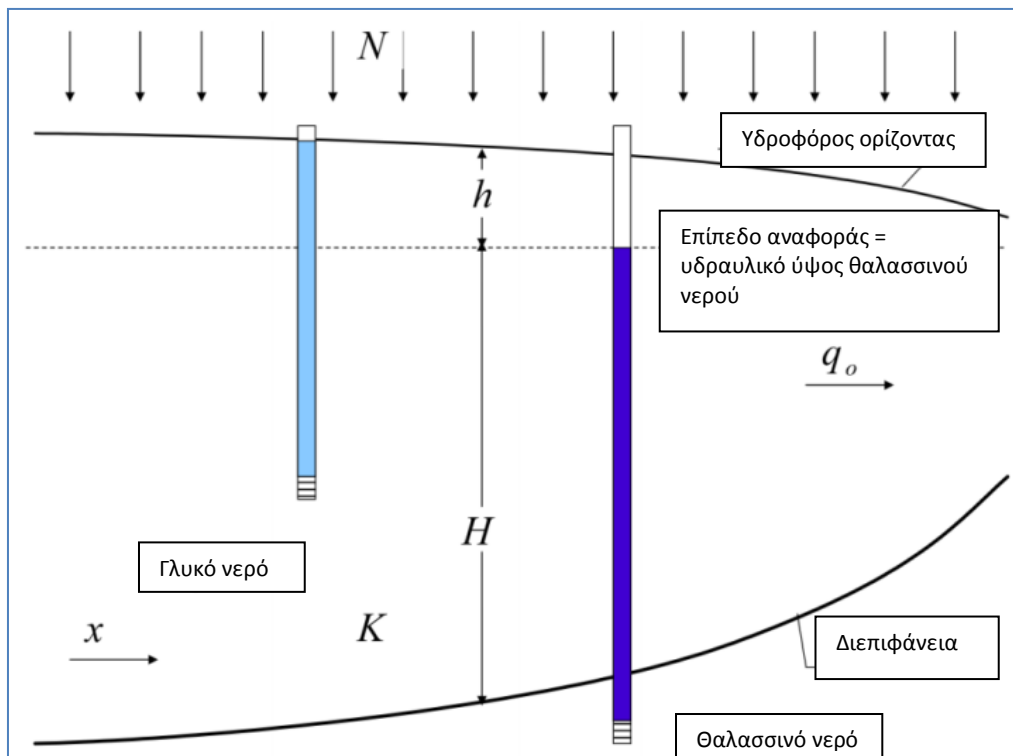
Προκειμένου να μπορεί να αξιολογηθεί εάν το μοντέλο ανταποκρίνεται σωστά στα αναμενόμενα αποτελέσματα, θα πρέπει να γίνει μια συγκριτική μελέτη. Εφαρμόζοντας σε ένα μοντέλο το πρόβλημα της περιοχής θα πρέπει να εξεταστεί εάν τα αποτελέσματα που υπολογίζονται από το μοντέλο είναι παρόμοια με αυτά που προκύπτουν από την αναλυτική επίλυση του προβλήματος.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα πιο απλοποιημένο πρόβλημα. Η καινούρια περιοχή μελέτης, έχει πιο απλή δομή, με τη θάλασσα να καλύπτει το βόρειο τμήμα και το υψόμετρο της ξηράς να αυξάνεται προοδευτικά προς την ενδοχώρα. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες σε αυτό το νέο πεδίο θεωρούνται ως η μέση τιμή των αγωγιμοτήτων κάθε στήλης από αυτές που είχαν οριστεί στην αρχική διακριτοποίηση της περιοχής της Χερσονήσου και ορίσθηκαν σε αυτή με βάση τη γεωλογία. Τα πηγάδια δεν λαμβάνονται υπόψη, παρά μόνο η διηθούμενη βροχόπτωση.

### 8.1 Αναλυτική επίλυση

Προκειμένου να λυθεί αναλυτικά το πρόβλημα θα πρέπει να πηγάδια να μην λαμβάνονται υπόψη. Σχηματικά το πρόβλημα αποτυπώνεται στην Εικόνα 8.1.





Εικόνα 8.1 Ροή σε ελεύθερο υδροφορέα και αποτύπωση της διεπιφάνειας (Olsthoorn, 2012)

Οι τρεις βασικές σχέσεις πάνω στις οποίες βασίζεται η λύση του προβλήματος είναι η αρχή της συνέχειας, ο νόμος του Darcy και η σχέση Badon - Ghyben – Herzberg (BGH), όπου:

-Νόμος του Darcy: Σύμφωνα με το νόμο του Darcy

$$q = -K(h + H) \frac{dh}{dx} \quad (8.1)$$

όπου

$q$  είναι η ειδική παροχή [ $L^2/T$ ]

$K$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα [ $L/T$ ]

$h$  το γλυκό νερό πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας

$H$  η απόσταση της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας [ $L$ ]

-Αρχή της Συνέχειας: Σύμφωνα με την αρχή της Συνέχειας, δεν υπάρχει απώλεια νερού κατά τη ροή του νερού προς τη θάλασσα. Υπάρχει εισροή νερού λόγω της βροχόπτωσης,  $N$ :

$$q = -K(h + H) \frac{dh}{dx} \quad (8.2) \quad \text{και} \quad \frac{dq}{dx} = N \quad (8.3) \quad \text{οπότε} \quad q = Nx + C_1 \quad (8.4)$$

-BGH: Σύμφωνα με τους BGH

$$h = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H = \frac{\Delta\rho}{\rho_f} H \quad (8.5)$$

$$\text{Οπότε, } -K \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} + 1 \right) H \frac{d \frac{\Delta\rho}{\rho_f} H}{dx} = q \rightarrow -K \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} + 1 \right) H dH^2 = (Nx + C_1) dx \quad (8.6)$$

Οπότε:

$$-\frac{K}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} + 1 \right) H^2 = \frac{1}{2} Nx^2 + C_1 x + C_2 \quad (8.7)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου η υφαλμύριση υπολογίζεται κατά  $y$ , η εξίσωση 8.7

$$\text{γίνεται: } -\frac{K}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} + 1 \right) H^2 = \frac{1}{2} Ny^2 + C_1 y + C_2 \quad (8.8)$$

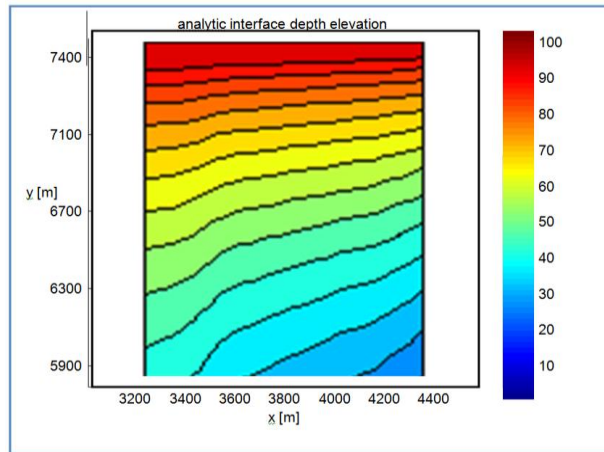
Για  $y = 0m$  δεν υπάρχει ροή,  $q=0$ , οπότε  $C_1 = 0$ . Για  $y = 7000m$ , που αντιπροσωπεύει το αυθαίρετο όριο με τη θάλασσα,  $H = 0$ . Οπότε η εξίσωση 8.8 γίνεται

$$H = \sqrt{\frac{N}{K \frac{\Delta\rho}{\rho_f} \left( \frac{\Delta\rho}{\rho_f} + 1 \right)}} (L^2 - y^2) \quad (8.9)$$

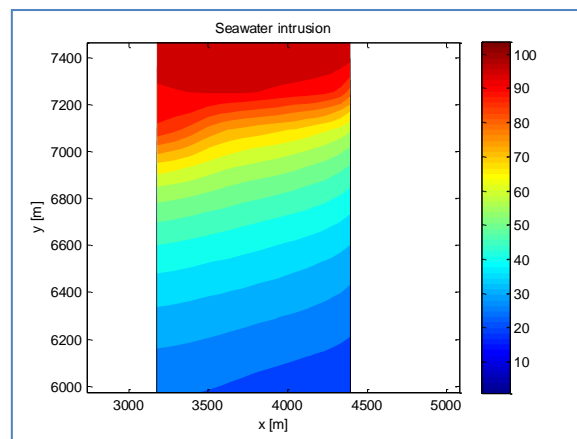
Το υψόμετρο της διεπιφάνειας υπολογίζεται ως :

Υψόμετρο της διεπιφάνειας = επιφάνεια της θάλασσας – H.

Εφαρμόζοντας την αναλυτική επίλυση του προβλήματος και συγκρίνοντας την με τα αποτελέσματα του μοντέλου, προκύπτει ότι το ύψος της διεπιφάνειας, είναι παρόμοιο όπως αποτυπώνεται στα παρακάτω γραφήματα στις Εικόνες 8.2 και 8.3:



Εικόνα 8.2 Αναλυτική επίλυση για τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας  $H$  [m]



Εικόνα 8.3 Αριθμητική επίλυση για τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας με SWI2

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητός ο λόγος που η αριθμητική επίλυση προτιμάται έναντι της αναλυτικής και πώς αξιολογείται η εγκυρότητα του μοντέλου, θα πρέπει να γίνουν σαφή τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους. Το μοντέλο για τον υπολογισμό της θέσης του μετώπου της υφαλμύρισης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο, απαραίτητο για την διαχείριση του υδροφορέα και την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών του συστήματος του υπόγειου νερού. Το μοντέλο γενικά αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις. Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων είναι η μέθοδος που προτιμάται, λόγω του ότι μπορεί να προσαρμοσθεί σε σύνθετα δεδομένα και παραμέτρους, όταν για παράδειγμα εισάγονται στο σύστημα πηγάδια, τα οποία θα έκαναν την αναλυτική επίλυση πιο δύσκολη, λόγω μη γραμμικότητας. Για αυτό και η αριθμητική μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως. Συγκρίνοντας την αναλυτική επίλυση, με την αριθμητική επίλυση από το πρόγραμμα SWI2, για ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο, διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα είναι παρόμοια σε ότι αφορά την υφαλμύριση. Σε γενικές γραμμές, η αριθμητική επίλυση προσεγγίζει την αναλυτική, αν και υπάρχουν ορισμένες διαφορές. Αυτές οι διαφορές μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης οφείλονται σε γενικές γραμμές στις αρχικές οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο πρόβλημα κατά την εφαρμογή του μοντέλου, τον αριθμό των επαναλήψεων που πραγματοποιούνται για την επίλυσή του και το είδος των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν.

## Κεφάλαιο 9: Σενάρια αντιμετώπισης της υφαλμύρισης

Η υφαλμύριση είναι ένα πρόβλημα το οποίο επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του νερού ενός παράκτιου υδροφορέα, δημιουργώντας προβλήματα στην εκμετάλλευσή του. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζονται παρακάτω σενάρια αντιμετώπισης του φαινομένου, που μπορούν να εφαρμοστούν μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό.

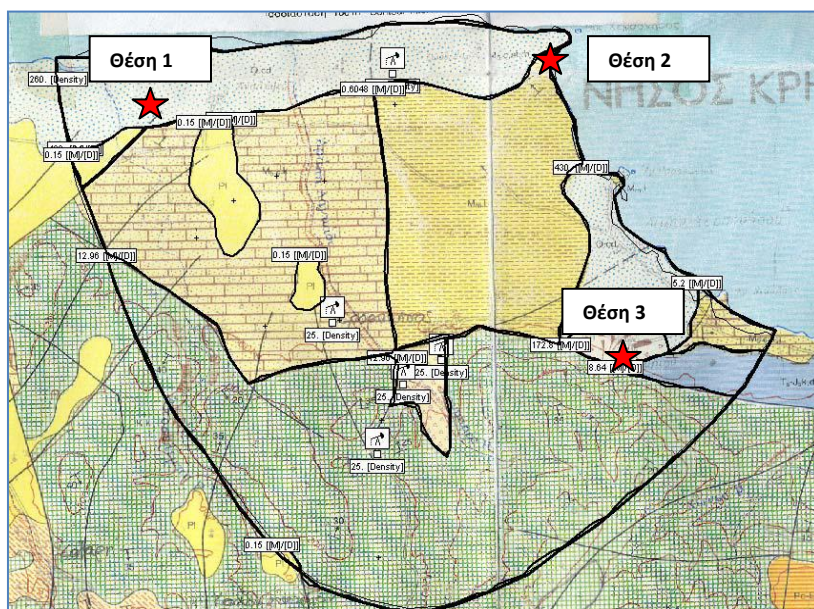
### 9.1 Εμπλουτισμός υδροφορέα

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης, μια από τις μεθόδους που προτείνεται είναι ο εμπλουτισμός του υδροφορέα (Johnson et al., 2001). Προκειμένου να γίνει αυτό, στο συγκεκριμένο σενάριο γίνεται εμπλουτισμός με χρήση νερού προερχόμενο από τον βιολογικό καθαρισμό της Χερσονήσου, λαμβάνοντας υπόψη όμως μόνο τα ποσοτικά και όχι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού της εκροής, με σκοπό να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας μεθόδους στις τοπικές συνθήκες. Τα πηγάδια εμπλουτισμού με νερό από βιολογικό καθαρισμό θα πρέπει να απέχουν όσο το δυνατό περισσότερο από τα πηγάδια άντλησης προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος παραμονής του παρεχόμενου νερού μέσα στον υδροφορέα και να επιτευχθεί επαρκής ανάμιξη με το νερό του υδροφορέα. (Asano and Cotruvo, 2004 )

Ο βιολογικός καθαρισμός της Χερσονήσου έχει δυναμικότητα εκροής  $500-3400 \frac{m^3}{d}$ . Λαμβάνοντας υπόψη μια πιθανή εκροή  $1000 \frac{m^3}{d}$ , τότε το νερό που θα διοχετευτεί στον υδροφορέα κατά τη διάρκεια του έτους είναι  $1000 \frac{m^3}{d} * 365 \frac{d}{yr} = 365000 \frac{m^3}{yr}$ . Στην παρούσα φάση, το νερό που προέρχεται από τον βιολογικό καθαρισμό χρησιμοποιείται για αγροτικούς σκοπούς και για ενίσχυση της πυρασφάλειας της περιοχής σαν επιπλέον πηγή νερού. (Tsagarakis et al, 2004).

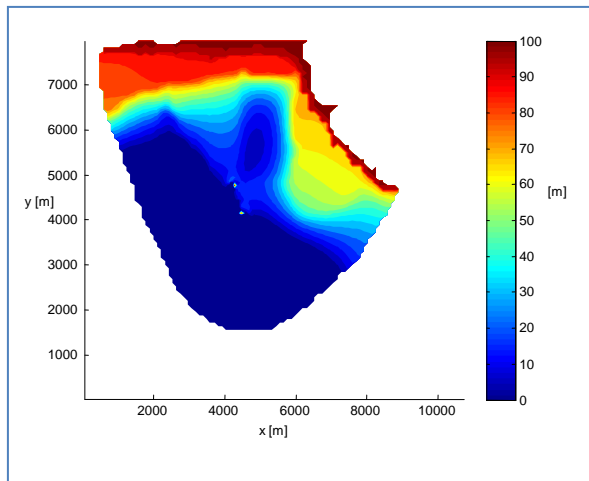
### 9.1.1 Εμπλουτισμός υδροφορέα από ένα πηγάδι

Αρχικά, γίνεται εφαρμογή ενός πηγαδιού εμπλουτισμού σε τρεις υποψήφιες θέσεις στην περιοχή μελέτης, προσπαθώντας να τοποθετηθούν σε σημεία που παρουσιάζεται υφαλμύριση και βρίσκονται σε απόσταση από τα πηγάδια άντλησης. Οι υποψήφιες θέσεις φαίνονται στην Εικόνα 9.1:

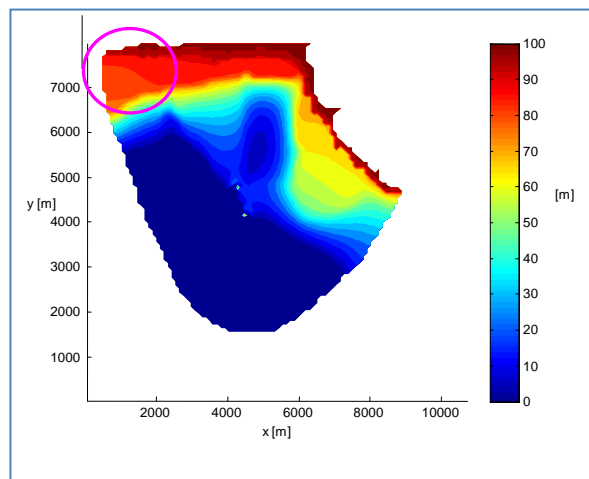


Εικόνα 9.1 Αποτύπωση των υποψήφιων θέσεων του πηγαδιού εμπλουτισμού στην περιοχή μελέτης

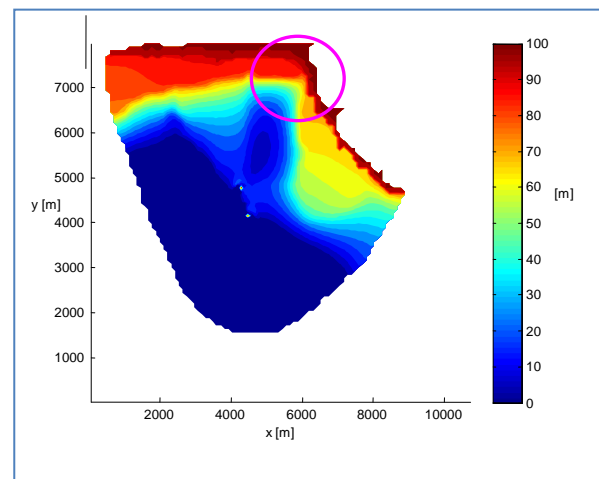
Από την εφαρμογή του πηγαδιού στις θέσεις 1 και 2, στην Εικόνα 9.2, προκύπτει η αποτύπωση της υφαλμύρισης όπου γίνεται και η σύγκριση της θέσης της ζώνης υφαλμύρισης σε σχέση και με την αρχική κατάσταση :



Εικόνα 9.2Α Θέση υφαλμύρισης πριν από την εφαρμογή σεναρίων αντιμετώπισης



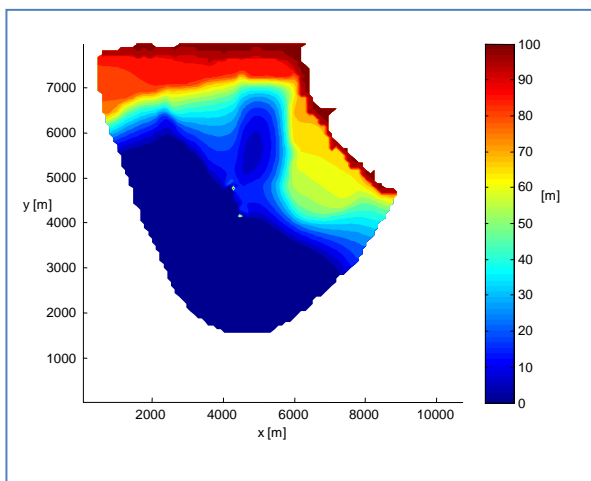
Εικόνα 9.2Β Αποτύπωση υψομέτρου διεπιφάνειας με εφαρμογή πηγαδιού εμπλουτισμού στη θέση 1



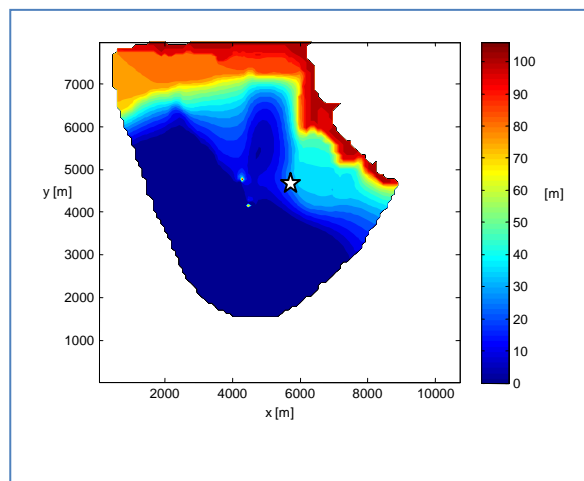
Εικόνα 9.2C Αποτύπωση υψομέτρου διεπιφάνειας με εφαρμογή πηγαδιού εμπλουτισμού στη θέση 2

Από την εισαγωγή του πηγαδιού εμπλουτισμού στις θέσεις 1 και 2 δεν υφίσταται αξιοσημείωτη μεταβολή της κατάστασης της υφαλμύρισης. Ένας πιθανός λόγος ίσως να είναι το γεγονός ότι στις θέσεις αυτές η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ιδιαίτερα υψηλή και ο όγκος θαλασσινού νερού που εισέρχεται αρκετά μεγάλος που η εισροή νερού από το πηγάδι εμπλουτισμού να μην επαρκεί για τον περιορισμό του φαινομένου.

Από την εισαγωγή όμως του πηγαδιού στη θέση 3 προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Συγκρίνοντας την παρούσα κατάσταση με την εφαρμογή του σεναρίου εμπλουτισμού, το υψόμετρο της διεπιφάνειας στην περιοχή μελέτης αποτυπώνεται παρακάτω στην εικόνα 9.3:

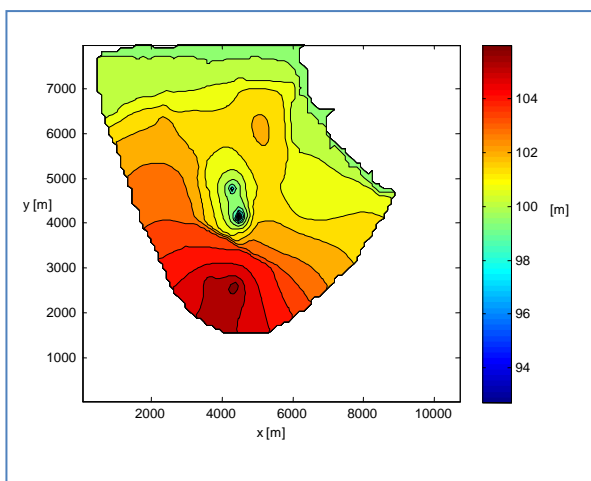


**Εικόνα 9.3Α Αρχική κατάσταση υψομέτρου διεπιφάνειας**

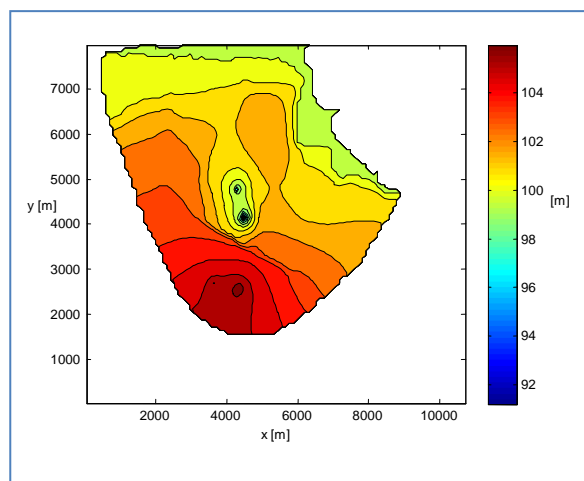


**Εικόνα 9.3Β Αποτύπωση υψομέτρου διεπιφάνειας με εφαρμογή του πηγαδιού εμπλουτισμού στη θέση 3**

Η διαφοροποίηση στις τιμές των υδραυλικών υψών από την εφαρμογή του σεναρίου εμπλουτισμού με πηγάδι εμπλουτισμού στη θέση 3 αποτυπώνεται στην Εικόνα 9.4 :



**Εικόνα 9.4Α Αποτύπωση υδραυλικών υψών στην αρχική κατάσταση**



**Εικόνα 9.4Β Υδραυλικά ύψη από την εφαρμογή πηγαδιού εμπλουτισμού στη θέση 3**

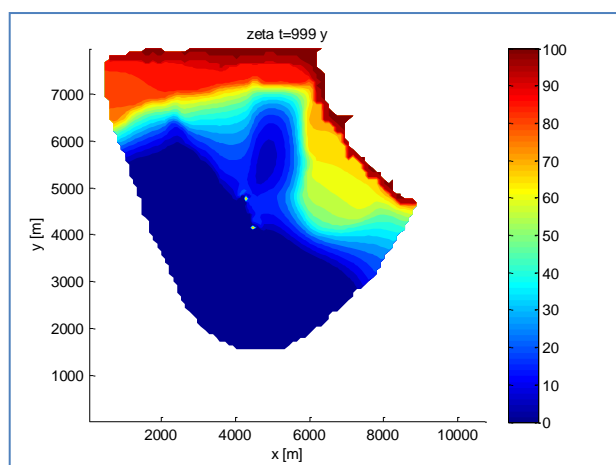
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου για την παρούσα κατάσταση και του σεναρίου εμπλουτισμού με εισαγωγή του πηγαδιού εμπλουτισμού στη θέση 3, διαπιστώνεται ότι το ύψος της διεπιφάνειας της ζώνης υφαλμύρισης περιορίστηκε

από τα περίπου 60m, στα 40m. Επίσης, από τις εικόνες διαπιστώνεται ότι και για τα υδραυλικά ύψη στην περιοχή γύρω από το πηγάδι εμπλουτισμού και κυρίως στην περιοχή με το αργυλικό πέτρωμα, παρουσιάζεται αύξηση.

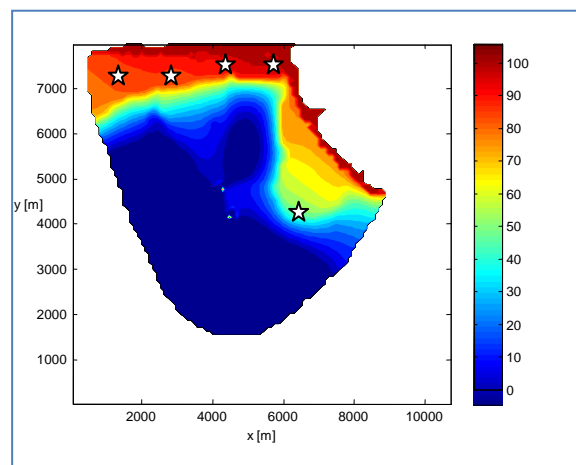
Η μεταβολή του υψομέτρου της διεπιφάνειας, κατά περίπου 30%, αποτελεί ένα αξιοσημείωτο ποσοστό μείωσης που ενθαρρύνει την μελέτη της δυνατότητας εφαρμογής μιας τέτοιας λύσης στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον δίνει και το έναυσμα για να γίνει πιο ενδελεχής έρευνα και για άλλες παραμέτρους που να σχετίζονται με τον εμπλουτισμό του υδροφορέα όπως τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού, το κόστος και η βιωσιμότητα μιας τέτοιας στρατηγικής.

### 9.1.2 Εμπλουτισμός υδροφορέα από 5 πηγάδια συνολικής δυναμικότητας ίσης με το 1 πηγάδι

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του εμπλουτισμού στον υδροφορέα, μελετάται επίσης και το σενάριο ο εμπλουτισμός να γίνει σε περισσότερα από ένα σημεία και να συγκριθεί με την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του εμπλουτισμού σε ένα σημείο. Για το λόγο αυτό ο εμπλουτισμός σε αυτό το σενάριο είναι συνολικής δυναμικότητας  $Q=1000\text{m}^3/\text{d}$  και διοχετεύεται στον υδροφορέα μέσω 5 πηγαδιών ίσης δυναμικότητας  $Q_i=200\text{m}^3/\text{d}$ ,  $i=1,\dots,5$ . Οι θέσεις των πηγαδιών γίνεται προσπάθεια να καλύψουν σε εύρος τις περιοχές όπου το πρόβλημα της υφαλμύρισης παρουσιάζεται πιο έντονο όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 9.5.



Εικόνα 9.5Α Αρχική κατάσταση



Εικόνα 9.5Β Εμπλουτισμός με 5 πηγάδια,  $Q_{\text{tot}}=1000\text{m}^3/\text{d}$

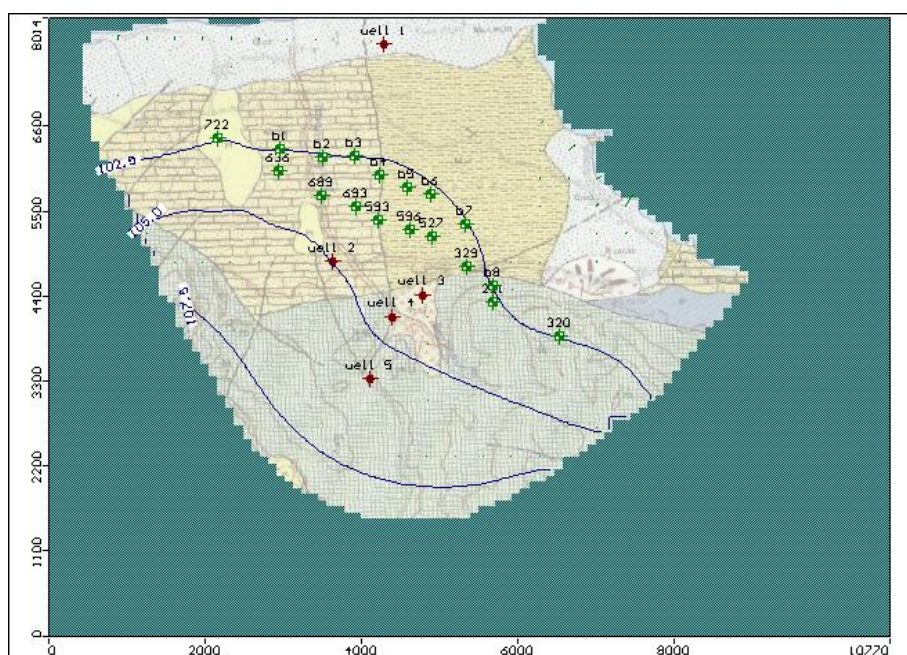
Από την εφαρμογή 5 πηγαδιών εμπλουτισμού στην περιοχή, παρατηρείται περιορισμός της υφαλμύρισης σε σημεία που η υδραυλική αγωγιμότητα έχει χαμηλότερες συγκριτικά τιμές, ενώ η επίδραση των πηγαδιών που τοποθετήθηκαν στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης



δεν συνέβαλαν ουσιαστικά στον περιορισμό του φαινομένου σε αυτή τη ζώνη. Έτσι, είναι φανερό ότι η επιλογή της εφαρμογής ενός πηγαδιού εμπλουτισμού σε συγκεκριμένη θέση είναι πιο αποτελεσματικό από την εφαρμογή πολλαπλών πηγαδιών, όπως εξετάστηκαν σε αυτό το σενάριο.

## 9.2 Βελτιστοποιημένοι ρυθμοί άντλησης

Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης της περιοχής της Χερσονήσου έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης και κατά το παρελθόν και έχει προταθεί η διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα με βελτιστοποίηση των αντλήσεων με τη χρήση του προγράμματος GWI. (Παππά, 2010). Το σενάριο αντλήσεων που είχε προταθεί ως το πιο κατάλληλο να εφαρμοστεί, ορίζει το μέτωπο της υφαλμύρισης σε θέσεις που αποτυπώνονται από την ισοϋψή των 102.5m και αποτυπώνεται στην εικόνα 9.6:



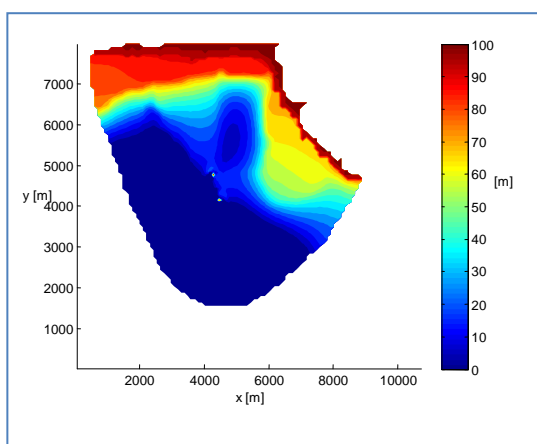
**Εικόνα 9.6 Αποτύπωση θέσης μετώπου υφαλμύρισης με εφαρμογή σεναρίου βέλτιστων αντλήσεων (Παππά, 2010)**

Οι αντλήσεις που προτάθηκαν να εφαρμοστούν προκειμένου η υφαλμύριση να περιοριστεί στις συγκεκριμένες θέσεις είναι οι εξής όπως παρουσιάζονται στον πίνακα :

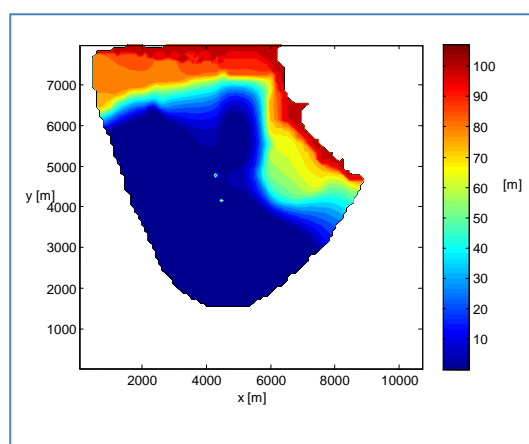
Πίνακας 9.1 Βελτιστοποιημένες αντλήσεις πηγαδιών (Παππά, 2010)

Πηγάδια άντλησης	Αρχικές τιμές άντλησης ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	Υπολογισμένη παροχή $Q_B$ σεναρίου με χρήση GWM ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	Ποσοστό μείωσης αντλήσεων (%)
1	1800	1800	0
2	2520	42	98%
3	576	576	0
4	2520	2520	0
5	146	146	0
Σqi	7562	5084	33%

Η σύγκριση των θέσεων του μετώπου της υφαλμύρισης με βάση την αποτύπωση τους γίνεται αντιληπτή στην Εικόνα 9.7:



Εικόνα 9.7Α Αρχική κατάσταση



Εικόνα 9.7Β Αποτύπωση της υφαλμύρισης με βελτιστοποίηση αντλήσεων

Με εφαρμογή της μεθόδους αυτής παρατηρείται σημαντική απώθηση του μετώπου της υφαλμύρισης προς τη θάλασσα και απομάκρυνση του από τις θέσεις των γεωτρήσεων που είναι στην ενδοχώρα.

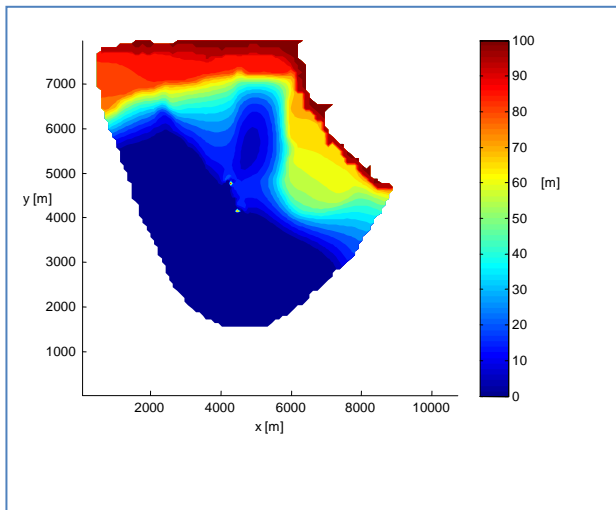
### 9.3 Πηγάδια άντλησης θαλασσινού νερού

Για την αντιμετώπισης της υφαλμύρισης, εξετάζεται σε αυτό το σενάριο η αποτελεσματικότητα της μεθόδου άντλησης του θαλασσινού νερού από τον υδροφορέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η άντλησης του νερού γίνεται με πηγάδια τα οποία διανοίγονται σε περιοχές του υδροφορέα όπου το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι πιο έντονο. Αυτές οι περιοχές είναι το βόρειο τμήμα της περιοχής.

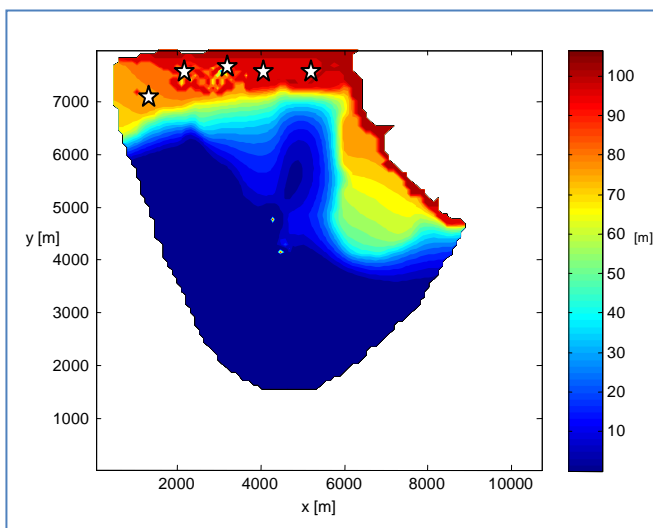
Η άντληση του θαλασσινού νερού γίνεται από 5 πηγάδια στη βόρεια πλευρά του υδροφορέα και οι δυναμικότητες τους είναι

$$Q_i = -1000 \text{ m}^3/\text{d} \text{ ή σε σύνολο } Q_{\text{tot}} = 5 * Q_i = 5 * (-1000) \text{ m}^3/\text{d} = -5000 \text{ m}^3/\text{d}.$$

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 9.8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εφαρμόζοντας το σενάριο άντλησης του θαλασσινού νερού :



Εικόνα 9.8Α Αρχική κατάσταση



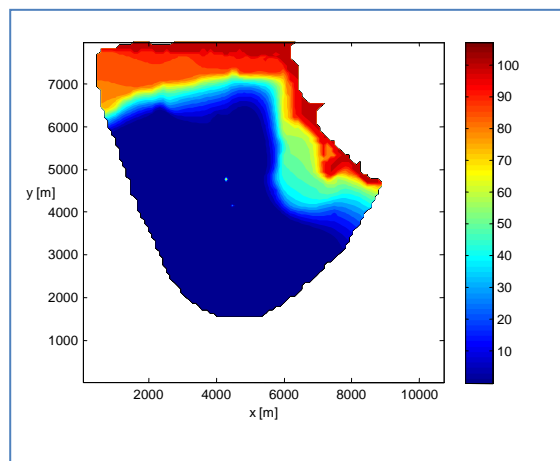
Εικόνα 9.8Β Άντληση θαλασσινού νερού από πηγάδια στο βόρειο κομμάτι

Παρατηρείται ότι τα πηγάδια άντλησης του θαλασσινού νερού μεταβάλλουν τη θέση της υφαλμύρισης στο βόρειο τμήμα της περιοχής, περιορίζοντάς την, έστω και κατά τόπους, ενθαρρύνοντας περαιτέρω προσπάθειες μελέτης αυτής της μεθόδου αντιμετώπισης, λόγω της αποτελεσματικότητας που επέφεραν ακόμα και σε περιοχές όπου η ζώνη της υφαλμύριση κάλυπτε όλα το πάχος του υδροφορέα.

#### 9.4 Συνδυασμοί μεθόδων αντιμετώπισης υφαλμύρισης

Εκτός από την μεμονωμένη εφαρμογή των σεναρίων αντιμετώπισης της υφαλμύρισης, εξετάζεται και η δυνατότητα συνδυασμού των μέτρων αυτών.

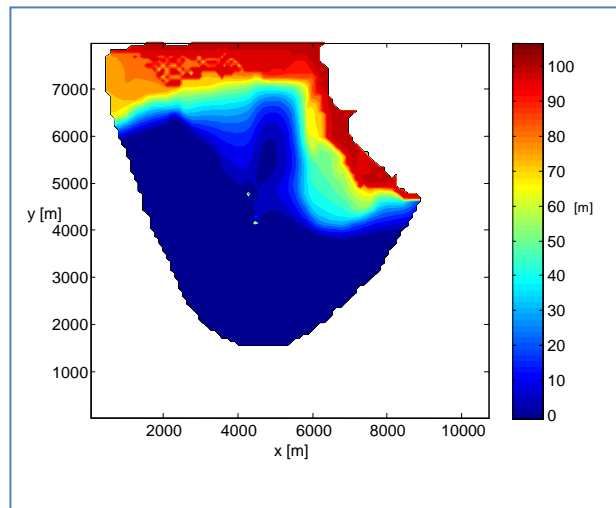
Συνδυάζοντας, τη μέθοδο των βελτιστοποιημένων αντλήσεων με τη μέθοδο του εμπλουτισμού προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 9.9:



**Εικόνα 9.9 Εφαρμογή βελτιστοποιημένων αντλήσεων και εμπλουτισμός του υδροφορέα με 1 πηγάδι εμπλουτισμού,  $Q_{\text{εμπλ}}=1000\text{m}^3/\text{d}$**

Παρατηρείται σημαντικός περιορισμός της υφαλμύρισης στις περιοχές κοντά στις γεωτρήσεις που βρίσκονται στην ενδοχώρα, αλλά η κατάσταση παραμένει σχεδόν αμετάβλητη στο βόρειο τμήμα της περιοχής, στο οποίο και το πρόβλημα είναι πιο έντονο .

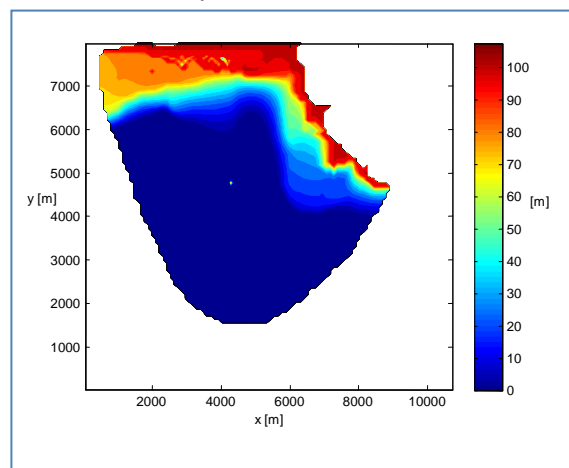
Αν γίνει συνδυασμός της μεθόδου άντλησης θαλασσινού νερού με τη μέθοδο εμπλουτισμού από ένα πηγάδι εμπλουτισμού, η ζώνη της υφαλμύρισης αποτυπώνεται στην Εικόνα 9.10:



**Εικόνα 4.10** Αποτύπωση της ζώνης της υφαλμύρισης με χρήση 5 πηγαδιών άντλησης στο βόρειο τμήμα της περιοχής και 1 πηγαδιού εμπλουτισμού

Από την εφαρμογή του συνδυασμού των μεθόδων άντλησης της υφαλμύρισης και εμπλουτισμού προκύπτει η μείωση του πάχους της ζώνης της υφαλμύρισης στο βόρειο τμήμα και βελτίωση στο ανατολικό τμήμα, όπου το πηγάδι εμπλουτισμού βελτιώνει τη υφιστάμενη κατάσταση περιορίζοντας την υφαλμύριση από τα 60-70m πάχος, κοντά στα 40m.

Με εφαρμογή των μεθόδων άντλησης θαλασσινού νερού από τη ζώνη της υφαλμύρισης, εμπλουτισμού και βελτιστοποίησης των αντλήσεων προκύπτει η παρακάτω εικόνα της υφαλμύρισης, όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 9.11:



**Εικόνα 9.5** Αποτύπωση της ζώνης της υφαλμύρισης με βελτιστοποιημένες αντλήσεις, χρήση 5 πηγαδιών άντλησης στο βόρειο τμήμα και 1 πηγαδιού εμπλουτισμού

Από την εφαρμογή όλων των προτεινόμενων μεθόδων αντιμετώπισης της υφαλμύρισης προκύπτει ότι η υφαλμύριση περιορίζεται αποτελεσματικά, επιτρέποντας σε πηγάδια άντλησης του γλυκού νερού στο κέντρο περίπου της περιοχής μελέτης να αντλούν νερό που δεν επηρεάζεται από το υφάλμυρο νερό. Η υφαλμύριση περιορίζεται τόσο στο ανατολικό

τμήμα της περιοχής, αλλά η κατάσταση βελτιώνεται και στο βόρειο τμήμα στο οποίο το πρόβλημα ήταν έντονο.

Για την επιλογή όμως της πιο κατάλληλης μεθόδου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφορες παράμετροι, όπως το κόστος εφαρμογής, η βιωσιμότητα της μεθόδου, οι προβλέψεις χρήσεις νερού κ.α.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης των αντλήσεων είναι μια μέθοδος που δεν έχει κόστος εφαρμογής, αφού προκειμένου να εφαρμοστεί μεταβάλλονται οι παροχές των ήδη υπαρχόντων πηγαδιών. Είναι μια μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα αλλά και να διαφοροποιηθεί με βάση τις συνθήκες της περιοχής. Αυτό το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί μειονέκτημα της μεθόδου, είναι το γεγονός ότι με βάση το σενάριο που προτείνεται ένα από τα πηγάδια άντλησης, το πηγάδι 2 συγκεκριμένα, θα πρέπει να διακόψει σχεδόν τη λειτουργία του αφού υπολογίστηκε μείωση της δυναμικότητας του κατά 98%.

Αντίθετα, η μέθοδος του τεχνητού εμπλουτισμού έχει κόστος εφαρμογής και συντήρησης που σχετίζονται με την διάνοιξη, συντήρηση και λειτουργία ενός πηγαδιού αλλά εμπλέκει και τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα του βιολογικού καθαρισμού της Χερσονήσου. Επιπλέον, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η παροχή προς το πηγάδι εμπλουτισμού θα χρειαστούν επιπλέον έργα όπως δεξαμενές εξισορρόπησης και σωληνώσεις μεταφοράς του νερού. Όμως, με την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, οι ήδη υπάρχουσες αντλήσεις δεν χρειάζεται να διαφοροποιηθούν από την ισχύουσα δυναμικότητά τους και να μεταβληθούν οι ανάγκες των κατοίκων σε μια περιοχή με αυξημένο τουρισμό.

Σε ότι αφορά τη μέθοδο άντλησης του θαλασσινού νερού, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το κόστος εφαρμογής και συντήρησης πηγαδιών άντλησης σε διάφορα σημεία του υδροφορέα. Όμως, δεν επιβάλλει την τροποποίηση των αντλήσεων των ήδη εγκατεστημένων γεωτρήσεων της περιοχής.

## 9.5 Αξιοποίηση αλμυρού νερού

Από την άντληση αλμυρού/υφάλμυρου νερού, το οποίο προέρχεται από την ζώνη του υδροφορέα που έχει ήδη επηρεαστεί από την υφαλμύριση, προκύπτει το ζήτημα της χρήσης και αξιοποίησης του. Αυτή η ποσότητα του νερού θα μπορούσε να αξιοποιηθεί με χρήση της τεχνολογίας Aquifer Thermal Energy Storage System (ATES), τροποποιημένης ελαφρώς, για τον κλιματισμό των ξενοδοχειακών μονάδων της περιοχής, όπως έχει εφαρμοστεί και σε άλλες περιπτώσεις (Courtois et al., 2009)

### 9.5.1 Τα συστήματα ATES

Ως συστήματα ATES αναφέρονται τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφορέα. Η τεχνολογία αυτή θεωρείται μια από τις πλέον φιλικές για την παροχή θέρμανσης και ψύξης σε κτίρια, με χρήση νερού που προέρχεται και αποθηκεύεται στον υπόγειο υδροφορέα. Το νερό που αποθηκεύεται στον υδροφορέα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ή ψύξη του κτιρίου αφού έχει κυκλοφορήσει μέσα στο κτίριο μέσω των σωληνώσεων και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί μήνες αργότερα από την αποθήκευσή του (Novo et al., 2009).

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε υδροφορέα, ATES, χρησιμοποιούνται για την εποχική αποθήκευση θερμής και ψυχρής ενέργειας και είναι μία από τις δύο βασικές ομάδες γεωθερμικών συστημάτων. Τα γεωθερμικά συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιοχές των ΗΠΑ, σε πολλές ευρωπαϊκές και άλλες χώρες, για την ψύξη και θέρμανση κτιρίων. Λόγω της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων, του υψηλού κόστους τους και της υπερθέρμανσης του πλανήτη, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας γίνονται σταδιακά πιο δημοφιλή ως προς τη χρήση τους (Kim et al, 2010).

### 9.5.2 Λειτουργία των ATES

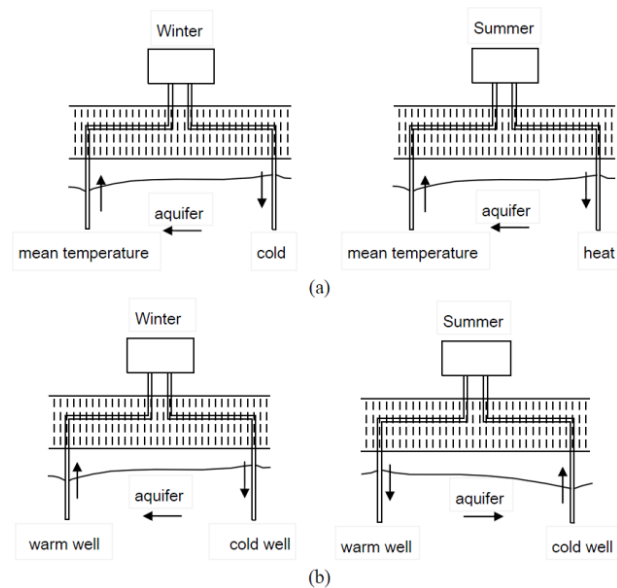
Τα συστήματα ATES αποτελούνται από έναν αριθμό πηγαδιών τα οποία διανοίγονται στον υδροφορέα για την κυκλοφορία του νερού μεταξύ της περιοχής αποθήκευσης και του συστήματος για το οποίο προορίζεται η παροχή ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με σκοπό την παροχή ψύξης και θέρμανσης σε εποχική βάση. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το θερμό και ψυχρό φορτίο δεν θα αναμειχτούν και θα παραμείνουν ξεχωριστά, τα πηγάδια τοποθετούνται σε απόσταση.

Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο πηγάδια που αντλούν συνεχώς προς τη μια κατεύθυνση ή από το ένα πηγάδι στο άλλο. Γενικά, υπάρχουν δύο συνθήκες λειτουργίας, η συνεχής και η κυκλική. Η συνεχής συνθήκη λειτουργίας ενδείκνυται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το φορτίο έχει θερμοκρασία κοντά σε αυτή του φυσικού υπόγειου νερού και η αποθήκευση του νερού μπορεί να θεωρηθεί ως φυσική επαναφορά των φυσικών θερμοκρασιών του υπόγειου νερού και αυτός είναι ένας εύκολος τρόπος σχεδίασης του συστήματος. Σε αυτή τη συνθήκη λειτουργίας είναι μόνο απαραίτητο να χρησιμοποιούνται αντλίες σε ένα μόνο πηγάδι ή σε ένα συγκεκριμένο σύνολο πηγαδιών. Μειονέκτημα αυτής της συνθήκης λειτουργίας είναι το γεγονός ότι θα υπάρχει περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών (Ma et al., 2005).

Κατά την κυκλική συνθήκη λειτουργίας, δημιουργούνται ένας ψυχρός και ένας θερμός 'ταμιευτήρας' / ρεζερβουάρ' γύρω από κάθε πηγάδι του συστήματος. Βασικό μειονέκτημα αυτής της συνθήκης λειτουργίας είναι ότι η σχεδίαση και η λειτουργία ενός τέτοιου



συστήματος άντλησης και επανέγχυσης του νερού είναι πολύ πιο δύσκολη και απαιτητική. (Lee, 2010)



**Εικόνα 9.12 Βασικές συνθήκες λειτουργίας συστημάτων ATES Figure 2 Basic operational regimes for aquifer thermal energy storage (a) συνεχής συνθήκη , (b) κυκλική συνθήκη (Lee, 2010).**

Στην παρούσα περίπτωση προτείνεται να ακολουθηθεί η πρακτική των ATES, ελαφρώς τροποποιημένη. Συστήνεται η άντληση του υπόγειου θαλασσινού νερού, από τη ζώνη της υφαλμύρισης, με σκοπό τη χρήση του για την παροχή ψύξης στις ξενοδοχειακές μονάδες της περιοχής κατά τους θερινούς μήνες. Το νερό, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του θα χρησιμοποιείται για να ψύξει τον αέρα στα ξενοδοχεία. Η παραλλαγή που προτείνεται να εφαρμοστεί στην περίπτωση της Χερσονήσου είναι να αντλείται το θαλασσινό νερό από τον υπόγειο υδροφόρα, να περνά από τα συστήματα κλιματισμού των ξενοδοχείων, αλλά να μην επανεισάγεται στον υδροφόρα προκειμένου, το πιο θερμό πλέον νερό, να χρησιμοποιείται ως πηγή θέρμανσης για το χειμώνα. Τα ξενοδοχεία δεν λειτουργούν το χειμώνα, οπότε το νερό αυτό δεν θα είχε κάποια χρησιμότητα και επιπλέον από τη στιγμή που αντλούμε το θαλασσινό νερό από τη ζώνη υφαλμύρισης με σκοπό να περιορίσουμε τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, δεν ενδείκνυται η επανέγχυσή του στον υδροφόρα. Για το λόγο αυτό προτείνεται η απόρριψη του νερού αυτού στη θάλασσα. Σε περίπτωση λειτουργίας των ξενοδοχείων και το χειμώνα, θα μπορούσαν τα συστήματα ATES να λειτουργήσουν όπως προβλέπεται από τον ορισμό τους, όπου το νερό επανεισάγεται στο υδροφόρα και αυτό αποτελεί μια εναλλακτική χρήση για την αξιοποίηση του υφάλμυρου νερού.

Επιπλέον, σε περίπτωση που η εφαρμογή των ATES εξυπηρετεί τις τοπικές ανάγκες, θα μπορούσε να επανεισάγεται το νερό στον υδροφόρα και έτσι να αποθηκεύεται και θερμό



φορτίο το οποίο θα αξιοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες αν και χρειάζεται με νερό με χαμηλές ταχύτητες για να μην έχουμε θερμικές παρεμβολές (Kranz et al., 2009)

Από την απόρριψη του θαλασσινού νερού στην θάλασσα δεν θεωρείται ότι επιβαρύνει το θαλάσσιο περιβάλλον. Εκτιμάται, από παρόμοιες εγκαταστάσεις όπου λειτουργούν συστήματα ATES στην Τουρκία, ότι η θερμοκρασία του νερού έπειτα από τη χρήση του για την ψύξη του κτιρίου, θα είναι σε εύρος 18-30°C. Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών το νερό της θάλασσας στην Κρήτη είναι κάπου στους 24 °C.  
(<http://www.seatemperature.org/europe/greece/chania-february.htm>)

Πιο συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα των συστημάτων ATES θεωρείται συνάρτηση του χρόνου και των θερμοκρασιών του νερού. Έτσι, η έγχυση νερού με θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτήν που έχει το υπόγειο νερό γύρω από το πηγάδι, θεωρείται ψυχρή ενέργεια η οποία μπορεί να ανακτηθεί κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Η αποδοτικότητα,  $n_w$ , ενός πηγαδιού σε ένα σύστημα ATES μπορεί να εκφραστεί ως ποσοστό της εξαγόμενης και εγχυόμενης ενέργειας,  $E$ , σε δύο διαδοχικές περιόδους  $\tau$  και  $\tau + 1$ :

$$n_w(\tau + 1) = \frac{E(\tau + 1)}{E(\tau)} \quad (9.1)$$

Προκειμένου να υπολογισθεί η συνολική αποδοτικότητα όλου του συστήματος ATES, προτείνεται το άθροισμα της εξαγόμενης ενέργειας από όλα τα πηγάδια να διαφραστεί με το άθροισμα της εγχυόμενης ενέργειας στα πηγάδια. Η ενέργεια έχει θετικές τιμές τόσο για τα θερμά όσο και για τα ψυχρά πηγάδια στην περίπτωση που η θερμοκρασία του νερού που εγχέεται είναι αντίστοιχα χαμηλότερη ή υψηλότερη από αυτή που του περιβάλλοντος υπόγειου νερού (Bark et al, 2013).

## Κεφάλαιο 11 – Συμπεράσματα

Οι παράκτιοι υδροφορείς αποτελούν ευάλωτα υδρολογικά συστήματα λόγω της ισορροπίας που διατηρούν με το θαλασσινό νερό με το οποίο γειτνιάζουν. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης, της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον παράκτιο υδροφορέα που περιέχει γλυκό νερό, αποτελεί παράγοντα υποβάθμισης της ποιότητας του νερού και επέρχεται είτε λόγω φυσικών γεωλογικών συνθηκών είτε λόγω ανθρώπινης παρέμβασης μέσω υπεράντλησης, για την κάλυψη υδρευτικών, αρδευτικών και βιομηχανικών αναγκών.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Χερσόνησο Ηρακλείου. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής έχει επιδεινώσει το φαινόμενο της υφαλμύρισης με αποτέλεσμα πλέον, η ποιότητα του νερού των γεωτρήσεων που βρίσκονται προς την ενδοχώρα, να επηρεάζεται από το θαλασσινό νερό. Η προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού έγινε με χρήση μοντέλου προσομοίωσης, με βάση τα υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής και η μελέτη της υφαλμύρισης με χρήση του πακέτου εφαρμογών SWI2.

Η αξιοπιστία του μοντέλου σχετικά με το αν ανταποκρίνεται σωστά στα αναμενόμενα αποτελέσματα, γίνεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με αυτά που προκύπτουν με την αναλυτική επίλυση το προβλήματος. Για το λόγο αυτό εξετάστηκε ένα πιο απλοποιημένο πρόβλημα, στο οποίο τα πηγάδια δεν λαμβάνονται υπόψη και η περιοχή μελέτης έχει πιο απλή δομή όσον αφορά τα γεωλογικά της χαρακτηριστικά και με τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας τις μέσες τιμές ανά στήλη όπως αυτές είχαν οριστεί κατά την αρχική διακριτοποίηση της περιοχής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναλυτική και την αριθμητική επίλυση του προβλήματος με χρήση του προγράμματος SWI2, δείχνουν ότι η αριθμητική επίλυση προσεγγίζει αρκετά καλά την αναλυτική. Οι μικρές διαφορές προκύπτουν από τον αριθμό των επαναλήψεων που επιλέχτηκαν στην εφαρμογή του μοντέλου. Από αυτή τη σύγκριση συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

Τα μέτρα τα οποία προτείνονται για τον περιορισμό και την επιβράδυνση του φαινομένου της υφαλμύρισης περιλαμβάνουν τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα σε μία ή πολλαπλές θέσεις, την άντληση του υφάλμυρου νερού και την βελτιστοποίηση των αντλήσεων με σκοπό τη μεταφορά του μετώπου μακριά από τις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις. Η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου κρίνεται με βάση τον περιορισμό της υφαλμύρισης που επιτυγχάνεται, ενώ για την πρακτική εφαρμογή κάποιας από τις προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως το κόστος εφαρμογής και οι επιπτώσεις στην τοπική κοινωνία.

Κατά την εφαρμογή του σεναρίου που περιλαμβάνει τον τεχνητό εμπλουτισμό, αποφασίστηκε ο εμπλουτισμός μέσω πηγαδιών, με νερό προερχόμενο από το βιολογικό καθαρισμό της Χερσονήσου. Στην περίπτωση εφαρμογής ενός μόνο πηγαδιού εμπλουτισμού, από τις θέσεις που εξετάστηκαν και βρίσκονταν μέσα στη ζώνη υφαλμύρισης, η πιο αποτελεσματική κρίθηκε αυτή που βρίσκεται στο μέσο και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, καθώς σε αυτή τη θέση είναι ορατή η μείωση του πάχους της ζώνης του υφάλμυρου νερού, ενώ σε θέσεις στο βόρειο τμήμα ο εμπλουτισμός από ένα πηγάδι δεν ήταν αποτελεσματικός. Στην περίπτωση εφαρμογής πέντε πηγαδιών εμπλουτισμού, συνολικής δυναμικότητας ίσης με αυτή που εφαρμόστηκε κατά την εγκατάσταση ενός πηγαδιού, οι θέσεις τους ορίστηκαν στα σημεία όπου το φαινόμενο της υφαλμύρισης ήταν πιο έντονο και τοποθετήθηκαν στο βόρειο και ανατολικό τμήμα της περιοχής. Από την εφαρμογή αυτής της μεθόδου η υφαλμύριση περιορίστηκε ελαφρά ακόμα και στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής.

Κατά την εξέταση του σεναρίου που περιλαμβάνει την εφαρμογή βελτιστοποιημένων αντλήσεων, όπως αυτές προέκυψαν έχοντας ως στόχο την μετατόπιση του μετώπου σε συγκεκριμένες θέσεις, ο περιορισμός της υφαλμύρισης κρίθηκε ικανοποιητικός, απομακρύνοντας το υφάλμυρο νερό από τις γεωτρήσεις της ενδοχώρας.

Κατά την εφαρμογή του σεναρίου άντλησης του θαλασσινού νερού εφαρμόζονται αντλητικά πηγάδια του υφάλμυρου νερού από τη ζώνη υφαλμύρισης στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Η εφαρμογή αυτών των πηγαδιών είχε θετική επίδραση στον περιορισμό του προβλήματος. Η συνδυασμένη εφαρμογή με ταυτόχρονο εμπλουτισμό του υδροφορέα με φρέσκο νερό επέφερε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Ο συνδυασμός και των τριών μεθόδων άντλησης του θαλασσινού νερού, εμπλουτισμού με φρέσκο νερό και βελτιστοποίησης των αντλήσεων των ήδη υπαρχόντων πηγαδιών βελτιώνει την εικόνα του υδροφορέα και περιορίζει δραστικά το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Η ανάγκη για περιορισμό του μετώπου της υφαλμύρισης είναι αναμφισβήτητη λόγω της σπουδαιότητας της τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής και της ανάγκης για νερό καλής ποιότητας. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την αντιμετώπιση του φαινομένου θα πρέπει να γίνει με βάση ορισμένα κριτήρια που δεν είναι αποκλειστικά τεχνικά, αλλά είναι συνδυασμός και άλλων παραμέτρων όπως οικονομικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών κ.α.

Από οικονομικής άποψης, από τις μεθόδους που έχουν προταθεί, αυτές που περιλαμβάνουν τη διάνοιξη και λειτουργία γεωτρήσεων, απαιτούν περισσότερα χρήματα για την εγκατάσταση και λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού και την εγκατάσταση σωληνώσεων για την μεταφορά του νερού από και προς τον υδροφορέα κατά περίπτωση. Πιο οικονομική πρόταση σαφώς είναι αυτή της εφαρμογής του περιορισμού των αντλήσεων με εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού για την μετατόπιση του μετώπου σε συγκεκριμένες θέσεις.

Από κοινωνικής άποψης, η μεγάλη μείωση των παροχών από τα υπάρχοντα πηγάδια, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως η ιδανικότερη λύση λόγω του ότι αν μπορούσε η τοπική κοινωνία να καλύψει τις ανάγκες της μειώνοντας την κατανάλωση του νερού του υδροφορέα ή αξιοποιώντας κάποια άλλη εναλλακτική πηγή, προκειμένου να διατηρηθεί το επίπεδο των υπηρεσιών που προσφέρονται στις ξενοδοχειακές μονάδες της περιοχής, θα το είχαν ήδη εφαρμόσει.

Από περιβαλλοντικής άποψης, ο περιορισμός των αντλήσεων και η άντληση του αλμυρού νερού από τις θέσεις όπου η υφαλμύριση είναι έντονη έχει επίδραση στις θέσεις που εντοπίζεται το μέτωπο και στο πάχος της ζώνης του αλμυρού νερού που υπέρκειται του γλυκού. Στην περίπτωση όμως του εμπλουτισμού του υδροφορέα με νερό που προέρχεται από την έξοδο του βιολογικού καθαρισμού, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα μικροβιολογικά χαρακτηριστικά αυτού. Η ποιότητα της εκροής του νερού και τα επίπεδα παρουσίας παθογόνων μικροοργανισμών μπορούν να αποτελέσουν ανασταλτικό παράγοντα για τη χρήση του ως νερού εμπλουτισμού. Το νερό των γεωτρήσεων καλύπτει και τις ανάγκες για νερό που προορίζεται για λόγους αναψυχής και η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών σε επίπεδα ανώτερα από τα επιτρεπτά, όπως αυτά ορίζονται από τις ευρωπαϊκές οδηγίες, αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα χρήσης του. Υπάρχει όμως δυνατότητα χρήσης του νερού της εκροής του βιολογικού καθαρισμού όταν το σημείο εμπλουτισμού του υδροφορέα και το σημείο άντλησης είναι σε ορισμένη απόσταση που λόγω της κίνησης του νερού μέσα στον υδροφορέα και της προσκόλλησης των μικροοργανισμών στα πετρώματα μπορεί να επιτευχθεί μείωσή τους σε επιτρεπτά επίπεδα.

Αυτή η πρόταση θα μπορούσε να αποτελεί ξεχωριστή μελέτη σχετικά με το ποιες είναι οι κατάλληλες θέσεις των γεωτρήσεων προκειμένου η ποιότητα του νερού της περιοχής να μην επηρεαστεί αρνητικά από το νερό εμπλουτισμού. Παράγοντας όμως αβεβαιότητας στη μελέτη, αποτελεί το γεγονός ότι ο υδροφορέας είναι καρστικός και δεν μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ των σημείων εμπλουτισμού και άντλησης, λόγω της αβεβαιότητας της πορείας του νερού και των υδραυλικών αγωγιμοτήτων των πετρωμάτων που μεσολαβούν, καθώς και η μη καταγραφή των παράνομων γεωτρήσεων οι παροχές των οποίων δεν είναι γνωστές.

## Βιβλιογραφία

### Ξένη Βιβλιογραφία

Asano, T. and Cotruvo, J. A. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. *Water Research*, 38(8), 1941-1951.

Ahlfeld, D. and Mulligan, A. (2000) *Optimal Management of Flow Groundwater Systems*, Academic Press

Anderson, M. and Woessner, W. (1992) *Applied Groundwater Modeling*, Academic Press

Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D. and Dausman, A.M., 2013, Documentation of the seawater intrusion (SWI2) package for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A46, 47 p., <http://pubs.usgs.gov/tm/6a46/>

Bakr, M., van Oostrom, N., and Sommer, W. (2013). Efficiency of and interference among multiple Aquifer Thermal Energy Storage systems; A Dutch case study. *Renewable Energy*, 60, 53-62.

Courtois, N., Grisey, A., Grasselly, D., Menjoz, A., Noël, Y., Petit, V. and Thiéry, D. (2007). Application of Aquifer Thermal Energy Storage for heating and cooling of greenhouses in France: a pre-feasibility study. In *Proceedings of European Geothermal Congress* (pp. 1-8).

Johnson, T., Reichard, E., Land, M. and Crawford, S. (2001). *Monitoring, Modeling, and Managing Saltwater Intrusion, Central and West Coast Groundwater Basins, Los Angeles County, California. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers— Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco*

Karterakis, S., Karatzas, G., Nikolos, I. and Papadopoulou, M. (2007) Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria, *Journal of Hydrology* v.342, pg 270-282

Kim, J., Lee, Y., Yoon, W. S., Jeon, J. S., Koo, M. H. and Keehm, Y. (2010). Numerical modeling of aquifer thermal energy storage system. *Energy*, 35(12), 4955-4965.

Kranz, S. and Bartels, J. (2009). Simulation and data based identification of parameters affecting seasonal ATES efficiency. In *11th International Conference on Thermal Energy Storage-Effstock*.

Lee, K. S. (2010). A review on concepts, applications, and models of aquifer thermal energy storage systems. *Energies*, 3(6), 1320-1334

Ma, J., Bin, D., Wang, M., Du, L. and Ni, Y. (2005). Choosing and Arranging of The Aquifer Thermal Energy Storing Well's Position. SMIA 05 "SUSTAINABLE MANAGEMENT IN ACTION" 19th - 20th September 2005, University of Geneva

Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., and Rodriguez-Hernandez, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits. *Applied Energy*, 87(2), 390-397.

Olsthoorn, T.N. (2012). Fresh and salt water, CIE4420 Geohydrology 1. Technical University of Delft

Olsthoorn, T.N. (2013). User guide of mflab.

<https://mflab.googlecode.com/svn/trunk/doc/mflabUserGuide/mflabUserGuide.pdf>

Papadopoulou, M., Varouchakis, E. and Karatzas, G. P. (2009). Simulation of complex aquifer behavior using numerical and geostatistical methodologies, *Desalination* v.237, pg 42-53

Todd, D. (1980). *Groundwater Hydrology*, second edition, Wiley, New York

Tsagarakis, K. P., Dialynas, G. E. and Angelakis, A. N. (2004). Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria. *Agricultural Water Management*, 66(1), 35-47

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

## Ελληνική Βιβλιογραφία

Βασιλείου Α., (2009) Σχεδιασμός πρότυπης περιφερειακής υπηρεσίας υδάτων, βάσει του μοντέλου βιώσιμων οργανισμών, για την εφαρμογή του άρθρου και της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60», Αθήνα, 2009.

Γιαννέλη, Χ. (2009) Υδρολογική έρευνα λεκανών του ελληνικού χώρου: παράδειγμα από τη λεκάνη Αγίων Αναργύρων (Καστοριά), Θεσσαλονίκη

Καλλέργης, Γ. (2001) Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία , Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας

Καρατζάς, Γ. (2002) Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης

Καρτεράκης, Σ. (2005) Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, Χανιά

Κουντούρη Φ, (2008) Εφαρμογή των οικονομικών πτυχών του άρθρου 5 της κοινοτικής οδηγίας περί υδάτων 2000/60/ΕΚ στην Ελλάδα

Μιμίκου Μ., (2002) Η εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60 σε επίπεδο λεκανών απορροής. Προοπτικές με βάση την ελληνική πραγματικότητα», Ημερίδα: Οδηγία Πλαίσιο 2000/60, Εναρμόνιση με την ελληνική πραγματικότητα, Αθήνα

Νόμος 3199/2003, «Προστασία και Διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23-10-2000».

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23-10-2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων.

Στεφανόπουλος, Κ. (2004) Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρωσης στην Περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης με Χρήση Προσομοίωσης και Μετρήσεων Πεδίου, Χανιά, 2004

Τάντος, Β. (2006) Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματικού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου – Κορίνθου. Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, Πάτρα

Τριχάκης, Ι. (2004) Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά

Τρούσσα-Μάρτη, Σ. (2009) Υφαλμύρωση Υπόγειων Υδροφορέων Νομού Χανίων, Χανιά.

Τσαλέπη, Μ. (2009) Προσομοίωση της λειτουργίας υδροφορέα υπό συνθήκες κλιματικών αλλαγών, Θεσσαλονίκη

Υδρογεωλογική μελέτη Βορείου Νομού Ηρακλείου, Έργο Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε, Παράρτημα Κρήτης

Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, «Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείριση και Προστασίας των Υδατικών Πόρων», 2008.

### Ιστοσελίδες

<http://www.seatemperature.org/europe/greece/chania-february.htm>

<http://www.geo.auth.gr/763/ch9.htm>

[www.googlemap.com](http://www.googlemap.com)

<http://www.waterinfo.gr/eedyp/papers/GKallergis.html>

<http://code.google.com/p/mfLab>

<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>

<http://water.usgs.gov/ogw/modflow/>

<http://hydro.geo.ua.edu/mt3d/>

