



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
VISUAL MODFLOW ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελευθερία Αγιουτάντη

Εξεταστική Επιτροπή
Γεώργιος Καρατζάς, Καθηγητής
Νικολαΐδης Νικόλαος, Καθηγητής
Παρανυχιανάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής
Δρ. Βαρουχακης Μανώλης

ΧΑΝΙΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων. Συγκεκριμένα, μελετάται το πρόβλημα στην περιοχή του Τυμπακίου όπου το φαινόμενο φαίνεται να έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις. Η περιοχή είναι κατά κύριο λόγο αγροτική, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα έχει προκληθεί από την υπεράντληση των υπόγειων υδάτων, με σκοπό την άρδευση των καλλιεργειών.

Σε πρώτο επίπεδο έγινε μία σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των υδροφορέων, όπως επίσης και των βασικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού. Στη συνέχεια, ακολούθησε μία εκτεταμένη αναφορά στο φαινόμενο της υφαλμύρισης, συμπεριλαμβανομένων των μαθηματικών προσεγγίσεων, που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς. Οι παραπάνω ενότητες αποτελούν τον πρώτο άξονα της εργασίας, ο οποίος επικεντρώνεται στο θεωρητικό υπόβαθρο του θέματος.

Ο δεύτερος άξονας, περιλαμβάνει ενότητες που σκιαγραφούν πιο αναλυτικά την περιοχή μελέτης. Αρχικά γίνεται μια περιγραφή της περιοχής, όπως επίσης και όλων παραγόντων, που επιδρούν στη ροή του υπόγειου υδροφορέα. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα Visual Modflow και των δεδομένων που εισάχθηκαν. Έπειτα πραγματοποιήθηκε μία εμπειρική διαδικασία βαθμονόμησης έτσι ώστε να υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των δεδομένων του πεδίου και της εκτιμώμενης πιεζομετρίας.

Μία νέα προσέγγιση που δεν έχει υλοποιηθεί μέχρι τώρα στην περιοχή του Τυμπακίου είναι η εκτίμηση της έκτασης της υφαλμύρισης μέσω μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού και αναπαράσταση αυτών σε χάρτη χωρικής κατανομής με διαφορετικές τεχνικές της γεωστατιστικής.

Το βασικό ερώτημα που καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία είναι εάν ο συνδυασμός δεδομένων ηλεκτρικής αγωγιμότητας, μετρήσεων πιεζομετρίας σε συγκεκριμένες θέσεις και προσομοίωση της ροής του υπόγειου υδροφορέα μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικά την έκταση της υφαλμύρισης.

ABSTRACT

This study investigates the occurrence of seawater intrusion in coastal aquifers. More specifically it focuses in the area of Timbaki, southern Crete, where the problem has dramatically increased in recent years. The increased demand on groundwater resources is mainly due to the increased irrigation activities in the area.

Initially the basic aquifer characteristics are described as well as the basic equations of groundwater flow. Subsequently, the phenomenon of seawater intrusion is discussed in detail along with the relevant mathematical formulations.

A numerical model for groundwater flow is then developed which is based on the Modflow code. The model is calibrated and validated against hydraulic head observations. Contours of hydraulic heads are plotted for the study area.

In addition electrical conductivity measurements were used to generate spatial distribution maps of the area. Different geostatistical techniques were evaluated in order to obtain the most representative distribution.

The fresh water-salt water interface is estimated using the Ghyben – Herzberg equation and results are compared to the electrical conductivity maps of the area.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και επιβλέποντα στην παρούσα διπλωματική εργασία κ. Γεώργιο Καρατζά για την βοήθειά που μου προσέφερε, στην επιλογή του θέματος και την περαιτέρω ανάπτυξή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την συνεχή του καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της.

Τέλος, ευχαριστώ τους κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και κ Νικόλαο Νικολαΐδη Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για την πολύτιμη συμπαράσταση και στήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα στην περίοδο εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στον πατέρα μου Ζαχαρία Αγιουτάντη

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ABSTRACT.....	3
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	4
Πίνακας περιεχομένων.....	5
Κατάλογος εικόνων	7
Κατάλογος πινάκων	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Σπουδαιότητα υδατικών πόρων	11
1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας	12
1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	12
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	14
2.1 Υδρολογικός κύκλος	14
2.2 Υδατικό ισοζύγιο	15
2.3 Ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων	17
2.3.1 Ακόρεστη ζώνη.....	18
2.3.2 Κορεσμένη ζώνη.....	18
2.4 Υδροφορείς	19
2.4.1 Παράμετροι υδροφορέων.....	20
2.4.2 Ομοιογένεια και ισοτροπία	24
2.5 Νόμος του Darcy	25
2.6 Κλίση και υδραυλικό φορτίο	26
2.7 Φρέατα άντλησης και παρατήρησης.....	27
2.7.1 Φρέατα άντλησης.....	27
2.7.2 Φρέατα παρατήρησης	29
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	31
3.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης	31
3.2 Μέθοδοι προσομοίωσης διεπιφάνειας	33
3.3 Προσέγγιση Ghyben- Herzberg	34
3.4 Μέτρηση της αλατότητας με την μέθοδο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας για εκτίμηση υφαλμύρισης.....	37
3.5 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου υφαλμύρισης.....	39
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	41
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής.....	41

4.2	Μετεωρολογικά στοιχεία	43
4.3	Υδρολογικά στοιχεία της περιοχής	44
4.4	Ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	45
4.5	Γεωλογία της περιοχής.....	48
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MODFLOW ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	51
5.1	Εισαγωγή στο λογισμικό Modflow	51
5.2	Πακέτα του λογισμικού MODFLOW	54
5.3	Οριακές συνθήκες	56
5.4	Το λογισμικό Visual Modflow	57
5.5	Προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης.....	57
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης	65
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	68
6.1	Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	68
6.1.1	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών	68
6.2	Το λογισμικό ArcGis.....	69
6.3	Γεωστατιστική Ανάλυση.....	70
6.3.1	Η μέθοδος παρεμβολής Kriging	70
6.3.2	Μεθοδολογία cross validation	73
6.3.1	Εκτιμώμενη χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης.....	78
6.4	Συζήτηση αποτελεσμάτων	78
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	83
7.1	Συμπεράσματα	83
7.2	Προτάσεις.....	84
8	Βιβλιογραφία	85
8.1	Διαδικτυακή βιβλιογραφία.....	87

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Κατανομή του παγκόσμιου νερού (http://www.aid-n.com/earths-water-resources-in-the-world/earths-water-resources-distribution-of-the-worlds-water/)	11
Εικόνα 2 Ο υδρολογικός κύκλος (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)	14
Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση υδατικού ισοζυγίου (Ανδρεαδάκης, 2016)	16
Εικόνα 4 Ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)	19
Εικόνα 5 Απεικόνιση αρτεσιανής γεώτρησης, γεώτρησης σε υπό πίεση υδροφορέα και γεώτρησης σε ελεύθερο υδροφορέα (Ohio DNR, 2016).....	20
Εικόνα 6 Τύποι διάταξης κόκκων: Α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, Β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, C) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες , D) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, F) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923)	21
Εικόνα 7 Εύρος τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας (Καρατζάς 2009)	23
Εικόνα 8 Γραφική αναπαράσταση ομοιογένειας και ισοτροπίας (Τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979).....	25
Εικόνα 9 Πείραμα Darcy (Hornberger et al ,1998).....	26
Εικόνα 10 Άντληση από περιορισμένο υδροφορέα (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division)	28
Εικόνα 11 Άντληση από ελεύθερο υδροφορέα (U.S.G.S, Ground Water Division)	29
Εικόνα 12 Φρέατα παρατήρησης σε περιορισμένο υδροφορέα (U.S.G.S, Ground Water Division).....	30
Εικόνα 13 Φρέατα παρατήρησης σε ελεύθερο υδροφορέα(U.S.G.S, Ground Water Division).....	30
Εικόνα 14 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα σε κανονικές συνθήκες (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division).....	32
Εικόνα 15 Στάθμη του υδροφόρου μετά την έναρξη της άντλησης (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division).....	33
Εικόνα 16 Ζώνη διεπιφάνειας α)σε ελεύθερο β) σε περιορισμένο υδροφορέα (http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm).....	33
Εικόνα 17 Διεπιφάνεια και συνθήκες στάθμης νερού κατά Ghyben-Herzberg(τροποποιημένο από Atunao Marui, 2003)	36
Εικόνα 18 Επαφή γλυκού-αλμυρού νερού και ο νόμος των Ghyben-Herzberg (http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm).....	37
Εικόνα 19 Η αρχή Badon Ghyben - Herzberg: διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε ελεύθερο υδροφορέα (https://en.wikipedia.org/wiki/Saltwater_intrusion).....	37
Εικόνα 20 Κατηγοριοποίηση αρδευτικού νερού με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα (US Salinity Laboratory, 1954)	38
Εικόνα 21 Κατευθυντήριες γραμμές για εκτίμηση της ποιότητας του νερού	39
Εικόνα 22 Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη υπαλμύρισης παράκτιου υδροφόρου (http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm).....	40
Εικόνα 23 Αντιμετώπιση θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, κοντά στη ακτή (http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm)	40
Εικόνα 24 Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης (https://www.hc-crete.gr/7η-υπε/η-κρητη-μας-ηρακλειο-δημοι).....	41
Εικόνα 25 Χάρτης της περιοχής του Τυμπακίου και της κοιλάδας της Μεσσαράς. Μεγάλα προγράμματα άρδευσης συμβολίζονται με μπλε χρώμα (Paritsis, 2005)	42

Εικόνα 26 Τύπος καλλιεργειών στην περιοχή (http://www.desire-his.eu/index.php/en/photo-gallery-resourcesmenu-198/category/81/itemPage/5/asInline) .	42
Εικόνα 27 Μετεωρολογικοί σταθμοί στην Κρήτη (http://penteli.meteo.gr/stations/chania/crete.htm).....	43
Εικόνα 28 Σχηματική απεικόνιση δεδομένων βροχόπτωσης από μετεωρολογικό σταθμό Τυμπακίου (Δασκαλάκης 2010).....	44
Εικόνα 29 Δίκτυο επιφανειακής απορροής της περιοχής Τυμπακίου (Paritsis, 2005)	45
Εικόνα 30 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής Τυμπακίου (Paritsis, 2005).....	45
Εικόνα 31 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου-αεροδρομίου (Γεροπόταμος) (Περιφέρεια Κρήτης 2009)	46
Εικόνα 32 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Α3-Τυμπακίου (Περιφέρεια Κρήτης).....	47
Εικόνα 33 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου- Αεροδρομίου (Γεροπόταμος) (Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013)..	47
Εικόνα 34 Γεωλογική δομή περιοχής (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ)	49
Εικόνα 35 Γεωλογικός χάρτης Τυμπακίου (1:150000, ΙΓΜΕ)	50
Εικόνα 36 Χαρακτηριστικά ενός υδροφορέα που μπορεί να προσομοιωθούν από το Modflow (U.S.G.S).....	53
Εικόνα 37 Σχηματική αναπαράσταση του Όριου Γενικού Φορτίου (G.H.B)(Visual Modflow Help Manual)	56
Εικόνα 38 Εικόνα περιοχής μελέτης.....	57
Εικόνα 39 Διαστάσεις κελιών του πλέγματος του μοντέλου.....	58
Εικόνα 40 Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες.....	59
Εικόνα 41 Απεικόνιση των απενεργοποιημένων κελιών στο μοντέλο, των διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και των πηγαδιών άντλησης.	60
Εικόνα 42 Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών σταθερού φορτίου και των πηγαδιών άντλησης	61
Εικόνα 43 Σχηματική απεικόνιση του Head των γεωτρήσεων παρατήρησης	63
Εικόνα 44 Απεικόνιση των πηγαδιών παρατήρησης καθώς και των πηγαδιών άντλησης ..	65
Εικόνα 45 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της πιεζομετρίας στην υγρή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος).....	66
Εικόνα 46 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της πιεζομετρίας κατά την ξηρή περίοδο (Μάρτιο-Σεπτέμβριο).....	66
Εικόνα 47 Απεικόνιση της απόκλισης των τιμών της πιεζομετρίας από τα πηγάδια παρατήρησης.....	67
Εικόνα 48 Πειραματικό ημιβαριόγραμμα πρότυπο βαριόγραμμα (Δήμου 2010).....	72
Εικόνα 49 Γραμμική τάση των δεδομένων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Η πράσινη γραμμή αναφέρεται στη διεύθυνση κατά x ενώ η μπλε γραμμή στη διεύθυνση κατά y). ...	77
Εικόνα 50 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δημιουργήθηκε από το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1 ^{ης} τάξης.....	78
Εικόνα 51 Απεικόνιση πιεζομετρίας της περιοχής μελέτης κατά την υγρή περίοδο και της ισοΰψους των 2,5 m που υποδηλώνει την εκτιμώμενη έκταση της υφαλμύρισης.....	79
Εικόνα 52 Απεικόνιση πιεζομετρίας της περιοχής μελέτης κατά την ξηρή περίοδο και της ισοΰψους των 2,5 m που υποδηλώνει την έκταση της υφαλμύρισης.....	80

Εικόνα 53 Η έκταση του μετώπου της υφαλμύρισης όπως προέκυψε από την προσομοίωση (MEDIS 2005). Στο βόρειο παράκτιο τμήμα το μέτωπο της υφαλμύρισης φαίνεται περισσότερο προωθημένο συγκριτικά με το νότιο τμήμα. Οι ισοκαμπύλες αντιπροσωπεύουν το βάθος στο οποίο βρίσκεται το μέτωπο της υφαλμύρισης (στα 38, 78, 118 και 158 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας) (Paritsis 2005)	81
Εικόνα 54 Η περιοχή του Τυμπακίου με σημειωμένες γεωηλεκτρικές τομές	82
Εικόνα 55 Γεωηλεκτρικές τομές των ERT-2 (πάνω) και ERT-5 (κάτω). Είναι 46% επικαλυπτόμενες (Vafeidis 2013)	82

Κατάλογος πινάκων

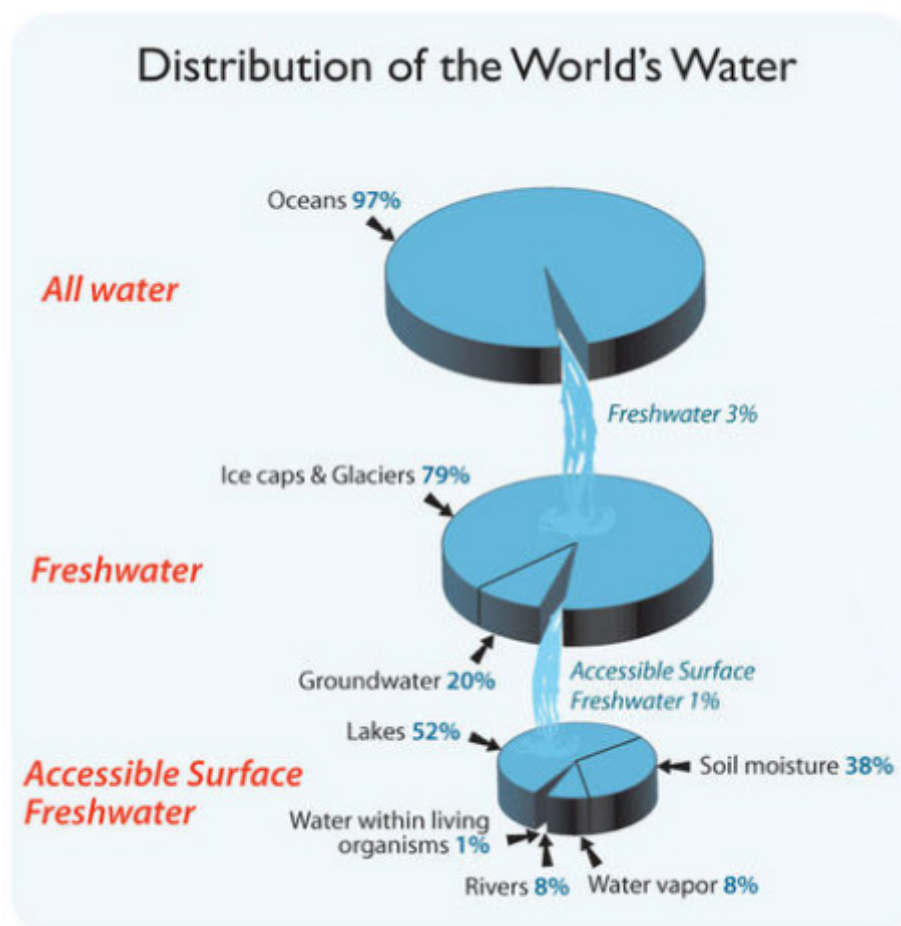
Πίνακας 1 Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης 1999)	21
Πίνακας 2 Μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντελο.....	58
Πίνακας 3 Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας (Δεττοράκη 2012).....	59
Πίνακας 4 Δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης (Παρίτσης, 2005).....	62
Πίνακας 5 Δεδομένα των πηγαδιών παρατήρησης που συλλέχθηκαν από αρχείο kmz.....	63
Πίνακας 6 Σύγκριση θεωρητικών βαριογραμμμάτων και απεικόνιση χωρικής κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σπουδαιότητα υδατικών πόρων

Τα υπόγεια νερά αναφέρονται σε υδάτινες ποσότητες εντός του υπεδάφους και των διαφόρων υπόγειων γεωλογικών σχηματισμών και αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό του γλυκού νερού που υφίσταται στον πλανήτη. Το 97% περίπου της συνολικής ποσότητας νερού του πλανήτη είναι αλμυρό νερό, δηλαδή νερό ακατάλληλο για χρήσεις όπως οικιακή, αγροτική και βιομηχανική. Από το 3% που παραμένει περίπου το 79% της ποσότητας το αποτελούν τα χιόνια και οι πάγοι. Το υπόλοιπο 20% καταλαμβάνεται από τα υπόγεια νερά και ένα πολύ μικρό ποσοστό της τάξης του 1% αντιπροσωπεύει τα επιφανειακά νερά όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.

Παραπάνω από τη μισή ποσότητα όμως των υπογείων υδάτων είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη (της τάξης των 800m κάτω από την επιφάνεια της γης), όπου η ποσότητα αλάτων είναι αυξημένη και η εκμετάλλευσή τους πολύ δύσκολη, ή, εξαιρετικά δαπανηρή. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί και η χωρικά και χρονικά άνιση κατανομή των υδάτινων πόρων γεγονός που καθιστά το νερό περιορισμένο πόρο και πρέπει να τυγχάνει ιδιαίτερης επιμέλειας (<http://www.sepa.org.uk/environment/water/>).



Εικόνα 1 Κατανομή του παγκόσμιου νερού (<http://www.aid-n.com/earths-water-resources-in-the-world/earths-water-resources-distribution-of-the-worlds-water/>)

Τα τελευταία χρόνια όλο και σε συχνότερη βάση, παρατηρούνται φαινόμενα μείωσης της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του νερού των υπόγειων υδροφορέων. Κύρια αιτία είναι η έντονη ανθρωπογενής δραστηριότητα. Το συγκεκριμένο γεγονός σε συνδυασμό με τα μελλοντικά σενάρια που κάνουν λόγο για παγκόσμια έλλειψη του πόσιμου νερού, καθιστούν απαραίτητη την καλύτερη δυνατή διαχείριση των υπόγειων υδάτων, τα οποία και αποτελούν σημαντικό ποσοστό των συνολικών διαθέσιμων αποθεμάτων γλυκού νερού.

Οι υπόγειοι υδροφορείς στον ελλαδικό χώρο δέχονται μεγάλες πιέσεις από τον τομέα της γεωργίας. Υπολογίζεται ότι περίπου το 80% του υπόγειου νερού καταναλώνεται στις αγροτικές δραστηριότητες). Συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις για άρδευση έχουν διπλασιαστεί τα τελευταία 20 έτη, με συνέπεια την υποβάθμιση του υπόγειου ορίζοντα (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2004). Παράλληλα στις περισσότερες των περιπτώσεων, πρόκειται για παράνομες γεωτρήσεις, γεγονός που καθιστά ακόμα πιο δύσκολο των έλεγχο τους.

Η διαχείριση των υδάτων ορίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία σχεδιάζεται η ποσότητα του φυσικού υπόγειου νερού που μπορεί να αντληθεί οικονομικά και νόμιμα σε αειφόρο βάση από ένα υδροφόρα, χωρίς να υποβαθμίζεται η φυσική ποιότητα του νερού ή να δημιουργούνται ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως μη αναστρέψιμες βλάβες στο περιβάλλον.

1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στην περιοχή του Τυμπακίου οι καλλιέργειες αρδεύονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα αντλούμενα υπόγεια ύδατα. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα με ανεξέλεγκτο και μη ορθολογικό ρυθμό άντλησης, σε συνδυασμό με τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες, είχε σαν άμεσο επακόλουθο την μείωση των υπογείων υδάτων και την εισροή θαλασσινού νερού στο εσωτερικό της περιοχής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής, έτσι ώστε:

- Να επιτευχθεί ικανοποιητική προσομοίωση του υδραυλικού ύψους του υπόγειου νερού, ώστε να δημιουργηθεί μία πρώτη εικόνα για την πιεζομετρία της περιοχής με βάση μετρήσεις στάθμης ύδατος σε συγκεκριμένα σημεία παρατήρησης.
- Να εκτιμηθεί το βάθος της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού στον υπόγειο υδροφόρα της περιοχής σύμφωνα με τη προσέγγιση Ghyben-Herzberg.
- Να προσεγγιστεί η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας νερού με βάση μετρήσεις σε γνωστά σημεία παρατήρησης της περιοχής.
- Να συγκριθούν οι παραπάνω προσεγγίσεις με στόχο την τεκμηρίωση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφόρα

1.3 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 8 κεφάλαια, στα οποία έγινε προσπάθεια ανάλυσης όλων των εννοιών και φαινομένων που μελετώνται καθώς και προσέγγισης του προβλήματος της υφαλμύρισης στην περιοχή του Τυμπακίου.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρατίθενται η εισαγωγή στην οποία γίνεται λόγος για την σπουδαιότητα των υδατικών πόρων, τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την αναλυτική δομή της εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο προσεγγίστηκαν όλες οι έννοιες, νόμοι και εξισώσεις που διέπουν τα υπόγεια ύδατα. Πρόκειται για ένα επίσης εισαγωγικό κεφάλαιο με βασικά στοιχεία υπόγειας υδραυλικής, που είναι χρήσιμα στον αναγνώστη για την καλύτερη κατανόηση των εννοιών που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης και διαφορετικοί μέθοδοι εκτίμησης του φαινομένου, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την τεκμηρίωση της έκτασης της υφαλμύρισης στην περιοχή.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης καθώς και μετεωρολογικά, γεωλογικά και υδρολογικά στοιχεία που αφορούν την περιοχή του Τυμπακίου.

Το 5^ο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην επεξήγηση των παραμέτρων του αριθμητικού μοντέλου Modflow που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης. Περιγράφονται επίσης οι βασικές αρχές λειτουργίας, τα δεδομένα και οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο 6^ο κεφάλαιο παραθέτονται οι αρχές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και έπειτα γίνεται λόγος για το λογισμικό ArcMap του ArcGis και συγκεκριμένα για την τεχνική της γεωστατιστικής. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε στην παρούσα διπλωματική για επεξεργασία των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της περιοχής. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται και η συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από την παρούσα εργασία καθώς και οι προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση.

Στο 8^ο κεφάλαιο αναγράφονται οι πηγές και οι διαδικτυακοί σύνδεσμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ

2.1 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος αποτελείται από μια σειρά διαδικασιών μέσω των οποίων το νερό κυκλοφορεί στην φύση μεταξύ ωκεανού, ατμόσφαιρας ξηράς και ωκεανού. Σε αυτή την αλυσίδα το νερό εμφανίζεται σε όλες τις πιθανές καταστάσεις: υγρή αέρια (υδρατμός) και στερεή (χιόνι, χαλάζι, πάγος). Πρακτικά ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει αρχή και τέλος. Για λόγους απλούστευσης, μπορεί να θεωρηθεί ότι η αρχή βρίσκεται στην ατμόσφαιρα όπου το νερό συγκεντρώνεται με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, λίμνες, ποταμούς, έδαφος, βλάστηση κ.λπ. Οι υδρατμοί αυτοί μεταφέρονται από τις αέριες μάζες και υπό κατάλληλες συνθήκες συμπυκνώνονται και σχηματίζουν νέφη. Στη συνέχεια, με τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων καταλήγουν στην επιφάνεια της γης.

Από την ποσότητα νερού που καταλήγει στην επιφάνεια της γης, ένα μέρος αυτής κατακρατείται από τη βλάστηση, εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος διηθείται εντός του εδάφους και διαχωρίζεται στο νερό που εξατμίζεται μέσω των πόρων, και στο νερό που διηθείται βαθύτερα και αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς.

Το υπόλοιπο νερό που δεν κατακρατείται από τη βλάστηση, απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα και τους ποταμούς για να καταλήξει τελικά στις λίμνες ή στις θάλασσες. Συνήθως ένα μέρος του απορρέοντος νερού εξατμίζεται κατά τη διαδρομή αυτή και επανέρχεται στην ατμόσφαιρα. (Εικόνα 2) (Τσακίρης, 1995).



Εικόνα 2 Ο υδρολογικός κύκλος (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)

2.2 Υδατικό ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο θεμελιώνεται με την αρχή διατήρηση της μάζας και αποτελεί τον απολογισμό του νερού που εισέρχεται, εξέρχεται και αποθηκεύεται σε ένα υδρολογικό σύστημα. Για δεδομένη λεκάνη απορροής η εξίσωση της διαφοράς μεταξύ των εκροών και των εισροών με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη, σε καθορισμένο χρόνο, εκφράζεται με τη σχέση:

$$\Delta M = M_{In} - M_{Out}$$

Όπου M_{In} και M_{Out} η εισρέουσα και εκρέουσα μάζα στον όγκο ελέγχου αντίστοιχα σε ένα χρονικό διάστημα. Ως ΔM ορίζεται η μεταβολή της περιεχόμενης μάζας στο ίδιο χρονικό διάστημα. Η μεταβολή αυτή είναι η αποθήκευση του νερού στον όγκο ελέγχου. Έτσι, η γενική αναλυτική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου, γράφεται ως εξής (Σακκάς 2004) (Εικόνα 3):

$$P=R+E+I$$

Όπου:

P είναι οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις

R είναι η επιφανειακή εισροή ή εκροή αντίστοιχα

I είναι η υπόγεια εισροή ή εκροή αντίστοιχα

E είναι η εξάτμιση, T είναι η διαπνοή (συνηθέστερα η εξάτμιση και η διαπνοή συναντώνται ως ένας όρος ET)

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού (mm) ή σε όγκο νερού (m^3) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%). Οι εισροές μπορεί να είναι (Todd and Mays, 2005):

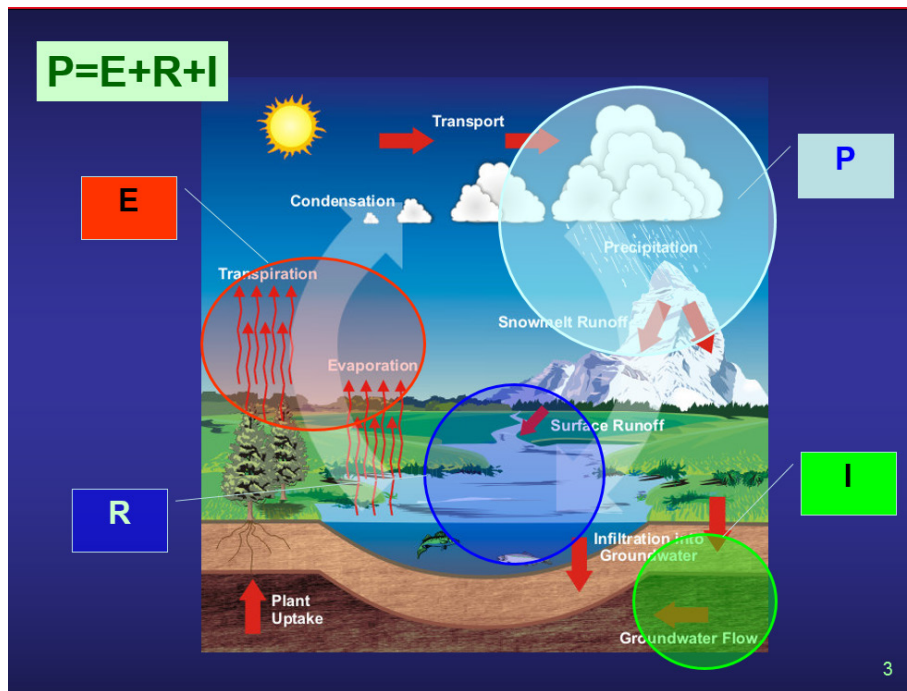
- κατακρημνίσεις (βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι)
- εκροή ανάντη της λεκάνης.

Οι εκροές μπορεί να είναι:

- απορροή (επιφανειακή, ενδιάμεση, υπόγεια)
- εξάτμιση
- διαπνοή
- διήθηση
- απολήψεις

Η αποθήκευση μπορεί να είναι:

- επιφανειακή (πάνω στο έδαφος, σε υδατορεύματα και ταμιευτήρες)
- υπεδάφια (στη ριζική ζώνη)
- υπόγεια (υδροφορείς)
- παρεμπόδιση
- κατακράτηση (από βλάστηση ή κτίρια)



Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση υδατικού ισοζυγίου (Ανδρεαδάκης, 2016)

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Precipitation), είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα με τη μορφή βροχής, χιονόνερου, χιονιού ή χαλαζιού. Αποτελούν τον κύριο τρόπο με τον οποίο το νερό της ατμόσφαιρας επιστρέφει στην επιφάνεια της γης. Τα σύννεφα περιέχουν υδρατμούς και σταγονίδια τα οποία είναι πολύ μικρά για να πέσουν ως κατακρημνίσματα, αλλά ταυτόχρονα αρκετά μεγάλα ώστε να σχηματίζουν ορατά σύννεφα. Το νερό συνεχώς εξατμίζεται και συμπυκνώνεται στον αέρα. Το περισσότερο νερό που συμπυκνώνεται στα σύννεφα δεν πέφτει διότι υποστηρίζεται από ανοδικά ρεύματα (Perlman et al, 2005)

Επιφανειακή απορροή (Surface runoff)

Με τον όρο επιφανειακή απορροή εννοούμε τη ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων (Ward and Robinson, 1989), δηλαδή την απορροή των κατακρημνισμάτων στο εδαφικό ανάγλυφο. Μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή. Συνήθως, τμήμα της βροχής που πέφτει, ποτίζει το έδαφος, αλλά όταν το έδαφος είναι κορεσμένο ή αδιαπέρατο, το νερό αρχίζει να ρέει προς τα χαμηλά με τη μορφή απορροής και το νερό κινείται κατακόρυφα, από την επιφάνεια έως τον υδροφόρο ορίζοντα (Perlman et al., 2005).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι το κλίμα (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία αέρα, άνεμοι, εξάτμιση), η γεωμορφολογία (κλίση λεκάνης απορροής, υδρογραφική πυκνότητα), η λιθολογία (είδος πετρωμάτων, περατότητα), καθώς και το είδος της φυτοκάλυψης. Μόνο το ένα τρίτο περίπου του όγκου των κατακρημνισμάτων που πέφτει πάνω στο έδαφος, απορρέει σε υδατορεύματα και γυρίζει στη θάλασσα. Τα υπόλοιπα δύο τρίτα, εξατμίζονται, ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά.

Εξατμισοδιαπνοή (Evapotraspiration)

Τα φαινόμενα της εξάτμισης και της διαπνοής είναι δυσδιάκριτα μεταξύ τους γιατί συνυπάρχουν και αλληλοσυμπληρώνονται. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν ξεχωριστά και έρευνες οι των τελευταίων ετών οδήγησαν στο διαχωρισμό της εξάτμισης του εδάφους από τη διαπνοή (Ritchie, 1974). Στην πραγματικότητα ιδιαίτερη σημασία έχει ο υπολογισμός της συνολικής ποσότητας ύδατος που χάνεται, κι έτσι δεν έχει ιδιαίτερη σημασία να καθοριστεί αν αυτή η ποσότητα προέρχεται από εξάτμιση ή διαπνοή.

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή ορίζεται σαν την ποσότητα που καταναλώνεται στη διαπνοή των φυτών και στην εξάτμιση των υγρών μερών του φυτού και του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου. Η πραγματική διαπνοή συσχετίστηκε με επιτυχία με παραμέτρους όπως το μέγεθος των φύλλων του φυτού (leaf area index), την εδαφική υγρασία και την δυναμική διαπνοή. Εντούτοις τέτοια διάκριση δεν γίνεται για όλους τους πρακτικούς σκοπούς όπου η εξατμισοδιαπνοή θεωρείται ενιαία μεταβλητή και ίση με την υδατοκατανάλωση. Ο όρος υδατοκατανάλωση (water consumption), των καλλιεργειών αντιπροσωπεύει την ολική ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη διαπνοή των φυτών, την εξάτμιση από τις επιφάνειες φυτών και εδάφους καθώς και την ποσότητα που χρειάζεται για κατασκευή των ιστών και του κορμού. Σε μια κανονική περίοδο ανάπτυξης η ποσότητα που παραμένει στο φυτό για τη δόμηση του είναι λιγότερο από το 1% της συνολικής ποσότητας που καταναλώθηκε στην εξάτμιση και τη διαπνοή (Τσακίρης, 2004).

Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: θερμοκρασία εδάφους- αέρα, υγρασία εδάφους-αέρα, ταχύτητα ανέμου, βαρομετρική πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, είδος χλωρίδας, πορώδες, κ.λπ. (Fratino, 2001).

Κατείσδυση ή Διήθηση (Infiltration)

Η κατείσδυση αντιπροσωπεύει το μέρος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και φθάνει στους υπόγειους υδροφορείς προστιθέμενο στα αποθέματα των υπόγειων νερών και μετέχει στις κινήσεις του υπόγειου νερού.

Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής καθώς συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Η ικανότητα κατείσδυσης (infiltration capacity) εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, τη λιθολογία, την κλίση και τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, την ένταση, την κατανομή των βροχοπτώσεων κ.λπ. (www.geo.auth.gr).

Το μέτρο της κατείσδυσης είναι ο συντελεστής κατείσδυσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεisdύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατείσδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

2.3 Ταξινόμηση των υπόγειων υδάτων

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές γλυκού νερού στον πλανήτη. Νερό που προέρχεται από υπόγειους ταμιευτήρες χρησιμοποιείται στη γεωργία, στη βιομηχανία, καθώς και για την εξασφάλιση πόσιμου νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιοχές παγκοσμίως μοναδική πηγή πόσιμου νερού αποτελεί η άντλησή του μέσω πηγαδιών (Todd and Mays, 2005; Alley et al., 1999).

Ο κάθε υδροφορέας διαιρείται σε δύο ζώνες, τη ζώνη αερισμού (ή ακόρεστη ζώνη) και την ζώνη κορεσμού (ή κορεσμένη ζώνη).

2.3.1 Ακόρεστη ζώνη

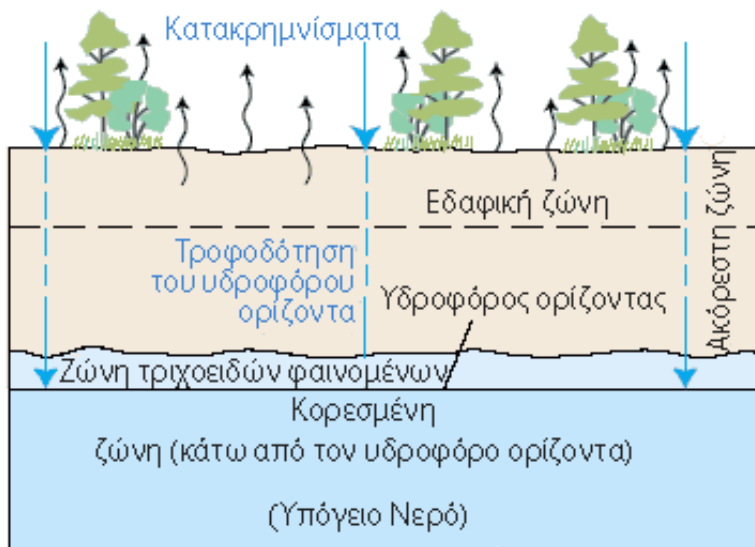
Η ακόρεστη ζώνη αποτελείται από πόρους οι οποίοι εν μέρει είναι κατειλημμένοι από αέρα και εν μέρει από νερό (με εξαίρεση κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις πλημμύρας, όπου παρατηρείται πλήρωση τους), και μπορεί να διαιρεθεί σε επιμέρους ζώνες:

Το ανώτερο μέρος της ακόρεστης ζώνης, συμπίπτει με την εδαφική ζώνη. Η εδαφική ζώνη, εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους, μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος των φυτών. Έχει βάθος λίγα μόνο μέτρα και το νερό που περιέχεται σε αυτήν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά. Εντός των ορίων της ακόρεστης ζώνης, εντοπίζεται και η ζώνη των τριχοειδών φαινομένων η οποία οριοθετείται μεταξύ του υδροφόρου ορίζοντα και του ύψους, όπου παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα. Το ύψος αυτό διακυμαίνεται, ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους εδαφών, από μερικά χιλιοστά έως και ένα μέτρο.

Στην ακόρεστη ζώνη η περιεκτικότητα υγρασίας είναι μικρότερη από το πορώδες του εδάφους και η πίεση του ύδατος εντός του εδαφικού υλικού είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής (αρνητική) (Karanth, 1987; Todd and Mays, 2005).

2.3.2 Κορεσμένη ζώνη

Η ζώνη κορεσμού εκτείνεται από το ανώτερο σημείο κορεσμού έως το υποκείμενο αδιαπέραστο στρώμα. Σε περίπτωση απουσίας υπερκείμενου αδιαπέραστου στρώματος ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί το άνω όριο της κορεσμένης ζώνης και ταυτόχρονα και η πίεση στο επίπεδό του ισούται με την ατμοσφαιρική. Στην κορεσμένη ζώνη όμως το σύνολο του όγκου των πόρων και των ρωγμών των πετρωμάτων, πληρώνεται με νερό και χαρακτηρίζεται από πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (Εικόνα 4) (Todd and Mays, 2005).

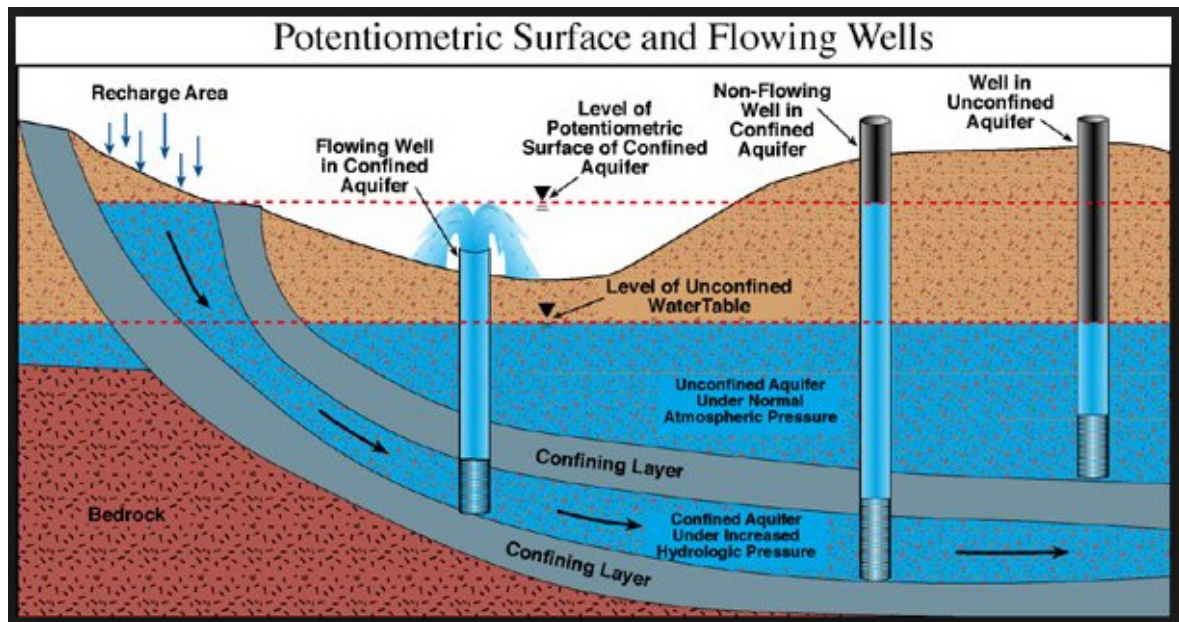


Εικόνα 4 Ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη (Μακρόπουλος και Κουτσογιάννης, 2016)

2.4 Υδροφορείς

Υδροφορέας είναι ένας γεωλογικός σχηματισμός που περιέχει διαπερατό υλικό κορεσμένο με νερό ο οποίος προμηθεύει πηγές και πηγάδια με ποσότητες νερού (Καρατζάς, 2009). Οι υδροφορείς χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Todd and Mays, 2005):

- Ελεύθερος υδροφορέας (unconfined aquifer): είναι ο υδροφορέας που έχει ως κάτω όριο αδιαπέρατο σχηματισμό, ενώ το πάνω όριο του είναι η ελεύθερη επιφάνεια του νερού (Εικόνα 5). Στην ελεύθερη επιφάνεια η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Οι αυξομειώσεις του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα αντιστοιχούν σε αντίστοιχες αυξομειώσεις του όγκου του ύδατος το οποίο είναι αποθηκευμένο στον υδροφορέα.
- Περιορισμένος υδροφορέας (confined aquifer): είναι ο υδροφορέας στον οποίο το υπόγειο ύδωρ βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής λόγω της ύπαρξης αδιαπέρατων σχηματισμών και στο πάνω και στο κάτω όριο του. Χαρακτηριστικό ενός υπό πίεση υδροφορέα είναι το εξής φαινόμενο: αν ανοιχτεί ένα πηγάδι μέσα σ' αυτόν, τότε η στάθμη του νερού θα ανέβει ψηλότερα από το αδιαπέρατο στρώμα και ίσως φτάσει ως την επιφάνεια του εδάφους. Αν τοποθετηθεί σωστά ένα φρέαρ παρατήρησης ή αλλιώς πιεζόμετρο, η στάθμη του νερού σ' αυτό θα δείχνει το πιεζομετρικό φορτίο στη συγκεκριμένη θέση. Επομένως, πιεζομετρική επιφάνεια είναι η ιδεατή εκείνη επιφάνεια που θα ορίζονταν από τις στάθμες πιεζόμετρων σε διάφορα σημεία κατά την οριζόντια έκταση ενός υπόγειου υδροφορέα.



Εικόνα 5 Απεικόνιση αρτεσιανής γεώτρησης, γεώτρησης σε υπό πίεση υδροφορέα και γεώτρησης σε ελεύθερο υδροφορέα (Ohio DNR, 2016).

2.4.1 Παράμετροι υδροφορέων

- Πορώδες (porosity)

Το πορώδες ενός εδαφικού σχηματισμού είναι ένα μέτρο των περιεχόμενων πόρων εκφρασμένο ως η αναλογία του όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο. Μια διαφορετική έκφραση του πορώδους αποτελεί το ενεργό πορώδες. Αποτυπώνει το ποσό του χώρου των διασυνδεμένων πόρων το οποίο είναι διαθέσιμο για τη ροή του ύδατος και εκφράζεται ως η αναλογία του όγκου των διασυνδεμένων πόρων προς τον συνολικό όγκο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων i δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (dead-end porous).

Το πορώδες και το ενεργό πορώδες μπορούν να εκφραστούν επίσης ως ποσοστό πολλαπλασιάζοντας το κλάσμα που προκύπτει από την αντίστοιχη αναλογία, με το 100. Οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται, τυπικά, από το 0 έως το 0.5 ανάλογα με το είδος και τις ιδιότητες του εδαφικού σχηματισμού (Todd and Mays, 2005) (Εικόνα 6). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους.

$$n = \frac{100 * V_v}{V}$$

Όπου

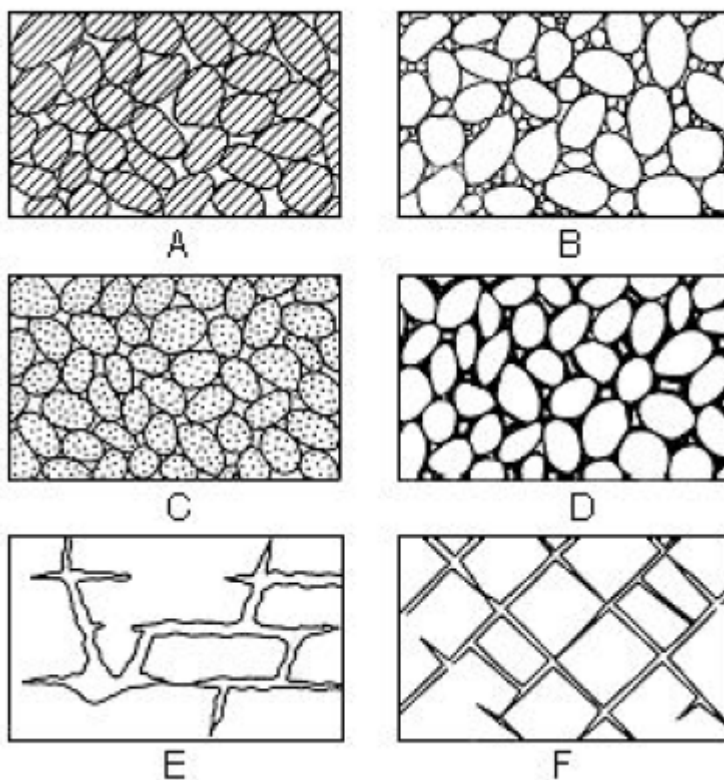
n : το πορώδες (ποσοστιαία)

V_v : ο όγκος που καταλαμβάνουν οι κενοί πόροι

V : ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνει το υλικό (πέτρωμα ή έδαφος)

Πίνακας 1 Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης 1999)

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρηγματωμένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Πυόλιθοι	21-41	Μη ρηγματωμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Πλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				



Εικόνα 6 Τύποι διάταξης κόκκων: Α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, Β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, C) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες , D) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, F) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923)

- Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity), ή υδροπερατότητα, είναι ένα μέγεθος που εκφράζει συνδυασμένα τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού, δηλαδή του εδάφους και του νερού στα προβλήματα της υπόγειας ροής.

Συνεπώς, εξαρτάται από τη φύση του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) και από τις ιδιότητες του ρευστού (Εικόνα 7).

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, με εργαστηριακές μεθόδους και με ιχνηθετήσεις. Σε μια σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ένα ομοιόμορφο, ιδεώδες, πορώδες μέσο το οποίο αποτελείται από γυάλινες σφαίρες διαμέτρου d , ομοιόμορφα κατανεμημένες μελετήθηκε η ροή διάφορων ρευστών πυκνότητας ρ , ιξώδους μ και σταθερής υδραυλικής κλίσης dh/dl . Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για την υδραυλική αγωγιμότητα ισχύει (Καρατζάς 2009)

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

Όπου,

k : η διαπερατότητα (m^2)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα ($\frac{m}{s}$)

ρ : η πυκνότητα του ρευστού ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : το ιξώδες του ρευστού ($\frac{kg}{m*s}$)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\frac{kg}{s^2}$)

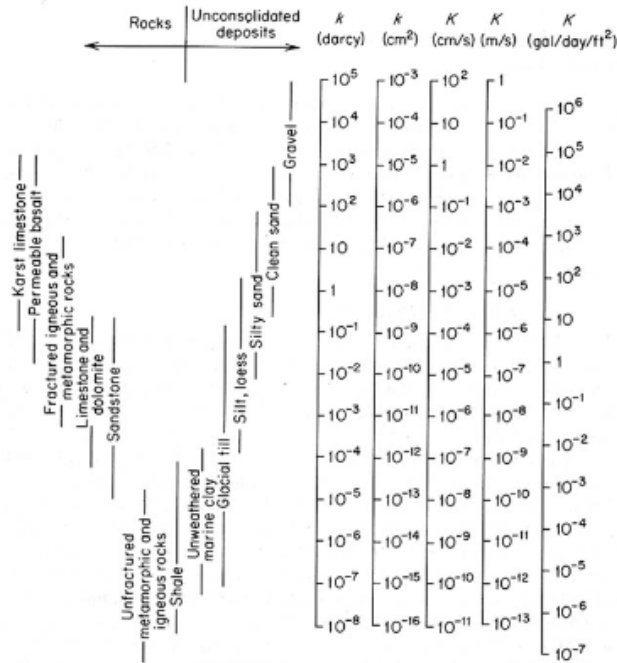


Table 2.3 Conversion Factors for Permeability and Hydraulic Conductivity Units

	Permeability, k^*			Hydraulic conductivity, K		
	cm ²	ft ²	darcy	m/s	ft/s	U.S. gal/day/ft ²
cm ²	1	1.08×10^{-3}	1.01×10^8	9.80×10^2	3.22×10^3	1.85×10^9
ft ²	9.29×10^2	1	9.42×10^{10}	9.11×10^5	2.99×10^6	1.71×10^{12}
darcy	9.87×10^{-9}	1.06×10^{-11}	1	9.66×10^{-6}	3.17×10^{-5}	1.82×10^1
m/s	1.02×10^{-3}	1.10×10^{-6}	1.04×10^5	1	3.28	2.12×10^6
ft/s	3.11×10^{-4}	3.35×10^{-7}	3.15×10^4	3.05×10^{-1}	1	6.46×10^5
U.S. gal/day/ft ²	5.42×10^{-10}	5.83×10^{-13}	5.49×10^{-2}	4.72×10^{-7}	1.55×10^{-6}	1

*To obtain k in ft², multiply k in cm² by 1.08×10^{-3} .

Εικόνα 7 Εύρος τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας (Καρατζάς 2009)

• Διαπερατότητα (permeability)

Η διαπερατότητα ενός εδαφικού σχηματισμού καθορίζει την ικανότητά του σχηματισμού να άγει τη ροή. Είναι μία αποκλειστική ιδιότητα του υλικού και εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη κόκκων) δεν σχετίζεται με τις ιδιότητες του ρευστού όπως συμβαίνει στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας (Καββαδάς, 2009).

$$k = K \mu \rho g$$

Όπου,

k : η διαπερατότητα (m^2)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα ($\frac{m}{s}$)

ρ : η πυκνότητα του ρευστού ($\frac{kg}{m^3}$)

μ : το ιξώδες του ρευστού ($\frac{kg}{m \cdot s}$)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($\frac{kg}{s^2}$)

- Αποθηκευτικότητα (storativity)

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (Storativity) αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που μπορεί να ληφθεί ή να αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Η αποθηκευτικότητα είναι αδιάστατο μέγεθος και ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\Delta V}{A * \Delta h}$$

Όπου:

ΔV , ο όγκος νερού που μπορεί να αποθηκευτεί στον υδροφορέα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A και ανά μονάδα μεταβολής υδραυλικού φορτίου Δh

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι ένας καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%- 0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης του νερού από τα είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη του νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα (Καββαδάς 2009).

- Μεταβιβασιμότητα (transmissivity)

Με τον όρο αυτό ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό, δεδομένου κινητικού ιξώδους, μεταβιβάζεται διαμέσου ενός υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση. Η συνολική ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταβιβάζει το υπόγειο ύδωρ εξαρτάται από το πάχος και τις υδραυλικές αγωγιμότητες των συνιστωσών του υδροφορέα. Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι (Karanth,1987):

$$T=K \cdot b$$

Όπου,

T : ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ($\frac{m^2}{s}$)

K : η μέση υδραυλική αγωγιμότητα ($\frac{m}{s}$)

b : το πάχος του υδροφορέα (m)

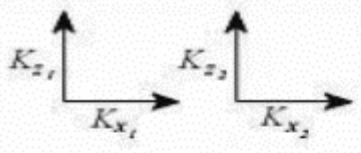
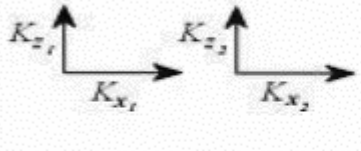
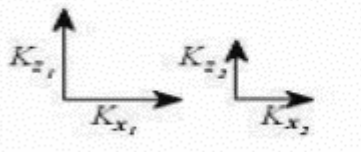
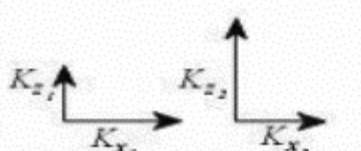
Η μεταβιβασιμότητα των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερή, εφόσον το πάχος τους είναι αμετάβλητο. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα των ελεύθερων υδροφορέων μεταβάλλεται χωρικά, καθώς το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται σε κάθε θέση από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στους περιορισμένους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται στη συμπίεστικότητα του ύδατος και του υλικού. Αντίθετα, στους ελεύθερους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται κυρίως στην πλήρωση ή εκκένωση των πόρων και πολύ λιγότερο στη συμπίεστικότητα του ύδατος και του υλικού (Tulipano and Sappa, 2008).

2.4.2 Ομοιογένεια και ισοτροπία

Η ομοιογένεια (Homogeneity) ενός υδροφορέα αναφέρεται στη χωρική μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας από σημείο σε σημείο. Έτσι, ο ομοιογενής υδροφορέας

εμφανίζει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε όλη την έκτασή του, δηλαδή η υδραυλική αγωγιμότητα παραμένει σταθερή για κάθε διεύθυνση, σε κάθε σημείο. Σε συνθήκες πεδίου, η ομοιογένεια είναι εξαιρετικά σπάνια και οι περισσότεροι υδροφορείς χαρακτηρίζονται ως ετερογενείς αφού οι υδραυλικές ιδιότητές τους μεταβάλλονται χωρικά.

Η ισοτροπία (Isotropy) αναφέρεται στη μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με την κατεύθυνση. Οι ισότροποι υδροφορείς εμφανίζουν σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο τους, την ίδια υδραυλική αγωγιμότητα σε όλες τις κατευθύνσεις ροής. Αντίστοιχα, όταν εμφανίζονται διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση, ο υδροφορέας θεωρείται ανισότροπος στο σημείο αυτό (Εικόνα 8) (Καρατζάς 2009)

	Ομοιογενής Ισότροπος	$K_{z_1} = K_{z_2}$ $K_{x_1} = K_{x_2}$ $K_x = K_y$
	Ομοιογενής Ανισότροπος	$K_{z_1} = K_{z_2}$ $K_{x_1} = K_{x_2}$ $K_x \neq K_y$
	Ετερογενής Ισότροπος	$K_{z_1} \neq K_{z_2}$ $K_{x_1} \neq K_{x_2}$ $K_x = K_y$
	Ετερογενής Ανισότροπος	$K_{z_1} \neq K_{z_2}$ $K_{x_1} \neq K_{x_2}$ $K_x \neq K_y$

Εικόνα 8 Γραφική αναπαράσταση ομοιογένειας και ισοτροπίας (Τροποποιημένο από Freeze and Cherry, 1979)

2.5 Νόμος του Darcy

Ο νόμος του Darcy είναι μια θεμελιώδης εξίσωση η οποία αναπτύχθηκε από τον Henry Darcy, ο οποίος 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 ($\frac{Q}{A}$) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής (Εικόνα 9). Η διατύπωση αυτή είναι ο νόμος του Darcy και η μαθηματική έκφραση είναι:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{\Delta L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

Όπου

Q : η παροχή ($\frac{m^3}{s}$)

A : η επιφάνεια (m^2)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα ($\frac{m}{s}$)

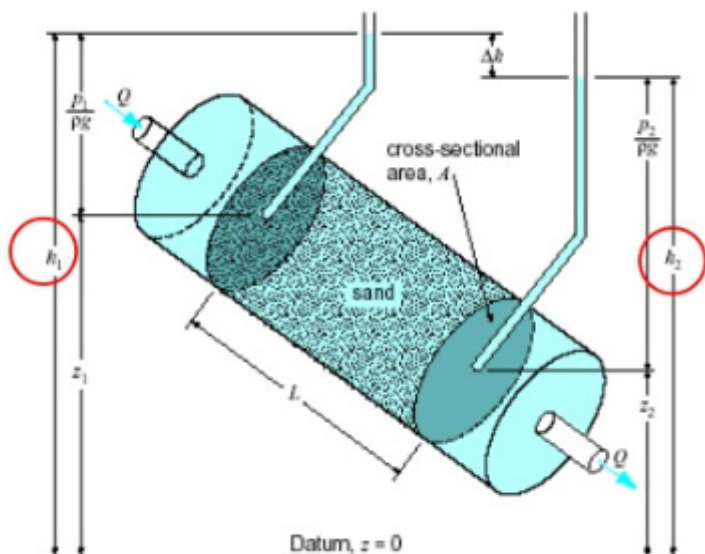
Δh : η απώλεια φορτίου μεταξύ δύο θέσεων (m)

L : το μήκος της στήλης (m)

q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή ($\frac{m}{s}$)

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο και η έκφραση $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Ο νόμος του Darcy θεωρείται ότι ισχύει για Reynolds numbers μέχρι $Re < 1$. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και $Re = 10$ χωρίς καμία προϋπόθεση. Εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις όπου παρατηρείται μεγάλη υδραυλική κλίση (π.χ. κοντά σε ένα φρέαρ άντλησης) ή τυρβώδη ροή (π.χ. για στρώματα βασάλτη ή ασβεστόλιθου με μεγάλα ανοίγματα) (Todd και Mays, 2005, Καρατζάς, 2009).



Εικόνα 9 Πείραμα Darcy (Hornberger et al ,1998)

2.6 Κλίση και υδραυλικό φορτίο

Εάν θεωρήσουμε το ολικό φορτίο (φορτίο δυναμικού και φορτίο πίεσης) ενός υδροφορέα (ελεύθερου ή περιορισμένου) σαν μία παράμετρο τότε είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ένα χάρτη ισοϋψών καμπύλων (συνδέοντας τα σημεία ίσων φορτίων) οι οποίες καλούνται ισοδυναμικές γραμμές (equipotential lines). Οι ισοδυναμικές γραμμές προκύπτουν από σύνδεση των σημείων με το ίδιο υδραυλικό ύψος (h). Ένας τέτοιος χάρτης ισοδυναμικών γραμμών μοιάζει με τοπογραφικό

χάρτη όπου οι ισοδυναμικές γραμμές είναι οι αντίστοιχες των ισοϋψών καμπύλων. Στην περίπτωση τρισδιάστατης αναπαράστασης οι ισοδυναμικές γραμμές εμφανίζονται ως ισοδυναμικές επιφάνειες.

Η κλίση του υδραυλικού φορτίου (grad h) είναι διανυσματικό μέγεθος και έχει διεύθυνση κάθετη προς τις ισοδυναμικές γραμμές (Καρατζάς, 2009)

$$\text{grad}h = \frac{dh}{ds}$$

Σε περίπτωση που η τιμή του όρου, grad h είναι ίση με μηδέν, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει υδραυλική κλίση προς την κατεύθυνση που υποδεικνύει και επομένως δεν υφίσταται υπόγεια ροή.

2.7 Φρέατα άντλησης και παρατήρησης

Τα φρέατα είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης παρέμβασης στους υπόγειους υδροφορείς και ανάλογα με το είδος τους, επηρεάζουν διαφορετικά την υπόγεια ροή. Υπάρχουν φρέατα που εκτείνονται μέχρι το ύψος τη στάθμης του νερού, όπου ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και άλλα, που διεισδύουν στο εσωτερικό περιορισμένων υδροφορέων. Όταν τοποθετούνται σε θέσεις, όπου ο υδροφορέας είναι περιορισμένος, ακολουθεί εκτόνωση, της εκεί αναπτυσσόμενης πίεσης, με αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης του νερού κατά μήκος του φρέατος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η πίεση είναι αρκετή ώστε το νερό να αναβλύζει στην επιφάνεια. Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των φρεάτων αφορά στη χρήση τους. Υπάρχουν φρέατα, που έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την άντληση νερού, άλλα που στοχεύουν στον εμπλουτισμό ενός υδροφορέα και τέλος αυτά που αξιοποιούνται στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υδροφορέα, γνωστά και ως φρέατα παρατήρησης (Καρατζάς, 2009)

2.7.1 Φρέατα άντλησης

Ο ρυθμός με τον οποίο αντλείται το νερό, διαμέσου των φρεάτων άντλησης (Pumping wells), είναι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας, όσο αφορά το μέγεθος της επίδρασης που έχουν αυτά, στην υπόγεια ροή. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης, εκφράζεται από την ακτίνα επιρροής του φρέατος και ορίζεται ως η απόσταση από το φρεάτιο, στην οποία η πτώση στάθμης του υπόγειου ύδατος, φτάνει σε σημείο, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η ροή γειτονικά του φρέατος γίνεται ακτινική, καθώς εξαιτίας της άντλησης, η επιφάνεια στην οποία κινείται το νερό μειώνεται σημαντικά. Έτσι, η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα προσομοιάζει σχηματικά με ένα κώνο, γνωστό και ως κώνο πτώσης στάθμης, ενώ ο συνολικός όγκος της περιοχής, που υπόκειται σε μεταβολή περικλείεται εντός ενός κυλίνδρου, που προκύπτει από την κυκλική επιφάνεια της ροής και το υδραυλικό ύψος. Στην περίπτωση δε, του ελεύθερου υδροφορέα, παράλληλα με τον υδροφόρο ορίζοντα σημειώνεται πτώση και του ύψους της κορεσμένης ζώνης (Καρατζάς, 2005)

Θεωρώντας σταθερές συνθήκες το υδραυλικό ύψος σε τυχαία απόσταση από φρεάτιο, ενός περιορισμένου υδροφορέα υπολογίζεται όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 10 με τον εξής τύπο:

$$h = h_o + \frac{Q}{2\pi K b} \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)$$

Όπου:

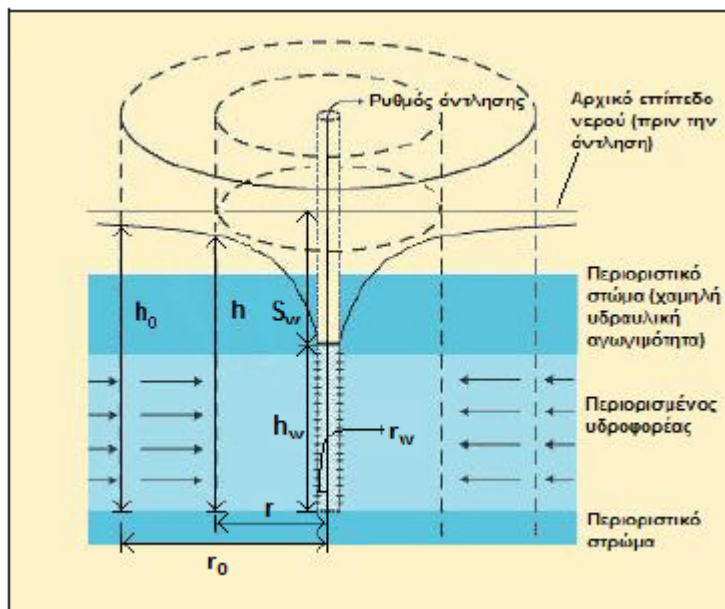
h_o : η στάθμη ύδατος πριν την άντληση, (m)

b : το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα, (m)

Q : ο ρυθμός άντλησης, ($\frac{m^3}{s}$)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, ($\frac{m}{s}$)

r_o : η ακτίνα επιρροής, (m)



Εικόνα 10 Άντληση από περιορισμένο υδροφορέα (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division)

Αντίστοιχα όταν ο υδροφορέας είναι ελεύθερος(Εικόνα 11) ισχύει:

$$h = \sqrt{h_o^2 + \frac{N}{2K} (r_o^2 - r^2) + \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}$$

Όπου

h : το υδραυλικό ύψος σε απόσταση r από το φρέαρ άντλησης(m)

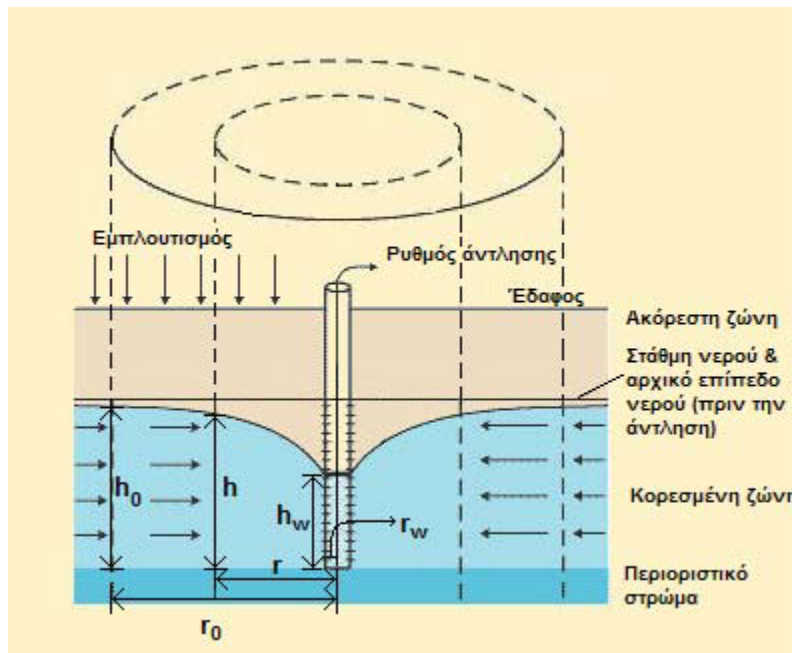
h_o : η στάθμη ύδατος πριν την άντληση, (m)

Q : ο ρυθμός άντλησης, ($\frac{m^3}{s}$)

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, ($\frac{m}{s}$)

r_o : η ακτίνα επιρροής, (m)

N : εμπλουτισμός λόγω βροχόπτωσης, ($\frac{m}{s}$)



Εικόνα 11 Αντληση από ελεύθερο υδροφορέα (U.S.G.S, Ground Water Division)

2.7.2 Φρέατα παρατήρησης

Η μελέτη ενός υδροφορέα, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό ορισμένων βασικών παραμέτρων, οι οποίες και τον χαρακτηρίζουν. Τέτοιες είναι, η υδραυλική αγωγιμότητα, ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας και η αποθηκευτικότητα. Μια μέθοδος καθορισμού των παραπάνω παραμέτρων περιλαμβάνει, δοκιμαστική άντληση του υδροφορέα, όπου εγκαθίσταται μια σειρά φρεάτων άντλησης και φρεάτων παρατήρησης (Observation wells). Εξετάζοντας την περίπτωση ενός περιορισμένου υδροφορέα και για συνθήκες μόνιμης ροής ισχύει η εξίσωση:

$$T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Όπου,

T: ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας, ($\frac{m^2}{s}$)

K: η υδραυλική αγωγιμότητα, ($\frac{m}{s}$)

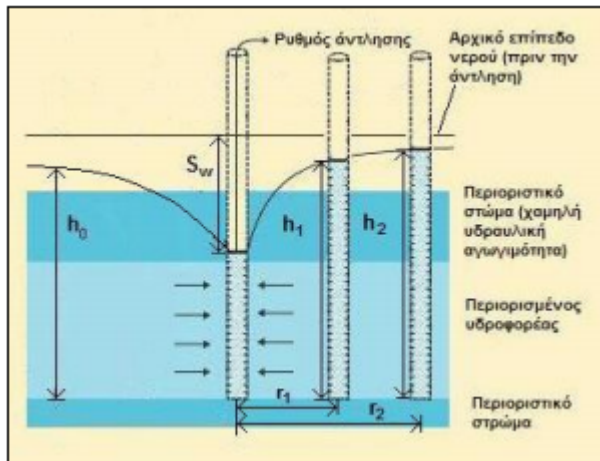
b: το πάχος του υδροφορέα, (m)

Q: ο ρυθμός άντλησης, ($\frac{m^3}{s}$)

h_1 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_1 από το φρέαρ άντλησης, (m)

h_2 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_2 από το φρέαρ άντλησης, (m)

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση του Thiem και για την εφαρμογή της κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση δύο φρεάτων παρατήρησης πλησίον του φρεάτος άντλησης.



Εικόνα 12 Φρέατα παρατήρησης σε περιορισμένο υδροφόρα (U.S.G.S, Ground Water Division)

Η εξίσωση του Thiem για έναν ελεύθερο υδροφόρα, με συνθήκες μόνιμης ροής, παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

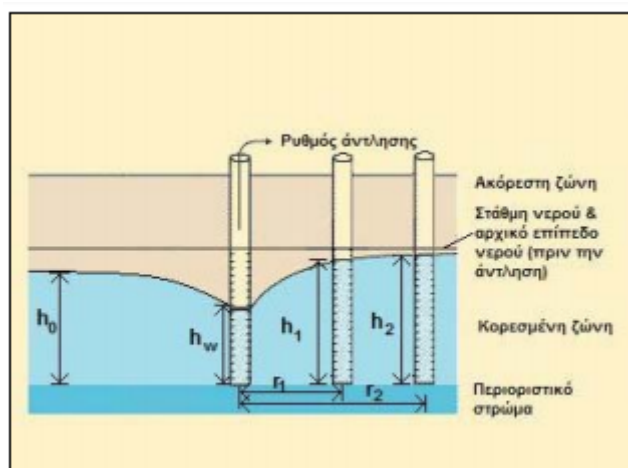
Όπου,

K: η υδραυλική αγωγιμότητα, ($\frac{m}{s}$)

Q: ο ρυθμός άντλησης, ($\frac{m^3}{s}$)

h₁: υδραυλικό ύψος σε απόσταση r₁ από το φρέαρ άντλησης, (m)

h₂: υδραυλικό ύψος σε απόσταση r₂ από το φρέαρ άντλησης, (m)



Εικόνα 13 Φρέατα παρατήρησης σε ελεύθερο υδροφόρα (U.S.G.S, Ground Water Division)

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

3.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης

Με τον όρο υφαλμύριση (saltwater intrusion) υπόγειων υδροφορέων, εκφράζεται η εισροή σε αυτούς, αλμυρού νερού, με παράλληλη αύξηση της αλατότητάς τους σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Η μάζα του αλμυρού νερού, που χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις ολικών διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids, TDS), κυρίως ιόντα χλωρίου και νατρίου, εισχωρεί κάτω από τη μάζα του γλυκού νερού, λόγω διαφοράς πυκνοτήτων, και το αντικαθιστά. Η υφαλμύριση αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου ύδατος, λόγω της ανάμιξης του με αλμυρό νερό, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για άρδευση και για πόση (Todd and Mays, 2005).

Ο παραπάνω ορισμός αναφέρεται σε παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς, όπου είναι φυσική η ύπαρξη του φαινομένου, λόγω της συνεχούς επαφής του θαλασσινού με το γλυκό νερό. Η υφαλμύριση αποτελεί ξεχωριστή κατηγορία της υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς. Πέρα από την εισχώρηση της θάλασσας, το φαινόμενο της υφαλμύρισης επηρεάζεται και από άλλους γεωλογικούς παράγοντες (Bear, 1999).

Η υφαλμύριση οφείλεται σε διάφορους μηχανισμούς, όμως οι βασικότεροι είναι οι εξής (Todd and Mays, 2005):

1. Μείωση ή αντιστροφή των υδραυλικών κλίσεων του υπογείου ύδατος με αποτέλεσμα την αντικατάσταση του γλυκού νερού από το αλμυρό λόγω της υψηλότερης τιμής της πυκνότητάς του. Συνήθως σε παράκτιους υδροφορείς που συνδέονται υδραυλικά με τη θάλασσα όταν η άντληση των γεωτρήσεων επηρεάζει την υδροδυναμική ισορροπία των δύο υδάτινων σωμάτων.
2. Καταστροφή των φυσικών φραγμάτων που διαχωρίζουν το γλυκό από το αλμυρό νερό. Π.χ. κατασκευή παράκτιου καναλιού αποστράγγισης
3. Απόρριψη αλμυρού νερού το οποίο καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρο μέσω πηγαδιών απόρριψης, χώρων υγειονομικής ταφής και γενικά χώρων διάθεσης αποβλήτων.

Η διεύθυνση αυτή, μπορεί να έχει φυσικά αίτια, όπως:

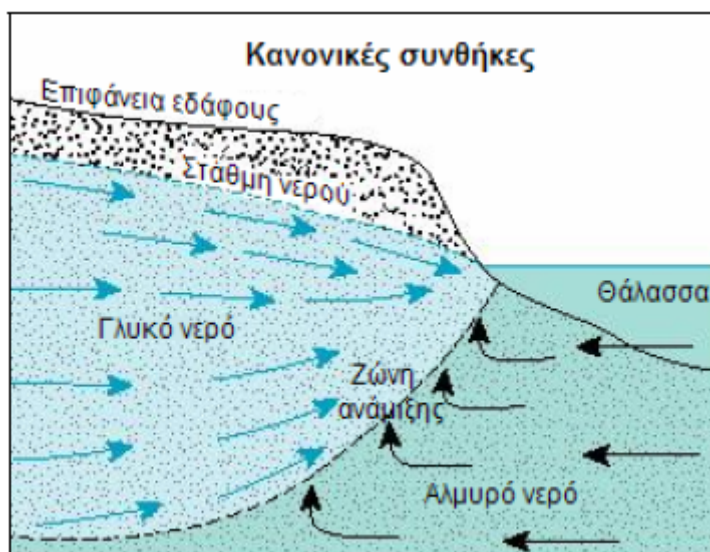
- Κλιματικές μεταβλητές όπως η βροχόπτωση, η επιφανειακή απορροή και η θερμοκρασία
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κλιματική αλλαγή
- Θαλασσινό νερό που διείσδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν
- Διάλυση στο υπόγειο νερό πετρωμάτων πλούσιων σε άλατα όπως το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), που μπορεί να απαντηθεί σε ασβεστολιθικούς και μαργαϊκούς σχηματισμούς.
- Νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια

Όλοι οι παράγοντες που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής ευθύνονται για τη φυσική υποβάθμιση υπόγειων νερών όπου υπάρχει υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα σε γλυκό και αλμυρό νερό. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη πρόκειται να μελετηθεί η επιρροή και των ανθρωπογενών παραγόντων. Μερικά παραδείγματα ανθρωπογενούς παρέμβασης, είναι:

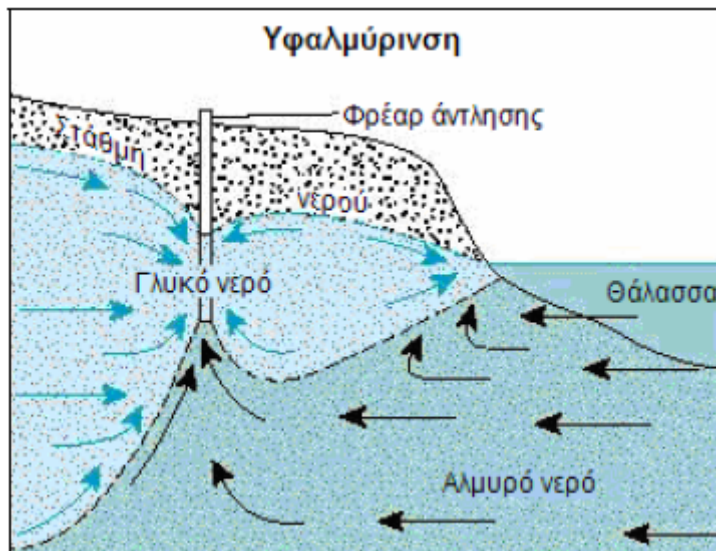
- Η υπεράντληση νερού υπόγειων υδροφορέων
- Τα λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προελεύσεως

- Η χρήση λιπασμάτων
- Η παραγωγή υγρών αποβλήτων
- Τα αποστραγγιστικά δίκτυα και την απόρριψη άλμης από εργοστάσια αφαλάτωσης

Συγκεκριμένα, όταν ο ρυθμός άντλησης σε φρέατα πλησίον της θάλασσας υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλάσσιο νερό εισρέει σε αυτόν αποκλείοντάς τον από πηγή πόσιμου νερού (Εικόνα 15). Στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού δημιουργείται μία μεταβατική ζώνη, μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους, γνωστή ως διεπιφάνεια. Πάνω απ' αυτήν κινείται το ελαφρύτερο γλυκό νερό που εξέρχεται προς τη θάλασσα και κάτω από αυτήν συναντάται το αλμυρό νερό. Οι υδραυλικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής στη ζώνη αυτή μεταβάλλονται, καθώς αλλάζει η πυκνότητα του νερού.

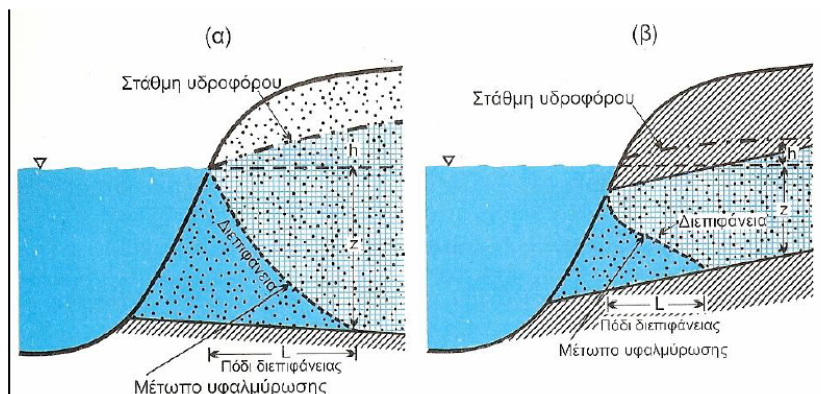


Εικόνα 14 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα σε κανονικές συνθήκες (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division)



Εικόνα 15 Στάθμη του υδροφόρου μετά την έναρξη της άντλησης (water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division)

Ανάλογα με τον υδροφορέα που συναντάμε, ελεύθερο ή περιορισμένο, το φαινόμενο της υφαλμύρισης παίρνει και διαφορετική μορφή. Στον ελεύθερο υδροφορέα η στάθμη της θάλασσας συμπίπτει με αυτή της υφαλμύρισης (σημείο τομής διεπιφάνειας και επιφάνειας θαλάσσης, Εικόνα 16α) ενώ στην περίπτωση του περιορισμένου υδροφορέα, (Εικόνα 16β) όπου το νερό είναι υπό πίεση η υφαλμύριση συναντάται σε πιο χαμηλό σημείο.



Εικόνα 16 Ζώνη διεπιφάνειας α) σε ελεύθερο β) σε περιορισμένο υδροφορέα (<http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>)

3.2 Μέθοδοι προσομοίωσης διεπιφάνειας

Η υφαλμύριση αποτελεί ένα φαινόμενο που κατά κύριο λόγο είναι πολύ δύσκολο να αντιστραφεί, γι' αυτό η αντιμετώπιση του θα πρέπει να συνδέεται με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση. Η παρουσία του είναι εντονότερη στους παράκτιους υδροφορείς στους οποίους παρατηρείται αυξημένη άντληση και ειδικότερα στους παράκτιους καρστικούς υδροφορείς στους οποίους η ύπαρξη ρηγμάτων διευκολύνει την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα.

Υπάρχουν δύο γενικές κατευθύνσεις ως προς την επίλυση των προβλημάτων υφαλμύρισης:

- 1) Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους λόγω υδροδυναμικής διασποράς (Pinder et al, 1970). Η διεξόδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά (δύο συνιστώσες μίας φάσης) και το πρόβλημα επιλύεται ως πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτημένη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Εξίσωση διατήρησης μάζας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος του Darcy)
- Εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς
- $p=p(c)$ (συνήθως γραμμική σχέση)

Άγνωστα μεγέθη του προβλήματος είναι:

- ειδική παροχή (ταχύτητα) q
- πίεση p
- πυκνότητα ρ και συγκέντρωση C

- 2) Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης), εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα (Ghyben-Herzberg, 1901). Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα λόγω διαφοράς υδραυλικού φορτίου. Η ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα καθορίζεται από τις τιμές του πιεζομετρικού φορτίου, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τις οριακές συνθήκες, την επιφανειακή τροφοδοσία και την άντληση. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μία φάση χωριστά. Ενδεικτικά δίνονται οι τύποι των εξισώσεων για κάθε περιοχή μελέτης.

Εξισώσεις για το γλυκό νερό:

- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Εξισώσεις για το θαλάσσιο νερό

- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Τα άγνωστα μεγέθη του προβλήματος είναι:

- Η πίεση p
- Το βάθος ζ της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας
- Οι ειδικές παροχές (ταχύτητες) q_f και q_s για το γλυκό και θαλάσσιο νερό αντίστοιχα

3.3 Προσέγγιση Ghyben- Herzberg

Η πρώτη προσπάθεια μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρισης έγινε από τον Badon-Ghyben (1888, 1889) και Herzberg (1901) για τη διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού

και αλμυρού νερού παράκτιων υδροφορέων προκειμένου να συσχετίσουν το σχήμα και τη θέση της διεπιφάνειας με υδρολογικές παραμέτρους του υπόγειου νερού. Οι δύο αυτοί επιστήμονες θεώρησαν ότι η διεπιφάνεια βρίσκεται σε στατική κατάσταση και όχι σε δυναμική κατάσταση, χωρίς δηλαδή να λαμβάνουν υπόψη τους τις ροές που πραγματοποιούνται.

Στην Εικόνα 19 φαίνεται η μορφή της διεπιφάνειας κατά Ghyben-Herzberg. Στην περίπτωση μόνιμης ροής, η διεπιφάνεια θεωρείται ακίνητη. Το θαλασσινό νερό εντός του υδροφορέα παραμένει ακίνητο ενώ υπάρχει μόνιμη ροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα που υπακούει στην υπόθεση της οριζόντιας ροής (υπόθεση Dupuit). Συγκεκριμένα, εφόσον η υδροστατική πίεση είναι παντού ίδια (Εικόνα 18) ισχύει:

$$h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g\rho_f}{g(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f$$

Όπου:

h_s : είναι το βάθος της διεπιφάνειας

h_f : είναι η ανύψωση σε m του υδροφόρου ορίζοντα

ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού ($=1000 \text{ kg/m}^3$)

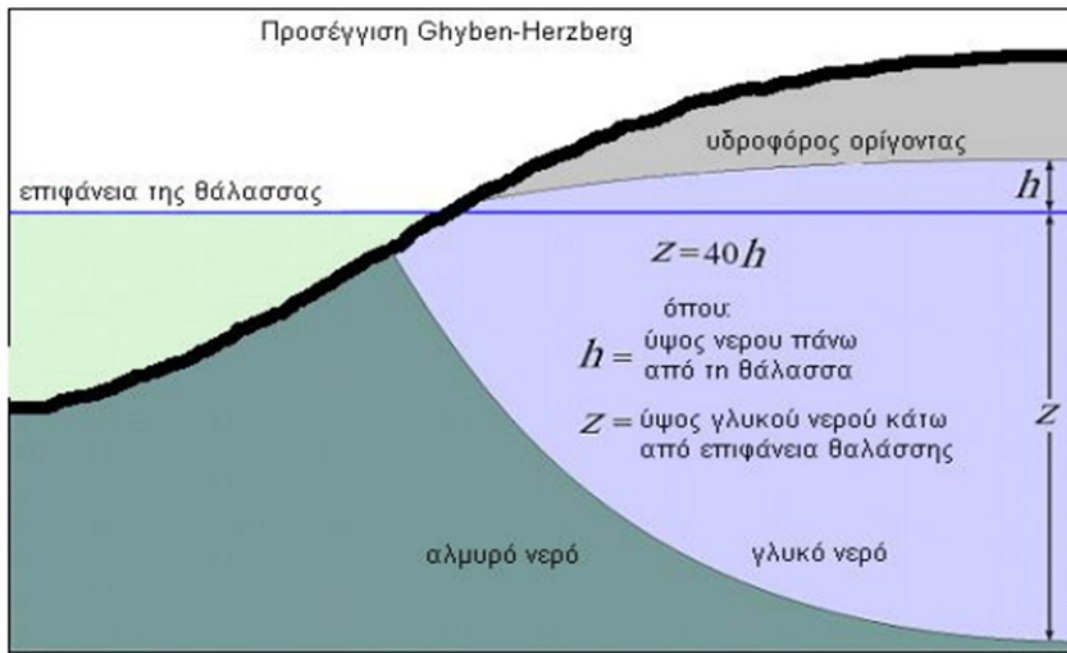
ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού ($= 1025 \text{ kg/m}^3$)

Αντικαθιστώντας τις τιμές, που αντιστοιχούν στις πυκνότητες γλυκού και αλμυρού νερού η εξίσωση

$$h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{1000}{(1025 - 1000)} h_f \Rightarrow h_s = 40h_f$$

Άρα με δεδομένα το ειδικό βάρος γλυκού (γ_f) και αλμυρού νερού (γ_s) και το πιεζομετρικό φορτίο σε κάποιο σημείο του υδροφορέα, η θέση της ακίνητης διεπιφάνειας στο σημείο αυτό βρίσκεται σε βάθος: $h_s = 40h_f$.

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπαφής μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Αν ο υδροφόρος ορίζοντας, σε ένα σημείο, εντοπίζεται 1m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η υφάλμυρη ζώνη διεπαφής εντοπίζεται 40m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Μέσω αυτής της εξίσωσης μπορεί, συνεπώς να υπολογιστεί το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο της υφαλμύρισης. Ως μέτωπο ορίζεται το σημείο στο οποίο σταματάει η εισχώρηση θαλάσσιου όγκου στον υδροφορέα. Χαρακτηρίζεται και ως σφήνα ή πόδι της υφαλμύρισης. Το μέτωπο βρίσκεται σε βάθος ίσο με το βάθος του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας (Εικόνα 17).



Εικόνα 17 Διεπιφάνεια και συνθήκες στάθμης νερού κατά Ghyben-Herzberg(τροποποιημένο από Atunao Marui, 2003)

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

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

- 3) Υδρομετρική μέθοδος, κατά την οποία προσδιορίζεται η συγκέντρωση των χλωριόντων και με τη χρήση πινάκων, υπολογιστικά, βρίσκεται η αλατότητα (μέθοδος Mohr)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για εκτίμηση της υφαλμύρισης του υπόγειου υδροφορέα αφορά την μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις οι οποίες σχετίζονται με τις θέσεις άντλησης.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (Electrical Conductance) διαλύματος, είναι μια μαθηματική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα και αποτελεί ένα βασικό παράγοντα στην αξιολόγηση της ποιότητας του νερού. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται από:

- την παρουσία στο νερό ανιόντων, όπως χλωριούχων, νιτρικών, θεικών, φωσφορικών και από την παρουσία κατιόντων, όπως νάτριο, μαγνήσιο, ασβέστιο και σίδηρο
- το σθένος των ιόντων, την κινητικότητα τους, τη συγκέντρωσή τους, τη θερμοκρασία και το ιξώδες του διαλύματος και το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού με την οποία γίνεται η μέτρηση
- τη θερμοκρασία του διαλύματος, καθώς η αγωγιμότητα των ηλεκτρολυτών αυξάνει με τη θερμοκρασία, από 1 έως 3% ανά βαθμό Κελσίου. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα και λόγω του ότι οι θερμοκρασίες των δειγμάτων ενδέχεται να είναι διαφορετικές, απαραίτητη είναι η αναγωγή των μετρήσεων στην ίδια θερμοκρασία, που συνήθως είναι αυτή των 25 °C. Η αναγωγή γίνεται αυτόματα, μέσω ενσωματωμένου στη συσκευή θερμομέτρου

Η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι το $1 \frac{mmhos}{cm}$ ή $1 \frac{mS}{cm}$ και χρησιμοποιούνται επίσης οι εξής υποδιαιρέσεις:

$$1 \frac{mS}{cm} = 1000 \frac{\mu S}{cm} = 1 \frac{mmhos}{cm} = 1000 \frac{\mu mhos}{cm}$$

Το αρδευτικό νερό με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα κατατάσσεται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες ποιότητας όπως φαίνεται από την (USA Salinity Laboratory, 1954):

Κατηγορία C1. Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) μικρότερη των 250 $\mu mhos/cm$ στους 25° C, περιεκτικότητα σε άλατα μικρότερη των 160 ppm,

κίνδυνος αλατώσεως μικρός

Κατηγορία C2. EC μεταξύ 250-750 $\mu mhos/cm$ στους 25° C, περιεκτικότητα σε άλατα μεταξύ 160 έως 480 ppm, κίνδυνος αλατώσεως μέσος

Κατηγορία C3. EC μεταξύ 750-2250 $\mu mhos/cm$ στους 25° C, περιεκτικότητα σε άλατα 480 έως 1470 ppm, κίνδυνος αλατώσεως μεγάλος

Κατηγορία C4. EC > 2250 $\mu mhos/cm$ στους 25° C, περιεκτικότητα σε άλατα > 1470 ppm, κίνδυνος αλατώσεως πολύ μεγάλος.

Εικόνα 20 Κατηγοριοποίηση αρδευτικού νερού με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα (US Salinity Laboratory, 1954)

Πρόβλημα	Μονάδες	Βαθμός περιορισμού στη χρήση		
		Κανένας	Μέτριος	Σοβαρός
ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ	dS/m	0,75	0,75-3,0	>3,0
ΔΙΗΘΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	μ.σ.ε.	<450	450-2000	>2000
SAR = 0-3 και EC _w =		>0,7	0,7-0,2	<0,2
= 3-6 και EC _w =		>1,2	1,2-0,3	<0,3
= 6-12 και EC _w =		>1,9	1,9-0,5	<0,5
= 12-20 και EC _w =		>2,9	2,9-1,3	<1,3
= 20-40 και EC _w =		>5,0	5,0-2,9	<2,9
ΤΟΞΙΚΟΤΗΤΑ				
Νάτριο επιφανειακές μέθοδοι	SAR	<3	3-9	>9
σπρίνκλερ	μ.σ.ε.	<70	>70	
Χλώριο επιφανειακές μέθοδοι	μ.σ.ε.	<140	140-350	>350
σπρίνκλερ	μ.σ.ε.	<100	>100	
Βόριο	μ.σ.ε.	<0,7	0,7-3,0	>3,0
ΔΙΑΦΟΡΑ				
Νιτρικό άζωτο (NO ₃ – N)	μ.σ.ε.	<5	5-30	>30
Δισανθρακικά (HCO ₃) για overhead σπρίνκλερ	μ.σ.ε.	<90	90-500	>500
Υπολειμματικό pH		συνήθως μεταξύ 6,5 – 8,4		
Χλώριο για overhead σπρίνκλερ	μ.σ.ε.	<1,0	1,0-5,0	>5,0

Εικόνα 21 Κατευθυντήριες γραμμές για εκτίμηση της ποιότητας του νερού

3.5 Τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου υφαλμύρισης

Για την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της διείσδυσης της θάλασσας σε ένα παράκτιο υδροφορέα, ιδιαίτερη σημασία έχουν:

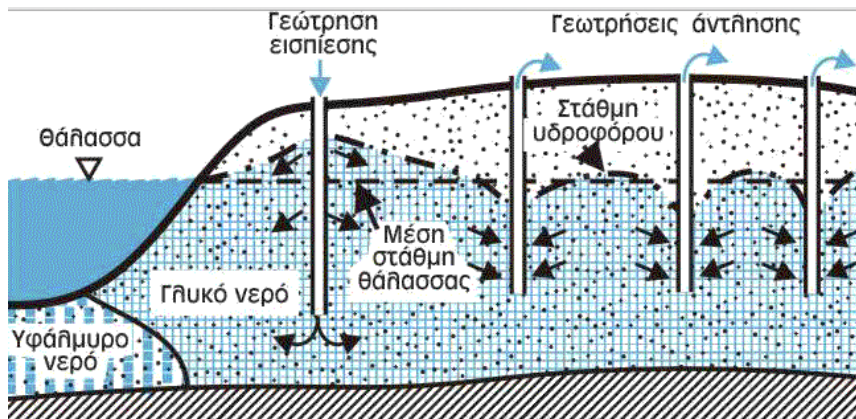
- Η γνώση της θέσης των ορίων, των γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπόγειου υδάτινου συστήματος
- Η σχέση του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και γειτονικά οικοσυστήματα καθώς και η χημική του σύνθεση
- Οι πιέσεις και οι επιπτώσεις λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων

Μετά από μελέτες και δοκιμές, έχουν προκύψει κάποιες μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την προσπάθεια αντιστροφής του φαινομένου αυτού ειδικότερα σε παράκτιους υδροφορείς. Οι κυριότερες από αυτές είναι (Todd and Mays, 2005):

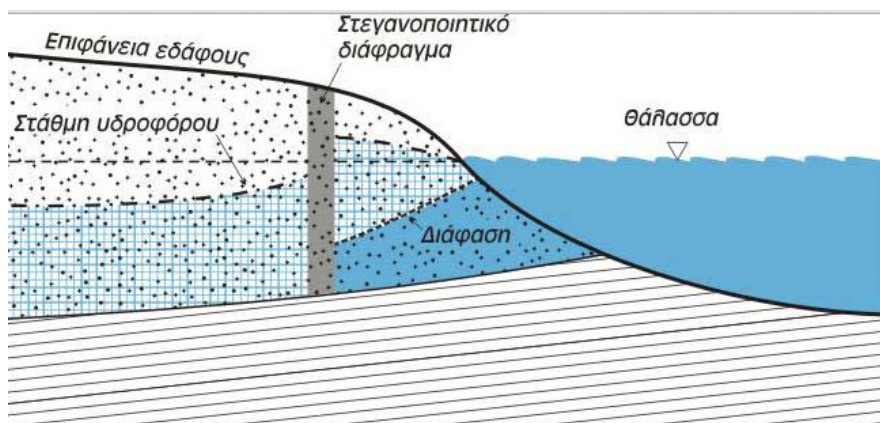
- Αλλαγή του μοτίβου άντλησης: η αλλαγή της θέσης των γεωτρήσεων, τυπικά με το να διασκορπιστούν στην ενδοχώρα, μπορεί να συμβάλλει στην αναδημιουργία μίας εντονότερης υδραυλικής κλίσης στις παράκτιες περιοχές. Η μείωση των παροχών άντλησης μπορεί να έχει επίσης το ίδιο αποτέλεσμα.
- Τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα για την διατήρηση της απαιτούμενης υδραυλικής κλίσης και στάθμης. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την ύπαρξη μίας εναλλακτικής πηγής νερού (Εικόνα 22).
- Ανάπτυξη ενός αυλακίου άντλησης στην περιοχή που γειτνιάζει με την ακτή: δημιουργείται με την διατήρηση μίας συνεχής άντλησης μέσω μίας «γραμμής» πηγαδιών σε μικρή απόσταση από την ακτή. Το θαλασσινό νερό και το γλυκό νερό που βρίσκεται σε επαφή με αυτό αντλούνται από κοινού παγιώνοντας με τον τρόπο αυτό μία νέα κατάσταση υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων και αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό την

περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού. Το νερό που αντλείται είναι φυσικά υφάλμυρο και συνήθως απορρίπτεται στη θάλασσα.

- Κατασκευή τεχνητών υπόγειων φραγμάτων: τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των φραγμάτων αυτών είναι πασσαλοσανίδες, άργιλος που έχει μαλαχθεί, γαλακτωματοποιημένη άσφαλτος, τσιμέντο, μπετονίτης, silica gel, ακρυλικό ασβέστιο και πλαστικό. Τα κύρια προβλήματα της μεθόδου είναι το κόστος κατασκευής και η αντοχή σε σεισμούς και χημικές διαβρώσεις (Εικόνα 23).



Εικόνα 22 Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη υφαλμύρισης παράκτιου υδροφόρου
(<http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>)



Εικόνα 23 Αντιμετώπιση θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, κοντά στη ακτή
(<http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>)

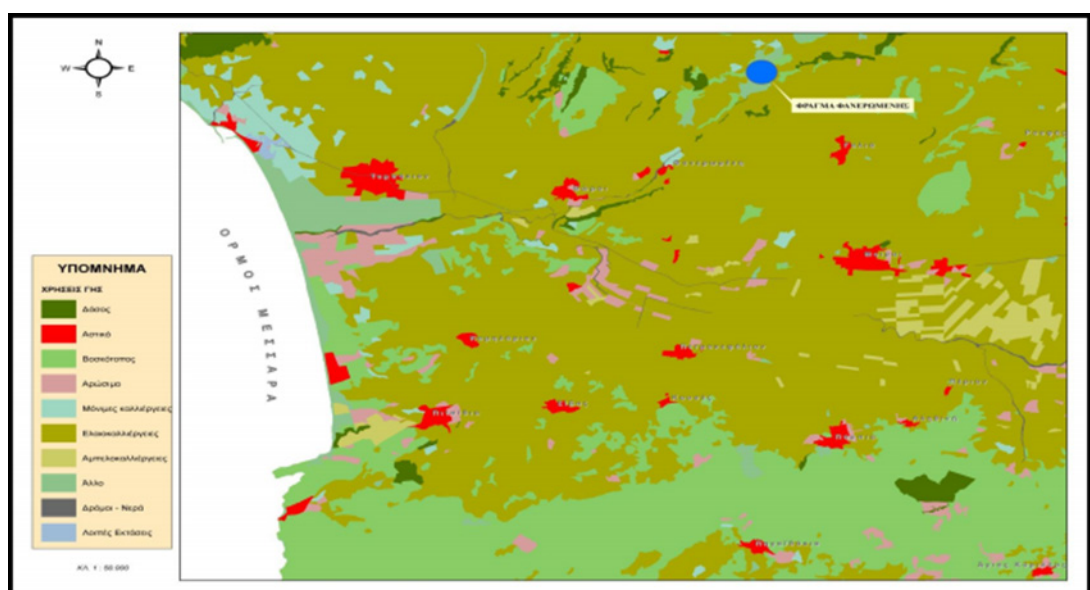
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά περιοχής

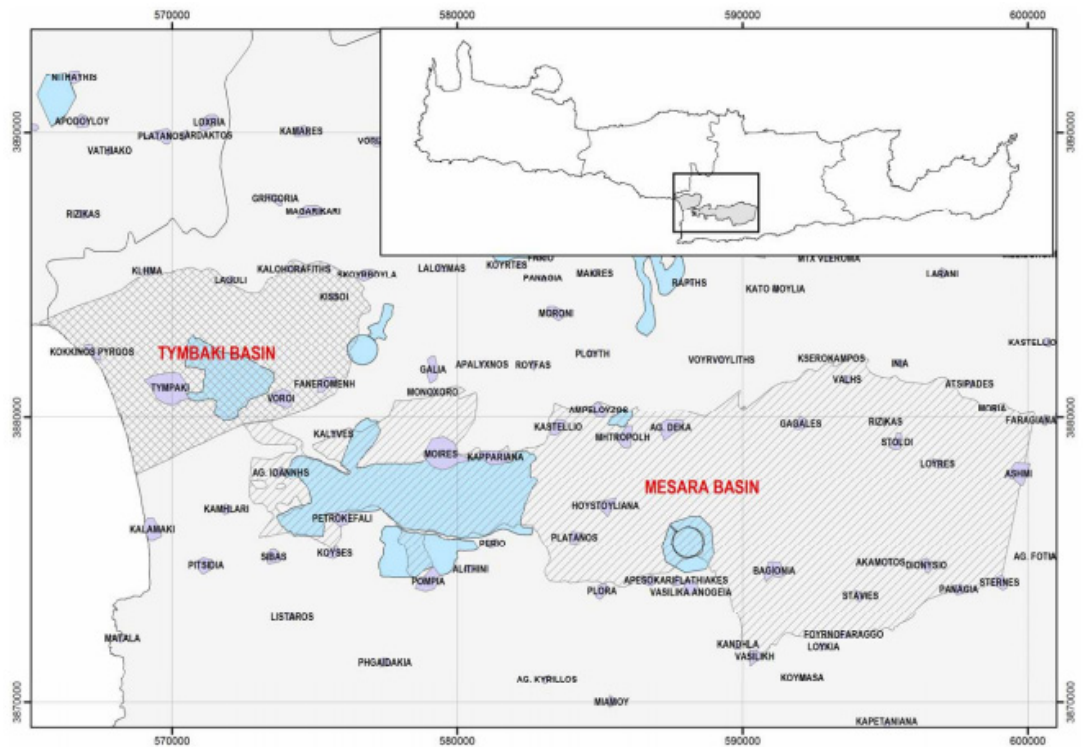
Ο Δήμος Τυμπακίου βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του νομού Ηρακλείου και έχει σαν έδρα του την ομώνυμη κωμόπολη Τυμπάκι. Πρόκειται για πεδινό και παραθαλάσσιο δήμο, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου βρίσκεται στον κάμπο της Μεσσαράς, ενώ βρέχεται από το Λιβυκό πέλαγος (Εικόνα 25). Σύμφωνα με την απογραφή του 2001 ο δήμος είχε συνολικά 10.001 κατοίκους και έκταση 157.122 στρέμματα. Το τοπικό διαμέρισμα του Τυμπακίου αριθμεί 5312 κατοίκους σύμφωνα με την πληθυσμιακή απογραφή του 2001. Κύριες ασχολίες του πληθυσμού της είναι ο τουρισμός και η γεωργία.

Η πεδιάδα του Τυμπακίου αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης και σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας, το μεγαλύτερο αριθμό στρεμμάτων κατέχουν τα ελαιόδεντρα, έπειτα τα εσπεριδοειδή στο σύνολό τους και τέλος τα κηπευτικά (Εικόνα 24, Εικόνα 26). Η επιλογή της περιοχής για την εγκατάσταση τόσων πολλών θερμοκηπίων δεν είναι τυχαία, αφού το Τυμπάκι έχει ιδανικό κλίμα με μεγάλη ηλιοφάνεια ακόμα και τους χειμερινούς μήνες, η θερμοκρασία το χειμώνα σε σχέση με άλλες περιοχές δεν είναι πολύ χαμηλή και δεν παρατηρούνται συχνά φαινόμενα παγετού ή χαλαζιού.

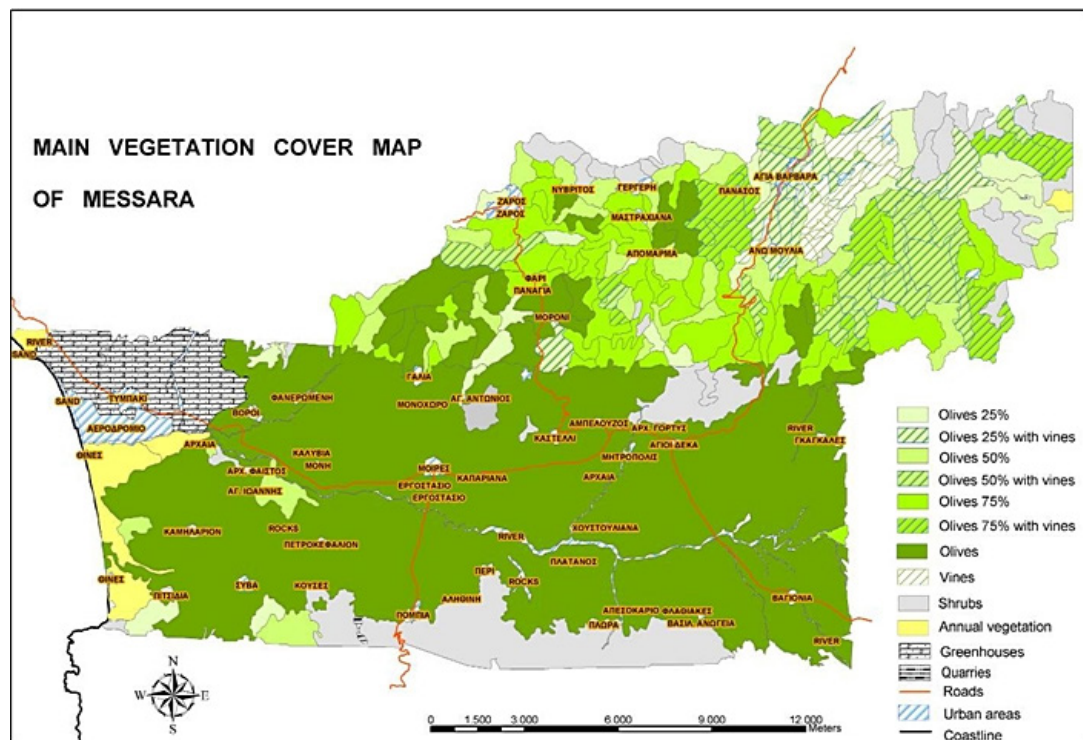
Η αρδευόμενη έκταση είναι 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα προέρχεται από το υπόγειο δυναμικό. Ο αλουβιακός - πλειστοκαινικός υδροφορέας καταλαμβάνει το παράκτιο - κεντρικό τμήμα της λεκάνης και έχει έκταση περίπου 50 km². Λόγω της γειτνίασής του με τη θάλασσα ο υδροφορέας στο ΝΔ παράκτιο τμήμα του (περιοχή Κόκκινου Πύργου) κινδυνεύει από υφαλμύριση. Ένεκα της σπουδαιότητας του υδροφορέα έχουν εγκατασταθεί τρεις σταθμοί, δύο κοντά στην ακτή (Αεροδρόμιο - Γεροπόταμος και Κόκκινος Πύργος) και ένας στο κέντρο περίπου της λεκάνης (<http://www.hellenica.de/DimosTympakiou.html>, Wikipedia, 2016, http://www.pkr.gov.gr/files/11/5774/pesdak_2010_-_kefalaio_5.pdf, Υπουργείο Γεωργίας, 2006).



Εικόνα 24 Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης (<https://www.hc-crete.gr/7η-υπε/η-κρητη-μας-ηρακλειο-δημοι>)



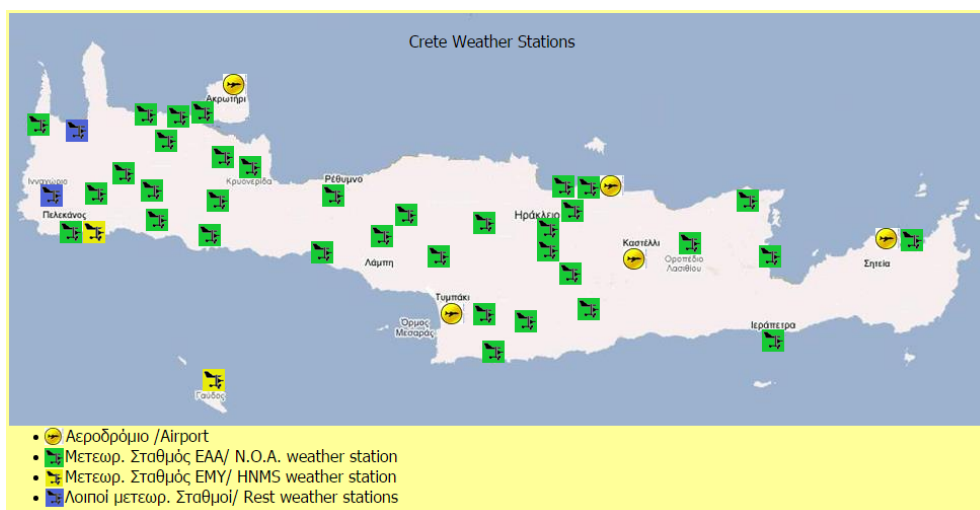
Εικόνα 25 Χάρτης της περιοχής του Τυμπακίου και της κοιλάδας της Μεσσαράς. Μεγάλα προγράμματα άρδευσης συμβολίζονται με μπλε χρώμα (Paritsis, 2005)



Εικόνα 26 Τύπος καλλιιεργειών στην περιοχή (<http://www.desire-his.eu/index.php/en/photo-gallery-resourcesmenu-198/category/81/itemPage/5/asInline>)

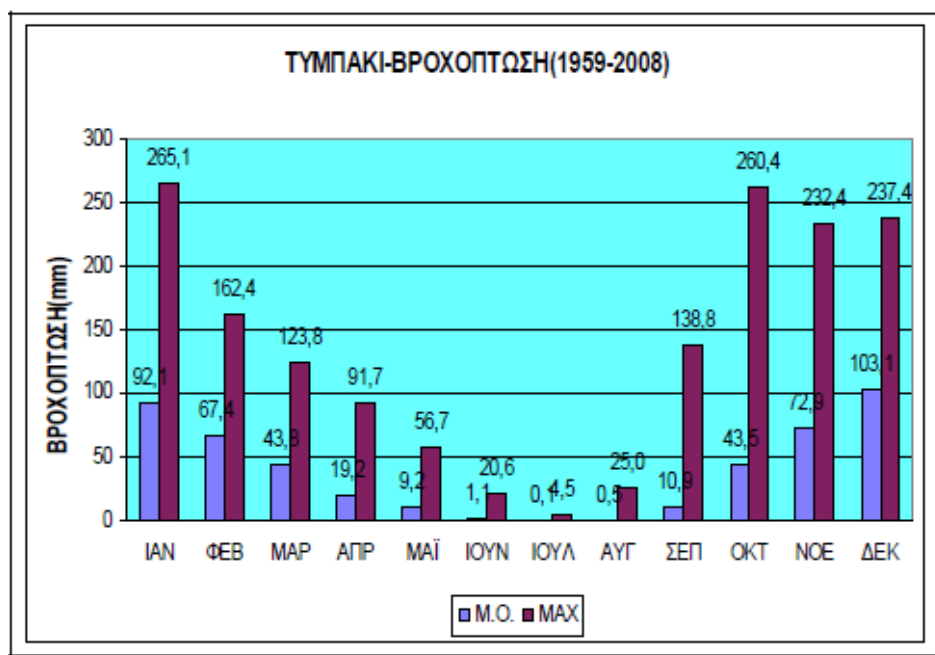
4.2 Μετεωρολογικά στοιχεία

Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής του Τυμπακίου ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Τυμπακίου που βρίσκεται σε υψόμετρο βρίσκεται σε υψόμετρο 6,7m, και σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος $24^{\circ} 46'$ και $35^{\circ} 4'$ αντίστοιχα (Εικόνα 27)



Εικόνα 27 Μετεωρολογικοί σταθμοί στην Κρήτη
(<http://penteli.meteo.gr/stations/chania/crete.htm>)

Από την Εικόνα 28 προκύπτει ότι η μέση βροχόπτωση στην περίοδο Οκτώβριου έως Μαρτίου ανέρχεται σε 422 mm ενώ από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο κυμαίνεται στα 41 mm. Σύμφωνα με μελέτες της Περιφέρειας Κρήτης, η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή στην Κρήτη είναι 70% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα σε περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο < 300m περίπου 70% της βροχόπτωσης χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής και 15% λόγω επιφανειακών απορροών, με το εναπομείναν 15% να εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς (Region of Crete, 2002; Donta et al., 2006).

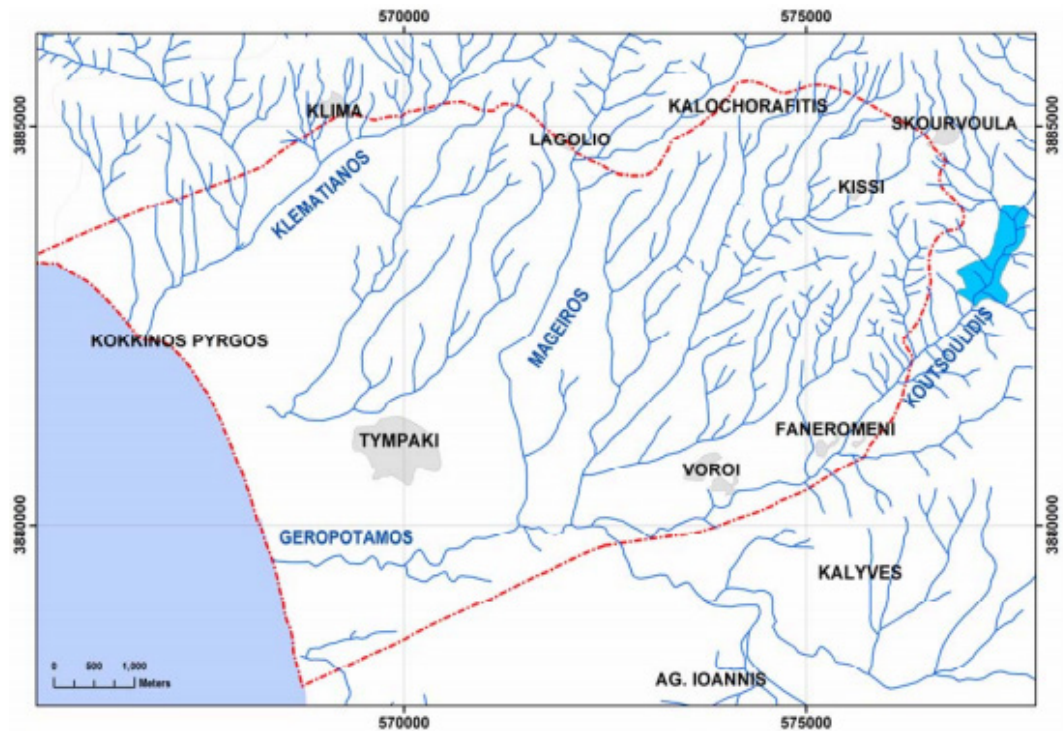


Εικόνα 28 Σχηματική απεικόνιση δεδομένων βροχόπτωσης από μετεωρολογικό σταθμό Τυμπακίου (Δασκαλάκης 2010)

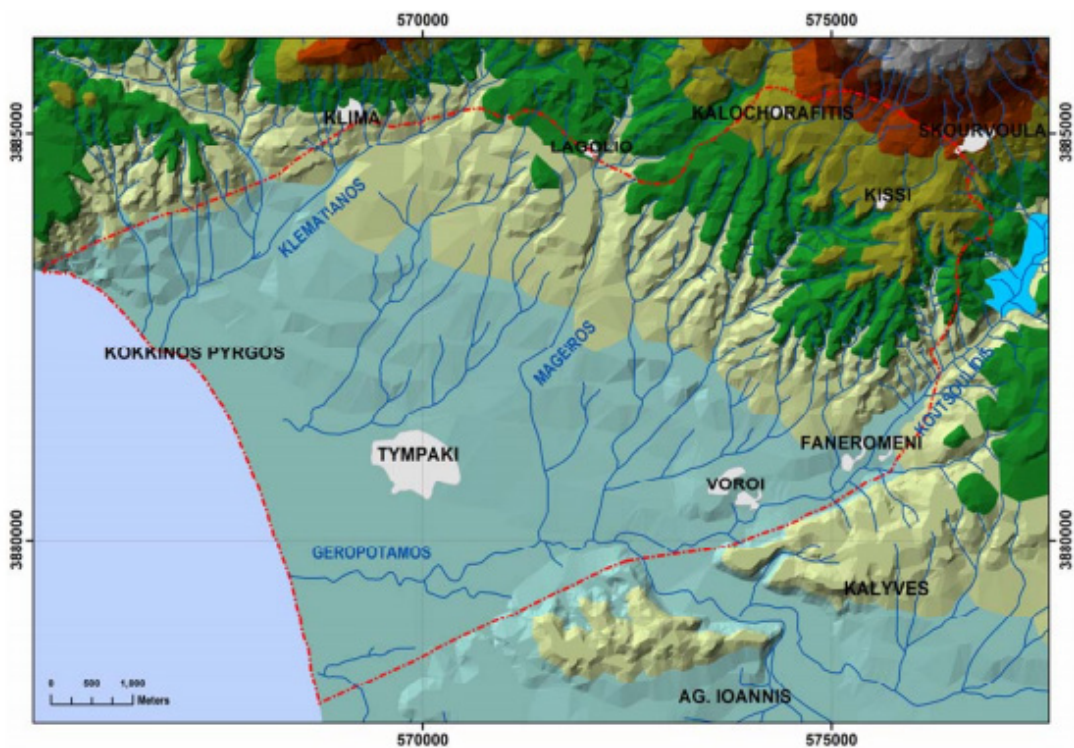
4.3 Υδρολογικά στοιχεία της περιοχής

Τα υδάτινα ρεύματα της περιοχής αποτελούν την κύρια πηγή αναπλήρωσης υπόγειων υδάτων της περιοχής του Τυμπακίου.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Paritsis (2005) η κατείσδυση στα υποκείμενα αλούβια από τα κύρια υδάτινα ρεύματα που διατρέχουν την περιοχή (Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης, Μάγειρος και Κλεματιανός) κυμαίνεται γύρω στο 10% της ροής των ρευμάτων αυτών. Σύμφωνα με μετρήσεις του Οργανισμού Τροφίμου και Γεωργίας Ηνωμένων Εθνών (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) η μέση ετήσια κατείσδυση μέσω του Γεροπόταμου στα αλουβιακά υποκείμενα στρώματα φτάνει τα 5.5 Mm³



Εικόνα 29 Δίκτυο επιφανειακής απορροής της περιοχής Τυμπακίου (Paritsis, 2005)

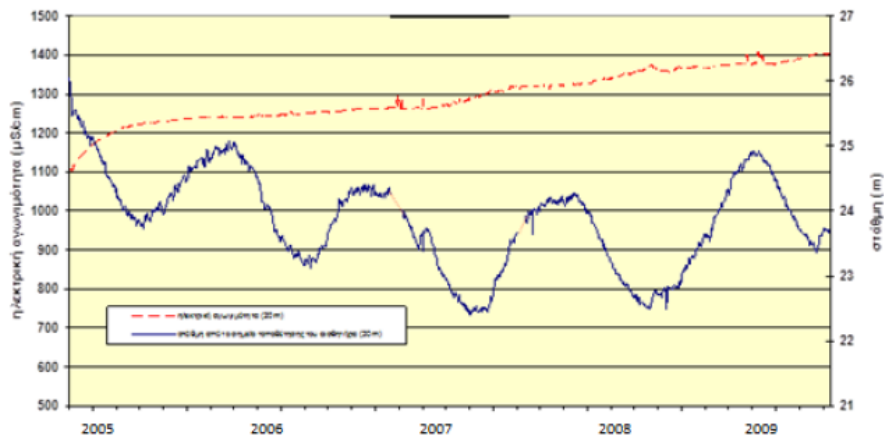


Εικόνα 30 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής Τυμπακίου (Paritsis, 2005)

4.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η Εικόνα 31 και η Εικόνα 32 απεικονίζουν την χρονική διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε δύο σταθμούς παρατήρησης της περιοχής μελέτης. Οι μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία,

λήφθηκαν τον Μάρτιο του 2007 από πηγάδια στην περιοχή μελέτης με αγωγιμόμετρο. Η Εικόνα 31, η Εικόνα 32 και η Εικόνα 33 απεικονίζουν την μεταβολή της αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το χρόνο και τη στάθμη. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την πάροδο του χρόνου.



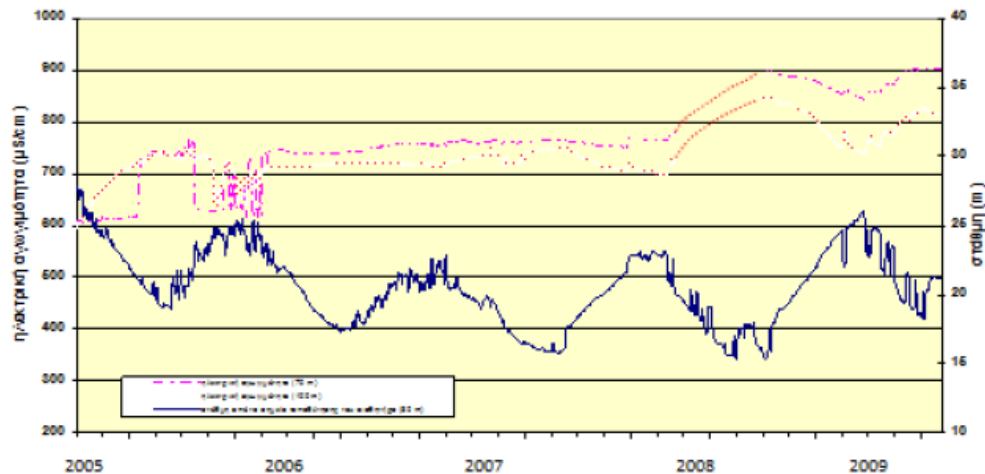
Υπόμνημα:

..... στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του οργάνου (30m)

..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (20m)

..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (100m)

Εικόνα 31 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου-αεροδρομίου (Γεροπόταμος) (Περιφέρεια Κρήτης 2009)



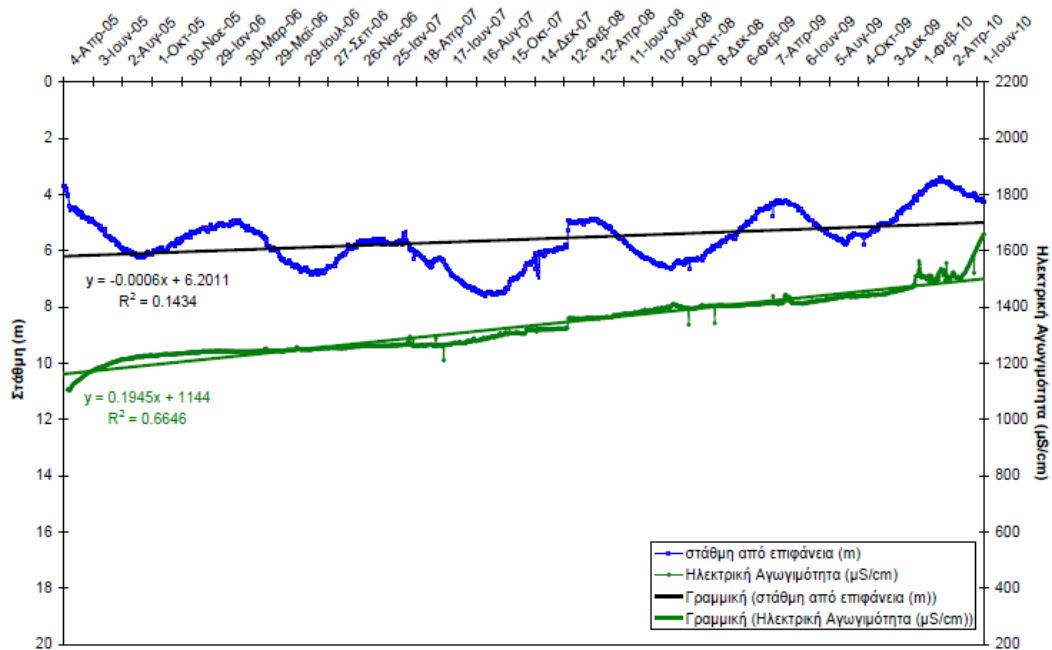
Υπόμνημα:

..... στάθμη από το σημείο τοποθέτησης του οργάνου (80m)

..... ηλεκτρική αγωγιμότητα (100m)

.....ηλεκτρική αγωγιμότητα (70m)

Εικόνα 32 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Α3-Τυμπακίου (Περιφέρεια Κρήτης)



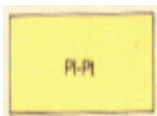
Εικόνα 33 Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακιου- Αεροδρομίου (Γεροπόταμος) (Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013)

4.5 Γεωλογία της περιοχής

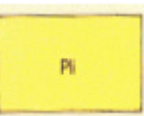
Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από μια αλληλουχία φάσεων διαφορετικής ηλικίας και σχηματισμών. Σύμφωνα με την γεωλογική τομή η οποία έχει πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της περιοχής που έχουν πραγματοποιηθεί οι βυθοσκοπήσεις και οι γεωτρήσεις η μελετώμενη περιοχή αποτελείται από τους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς:



Παράκτιες αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο). Αποτελούνται από άμμους, οι οποίοι είναι συγκολλημένοι με κροκάλες και ψαμμίτες. Οι αποθέσεις αυτές καλύπτουν την παράκτια ζώνη της περιοχής του Τυμπακίου, στις εκβολές του Γεροποτάμου.



Κροκαλοπαγή άμμους και αργίλους του Πλειο-Πλειστόκαινου. Πρόκειται γενικά για συγκολλημένα αλλουβιακά ριπίδια και ποταμολιμναία ιζήματα ερυθρού, κίτρινου ή γκριζωπού χρώματος με παρεμβολές λιμναίων μαργαϊκών ασβεστολίθων.



Θαλάσσιες αποθέσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου. Περιλαμβάνουν λευκές μάργες, λευκούς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και καστανωπές φυλλώδεις μάργες. Παρουσιάζονται άμμοι, κροκαλοπαγή καθώς επίσης και κλαστικοί ασβεστόλιθοι κυρίως στα ανώτερα μέρη του σχηματισμού. Η ηλικία των πετρωμάτων αυτών, καθορίστηκε βάση των εμφανιζόμενων απολιθωμάτων από Κοράλλια, Βρυόζωα και Φύκη.



Αλλουβιακές Αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο): Αποτελούνται από ασύνδετα υλικά από χαλίκια, άμμους, ιλύ και λοιπά προϊόντα αποσάθρωσης. Τα κλαστικά αυτά ιζήματα αποτέθηκαν από το ρέον νερό των ποταμών Γεροποτάμου, Κουτσουλίδη και Μάγειρα, στις κοίτες τους.



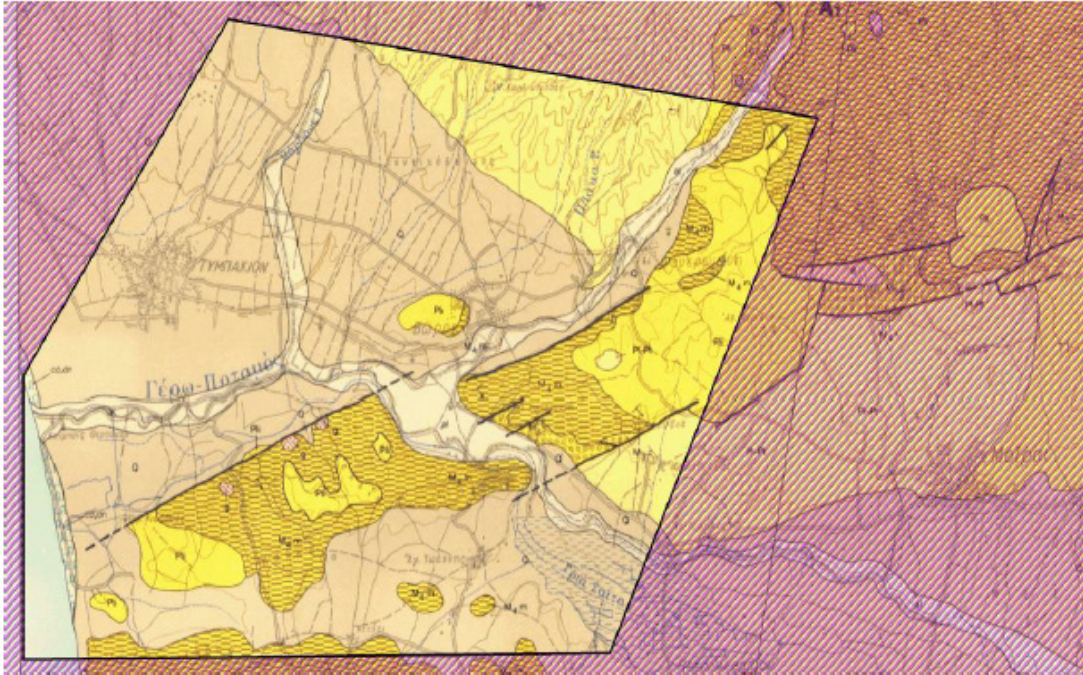
Ερυθρά Κροκαλοπαγή, άμμοι και άργιλοι του Τεταρτογενούς (Αδιαίρετου): Πρόκειται για αποστρωγγυλοποιημένα συγκολλημένα τεμάχια πετρωμάτων μέσα σε άμμο και ιλύ ποταμολιμναίας γενικά προέλευσης.



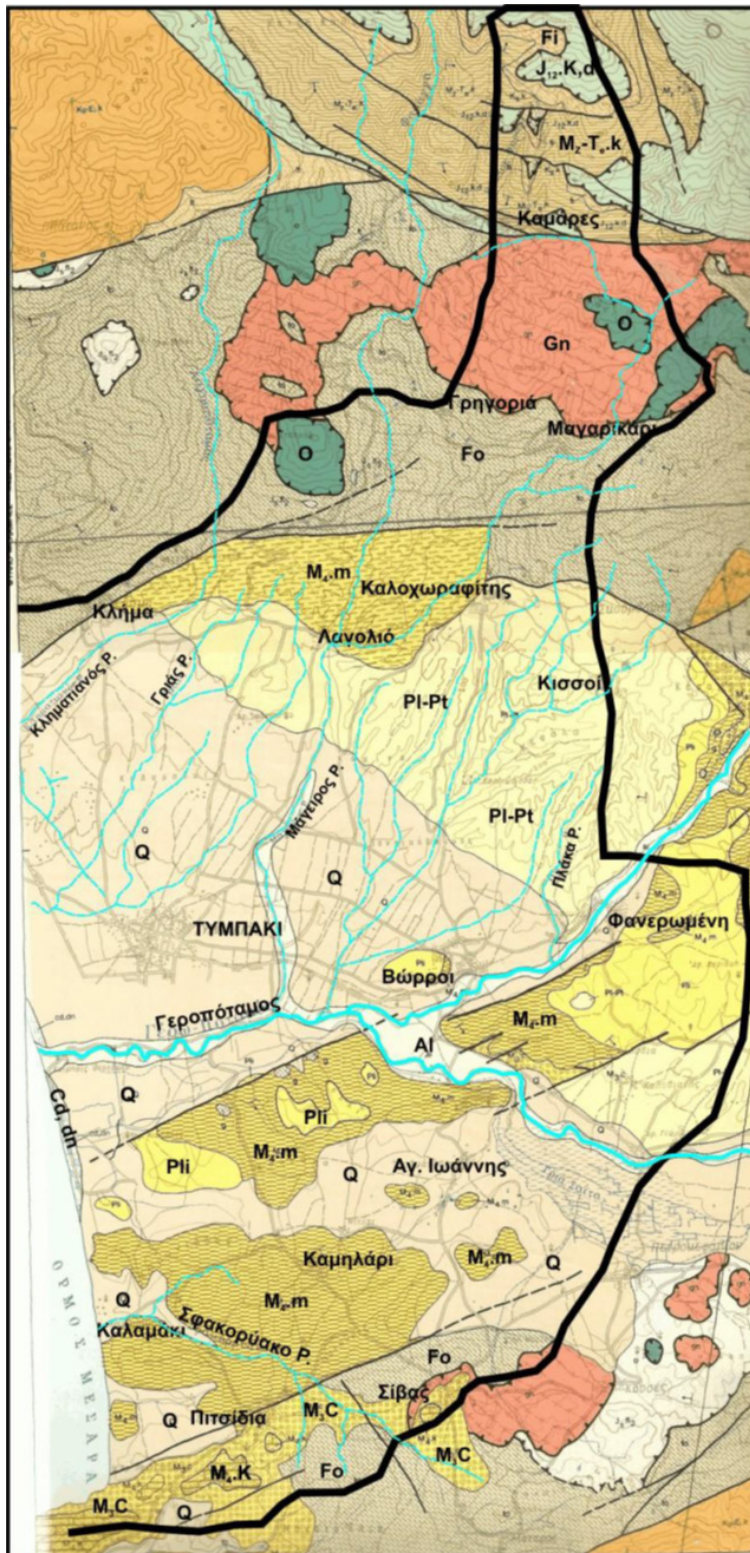
Μάργες και Γύψοι του Νεογενούς (Ανώτερο Μειόκαινο– Μεσσήνιο): Εμφανίζονται ομογενείς μάργες που εναλλάσσονται με φυλλώδεις μάργες. Στο σύνολό τους, οι μάργες βρίσκονται υπεράνω καθώς και πλευρικά των ασβεστολίθων. Σε μικρό βαθμό, υφίστανται κροκαλοπαγή γύψου και σελινιτικές γύψοι, σε λεπτές σαν ελάσματα στρώσεις τύπου “balatino”. Οι γύψοι είναι ενδιαστωμένες μέσα στις εναλλαγές των ομοιογενών και φυλλωδών μαργών. Τα απολιθώματα που έχουν παρατηρηθεί μέσα στις μάργες και κυρίως στα φυλλώδη μέρη, είναι βελόνες σπόγγων, ψάρια και φυτικά λείψανα.



Αποθέσεις Θαλάσσιες, Υφάλμυρες ή Γλυκού Νερού του Νεογενούς (Ανώτερο Μειόκαινο–Τορτόνιο): Χαρακτηρίζονται από ανώμαλες εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, άμμων και μαργών ή αργίλων. Τοπικά παρεμβάλλονται λιγνίτες και λιμναίοι ασβεστόλιθοι. Μαλάκια (*Planorbis* sp., *Neritina* sp. κτλ), Φύκη (*lithothamnium*) sp, Κοράλλια, Βρυόζωα και Εχινόδερμα είναι μερικά των αναφερθέντων απολιθωμάτων.



Εικόνα 34 Γεωλογική δομή περιοχής (Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ)



Εικόνα 35 Γεωλογικός χάρτης Τυμπακίου (1:150000, ΙΓΜΕ)

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MODFLOW ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

5.1 Εισαγωγή στο λογισμικό Modflow

Για την μελέτη του προβλήματος της υφαλμύρισης στην περιοχή του Τυμπακίου, θα χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό μοντελοποίησης το οποίο έχει την ικανότητα προσομοίωσης της ροής των υπόγειων υδάτων σε πορώδη κορεσμένα υλικά, σε τρεις διαστάσεις τόσο σε συνθήκες μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής. Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι το MODFLOW (Modular three dimensional finite difference ground water flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων.

Το λογισμικό MODFLOW χρησιμοποιεί την ανάλυση πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση της εξίσωσης της ροής των υπογείων υδάτων σύμφωνα με την εξίσωση διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy.

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

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

Όπου:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των x , y , z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται ότι είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας ($\frac{m}{s}$)

h : το υδραυλικό φορτίο (m)

W : παροχή ανά μονάδα χρόνου, που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (s^{-1})

S_s : ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου ($\frac{1}{m}$)

t : ο χρόνος (s)

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με τον προσδιορισμό της ροής, των αρχικών συνθηκών πιεζομετρικής στάθμης, και των συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης στα όρια του υδροφόρου συστήματος, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου νερού. Η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method) εφαρμόζεται με επιτυχία για την επίλυση της ανωτέρω εξίσωσης. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η αναγωγή ενός “συνεχούς” συστήματος σ’ ένα αντίστοιχο “διακριτό”. Με τη μέθοδο αυτή λοιπόν, το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την παραπάνω εξίσωση αντικαθίσταται από ένα πλέγμα διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο και οι μερικές παράγωγοι

Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων του κάνναβου (block-centered) και η εφαρμογή του απαιτεί γνώσεις των υδραυλικών, υδρογεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης στην προσομοίωση υπόγειας ροής, κυρίως λόγω της απλότητας και της ευκολίας με

την οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατα προβλήματα σε συνθήκες μόνιμης όσο και μη μόνιμης ροής.

Σε κάθε προσομοίωση ροής με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, το φορτίο υπολογίζεται σε καθορισμένα σημεία στο χώρο. Αυτά τα σημεία ονομάζονται κόμβοι του πλέγματος πεπερασμένων διαφορών. Τα ομοιώματα πεπερασμένων διαφορών συνήθως περιγράφονται, είτε ως προς το "κέντρο του κύβου" (block-centered), είτε ως προς το "κέντρο του κόμβου" (mesh-centered), ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται οι υδραυλικές παράμετροι, σε σχέση με τους κόμβους του πλέγματος.

Στη διάταξη του "κέντρου του κόμβου", οι κόμβοι βρίσκονται στις τομές των γραμμών πλέγματος. Σε αυτή τη διάταξη οι περιοχές στις οποίες καθορίζονται μεταβιβαστικές ιδιότητες, διαφέρουν από αυτές για τις οποίες καθορίζονται ιδιότητες αποθηκευτικότητας, εισροής και αποχώρησης. Οι μεταβιβαστικές ιδιότητες, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα ή η μεταβιβαστικότητα σε μια δεδομένη κατεύθυνση, καθορίζονται πάνω σ' ένα διάστημα ως προς την ίδια κατεύθυνση και παίρνουν αυτή την τιμή σ' όλη την απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους.

Αντίθετα, ιδιότητες όπως ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή ο ρυθμός επανατροφοδότησης, καθορίζονται σε περιοχές ή όγκους με κέντρα τους κόμβους, ακριβώς όπως συμβαίνει στην προσέγγιση του "κέντρου του κύβου".

Στη διάταξη κατά την οποία οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των κύβων (στοιχείων), το πεδίο προσομοίωσης μπορεί να θεωρηθεί σαν πλέγμα στοιχείων ή κελιών, που περιβάλλουν κάθε κόμβο. Αυτά τα στοιχεία χωρίζονται μεταξύ τους με πλεγματικές γραμμές ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους. Οι υδραυλικές ιδιότητες καθορίζονται για κάθε στοιχείο και θεωρούνται ομοιογενείς μέσα σ' αυτό. Το οριζόντιο πλέγμα (grid) δημιουργείται με το συνηθισμένο τρόπο καθορίζοντας τις διαστάσεις του πλέγματος κατά τις διευθύνσεις x και y. Όπως σε όλα τα πλέγματα των πεπερασμένων διαφορών, το οριζόντιο πλέγμα πρέπει να είναι το ίδιο για κάθε στρώμα.

Η βασική εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς που χρησιμοποιεί το MODFLOW, θεωρώντας ότι η πυκνότητα του υγρού παραμένει σταθερή και ότι οι αρχικές κατευθύνσεις της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας και μεταβιβασιμότητας δεν μεταβάλλονται μέσα στο σύστημα είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Delta V$$

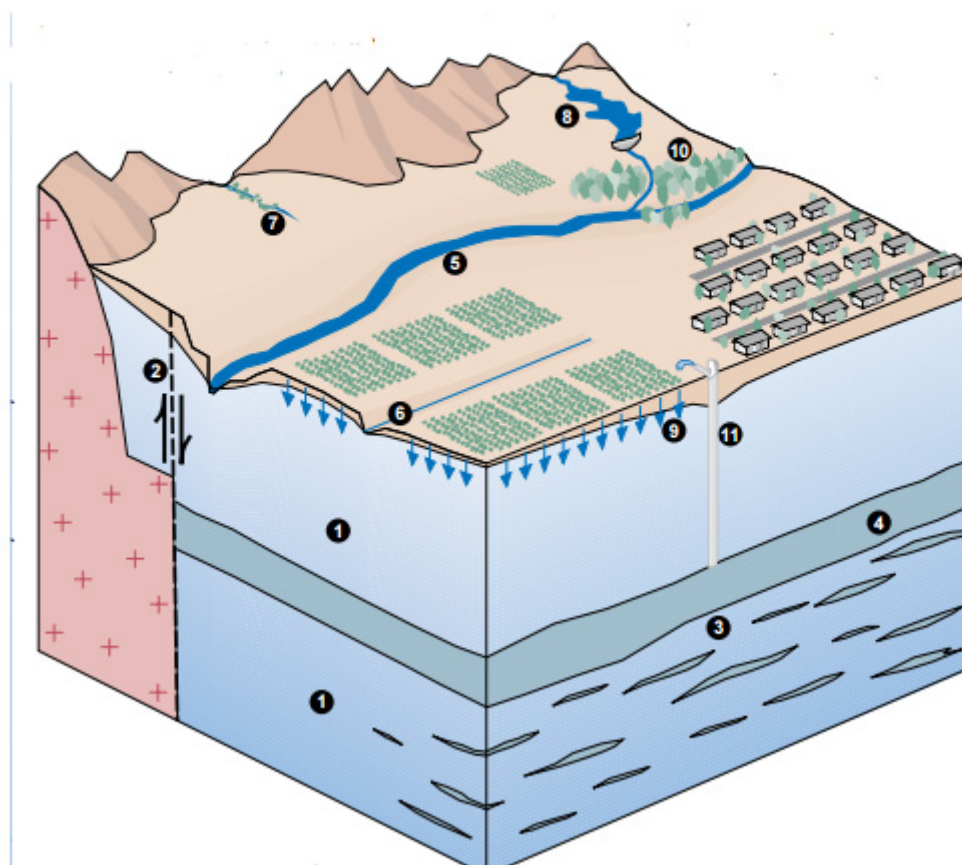
Όπου

Q_i : ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κυψελίδα ($\frac{m^3}{sec}$)

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

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

ΔV : ο όγκος της κυψελίδας (m^3)



- | | |
|--|--|
| ① Unconfined and confined aquifers—
Ground-water flow and storage changes | ⑦ Ephemeral streams—Exchange of water
with aquifers |
| ② Faults and other barriers—Resistance to
horizontal ground-water flow | ⑧ Reservoirs—Exchange of water with
aquifers |
| ③ Fine-grained confining units and interbeds | ⑨ Recharge from precipitation and irrigation |
| ④ Confining units—Ground-water flow and
storage changes | ⑩ Evapotranspiration |
| ⑤ Rivers—Exchange of water with aquifers | ⑪ Wells—Withdrawal or recharge at speci-
fied rates |
| ⑥ Drains and springs—Discharge of water
from aquifers | |

Εικόνα 36 Χαρακτηριστικά ενός υδροφορέα που μπορεί να προσομοιωθούν από το Modflow (U.S.G.S)

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

5.2 Πακέτα του λογισμικού MODFLOW

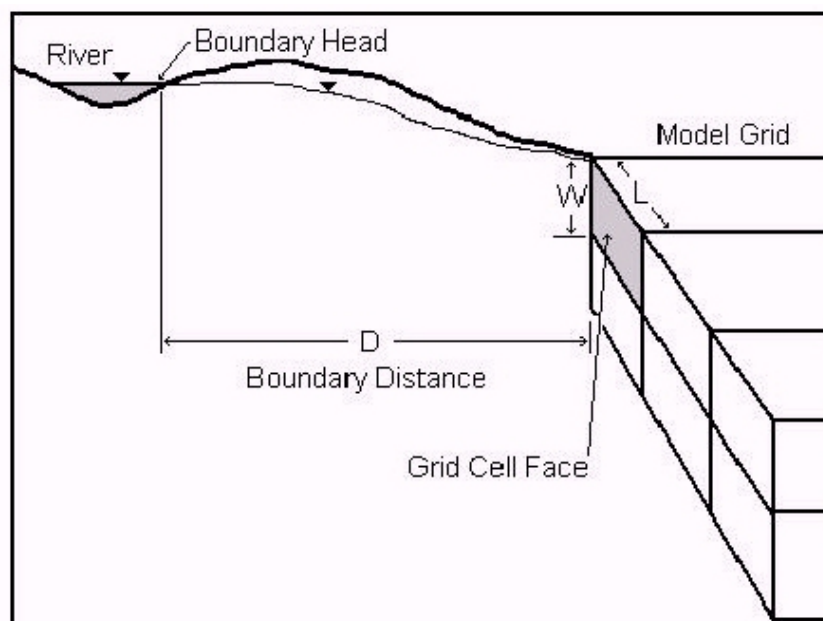
Για την αξιοπιστία της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, άμεση συνάρτηση έχει η αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου (οι υδραυλικές και υδρολογικές παράμετροι, το υδραυλικό φορτίο, οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι παροχές αντλήσεων, οι πλευρικές εισροές, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά υδροφορέα, η βροχόπτωση), αλλά και η ομοιογένεια του υδροφόρου συστήματος που προσομοιώνεται.

Η εισαγωγή δεδομένων και η επεξεργασία αυτών αποτελείται από πολλές επιμέρους διαδικασίες. Οι διαδικασίες αυτές υλοποιούνται μέσω κατάλληλων πακέτων τα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει με βάση τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης που θέλει να μοντελοποιήσει. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικά πακέτα που είναι διαθέσιμα:

- 1) Βασικό πακέτο - Basic Package, BAS. Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες για:
 - τον αριθμό των γραμμών και στηλών
 - τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων
 - τη χρονική περίοδο προσομοίωσης, το βήμα κάθε περιόδου
 - τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης
 - τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου
 - Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.
- 2) Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής - Block-Centered Flow Package, BCF. Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες για:
 - τον τύπο του υδροφόρου
 - τις συνθήκες ροής
 - τις διαστάσεις των κυψελίδων του κανάβου
 - τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας, 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. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται είτε στην κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό. Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα. Έτσι δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μιας κατακόρυφης στήλης επειδή ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται στον υδροφορέα από την επιφάνεια εδάφους. Τιμές της βροχόπτωσης μεγαλύτερες του 0 αντιπροσωπεύουν ροή μέσα στο κελί, ενώ τιμές μικρότερες του 0 αντιπροσωπεύουν ροή έξω από το κελί.
- 4) Γεωτρήσεις - Well Package. Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες για τα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη περίοδο. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό ενώ οι αρνητικές τιμές της παροχής άντληση. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται

ανεξάρτητος τόσο από την έκταση της κυψελίδας όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σ' αυτήν.

- 5) Σταθερό φορτίο - Constant head. Στο πακέτο αυτό χρησιμοποιείται η συνθήκη του σταθερού φορτίου για να εισάγει τιμές υδραυλικού φορτίου σε επιλεγμένα κελιά ανεξάρτητα από την κατάσταση του συστήματος στα γύρω κελιά επομένως συμπεριφερόμενη ως ανεξάντλητη πηγή νερού που εισάγεται στο σύστημα ή σαν ανεξάντλητη ποσότητα νερού που εξέρχεται από το σύστημα. Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία παραμένουν αμετάβλητα.
- 6) Όριο γενικού φορτίου - General Head Boundary, G.H.B. Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων (Εικόνα 37). Προσομοιάζει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφορέα που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιούμενης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη πλευρικής τροφοδοσίας. Η παροχή τροφοδοσίας είναι ανάλογη προς τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή κυψελίδες του μοντέλου με τις οποίες γειτνιάζει. Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κυψελίδα:
 - Το γενικό φορτίο : Αυτό το φορτίο είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο όπως π.χ. 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) Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure Package, SIP). Το πακέτο αυτό συνιστά μια μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, που προκύπτει με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών.
- 8) Εξατμισοδιαπνοή – Evapotranspiration, ET. Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες για την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους αλλά και από τη διαδικασία διαπνοής των φυτών.
- 9) Output Control – Δεδομένα εξόδου. Στο πακέτο αυτό εισάγονται δεδομένα για τον τρόπο εμφάνισης των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει από την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων(Visual MODFLOW, 2006)



Εικόνα 37 Σχηματική αναπαράσταση του Όριου Γενικού Φορτίου (G.H.B)(Visual Modflow Help Manual)

5.3 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι η μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη-head) ή την παράγωγο αυτής (ροή-flux) στα όρια της περιοχής του προβλήματος. Βασική προϋπόθεση για την ορθή κατασκευή του μοντέλου και την επίτευξη όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικής και αξιόπιστης προσομοίωσης της ροής, είναι η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης (steady-state), τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής και η επιλογή τους αποτελεί την πιθανότερη αιτία σφάλματος.

Υπάρχουν τρεις τύποι οριακών συνθηκών:

- **Συνθήκη 1ης τάξης (τύπος Dirichlet)**

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους και λαμβάνει υπόψη την κάθετη μεταβολή του υδραυλικού ύψους ανάλογα με το βάθος.

- **Συνθήκη 2ης τάξης (τύπος Neumann)**

Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές. Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου.

- **Συνθήκη 3ης τάξης (τύπος Cauchy ή μικτού ορίου)**

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική

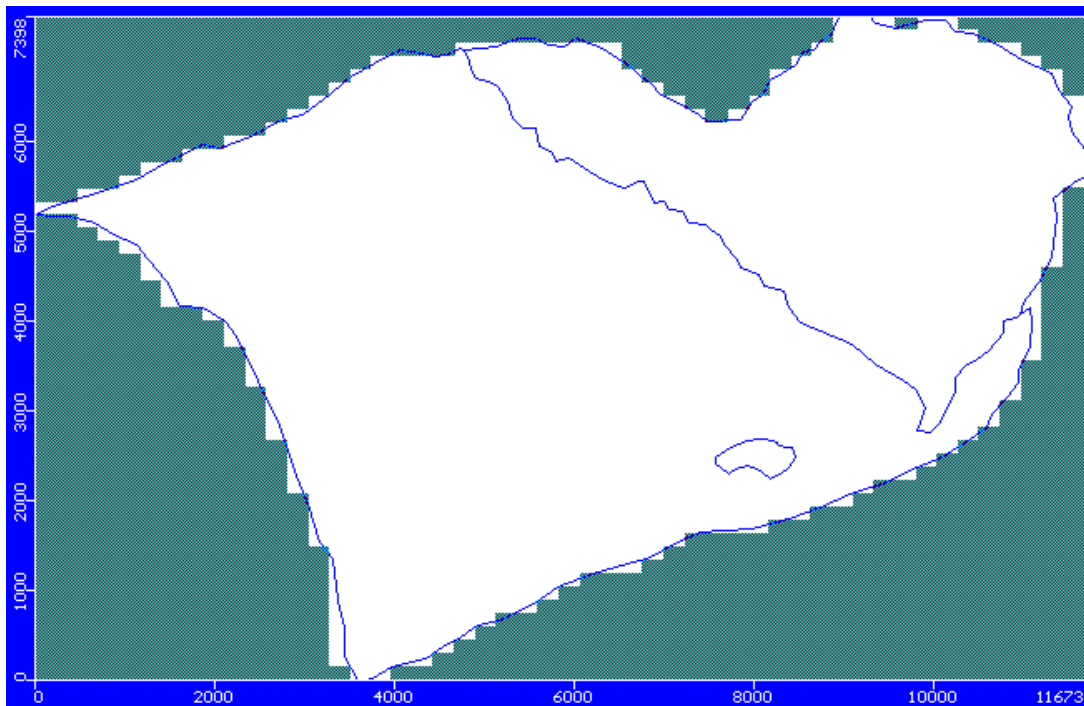
αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή (Anderson and Woessner, 1992)

5.4 Το λογισμικό Visual Modflow

Το πρόγραμμα Visual Modflow είναι ένα εμπορικό πακέτο το οποίο βασίζεται στο λογισμικό Modflow και προσφέρει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για την εισαγωγή των απαραίτητων γεωμετρικών στοιχείων και υδραυλικών παραμέτρων, για την δημιουργία των αντίστοιχων μοντέλων. Επίσης μέσω του προγράμματος Visual Modflow είναι δυνατή η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του κάθε μοντέλου. Οι επόμενες ενότητες αναφέρονται στο πρόγραμμα Visual Modflow.

5.5 Προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης

Αρχικά, έγινε η εισαγωγή μίας εικόνας (Εικόνα 38), η οποία παρουσιάζει τα όρια του υδροφορέα και μια διαβάθμιση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης. Η εικόνα αυτή δίνει επίσης πληροφορίες σχετικά με το ποια κελιά θα παραμείνουν ενεργά και ποια θα απενεργοποιηθούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα στο πρόγραμμα



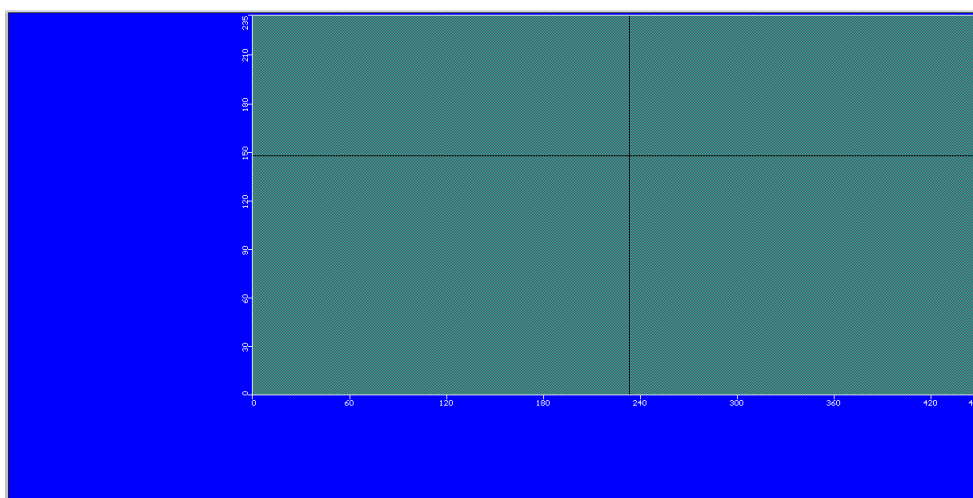
Εικόνα 38 Εικόνα περιοχής μελέτης

- Δημιουργία νέου μοντέλου υδροφορέα (Create new model): Ορίζεται έτσι ένα νέο μοντέλο για την αναπαράσταση του υδροφορέα.
- Επιλογή βασικών παραμέτρων μοντέλου
 - Ορισμός μονάδων: Οι μονάδες που επιλέχτηκαν για το μοντέλο είναι:

Πίνακας 2 Μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Μήκος	M
Χρόνος	Day
Αγωγιμότητα (Conductivity)	m/day
Ρυθμός Άντλησης	m ³ /day
Ρυθμός Βροχόπτωσης (Recharge)	mm/yr

- Ορισμός τύπου ροής: Transient flow. Ο τύπος αυτός επιλέγεται διότι μελετώνται δύο διαφορετικές υδρολογικές περίοδοι κατά την διάρκεια των οποίων η ροή μεταβάλλεται.
- Ορισμός χρόνου προσομοίωσης Για την επίλυση του υπάρχοντος προβλήματος, έγιναν δυο εφαρμογές του μοντέλου MODFLOW, μια για το χειμώνα και μια για το καλοκαίρι. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε να εξεταστεί η έκταση του προβλήματος μέσα σε ένα υδρολογικό έτος και την εξάπλωση αυτού από την χειμερινή στην καλοκαιρινή περίοδο. Η χειμερινή περίοδος αναφέρεται από τον Οκτώβριο μέχρι και τον Απρίλιο, ενώ η καλοκαιρινή ξεκινά από τον Μάιο και ολοκληρώνεται στο Σεπτέμβρη.
- Ορισμός διαστάσεων υδροφορέα (Grid) : Ακολουθεί η χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα. Με δεδομένες τις διαστάσεις του, ο υδροφορέας αναπαρίσταται από ένα κάνναβο 51 γραμμών (κατά τον άξονα x), 50 στηλών (κατά τον άξονα y) και 1 επιπέδου – layer (κατακόρυφος άξονας), με διαστάσεις κελιών 233m κατά x και 148m κατά y (Εικόνα 39).



Εικόνα 39 Διαστάσεις κελιών του πλέγματος του μοντέλου

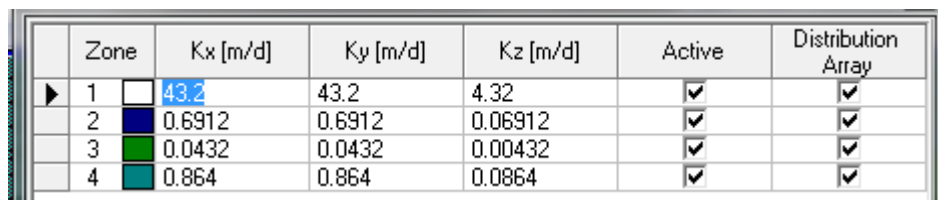
- Καθορισμός είδους υδροφορέα (Layer Type) : Εφόσον γίνεται επεξεργασία ενός επιπέδου (1 layer) επιλέγεται Layer Type : Unconfined
- Αρχικές συνθήκες: Υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής του χάρτη της περιοχής που προσομοιώνεται στο Visual Modflow και επομένως εισάγεται ο χάρτης του προσχωματικού υδροφορέα στο μοντέλο. Σημαντικό βήμα στον σχεδιασμό του ανάγλυφου, είναι και η απενεργοποίηση κελιών (inactive cells), στα οποία είναι

λογικό να μην υπάρχει ροή νερού (no flow cells). Η κατάσταση "μη ροής" αφορά τα κελιά που αντιπροσωπεύουν το θαλάσσιο μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως και όλα τα κελιά των υπόγειων στρωμάτων που αντιστοιχούν σε γεωλογικούς σχηματισμούς κάτω από τη θάλασσα. Τα κελιά που τελικά απενεργοποιήθηκαν είναι συνολικά 1000, με εναπομείναντα 1500 ενεργά κελιά. Τα απενεργοποιημένα κελιά αυτά δεν μετέχουν στην περαιτέρω επεξεργασία.

- Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity): Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη στην ίδια περιοχή (Δεττοράκη 2012). Η υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών για τις κατευθύνσεις x και y είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, ενώ για την κατεύθυνση z οι τιμές είναι ελαττωμένες κατά μια τάξη μεγέθους. Τα δεδομένα της υδραυλικής αγωγιμότητας εμφανίζονται στον Πίνακα 3 και εισήχθησαν στο μοντέλο όπως φαίνεται στην Εικόνα 40. Η απεικόνιση των διαφορετικών ζωνών της υδραυλικής αγωγιμότητας φαίνεται στην Εικόνα 41.

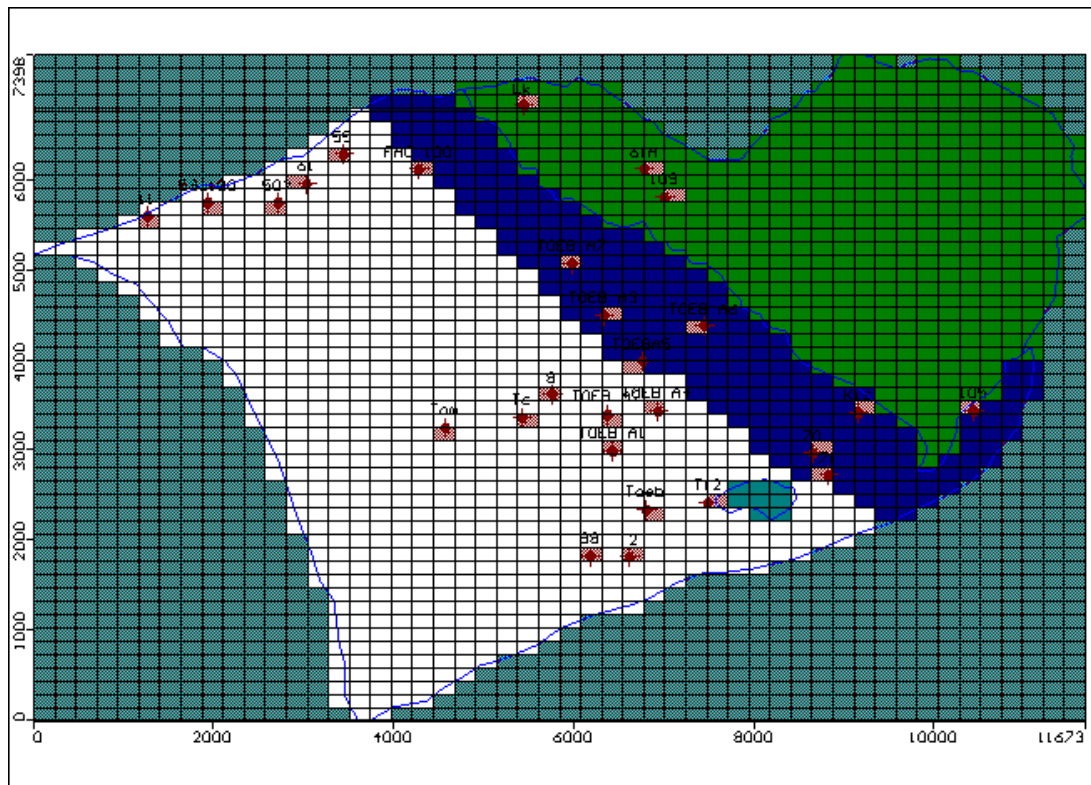
Πίνακας 3 Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας (Δεττοράκη 2012)

Γεωλογικοί Σχηματισμοί	$K_x (\frac{m}{s})$	$K_y (\frac{m}{s})$	$K_z (\frac{m}{s})$
Τμήμα 1	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Τμήμα 2	$8 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-7}$
Τμήμα 3	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Τμήμα 4	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}



Zone	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Kz [m/d]	Active	Distribution Array
1	43.2	43.2	4.32	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	0.6912	0.6912	0.06912	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	0.0432	0.0432	0.00432	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	0.864	0.864	0.0864	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 40 Παράθυρο διαλόγου του Modflow στο οποίο προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες



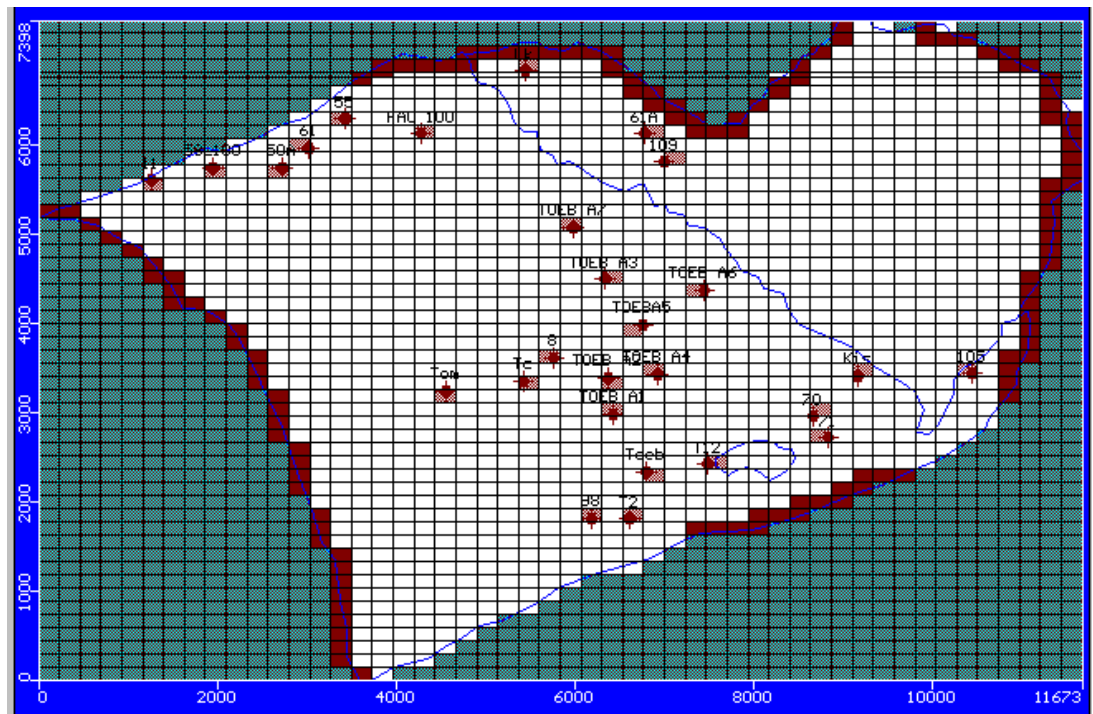
Εικόνα 41 Απεικόνιση των απενεργοποιημένων κελιών στο μοντέλο, των διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και των πηγαδιών άντλησης.

Οριακές συνθήκες (Boundary Condition) :

Constant Head

Εισάγονται τα όρια σταθερού φορτίου και τα αδιαπέρατα όρια. Κατά μήκος της ακτογραμμής εισάγεται με την εντολή constant head το υδραυλικό ύψος (Συνθήκη 1ου είδους). Κατά τη διάρκεια δηλαδή αυτής της περιόδου στις συγκεκριμένες κυψελίδες, που βρίσκονται κατά μήκος του άνω ορίου της περιοχής, που είναι η θάλασσα, το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό και ίσο με μηδέν, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει εισροή και εκροή ποσοτήτων νερού από και προς στο μοντέλο.

Οι πλευρικές εισροές στην περιοχή μελέτης μπορούν να οφείλονται σε πολλές και διαφορετικές πηγές υδάτων όπως π.χ. ροή λόγω κατείσδυση υδάτων σε γειτονικές περιοχές. Κατά μήκος των ορίων της περιοχής εισάγονται τα υδραυλικά ύψη που αντιπροσωπεύουν το κατ' εκτίμηση υδραυλικό ύψος νερού στην περιοχή αυτή. Για την εισαγωγή των τιμών χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες εργασίες (Δεττοράκη 2012) και στη συνέχεια τροποποιήθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να βαθμονομηθεί το μοντέλο με βάση τις τιμές του υδραυλικού ύψους του νερού στα πηγάδια παρατήρησης της περιοχής (Εικόνα 42).



Εικόνα 42 Σχηματική απεικόνιση των συνθηκών σταθερού φορτίου και των πηγαδιών άντλησης

Επιφανειακή τροφοδοσία (Recharge) :

Η τροφοδοσία του υδροφορέα μέσω κατείσδυσης εισάγεται στο μοντέλο σύμφωνα με την Εικόνα 28, και τις παραδοχές που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4. Συνολικά η ποσότητα νερού που κατεισδύει στον υδροφορέα το χρόνο είναι 70 mm, το οποίο προκύπτει με βάση τον ακόλουθο συλλογισμό: Η μέση βροχόπτωση στην περίοδο Οκτώβριου έως Μαρτίου ανέρχεται σε 422 mm ενώ από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο η μέση βροχόπτωση κυμαίνεται στα 41 mm, άρα η συνολική ετήσια ανέρχεται στα 463 mm.

Σύμφωνα με μελέτες της Περιφέρειας Κρήτης, η μέση ετήσια εξατμισοδιαπνοή στην Κρήτη είναι 70% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης. Συγκεκριμένα σε περιοχές που βρίσκονται σε υψόμετρο < 300m περίπου 70% της βροχόπτωσης χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής και 15% λόγω επιφανειακών απορροών, με το εναπομείναν 15% να εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς.

Θεωρήθηκε ότι την υγρή περίοδο η κατείσδυση ανέρχεται στα 50 mm ενώ την ξηρή περίοδο στα 20 mm. (Region of Crete, 2002; Donta et al., 2006)

Πηγάδια άντλησης

Τα πηγάδια άντλησης, pumping wells, ανάλογα με την αντλητική τους δυναμικότητα μεταβάλλουν τη στάθμη και τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα και για το λόγο αυτό επηρεάζουν τη θέση του μετώπου της υφαλμύρισης. Η λειτουργία τους κρίνεται απαραίτητη κατά την περίοδο άνοιξη-καλοκαίρι, για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών που προκύπτουν, κυρίως λόγω του περιορισμού των βροχοπτώσεων. Τα πηγάδια άντλησης για την περιοχή μελέτης στο σύνολο τους είναι 27 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4

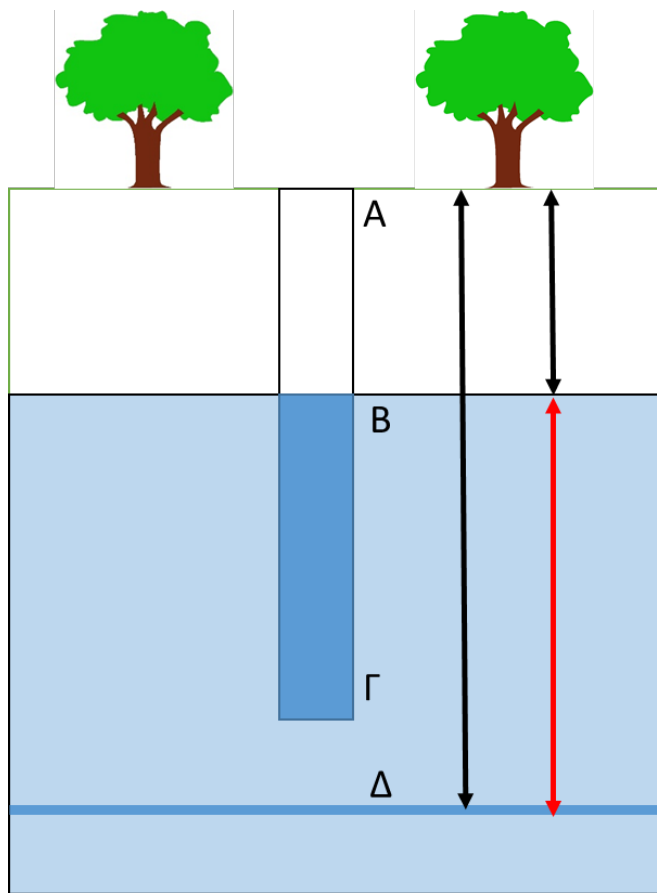
Πίνακας 4 Δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης (Παρίτσης, 2005)

Όνομασία Πηγαδιού	Παγκόσμιες Συντεταγμένες X	Παγκόσμιες Συντεταγμένες Y	Χειμερινή περίοδος m ³ /d	Καλοκαιρινή περίοδος m ³ /d
11	566430	3883683	112	488
59_100	567110	3883683	520	2255
50A	567885	3883827	520	2255
61	568187	3884045	112	488
55	568601	3884369	112	488
FAO 100	569447	3884201	112	400
Lk	570609	3884905	112	300
61A	571938	3884201	180	430
109	572165	3883889	180	350
TOEB A7	571153.3	3883154	180	160
TOEB A3	571492.2	3882576	520	180
TOEB A6	572606.9	3882458	112	320
TOEB A5	571930.2	3882064	520	470
TOEB A4	572096	3881516	520	600
TOEB A2	571542	3881477	520	600
TOEB A1	571595.7	3881069	520	500
Tc	570594	3881442	180	2500
8	570921	3881697	180	3000
Tom	569728	3881331	112	488
98	571342	3879902	281	2000
T2	571783	3879891	180	780
Toeb	571961	3880425	520	3000
T12	572644	3880501	180	3000
70	573826	3881042	180	600
71	573990	3880800	180	780
Kis	574323	3881496	180	700
105	575608	3881520	112	300

Πηγάδια παρατήρησης

Τα δεδομένα των γεωτρήσεων ήταν διαθέσιμα σε αρχείο τύπου kmz το οποίο είναι αναγνώσιμο από την εφαρμογή Google maps. Από την παραπάνω βάση δεδομένων αφαιρέθηκαν οι θέσεις για τις οποίες η τιμή του βάθους της ελεύθερης επιφάνειας από την κεφαλή της γεώτρησης ήταν μηδέν. Θεωρήθηκε ότι το μηδέν δεν αναφέρεται σε πραγματική τιμή, αλλά σε έλλειψη τιμής. Επίσης αφαιρέθηκαν μετρήσεις οι οποίες είχαν μεγάλη απόκλιση από άλλες γειτονικές μετρήσεις. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τα στοιχεία των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης όπως λήφθηκαν από το παραπάνω λογισμικό. Η Εικόνα 43 είναι μια σχηματική αναπαράσταση των γεωτρήσεων παρατήρησης που βρίσκονται στο google maps για την πλήρη κατανόηση των δεδομένων του Πίνακα 5. Η απόσταση ΑΔ αναφέρεται στο ύψος της κεφαλής της γεώτρησης από το επίπεδο της θάλασσας. Η απόσταση ΑΒ εκφράζει το βάθος της

ελεύθερης επιφάνειας νερού από την επιφάνεια της γης και η διαφορά τους εκφράζει το υδραυλικό ύψος (head) της γεώτρησης.



Εικόνα 43 Σχηματική απεικόνιση του Head των γεωτρήσεων παρατήρησης

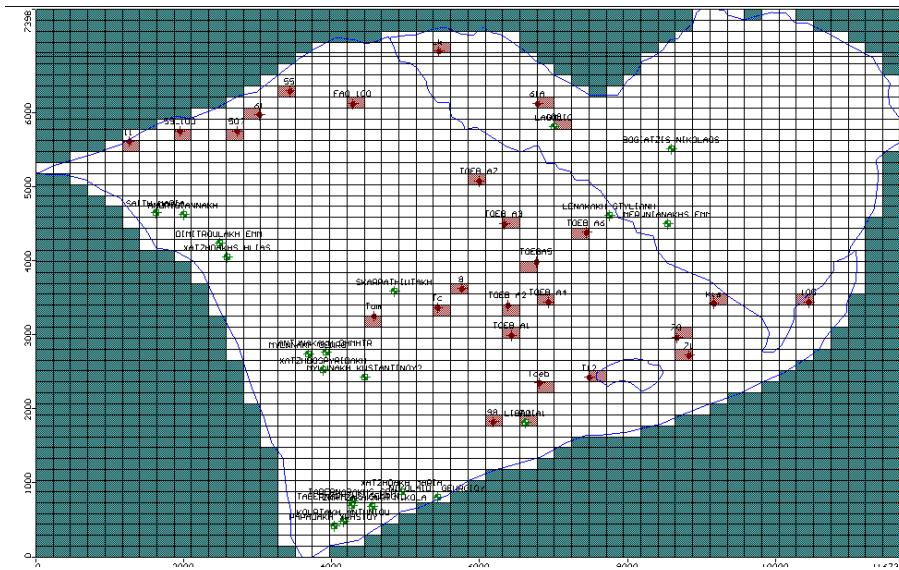
Για την εισαγωγή των δεδομένων στο Visual Modflow έγιναν κάποιες παραδοχές λόγω έλλειψης σχετικών πληροφοριών. Θεωρήθηκε ότι η στάθμη στα πηγάδια παρατήρησης η οποία εμφανίζεται στο αρχείο δεδομένων, αντιπροσωπεύει την στάθμη κατά την υγρή περίοδο. Οι στάθμες κατά την ξηρή περίοδο ανέρχονται στο 60-70% της υγρής περιόδου (Οκτώβριο – Μάρτιο)

Πίνακας 5 Δεδομένα των πηγαδιών παρατήρησης που συλλέχθηκαν από αρχείο kmz

Όνομα πηγαδιού	X	Y	Υψόμετρο Γεώτρησης (m)	Βάθος ελεύθερης επιφάνειας νερού (m)	Head (m)	Head υγρή περίοδο (m)	Head ξηρή περίοδο (m)
Saith maria	56678 9	38827 26	10	11	-1	-1	-0.7

Andrigiann akh nikolaou	56715 8.1	38827 03	12	11	1	1	0.7
Dhmhtroyla kh	56765 6	38823 11	13	15	-2	-2	-1
Xatzhdakhs	56775 2	38821 23	9	8	1	1	0.3
Mylwnakh gewrgios	56885 0	38808 20	10	6	4	4	1.
Antwnakak h	56908 9	38808 46	12	8	4	4	1
Xatzhdospy ridakh	56905 3	38806 02	9	7	2	2	0.6
Papadakh xrhstoy	56920 1.1	38784 92	4	4	0	0	0
Tabernarak hs gewrgios	56944 5	38788 38	2	3	-1	-1	-0.4
Tzwrtzakak akh nikolaou	56971 0.8	38787 60	4	4	0	0	0
Kourtakh			4	6	-2	-2	-0.6
Xatzhdakh maria	57011 3.1	38789 63	8	4	4	4	1.5
Nikolaidh gewrgiou	57072 1	38788 86	17	9	8	8	2.4
Bogiatzhs	57384 4	38836 67	182	102.1	80	80	56
Skarpathiw takis	57000 4.2	38816 59	31	30	1	1	0.3
Lagolio	57216 2	38838 83	105	92	13	13	3.9
Lenakakh stylianh	57211 3	38829 75	88	53	35	35	17
Merwniana- khs emm. Nikolaou	57369 6	38825 80	90	37	53	53	15.9
Mylwnakh kwstantinoy	56960 3	38805 01	12	6	6	6	1.8

Η απεικόνιση στο φύλλο εργασίας μετά την εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης και παρατήρησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 44.



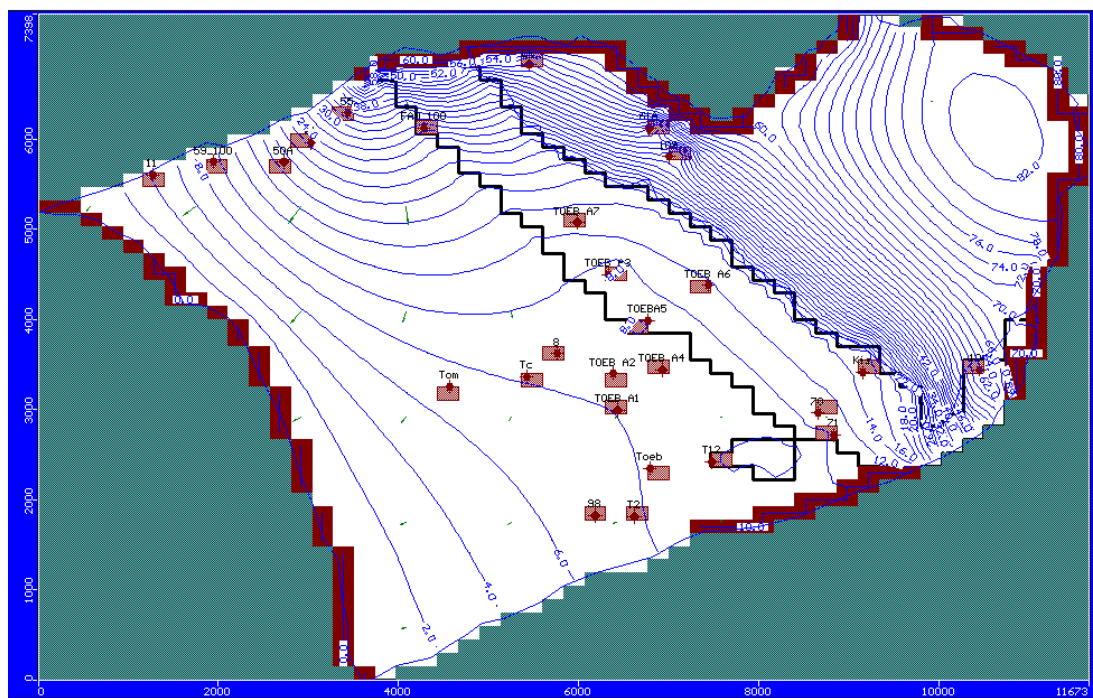
Εικόνα 44 Απεικόνιση των πηγαδιών παρατήρησης καθώς και των πηγαδιών άντλησης

5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

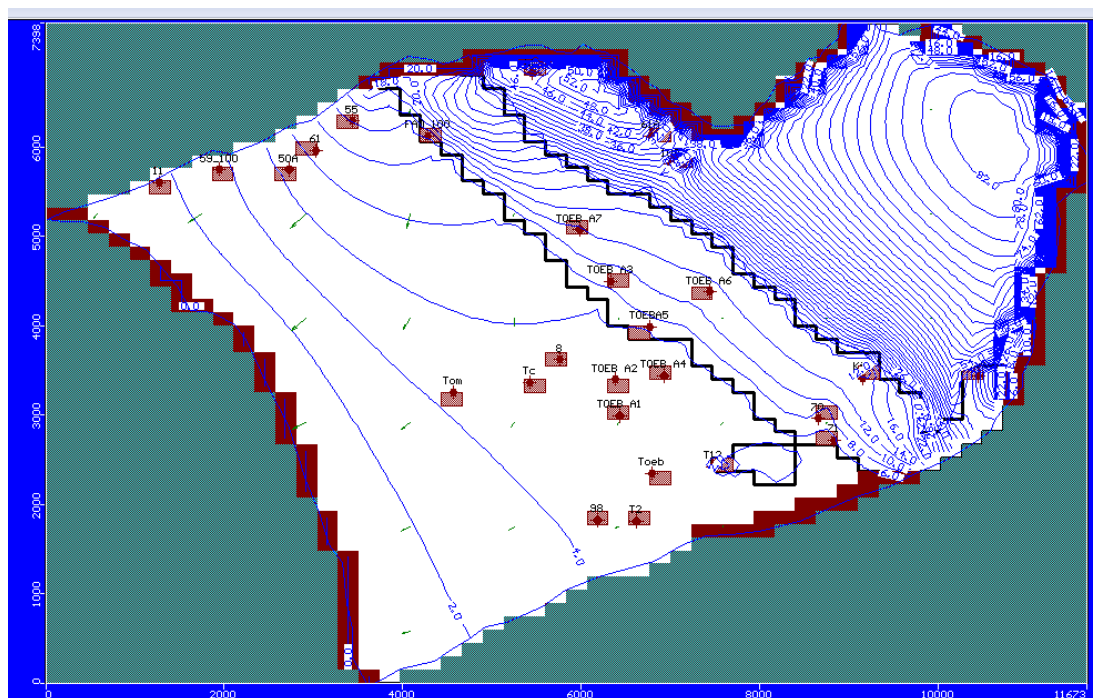
Η διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου περιλαμβάνει την αλλαγή των παραμέτρων και των οριακών συνθηκών του μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλιστεί η σωστή αναπαράσταση των παρατηρούμενων τιμών υδραυλικών υψών στο πεδίο. Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε είναι εμπειρική με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος (trial and error) και αποτέλεσε την πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία της μοντελοποίησης του υπόγειου υδροφορέα καθώς πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός επιλύσεων μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στις τιμές του πεδίου και στις τιμές του μοντέλου. Στην Εικόνα 45 απεικονίζονται τα υδρολογικά ύψη κατά την υγρή περίοδο και στην Εικόνα 46 τα υδρολογικά ύψη κατά την ξηρή.

Στην ξηρή περίοδο παρατηρείται ότι η κατανομή της πιεζομετρίας έχει αλλάξει, καθώς τα υδραυτικά ύψη έχουν μετακινηθεί προς την ενδοχώρα. Το φαινόμενο αυτό μεταφράζεται ως υποβάθμιση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και οφείλεται σε συνδυασμό αυξημένων ρυθμών άντλησης νερού για άρδευση καλλιεργειών (Πίνακας 4) και μειωμένης βροχόπτωσης στην περιοχή.

Στην Εικόνα 47 απεικονίζεται η απόκλιση των υδραυλικών υψών από τις τιμές στα πηγάδια παρατήρησης (calibration residuals), από όπου φαίνεται ότι το υπόψιν μοντέλο έχει βαθμονομηθεί με επιτυχία καθώς οι αποκλίσεις είναι αρκετά μικρές.



Εικόνα 45 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της πιεζομετρίας στην υγρή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος)



Εικόνα 46 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της πιεζομετρίας κατά την ξηρή περίοδο (Μάρτιο-Σεπτέμβριο)

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

6.1 Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) ή κατά την ξένη ορολογία Geographic Information System (GIS) είναι συστήματα βασιζόμενα σε υπολογιστικό εξοπλισμό τα οποία χαρτογραφούν και αναλύουν «αντικείμενα» που υφίστανται στην επιφάνεια της γης (και όχι μόνο) καθώς και γεγονότα που συμβαίνουν σε δεδομένη χρονική πραγματικότητα στον γεωγραφικό της χώρο (Burrrough, 1986; Demers, 2000; Κουτσόπουλος, 2002).

Τα ΓΣΠ δέχονται δεδομένα από πολλαπλές πηγές οι οποίες μπορεί να έχουν πολλές διαφορετικές τυποποιήσεις και δομές. Στους διαφορετικούς τύπους δεδομένων συμπεριλαμβάνονται χάρτες, εικόνες, φωτογραφίες, ψηφιακά προϊόντα, σήματα /μετρήσεις GPS, κείμενα, πίνακες δεδομένων. Τα ΓΣΠ συνδυάζουν δεδομένα και συνεργάζονται με ένα μεγάλο αριθμό άλλων επιστημονικών κατευθύνσεων, όπως τη Γεωγραφία, τη Χαρτογραφία, τη Γεωδαισία, την Τοπογραφία, τη Στατιστική κ.λπ.

Αποστολή των ΓΣΠ είναι να εφοδιάσουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων με τις απαραίτητες πληροφορίες. Οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται, είτε για να αναγνωρίσουν και να επισημάνουν την ύπαρξη και τη θέση ενός προβλήματος, είτε για να ανιχνεύσουν και να αναλύσουν τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις ή και για να βοηθήσουν στην εκτέλεση μιας απόφασης.

Τα ΓΣΠ αποδίδουν γεωγραφική ταυτότητα στις κάθε είδους ιδιότητες και θεματικές πληροφορίες που ενσωματώνονται σε αυτά. Η γεωγραφική διάσταση των πληροφοριών υλοποιείται με τα διάφορα συστήματα συντεταγμένων και τους ψηφιακούς χάρτες (διανυσματικούς ή ψηφιδωτούς). Ένα ΓΣΠ περιλαμβάνει μηχανισμούς και διαδικασίες τόσο για τη διαχείριση των χωρικών πληροφοριών, όσο και των περιγραφικών. Σε κάθε στοιχείο του χώρου αντιστοιχίζονται:

- Χωρικά δεδομένα (spatial data), που προσδιορίζουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στοιχείου (θέση, διαστάσεις, σχήμα κ.λπ.) και έχουν άμεση σχέση με τον εντοπισμό του.
- Περιγραφικά δεδομένα ή μη χωρικά δεδομένα (aspatial data ή attributes), που αναφέρονται σε χαρακτηριστικά ή ιδιότητες που αποδίδονται στο συγκεκριμένο στοιχείο του χώρου και δεν σχετίζονται άμεσα με τον εντοπισμό του.

6.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΓΣΠ είναι (Αστάρας, 2007):

- Εξυπηρετούν τις ειδικές ανάγκες διαφόρων χρηστών που έχουν πολλές φορές εντελώς διαφορετικές απαιτήσεις ως προς το είδος και την ακρίβεια των πληροφοριών που χρειάζονται
- Μειώνουν σημαντικά τον αριθμό των πολλαπλά αποθηκευμένων στοιχείων
- Διατηρούν την αρχική ακρίβεια των δεδομένων στην ψηφιακή βάση
- Επιτρέπουν την ευκολότερη μετατροπή, ενημέρωση και αναθεώρηση των δεδομένων καθώς και την δυνατότητα εύκολης παραγωγής ειδικών χαρτών για συγκεκριμένες εφαρμογές

- Εφαρμόζουν γρήγορο και επαναλαμβανόμενο αναλυτικό έλεγχο, συνδέοντας τα χωρικά με τα περιγραφικά δεδομένα σε ένα σύστημα πληροφοριών
- Διαθέτουν συνήθως σύστημα ασφαλείας ώστε να μην μπορεί κάποιος μη εξουσιοδοτημένος να διαφοροποιήσει το περιεχόμενο μιας εγγραφής

Τα κύρια μειονεκτήματα των ΓΣΠ είναι (Αστάρας, 2007):

- Η αγορά των ψηφιακών συστημάτων και οι τεχνικές υποστήριξης και συντήρησης έχουν αρκετά υψηλό κόστος
- Η αναδιοργάνωση και εκπαίδευση του προσωπικού προϋποθέτει αρκετό χρόνο
- Υπάρχουν προβλήματα κατά τη μετατροπή και καταχώρηση ορισμένων προϋπαρχόντων δεδομένων σε συγκεκριμένη βάση δεδομένων

6.2 Το λογισμικό ArcGis

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS Desktop το οποίο είναι ένα λογισμικό χωρικής ανάλυσης και διαχείρισης δεδομένων και είναι διαθέσιμο σε 3 εκδόσεις:

- ArcView

Σε αυτή την έκδοση υπάρχει η δυνατότητα αναλυτικής χρήσης χωρικών και περιγραφικών δεδομένων, όπως επίσης και χαρτογράφησης και ανάλυσης των δεδομένων αυτών

- ArcEditor

Το ArcEditor περιέχει τις δυνατότητες του ArcView καθώς επίσης και τις δυνατότητες δημιουργίας και διόρθωσης δεδομένων.

- ArcInfo

Το ArcInfo περιέχει τις δυνατότητες του ArcView και ArcEditor καθώς και επιπλέον εργαλεία ανάλυσης χωρικών δεδομένων. Κάθε μια από τις εκδόσεις του ArcGIS περιέχει 3 βασικές εφαρμογές:

ArcMap

Η εφαρμογή αυτή αποτελεί την κεντρική εφαρμογή του ArcGIS Desktop και έχει τις δυνατότητες δημιουργίας και επεξεργασίας χαρτών, εμφάνισης και ανάλυσης γεωγραφικών δεδομένων, αναζήτησης και επιλογής χωρικών δεδομένων, δημιουργίας γραφημάτων και διαμόρφωσης χαρτών για εκτύπωση.

ArcCatalog

Σε αυτή την εφαρμογή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να έχει πρόσβαση και να διαχειρίζεται γεωγραφικά δεδομένα.

ArcToolBox

Με την εφαρμογή αυτή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μετατρέψει χωρικά δεδομένα από μια μορφή σε μια άλλη και να αλλάξει το προβολικό σύστημα των δεδομένων του (Τσουχλαράκη και Αχιλλέως, 2010).

6.3 Γεωστατιστική Ανάλυση

Η γεωστατιστική ανάλυση ασχολείται με κατανομές στις οποίες τα χαρακτηριστικά της χωρικής εξάρτησης παίζουν πρωτεύοντα ρόλο. Οι μέθοδοι γεωστατιστικής ανάλυσης οδηγούν στον προσδιορισμό της χωρικής κατανομής μεταβλητών σε σημεία μιας περιοχής όπου δεν είναι γνωστές. Αυτές οι μεταβλητές χαρακτηρίζουν μεγέθη με οικονομική ή περιβαλλοντική σημασία. (Χριστόπουλος 2004).

Η γεωστατιστική περιλαμβάνει ένα σύνολο στατιστικών τεχνικών που αφορούν τυχαίες μεταβλητές οι οποίες μεταβάλλονται στο χώρο (τυχαία πεδία). Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στην υπόθεση ότι η χωρική διακύμανση της μεταβλητής εμπεριέχει τυχαίο χαρακτήρα, οπότε χρησιμοποιούν στατιστικές μεθοδολογίες (π.χ μέση τιμή, διασπορά κ.α.) για οποιαδήποτε εκτίμηση απορρέει από τις σημειακές μετρήσεις της μεταβλητής (Χριστόπουλος 2004).

Ο προσδιορισμός της υπόγειας αλατότητας ενός υδροφορέα είναι μια χρονοβόρα και ακριβή διαδικασία. Επομένως η εκτίμηση της αλατότητας ενός υδροφορέα είναι ιδιάζουσας σημασίας σε περιοχές που δεν υπάρχουν μετρήσεις. Πρόσφατες εξελίξεις σε μη κλασσικές μεθόδους εκτίμησης έχουν αυξήσει την τάση για χρήση χωρικών αναλύσεων ή γεωστατιστικών μεθόδων με στόχο την καλύτερη κατανόηση της χωρικής κατανομής μιας μεταβλητής. Αντίθετα με αιτιοκρατικές (deterministic) στατιστικές μεθόδους η θεωρητική βάση της γεωστατιστικής υποθέτει ότι τα δεδομένα και οι παρατηρήσεις δεν είναι τυχαία αλλά είναι χωρικά συνδεδεμένα. (Chandrasekharan et al., 2008).

6.3.1 Η μέθοδος παρεμβολής Kriging

Οι πιο διαδεδομένες τεχνικές της γεωστατιστικής είναι γνωστές με την ονομασία Kriging. Περιλαμβάνουν διαφορετικές προσεγγίσεις όπως: απλό Kriging, κανονικό kriging, disjunctive Kriging, Kriging με συνάρτηση τάσης και Kriging συνάρτησης δείκτη. Η τεχνική του Kriging έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην γεωλογία, υδρογεωλογία και περιβαλλοντική διαχείριση για παλινδρόμηση και χωρικά δεδομένα. Η ευρέα διάδοση της χωρικής παρεμβολής οφείλεται στο γεγονός ότι είναι εξαιρετικά απλή στη σύλληψή της και επιτυγχάνει εκτίμηση των τιμών των μεταβλητών σε θέσεις που δεν ελήφθησαν δείγματα, χρησιμοποιώντας το αρχικό σύνολο των τιμών και τις πληροφορίες που μας περιέχει το βαριόγραμμα (Burrough and McDonnell, 1998).

Τα χαρακτηριστικά του Kriging δίνονται περιληπτικά με το ακρωνύμιο BLUE- Best Linear Unbiased Estimator, δηλαδή βέλτιστος γραμμικός αμερόληπτος εκτιμητής.

- Best (βέλτιστος), με την έννοια ότι έχει το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα, δηλαδή η αναμενόμενη τετραγωνισμένη διαφορά μεταξύ της εκτίμησης $X_\lambda^*(s_v)$ και την πραγματικής τιμής $X_\lambda(s_v)$, $E[X_\lambda^*(s_v) - X_\lambda(s_v)]^2$ είναι η ελάχιστη για όλους τους πιθανούς εκτιμητές.
- Linear (γραμμικός), σχηματίζεται δηλαδή με γραμμική ζύγιση των διαθέσιμων δειγμάτων
- Unbiased (αμερόληπτος), αφού ισχύει η συνθήκη της αμεροληψίας η οποία καθορίζει το αναμενόμενο σφάλμα $E[X_\lambda^*(s_v) - X_\lambda(s_v)]$ ίσο με μηδέν

Το εργαλείο του Kriging προσαρμόζει μια μαθηματική συνάρτηση σε ένα συγκεκριμένο αριθμό σημείων ή σε όλα τα σημεία μέσα σε μια συγκεκριμένη ακτίνα, για να προσδιορίσει την εκτιμώμενη τιμή σε κάθε ζητούμενο σημείο. Η τεχνική του

Kriging θεωρεί ότι η απόσταση ή κατεύθυνση μεταξύ σημείων μέτρησης αντιπροσωπεύει μια χωρική συσχέτιση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει μεταβλητές στην επιφάνεια. Η τεχνική αυτή είναι μια διαδικασία με πολλά βήματα που περιλαμβάνει στατιστική ανάλυση των δεδομένων τιμών(τιμών μέτρησης), δημιουργία βαριογράμματος κ.λ.π. Η τεχνική είναι πιο κατάλληλη όταν υπάρχει πληροφορία για χωρική συσχέτιση αποστάσεων ή μεταβλητότητα όσον αφορά τον προσανατολισμό των δεδομένων τιμών (ArcGis Help Manual)

Η μέθοδος Kriging βασίζεται στην υπόθεση πως η παράμετρος που πρέπει να εκτιμηθεί δύναται να υποστεί μεταχείριση ως μια τοπική μεταβλητή. Μια τοπική μεταβλητή είναι μια μεταβλητή ενδιάμεση μιας πραγματικά τυχαίας μεταβλητής και μιας απόλυτα αιτιοκρατικής (deterministic) μεταβλητής. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι η τοπική μεταβλητή μεταβάλλεται με ένα συνεχή τρόπο από μια περιοχή στην επόμενη και συνεπώς τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε κοντινή απόσταση έχουν ένα συγκεκριμένο βαθμό χωρικής συσχέτισης, ενώ τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση είναι στατιστικά ανεξάρτητα (Davis, 1986).

Μία από τις παραλλαγές των τεχνικών Kriging που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία είναι το Κανονικό Kriging (Ordinary Kriging): Το Κανονικό Kriging αναφέρεται στη χωρική εκτίμηση σύμφωνα με τις ακόλουθες προϋποθέσεις των Cressie (1993) και Wackernagel (2003):

- Η μέση τιμή του πεδίου θεωρείται σταθερή στη γειτονιά του σημείου εκτίμησης αλλά η τιμή της μπορεί να μεταβάλλεται από γειτονιά σε γειτονιά, σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι η μέση τιμή είναι άγνωστη.
- Η εκτιμώμενη συγκέντρωση στο σημείο εκτίμησης εκφράζεται ως ένας γραμμικός συνδυασμός των τιμών των γειτονικών σημείων. Οι γραμμικοί συντελεστές (παράμετροι) του κανονικού Kriging προσδιορίζονται από το βέλτιστο τύπο ημιβαριογράμματος χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο βελτιστοποίησης με βάση την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.
- Η μέση τιμή των εκτιμήσεων είναι ίση με την μέση τιμή του τυχαίου πεδίου. Συνεπώς το κανονικό Kriging είναι ένας βέλτιστος γραμμικά αμερόληπτος τρόπος εκτίμησης.

Χρησιμοποιώντας την βασική εξίσωση του Kriging, η εκτίμηση με την μέθοδο του κανονικού Kriging δίνεται από τις εξής εξισώσεις: Θεωρείται ότι οι εκτιμήσεις αποτελούν ένα γραμμικό, με βάρη συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών των περιφεροποιημένων μεταβλητών που παίρνει τη μορφή:

$$V(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V(s_i)$$

Όπου

$V(s_o)$: Η εκτιμηθείσα τιμή στη θέση s_o

$V(s_i)$: Η παρατηρηθείσα τιμή στο σημείο s_i

λ_i : Τα βάρη που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο του δείγματος s_i , δηλαδή εξαρτώνται από τη θέση τους σε σχέση με την υπό εκτίμηση θέση s_o

Τα βάρη λ_i επιλέγονται έτσι ώστε η εκτίμηση να τηρεί τον όρο της μη προκατάληψης ότι η εκτιμηθείσα διακύμανση είναι μικρότερη από κάθε άλλο γραμμικό συνδυασμό των παρατηρούμενων τιμών. Επειδή η μέση τιμή είναι σταθερή, η απαίτηση για μη προκατάληψη σημαίνει ότι:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

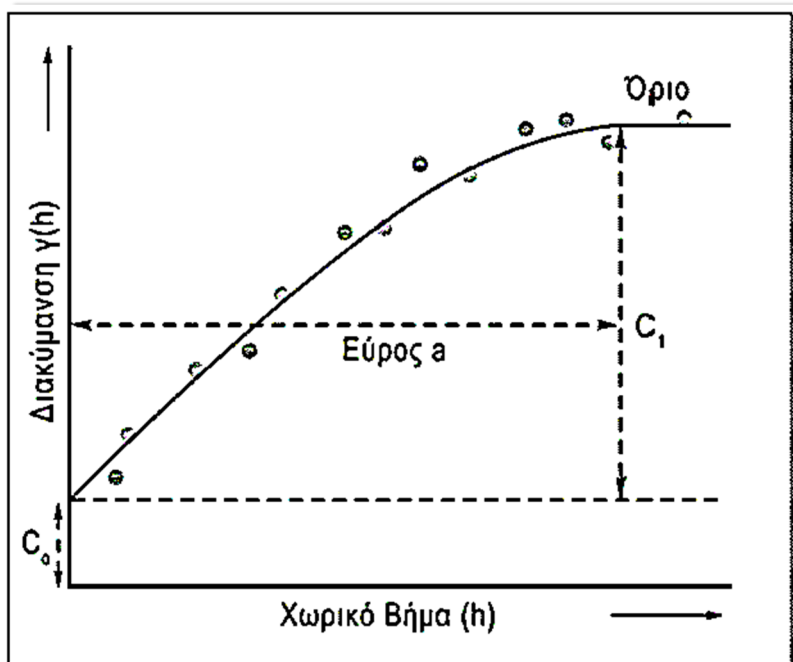
Το πρώτο βήμα στη συνήθη τεχνική Kriging είναι η κατασκευή του βαριογράμματος από το σύνολο των διεσπαρμένων σημείων που πρόκειται να υποστούν την παρεμβολή. Ένα βαριόγραμμα αποτελείται από δύο μέρη: το πειραματικό και το πρότυπο βαριόγραμμα.

Η Εικόνα 48 παρουσιάζει ένα πειραματικό βαριόγραμμα με ένα πρότυπο βαριόγραμμα που συσχετίζει με καλύτερο τρόπο τα δεδομένα. Ο κάθε γκριζος κύκλος προκύπτει από τον υπολογισμό του μέσου όρου των τετραγώνων των διαφορών των τιμών του πεδίου σε σημεία που απέχουν μεταξύ τους την ίδια απόσταση (στη διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται lag) με μια συγκεκριμένη ανοχή.

Σε ένα πειραματικό βαριόγραμμα, στον οριζόντιο άξονα τοποθετούνται οι ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ ζευγών σημείων πειραματικών μετρήσεων στην ίδια γειτονιά (χωρικά βήματα). Στον κάθετο άξονα τοποθετείται η διασπορά διαφοράς των σημείων αυτών ή αλλιώς ημιδιακύμανση (semivariance) που δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Όπου N ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας της μεταβλητής Z που απέχουν μεταξύ του απόσταση h, η οποία είναι γνωστή και ως χωρικό βήμα(lag distance).



Εικόνα 48 Πειραματικό ημιβαριόγραμμα πρότυπο βαριόγραμμα (Δήμου 2010)

Η παράμετρος nugget (C_0) είναι η χωρική διακύμανση που οφείλεται στο συστηματικό λάθος μέτρησης και δειγματοληψίας, σε μικρομεταβολές δηλαδή της ιδιότητας που δεν μπορούν να ανιχνευθούν στην κλίμακα.

Η παράμετρος a ονομάζεται εύρος (range) της χωρικής συσχέτισης και είναι το τμήμα του ημιβαριογράμματος που δείχνει συνεχή αύξηση της ημιδιακυμάνσεως αυξανόμενης του χωρικού βήματος h. Το εύρος προσδιορίζει τη ζώνη επίδρασης ενός

δείγματος, δηλαδή σημεία που απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από αυτή δεν παρουσιάζουν καμία χωρική συσχέτιση (<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/tutorials>).

Μετά από τον υπολογισμό των πειραματικών βαριογραμμμάτων απαιτείται η προσαρμογή κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων που να περιγράφουν με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια τη χωρική διακύμανση τιμών που εξετάζεται.

Τα θεωρητικά μοντέλα που εφαρμόζονται συνήθως είναι το εκθετικό (exponential), το σφαιρικό (spherical), το γραμμικό και το Gaussian.

6.3.2 Μεθοδολογία cross validation

Η διαδικασία της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης χρησιμοποιείται σε μικρά σύνολα δεδομένων και συντελεί στην επιλογή του βέλτιστου θεωρητικού βαριογράμματος που προσαρμόζει καλύτερα τα δεδομένα.

Σε αυτήν την περίπτωση όλα τα σημεία του δείγματος αποτελούν το σύνολο εκπαίδευσης και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων του γεωστατιστικού μοντέλου. Στην συνέχεια πραγματοποιείται επιβεβαίωση των εκτιμήσεων του γεωστατιστικού μοντέλου αφαιρώντας επαναληπτικά ένα σημείο από το δείγμα ενώ λαμβάνοντας υπόψη τα υπόλοιπα σημεία του δείγματος πραγματοποιείται εκτίμηση σε αυτό. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ της εκτιμωμένης και της πραγματικής τιμής του δείγματος.

Οι υπολογισμένες στατιστικές συμβάλλουν ως διαγνωστικά για το αν το μοντέλο και οι παράμετροι που το αποτελούν είναι αντιπροσωπευτικές. Το θεωρητικό μοντέλο ημιβαριογράμματος του οποίου οι παράμετροι δίνουν το μικρότερο σφάλμα εκτίμησης αποτελεί το βέλτιστο πρότυπο.

Τέλος προκειμένου να αξιολογηθούν τόσο τα χωρικά μοντέλα, όσο οι μεθόδους εκτίμησης (Kriging) πραγματοποιήθηκε σύγκριση των εξής παραμέτρων μέτρησης σφάλματος (http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/tutorials/geostat/Geostat_4_1.htm):

Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean absolute error):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z^*(x_i)]$$

Ρίζα Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (Root mean square error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z^*(x_i) - z(x_i)]^2}$$

Μέσο Κανονικοποιημένο Σφάλμα (Average Standardized Error):

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^2(x_i)}$$

Μέσο Τυποποιημένο Σφάλμα Πρόβλεψης (Mean Standardized Predicted Error):

$$MSPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{ME}{\sigma^2(x_i)} \right]$$

Τυποποιημένη ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root mean standardized squared error)

$$RMSS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{ME}{\sigma^2(x_i)} \right)^2}$$

Όπου n είναι ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας, $z^*(x_i)$ είναι η εκτιμώμενη τιμή στο σημείο x_i και $z(x_i)$ είναι η μετρημένη τιμή στο σημείο x_i και $\sigma^2(x_i)$ είναι το τυπικό σφάλμα της πρόβλεψης στο σημείο x_i (Johnston et al 2001, Webster and Oliver 2001).

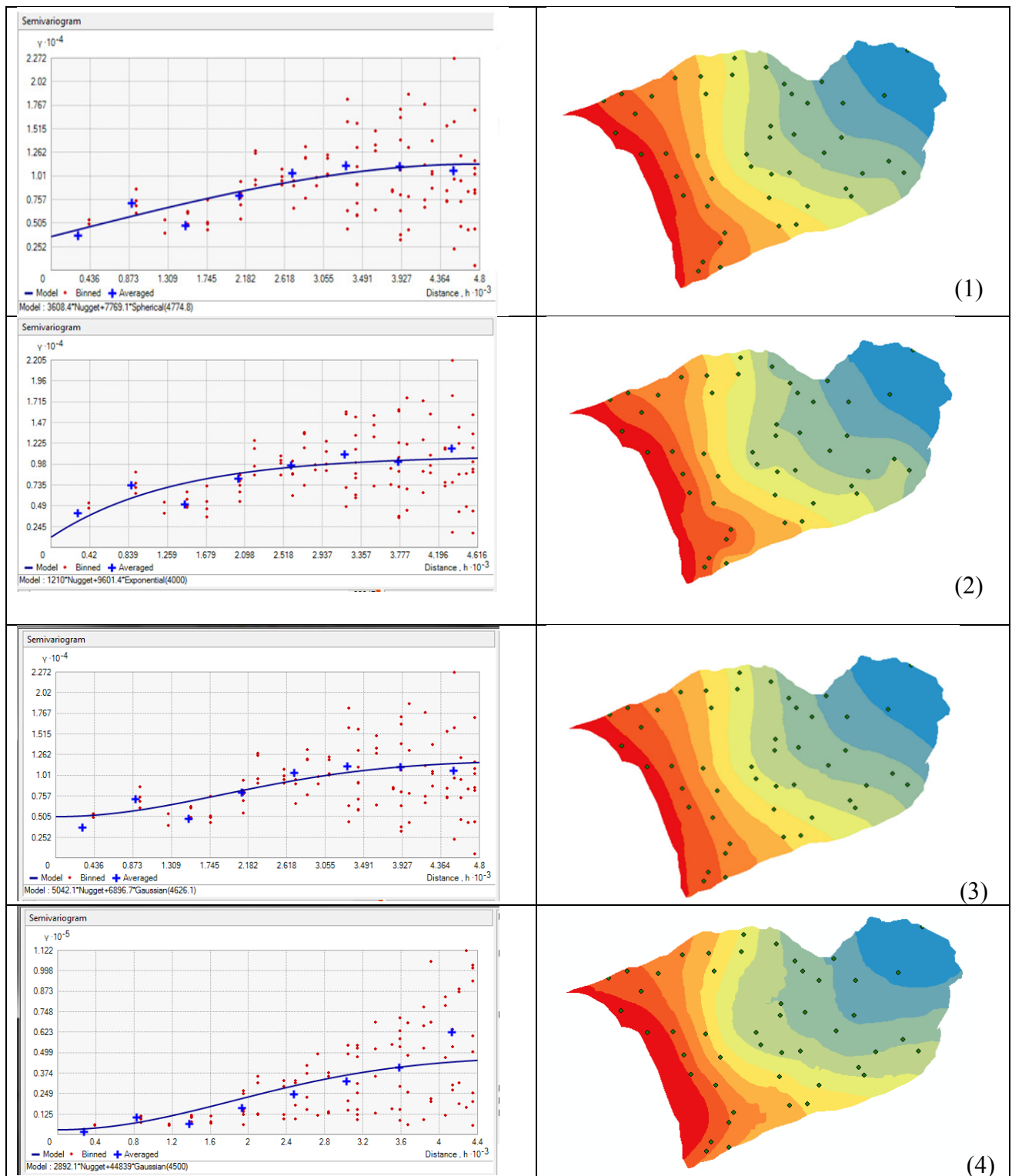
Εάν η μέθοδος παρεμβολής είναι αμερόληπτη τότε το μέσο σφάλμα (Mean Error, ME) πρέπει να είναι μηδέν. Μία μέθοδος χαρακτηρίζεται ακριβής εάν ο δείκτης (Mean Standardized Predicted Error, MSPE) είναι κοντά στη μονάδα. Επίσης αξιόπιστη θεωρείται μια μέθοδος όταν ο δείκτης Root Mean Standardized Squared Error (RMSS) είναι ίσος με ένα. Εάν ο RMSS είναι μεγαλύτερος από ένα τότε έχουμε υποεκτιμήσει τις τιμές της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει.

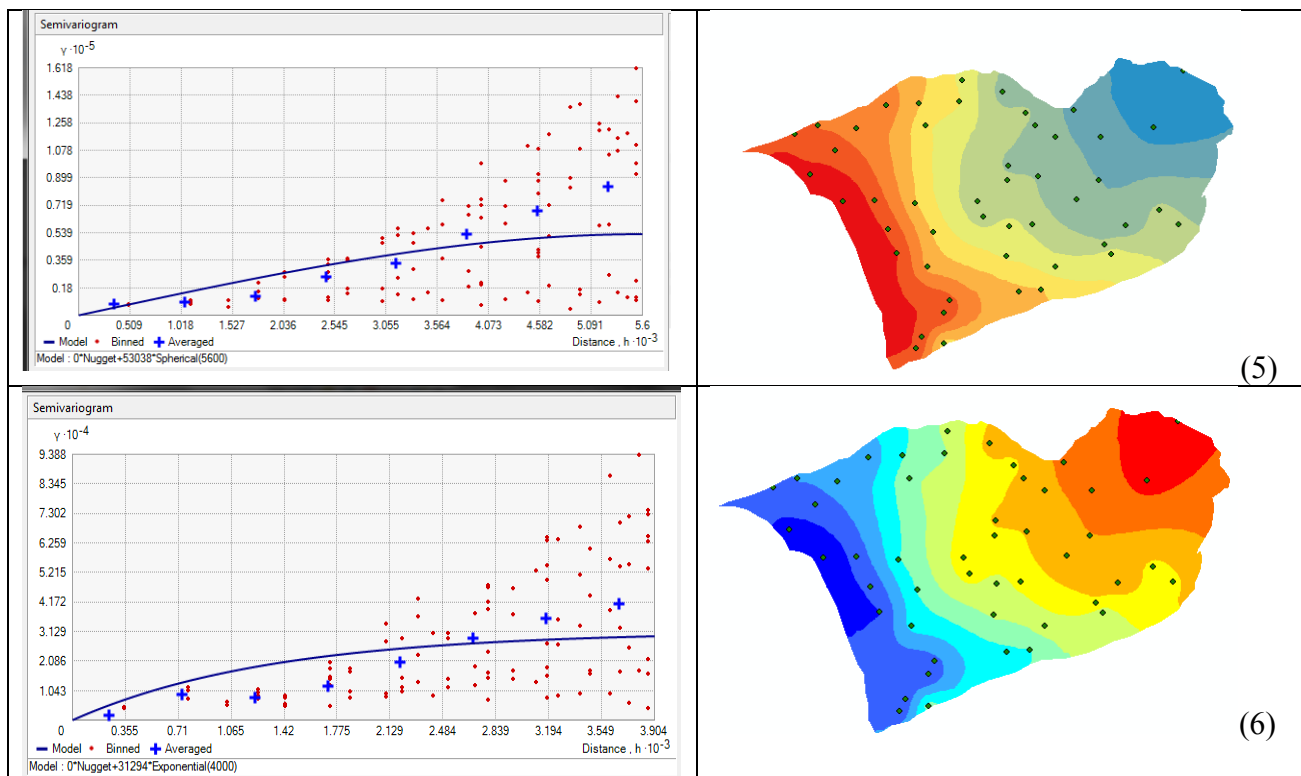
Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να ενισχυθεί η επιλογή του κατάλληλου θεωρητικού βαριογράμματος, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών θεωρητικών βαριογραμμάτων. Χρησιμοποιείται κάθε φορά διαφορετικό θεωρητικό βαριόγραμμα ώστε εν τέλει να προσδιοριστεί εκείνο με το οποίο, οι νέες υπολογισμένες τιμές προσεγγίζουν καλύτερα τις αρχικές.

Τα θεωρητικά βαριογράμματα που συγκρίνονται στην παρούσα εργασία είναι το σφαιρικό ημιβαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1ης τάξης, το εκθετικό ημιβαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1ης τάξης, το γκαουσιανό ημιβαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1ης τάξης, το γκαουσιανό, το σφαιρικό και εκθετικό.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται τα διαφορετικά βαριογράμματα σε συνδυασμό με το χάρτη που δημιουργήθηκε της χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Πίνακας 6 Σύγκριση θεωρητικών βαριογραμμάτων και απεικόνιση χωρικής κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας

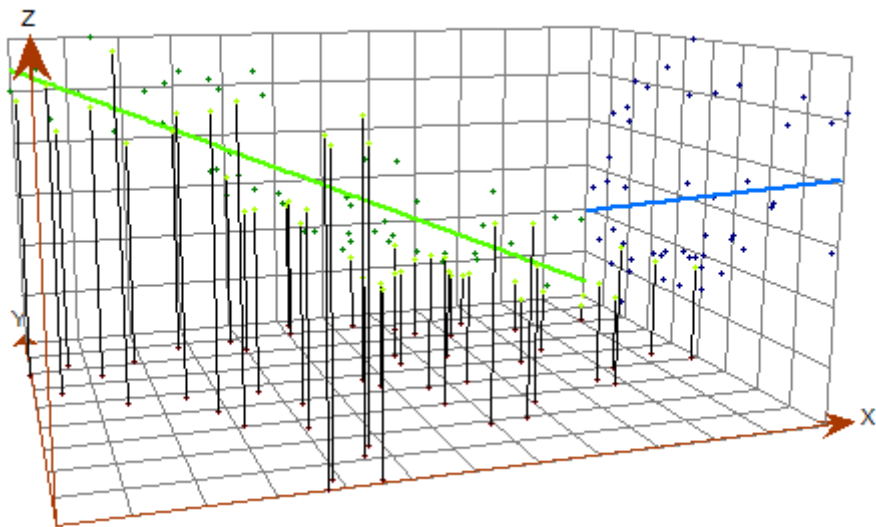




Συγκρίνοντας τους δείκτες σφαλμάτων του κάθε θεωρητικού βαριογράμματος (Πίνακας 7) παρατηρείται ότι το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση της τάσης 1ης τάξεως παρουσιάζει το μικρότερο μέσο σφάλμα (ME) καθώς και το μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) και θεωρείται το πιο κατάλληλο για τη χωρική συσχέτιση των μετρούμενων τιμών.

Η χωρική συσχέτιση των δεδομένων, πολλές φορές μπορεί να περιγραφεί από μία γενική και μία τοπική εξάρτηση (global and local trend). Η συνηθισμένη γενική εξάρτηση είναι πολυωνυμικής μορφής και αναφέρεται σε αργές μεταβολές της εκτιμωμένης παραμέτρου. Όταν αφαιρεθεί η συνάρτηση γενικής εξάρτησης από τις εκτιμήσεις τότε παραμένουν οι τοπικές μεταβολές.

Στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται η γραμμική τάση των δεδομένων (πολυώνυμο πρώτου βαθμού) όπως προσδιορίζεται από το ArcGis. Στην πραγματικότητα δίνεται ξεχωριστά η τάση των δεδομένων κατά τη διεύθυνση x και κατά y. Η τάση αυτή αφαιρέθηκε από κάποια θεωρητικά βαριογράμματα έτσι ώστε να γίνει μια καλύτερη προσέγγισή του εκτιμώμενου μεγέθους.



Εικόνα 49 Γραμμική τάση των δεδομένων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Η πράσινη γραμμή αναφέρεται στη διεύθυνση κατά x ενώ η μπλε γραμμή στη διεύθυνση κατά y).

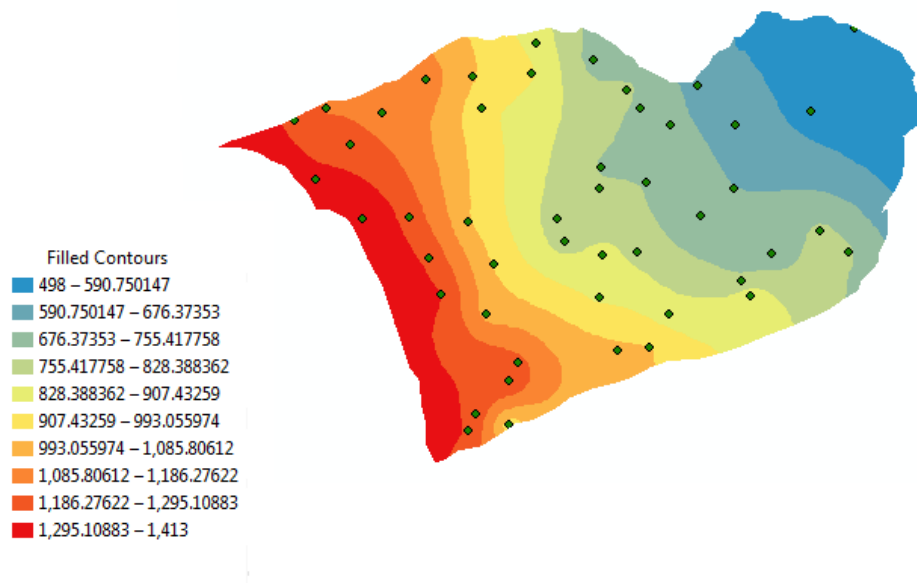
Τύπος Βαριογράμματος	Μέσο Σφάλμα (ME)	Τετραγωνικό μέσο σφάλμα (RMS)	MS	RMSS
Σφαιρικό με αφαίρεση τάσης 1 ^{ης} τάξεως	-1.726218	76.45149	-0.01794	0.96086
Εκθετικό με αφαίρεση τάσης 1 ^{ης} τάξεως	0.042258	74.17835	-0.00672	0.95301
Γκαουσιανό με αφαίρεση τάσης 1 ^{ης} τάξεως	-2.388994	78.12662	-0.02237	0.97087
Γκαουσιανό	2.509328	79.37257	0.02119	1.11519
Spherical	5.783664	74.10654	0.02676	0.73345
K-bessel	8.357493	147.16026	1.40605	34.19274
Exponential	4.298207	77.786153	0.01163	0.63287

6.3.1 Εκτιμώμενη χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης

Συνοψίζοντας την παραπάνω ανάλυση, χρησιμοποιώντας την διαδικασία της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης και με την χρήση των τριών κριτηρίων σφαλμάτων έγινε η επιλογή του θεωρητικού βαριόγραμματος. Το θεωρητικό βαριόγραμμα με τα μικρότερα σφάλματα είναι το εκθετικό με αφαίρεση τάσης 1^{ης} τάξεως. Η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με βάση το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1ης τάξεως απεικονίζεται στην Εικόνα 50.

Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας 1295 με 1413 εμφανίζονται στην παράκτια ζώνη της περιοχής μελέτης, ενώ προς την ενδοχώρα οι τιμές μειώνονται.

Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι το καθεστώς υπεράντλησης στην περιοχή έχει οδηγήσει την υποβάθμιση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και την εισχώρηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού στην παράκτια περιοχή του Τυμπακίου. Σύμφωνα με την εικόνα 21 οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εμπίπτουν στην κατηγορία 3 όπου ο κίνδυνος αλατώσεως είναι αρκετά μεγάλος. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι ενδεικτικές καθώς προέρχονται από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν το Μάρτιο του 2007. Σύμφωνα με την Εικόνα 33 η οποία αναφέρεται σε ποιο πρόσφατες μετρήσεις η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει μια σταθερή αύξηση με το χρόνο.



Εικόνα 50 Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δημιουργήθηκε από το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1^{ης} τάξης

6.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Σε αυτήν την ενότητα συγκρίνονται οι διαφορετικοί μέθοδοι προσέγγισης της έκτασης της υφαλμύρισης που αναλύθηκαν στην παρούσα διπλωματική καθώς και προσεγγίσεις από προηγούμενες μελέτες στην περιοχή.

Από την προσομοίωση της υπόγειας ροής στο λογισμικό Modflow είναι εφικτός ο υπολογισμός του βάθους της διεπιφάνειας γλυκού αλμυρού με τη βοήθεια της εξίσωσης του Ghyben-Herzberg.

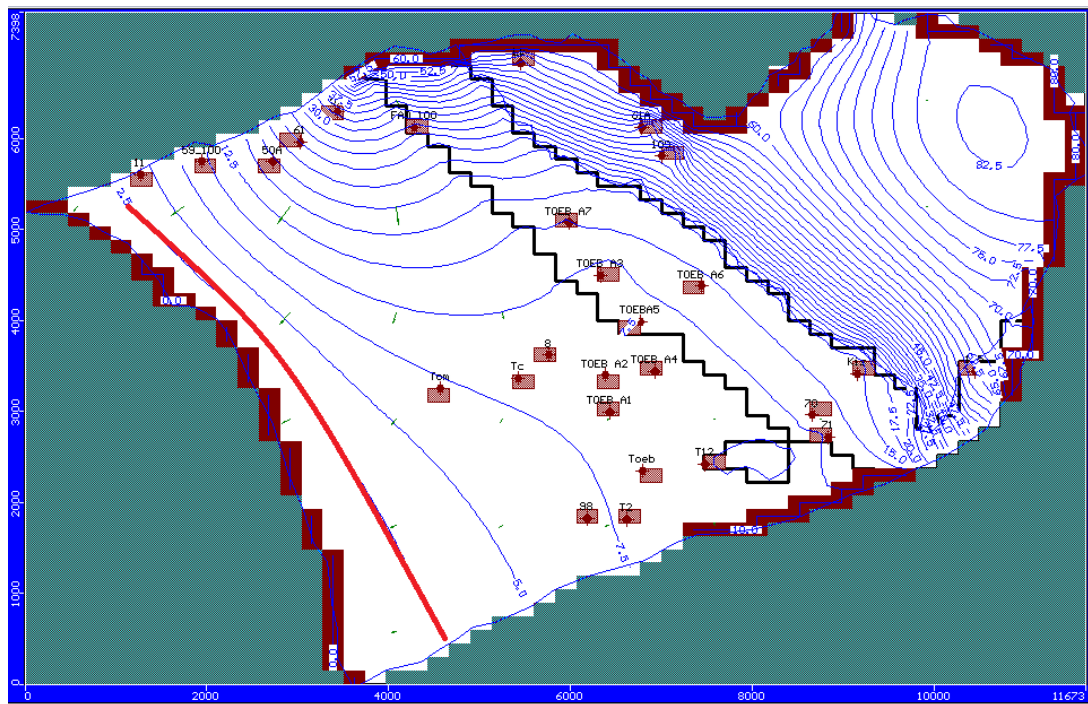
Με την υπόθεση ότι το κάτω όριο του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα 100 m από την επιφάνεια και θεωρώντας ότι το υψόμετρο του εδάφους από την επιφάνεια της θάλασσας είναι πολύ χαμηλό (στην δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης) τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το πιεζομετρικό ύψος 2,5 για την εκτίμηση του βαθύτερου σημείου διείσδυσης της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού.

Το πιεζομετρικό ύψος 2,5 m προκύπτει από την εξίσωση του Αντικαθιστώντας τις τιμές, που αντιστοιχούν στις πυκνότητες γλυκού και αλμυρού νερού και θεωρώντας ως h_s τα 100 m το h_f παίρνει την τιμή 2,5.

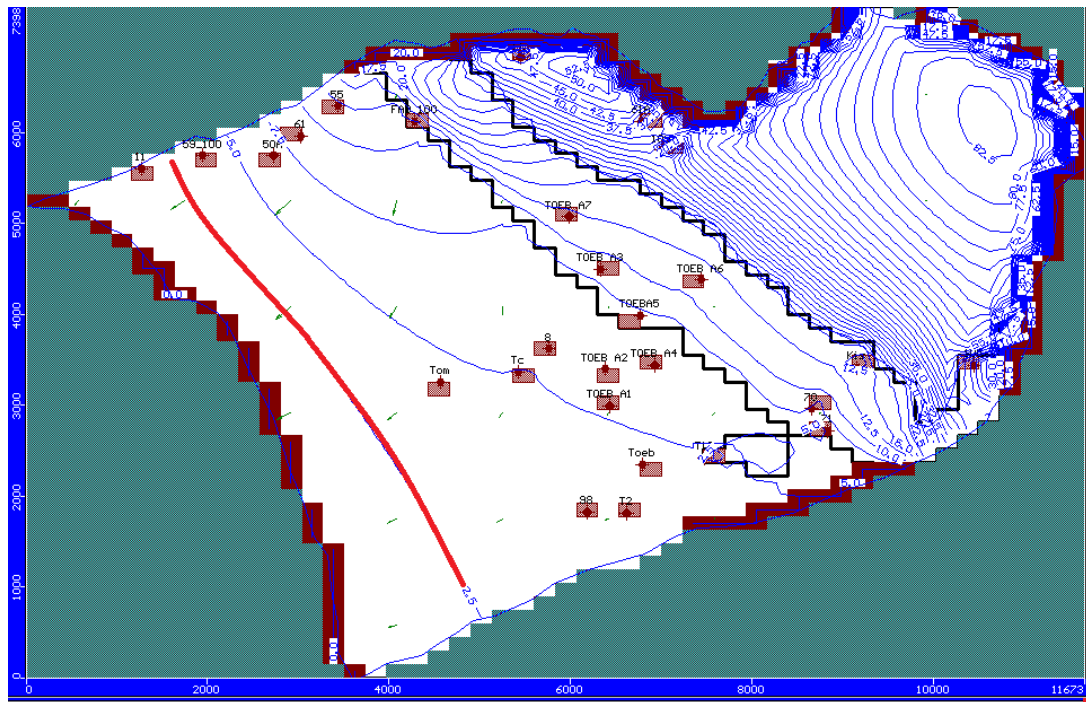
$$h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g\rho_f}{g(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow$$

$$h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{1000}{(1025 - 1000)} h_f \Rightarrow h_s = 40h_f$$

Η μετακίνηση του μέτωπου της υφαλμύρισης κατά την ξηρή περίοδο σε σχέση με την υγρή είναι φανερή στην Εικόνα 51 και στην Εικόνα 52. Η μετακίνηση αυτή προς το εσωτερικό της περιοχής οφείλεται στην υπέρμετρη άντληση κατά την καλοκαιρινή περίοδο, σε συνδυασμό με τις μειωμένες βροχοπτώσεις την ίδια περίοδο στην περιοχή μελέτης.

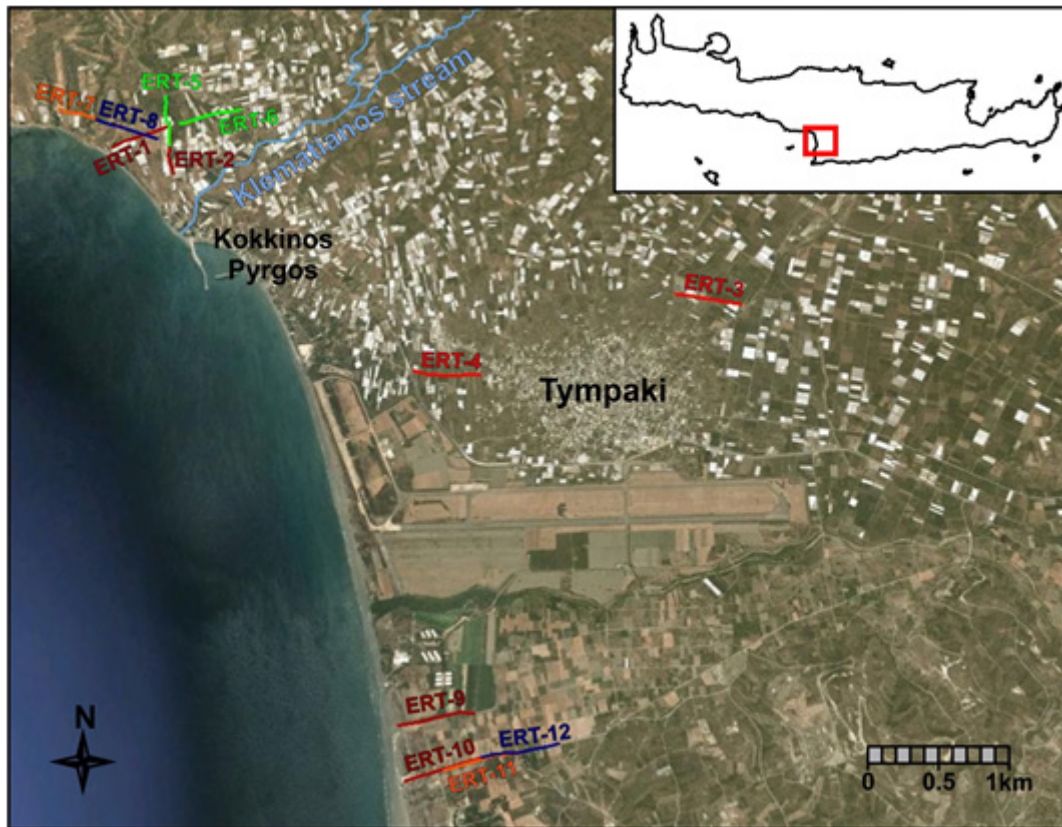


Εικόνα 51 Απεικόνιση πιεζομετρίας της περιοχής μελέτης κατά την υγρή περίοδο και της ισοϋψούς των 2,5 m που υποδηλώνει την εκτιμώμενη έκταση της υφαλμύρισης

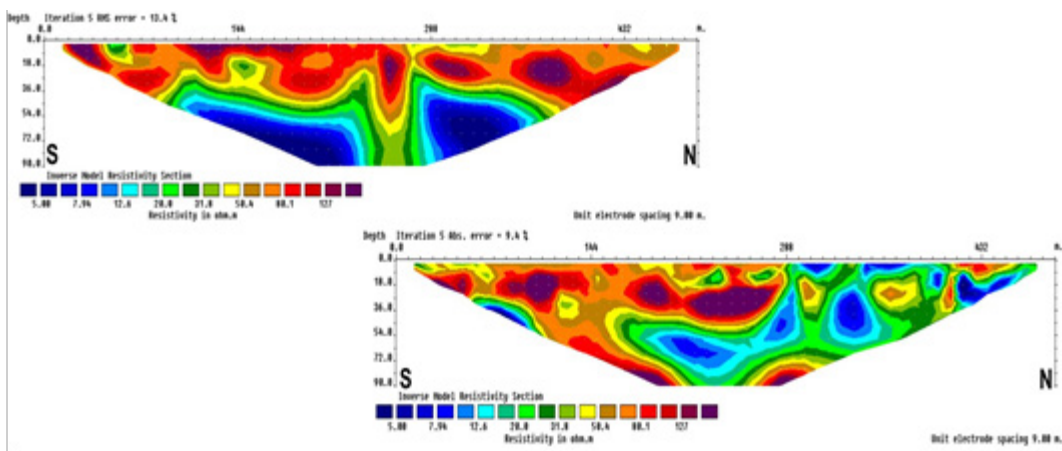


Εικόνα 52 Απεικόνιση πιεζομετρίας της περιοχής μελέτης κατά την ξηρή περίοδο και της ισοϋψούς των 2,5 m που υποδηλώνει την έκταση της υφαλμύρισης

Η υδρογεωλογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Paritsis (2005) για την έκταση του μετώπου της υφαλμύρισης στην περιοχή του Τυμπακίου είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία του χάρτη πιεζομετρίας της περιοχής (Εικόνα 53). Συγκρίνοντας την παραπάνω υδρογεωλογική μελέτη με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι η κατανομή του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι παρόμοια.



Εικόνα 54 Η περιοχή του Τυμπακίου με σημειωμένες γεωηλεκτρικές τομές



Εικόνα 55 Γεωηλεκτρικές τομές των ERT-2 (πάνω) και ERT-5 (κάτω). Είναι 46% επικαλυπτόμενες (Vafeidis 2013)

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής του Τυμπακίου με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης MODFLOW σε συνδυασμό με τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, που βασίζεται στην εξίσωση Ghyben – Herzberg. Στη συνέχεια αποτελέσματα συνδυάστηκαν με εκτιμήσεις κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας όπως προέκυψε από γεωστατιστική ανάλυση τιμών στο λογισμικό ArcGis. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή που αφορούν τόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του υδροφορέα όσο και τα αποτελέσματα από τους χάρτες διαστρωμάτωσης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι τα ακόλουθα:

- Το γεγονός ότι στην παράκτια περιοχή υπάρχουν κάποια μετρημένα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα χαμηλότερα από το επίπεδο της θάλασσας, δημιουργεί συνθήκες πιθανής εισχώρησης θαλασσινού νερού στον υδροφορέα.
- Από την βάση δεδομένων των υδραυλικών υψών των πηγαδιών παρατήρησης αφαιρέθηκαν οι θέσεις για τις οποίες η τιμή του βάθους της ελεύθερης επιφάνειας από την κεφαλή της γεώτρησης ήταν μηδέν. Θεωρήθηκε ότι το μηδέν δεν αναφέρεται σε πραγματική τιμή, αλλά σε έλλειψη τιμής. Επίσης αφαιρέθηκαν μετρήσεις οι οποίες είχαν μεγάλη απόκλιση από άλλες γειτονικές μετρήσεις.
- Η έλλειψη δεδομένων για τον ακριβή όγκο συνολικού νερού που τροφοδοτεί τον υδροφορέα, οδήγησε σε ορισμένες παραδοχές και θεωρήσεις για τα όρια σταθερού ύψους. Ο μόνος τρόπος επιβεβαίωσης του μοντέλου αυτού ήταν με σύγκριση των υπολογιζόμενων τιμών πιεζομετρίας με τις μετρούμενες.
- Η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτέλεσε μία σύνθετη και χρονοβόρα διαδικασία λόγω του ιδιάζοντος χαρακτήρα της περιοχής μελέτης. Η δυσκολία εντοπίζεται σε παράγοντες όπως η έλλειψη δεδομένων με αποτέλεσμα πολλές παράμετροι να προκύπτουν μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης, το μεγάλο πλήθος των γεωτρήσεων και πηγαδιών για τα οποία δεν υπήρχαν στοιχεία.
- Από την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, παρατηρείται διαφοροποίηση του προβλήματος κατά τη διάρκεια των υδρολογικών περιόδων που εξετάστηκαν, όπου η υπολογιζόμενη πιεζομετρία κατά τη ξηρή περίοδο είναι χαμηλότερη από την υγρή περίοδο.
- Πραγματοποιήθηκε γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την μέθοδο του κανονικού Kriging. Με τη διαδικασία της διασταυρωμένης επιβεβαίωσης εξάγεται το βέλτιστο θεωρητικό βαριόγραμμα. Η μέθοδος εκτίμησης της αλατότητας του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία όταν υπάρχουν κατάλληλα δεδομένα ηλεκτρικής αγωγιμότητας από διαφορετικές χρονικές περιόδους. Στη παρούσα εργασία υπήρχαν δεδομένα μόνο από τον Μάρτιο του 2007, ο οποίος είναι ένας μήνας ενδιάμεσα στην υγρή και στην ξηρή περίοδο.
- Οι χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό ArcMap του ArcGis, υποδηλώνουν ότι οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στην παραλία εμφανίζουν αυξημένες τιμές

ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σχέση με το εσωτερικό της περιοχής. Οι αυξημένες τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας συνδέονται με την διείσδυση θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφορέα.

- Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ghyben- Herzberg για εύρεση του υδραυλικού ύψους στο οποίο βρίσκεται το πόδι της διεπιφάνειας σε συνάρτηση με την πιεζομετρία που προέκυψε από την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα. Η έκταση της υφαλμύρισης επιβεβαιώνεται από τους χάρτες χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

7.2 Προτάσεις

- Το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η περιοχή. Είναι προτιμότερο να ληφθούν κατάλληλα μέτρα ώστε να αποφευχθεί η εισροή της θάλασσας στην ενδοχώρα αντί να χρειαστεί να αντιμετωπιστεί η υφαλμύριση των υδάτων μετέπειτα. Αυτό είναι εφικτό με την εκπόνηση μιας σωστή υδρολογικής μελέτης για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων.
- Σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό το πρόβλημα έχει δημιουργηθεί από την υπέρμετρη άρδευση καλλιεργειών. Αν λοιπόν, επιβαλλόταν ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα άρδευσης όπως π.χ η άρδευση να γίνεται κατά τις νυκτερινές ώρες, νωρίς το πρωί ή αργά το απόγευμα για την αποφυγή μεγάλης εξάτμισης.
- Με το πρόγραμμα άρδευσης καθορίζεται ο αριθμός των αρδεύσεων που πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου μιας καλλιέργειας, οι ημερομηνίες άρδευσης και το νερό που πρέπει να εφαρμόζεται με κάθε άρδευση έτσι ώστε να υπάρχει πάντα στο χωράφι υγρασία που να προσλαμβάνεται με ευχέρεια καθ' όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου.
- Για την έγκαιρη διάγνωση του φαινομένου και αποφυγή επέμβασης στο πεδίο η εγκατάσταση αυτοματοποιημένων μηχανισμών μέτρησης του υπόγειου νερού και ειδοποίησης.
- Ο εμπλουτισμός των υδροφορέων μπορεί να αποτελέσει μια εναλλακτική λύση. Η επαναχρησιμοποίηση των υδάτων από τις εκροές του βιολογικού καθαρισμού, μπορούν να συμβάλλουν στον εμπλουτισμό των υδροφορέων. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατάλληλη επεξεργασία των υδάτων από τις εκροές για τη διασφάλιση της ανθρώπινης υγείας. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι το κόστος αυτής της επιλογής είναι σχετικά υψηλό.
- Ο έλεγχος και η συντήρηση τόσο των δικτύων μεταφοράς, όσο και των δικτύων διανομής, πρέπει να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την αποφυγή διαρροών που οδηγούν σε άσκοπη κατανάλωση νερού.
- Βελτιώνοντας ωστόσο τη διαχείριση της ποσότητας των υπογείων υδάτων, θα πρέπει κύριο μέλημα να είναι η εύρεση μιας βέλτιστης δυνατής λύσης. Ωστόσο προτείνεται και μια ακολουθία ενεργειών που μπορούν να γίνουν:
- Μία ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την περιοχή μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο για τη δημιουργία ενός σχεδίου άντλησης από τους δημόσιους φορείς, το οποίο να προλάβει την περαιτέρω εισχώρηση του θαλασσινού νερού εξασφαλίζοντας αειφορία στο σύστημα των υπογείων υδάτων της περιοχής.

8 Βιβλιογραφία

- Anderson M, Woessner W, 1992, Applied Groundwater Modeling, Academic Press
- Atunao Marui, 2003, Groundwater conditions along the seawater/freshwater interface on a volcanic island and depositional area in Japan, Panstwowy Instytut Geologiczny delle acque
- Barlow Paul M. and Reichard Eric G., 2010, Saltwater intrusion in coastal regions of North America, Springer
- Burrough P, McDonnell R, 1998, Principles of geographical Information systems, Oxford University Press
- Davis J.C, 1998, Statistics and data analysis in geology, courier
- Fetter C.W, 1998, Contaminant Hydrology (2nd Edition), Prentice Hall
- Fratino U., 2001. Idraulica, (Appunti), DIAC, Politecnico di Bari, Sezione di Ingegneria
- Freeze A.R. & J.A. Cherry, 1979, Groundwater, Prentice Hall Inc, New Jersey
- Hornberger et al., 1998, Elements of Physical Hydrology, The Johns Hopkins Press, Baltimore, 302 p.
- Johnston K, Ver Hoef, Krivoruchko, Lucas, 2001, Using ArcGis Geostatistical Analyst Environmental Systems Research, Redlands USA
- Karanth K.R, 1987, Ground Water Assessment Development and Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Delhi
- Meinzer O E, 1923, The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles, Govt. Print. Off.
- Ohio DNR 2016, http://water.ohiodnr.gov/portals/soilwater/Images/maps/PSurface_Flow_Well_sml.jpg τελευταία πρόσβαση 12/6/2016
- Paritsis, S.N., 2005. Simulation of seawater intrusion into the Tymbaki aquifer, South Central Crete, Greece.
- Perlman H, Μακρόπουλος X, Κουτσογιάννης Δ, 2016, Ο υδρολογικός κύκλος, Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ, <http://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>, τελευταία πρόσβαση 12/6/2016
- Pinder, G.F. & Cooper, H.H., 1970, A Numerical Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front. Water Resources Research, 6(3), pp.875–882
- Ritchie, J.C, 1974, Post-glacial Vegetation of Canada, Cambridge University Press

Todd D.K. and Mays L.W., 2005, Groundwater Hydrology, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York,

Tulipano L. & G. Sappa, 2008. Lezioni di Idrogeologia Applicata, DICEA, Università degli Studi di Roma

USA Salinity Laboratory <http://www.ars.usda.gov/>

Varouchakis E, 2015, Integrated Water Resources Analysis at Basin Scale: A Case Study in Greece, American Society of Civil Engineers, DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000966

Visual Modflow help manual, Waterloo Hydrogeologic

Ward R. C. and Robinson, M., 1989, Principles of hydrology (3rd edition), McGraw-Hill, ISBN 0-07-707204-9

Wikipedia (2016),

Ανδρεαδάκης Εμμ, 2016, Εργαστήριο Υδρογεωλογίας

Δασκαλάκης Ν, 2010, Κλιματικές αλλαγές και επιδράσεις στη φυτική παραγωγή, Διπλωματική εργασία, Τμήμα μηχανικών περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δήμου Π., 2010, Εφαρμογή γεωστατιστικών μεθόδων στην εκτίμηση εδαφικών ιδιοτήτων γεωργικών εδαφών με τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών

Καββαδάς Μ, 2009, Στοιχεία εδαφομηχανικής, Συμμεών

Καλλέργης Γ., 1999, Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση,

Καρατζάς Γ., 2000, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης,

Κριτωτάκης Μ, Παυλίδου Σ, 2013, Κατάσταση υπόγειων υδροφόρων Κρήτης, Αποκεντρωμένη διοίκηση Κρήτης, γενική διεύθυνση χωροταξικής και περιβαλλοντικής πολιτικής, διεύθυνση υδάτων

Σακκάς Ι. Γ., 2004, Τεχνική Υδρολογία, 1ος Τόμος, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Αϊβάζη, Θεσσαλονίκη,

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Τσακίρης Γ, 1995, Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία

Χριστόπουλος, Δ., 2004α, Μεταπτυχιακές Σημειώσεις Ανάλυσης Δεδομένων

Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, (2004). Απολογισμός Δραστηριοτήτων Δασικών Υπηρεσιών Υπουργείου Γεωργίας έτους 2003, Αθήνα

8.1 Διαδικτυακή βιβλιογραφία

<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

<http://penteli.meteo.gr/stations/chania/crete.htm>

https://en.wikipedia.org/wiki/Saltwater_intrusion

<http://www.sepa.org.uk/environment/water/>

<http://www.aid-n.com/earths-water-resources-in-the-world/earths-water-resources-distribution-of-the-worlds-water/>

<https://www.hc-crete.gr/7η-υπε/η-κρητη-μας-ηρακλειο-δημοι>

<http://www.desire-his.eu/index.php/en/photo-gallery-resourcesmenu-198/category/81/itemPage/5/asInline>