

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρισης με χρήση του  
προσομοιωτή MODFLOW – SEAWAT στην περιοχή Τυμπακίου, Κρήτης**

**ΒΑΣΑΜΙΔΟΥ ΑΡΧΟΝΤΟΥΛΑ**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Καρατζάς Γεώργιος**

**Νικολαΐδης Νικόλαος**

**Παρανυχιανάκης Νικόλαος**

**Αναπληρωματικός: Βαρουχάκης Εμμανουήλ**

**Χανιά, Οκτώβριος 2017**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρινσης σε υπόγειους υδροφορείς, δηλαδή της διείσδυσης αλμυρού νερού σε ένα υπόγειο υδροφόρο στρώμα, με τη θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και μεταβλητής πυκνότητας. Η υφαλμύριση είναι ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα, που οφείλεται τόσο σε φυσικούς όσο και ανθρωπογενείς παράγοντες και εμφανίζεται έντονα στον ελλαδικό χώρο. Συναντάται συνήθως σε παράκτιους υδροφορείς που βρίσκονται κοντά σε μεγάλους όγκους αλμυρού / θαλασσινού νερού.

Σε αυτή την εργασία η μελέτη γίνεται στην περιοχή του Τυμπακίου, στο νομό Ηρακλείου, η οποία είναι μία περιοχή ιδιαίτερης σημασίας λόγω της γεωργικής και τουριστικής της ανάπτυξης. Έτσι λόγω της έντονης δραστηριότητας που υπάρχει, η άντληση από τον υπόγειο υδροφόρο της περιοχής κρίνεται απαραίτητη για την κάλυψη των αναγκών που προκύπτουν, και σε συνδυασμό με τη γεωμορφολογία της περιοχής τα τελευταία χρόνια το φαινόμενο της υφαλμύρινσης έχει προχωρήσει σε μεγάλη έκταση στην ενδοχώρα.

Αρχικά λοιπόν παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες και εξισώσεις για την κατανόηση της κίνησης του υπόγειου νερού καθώς και του φαινομένου της υφαλμύρινσης και των τρόπων προσέγγισής του. Επιπλέον γίνεται αναφορά του φαινομένου της υφαλμύρινσης σε διάφορες περιοχές του νησιού της Κρήτης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η περιοχή μελέτης και όλα τα βασικά χαρακτηριστικά της που αλληλεπιδρούν στο φαινόμενο. Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται και αποτελέσματα άλλων μελετών που έχουν γίνει στην περιοχή τα προηγούμενα χρόνια.

Έπειτα αναλύεται το πρόγραμμα προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μετακίνησης του υπόγειου ρύπου που χρησιμοποιήθηκε (MODFLOW – SEAWAT), και αναφέρονται τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν, μετά τη βαθμονόμηση από την προσομοίωση και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα προηγούμενης μελέτης που εξετάζει την εισχώρηση με τη δημιουργία χαρτών χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Σκοπός είναι να ελέγξουμε κατά πόσο υπάρχει συμφωνία στους διάφορους τρόπους προσέγγισης.

Τέλος εξάγονται συμπεράσματα για την κατάσταση της περιοχής με βάση τα αποτελέσματα και δίνονται προτάσεις για μελλοντικές δράσεις στην περιοχή (αλλά και γενικότερα) ώστε να αντιμετωπιστεί (προληφθεί) το πρόβλημα.

## ABSTRACT

The present study investigates the salinization problem in aquifers, i.e. the saltwater intrusion in a water body. The method used is based on the three dimensional variable density groundwater flow. Salinization is an important environmental problem caused by human activities and natural reasons. It often occurs in coastal aquifers that lie close to big bodies of brine.

In this study, the place examined is Tymbaki, in Heraklion, Crete. Tymbaki is particularly important due to the agricultural and touristic activities. To cover the needs from these activities, the needed amount of water that is being pumped from the aquifer and the natural characteristics of the area result in the salinization problem that has progressed inland.

Firstly there are described the basic concepts and equations regarding the groundwater flow, the salinization problem and how it can be investigated. Additionally there are presented the results of various studies regarding the salinization problem on the island of Crete. Moreover the place of interest is presented along with all its characteristics that interact in the saltwater intrusion. At this point results from previous studies are presented and explained.

For the simulation of the groundwater flow and the contaminant (salt) the mathematical problem is solved with a numerical model, MODFLOW – SEAWAT. The problem solved is that of three – dimensional, finite difference groundwater flow. Initial conditions, boundary conditions, and hydraulic conductivity values for the basin were used in order to perform the model calibration and simulation. The results of the simulation are then collated with those of a study that examines the saltwater intrusion with spatial distribution maps of electrical conductivity measures of the area. The goal of this is to check how well the simulation of the saltwater intrusion front is presented.

Lastly, the conclusions of the simulation are presented and there are given proposals for the solution and prevention of the problem.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά όσους βοήθησαν στην διεκπεραίωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Καρατζά, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος στο Πολυτεχνείο Κρήτης και επιβλέποντα καθηγητή μου για την ανάθεση αυτού του θέματος καθώς και την γενικότερη βοήθεια και έμπνευση όλα τα χρόνια φοίτησής μου. Επίσης ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής που διέθεσαν χρόνο για την μελέτη και αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την συνεχή στήριξη και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν τώρα αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	2
ABSTRACT .....	3
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	8
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	12
1.1 Νερό και Υδατικοί Πόροι.....	12
1.2 Υπόγεια ύδατα.....	14
1.2.1 Σχηματισμός υπόγειων υδροφορέων .....	14
1.2.2 Σημασία των υπόγειων υδάτων .....	15
1.3 Υδατικοί πόροι στην Ελλάδα – Υδατικά διαμερίσματα .....	17
1.4 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας .....	21
1.5 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ .....	23
2.1 Είδη υπόγειων υδροφορέων.....	23
2.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά – Παράμετροι υδροφορέων .....	24
2.2.1 Υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head).....	24
2.2.2 Διαπερατότητα – Υδροπερατότητα (Permeability – Hydraulic conductivity) .....	25
2.2.3 Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity) .....	26
2.2.4 Αποθηκευτικότητα (Storativity) .....	27
2.2.5 Ολικό και ενεργό πορώδες.....	27
2.2.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία (Homogeneity and Isotropy) .....	28
2.3 Κίνηση του υπόγειου νερού.....	29
2.3.1 Νόμος του Darcy (Darcy's Law) .....	29
2.3.2 Κριτήριο χρήσης του νόμου του Darcy .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ.....	32
3.1 Το φαινόμενο και που συναντάται .....	32
3.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρινης στην Ελλάδα .....	33
3.3 Το φαινόμενο της υφαλμύρινης στο Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης .....	35
3.3.1 Παράκτιος υδροφορέας της Χερσονήσου, Ηράκλειο Κρήτης.....	36

3.3.2 Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ) Ηρακλείου Κρήτης .....	38
3.3.3 Παράκτιος υδροφορέας στα Μάλια, Ηράκλειο Κρήτης.....	40
3.3.4 Πορώδες υδροφόρο σύστημα λεκάνης Μεσαράς – Πορώδες υδροφόρο σύστημα λεκάνης Τυμπακίου, Ηράκλειο Κρήτης .....	42
3.3.5 Πορώδες υπόγειο υδατικό σύστημα Κισσάμου – Φαλάσαρνα, Χανιά Κρήτης .....	44
3.3.6 Συμπεράσματα των ερευνών που αφορούν τις πληγείσες περιοχές .....	45
3.4 Μέθοδοι μελέτης του φαινομένου .....	45
3.4.1 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού .....	46
3.4.2 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg .....	47
3.4.3 Υδρογεωχημική μελέτη της υφαλμύρισης .....	50
3.5 Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης .....	51
3.5.1 Νομοθεσία στο πρόβλημα της υφαλμύρισης .....	51
3.5.2 Τρόποι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης .....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	55
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	55
4.2 Κλιματολογικά στοιχεία & μετεωρολογικά χαρακτηριστικά .....	57
4.3 Γεωλογικά & Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά .....	61
4.3.1 Γεωλογία της περιοχής μελέτης .....	61
4.3.2 Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης.....	63
4.4 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά.....	64
4.4.1 Δομή της οικονομίας .....	64
4.4.2 Χρήσεις γης & χρήσεις νερού .....	65
4.5 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην περιοχή μελέτης.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MODFLOW – SEAWAT .....	75
5.1 Γενικά για το λογισμικό MODFLOW .....	75
5.2 Γενικά για το SEAWAT .....	76
5.2.1 Ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο .....	78
5.2.2 Μαθηματική περιγραφή της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας .....	79
5.3 Υπορουτίνες του κώδικα SEAWAT .....	83
5.4 Τρόποι επίλυσης ενός μοντέλου SEAWAT .....	84
5.5 Οριακές & αρχικές συνθήκες σε ένα μοντέλο SEAWAT .....	86
5.6 Προετοιμασία του μοντέλου SEAWAT για την περιοχή μελέτης (Τυμπάκι).....	88
5.7 Αποτελέσματα της προσομοίωσης .....	100

5.8 Σύγκριση με αποτελέσματα άλλων εργασιών .....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	112
6.1 Συμπεράσματα .....	112
6.2 Προτάσεις .....	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	114

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανομή του νερού (USGS). ....	12
Εικόνα 1.2: Ο υδρολογικός κύκλος (Illustration by John M. Evans, Howard Perlman, USGS Greek translation by Demetris Koutsoyiannis, National Technical University of Athens). ....	14
Εικόνα 1.3: Διήθηση κατακρημνισμάτων και σχηματισμός ακόρεστης/κορεσμένης ζώνης (Ο υδρολογικός κύκλος, Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ, USGS). ....	15
Εικόνα 1.5: Υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. ....	20
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ελεύθερου και επικρεμάμενου υδροφορέα. ....	24
Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ενός υδροφόρου συστήματος. ....	24
Εικόνα 2.3: Σχέση γραμμών ροής, ισοδυναμικών γραμμών και $\text{grad } h$ (Καρατζάς, 2016). ....	25
Εικόνα 2.4: Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, (Freeze & Cherry, 1979). ....	26
Εικόνα 2.5: Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες υπό διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923). ....	28
Εικόνα 2.6: Το πείραμα του Darcy – Darcy’s Law (Καρατζάς, 2016). ....	30
Εικόνα 3.1: Περιοχές θαλάσσιας διείσδυσης από υπεράντληση στην Ελλάδα (Βουδούρης, Scheidleder, Δασκαλάκη, 2004). ....	35
Εικόνα 3.2: Κατανομή υδραυλικού ύψους – Visual MODFLOW simulator grid cells (M.P. Paradopolou et al., 2009). ....	37
Εικόνα 3.4: Κατανομή υδραυλικού ύψους (m) για την ξηρή περίοδο άντλησης στον υδροφορέα Χερσονήσου (Dokou Z. et al., 2016). ....	38
Εικόνα 3.5: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης (Παραδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005). ....	39
Εικόνα 3.6: Υδραυλικό ύψος (m). Προσομοίωση της κατάστασης φυσικού συστήματος μετά το τέλος της χειμερινής και θερινής περιόδου στην αρχική κατάσταση (Παραδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005). ....	39
Εικόνα 3.7: Κάθετη διακριτοποίηση του μοντέλου της περιοχής μελέτης, και βαθμονομημένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (K) για κάθε γεωλογικό σχηματισμό (Karatzas, Dokou, 2015). ....	41
Εικόνα 3.8: Αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση για τα υδραυλικά ύψη, η ζώνη υφαλμύρισης για χρονικό διάστημα μετά από 10 χρόνια (Karatzas, Dokou, 2015). ....	41
Εικόνα 3.9: Τοποθεσία της λεκάνης Μεσαράς, Ηράκλειο Κρήτης (LEDD, 2012). ....	43
Εικόνα 3.10: Υδρογεωλογική τομής λεκάνης Μεσαράς (A – Δ) (Kritsotakis, Tsanis, 2009). ....	43
Εικόνα 3.11: Πορώδη υδροφόρα συστήματα λεκάνης Ηρακλείου (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013). ....	44
Εικόνα 3.12: Διαγράμμα γεωτρήσεων Γραμβούσας – Πλατάνου όπου φαίνεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013). ....	45
Εικόνα 3.13: Υδροστατική ισορροπία μεταξύ φρέσκου και θαλασσινού νερού, σε σωλήνα – U (Νάνου – Γιάνναρου, 2001). ....	47
Εικόνα 3.14: Επαφή γλυκού – αλμυρού νερού και ο νόμος των Ghyben – Herzberg. (1) Ζώνη μετάβασης, (α): περιεκτικότητα σε ιόντα $\text{Cl}^-$ της ζώνης μετάβασης, (β): χημικό διάγραμμα από τα σημεία (1) και (2) της ζώνης μετάβασης, (γ): μανομετρικό (υδραυλικό) ισότιμο της επαφής γλυκού – αλμυρού νερού. (Γ. Σούλιος, Εκμετάλλευση και Διαχείριση υπόγειου νερού – Κεφάλαιο 5 «Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα»). ....	49



Εικόνα 3.16: Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).....	50
Εικόνα 3.17: Είδη φραγμάτων που ελέγχουν τη θαλάσσια διείσδυση (Pool, Carrera, 2010).54	
Εικόνα 4.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο της Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13). ....	55
Εικόνα 4.2: Χάρτης της λεκάνης Τυμπακίου και Μεσαράς. Τα μεγάλα αρδευτικά έργα φαίνονται με μπλε χρώμα (Paritsis, 2005).....	57
Εικόνα 4.3: Θερμοκρασιακή διακύμανση στο σταθμό Α3 – Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης). ....	58
Εικόνα 4.5: Διακύμανση ηλιοφάνειας στο σταθμό Α3 – Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης). ....	59
Εικόνα 4.6: Διακύμανση βροχοπτώσεων στο σταθμό Α3 – Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης). ....	59
Εικόνα 4.7: Μέση μηνιαία βροχόπτωση Μ.Σ. Τυμπακίου (έτη 1959-1997) (Μελέτη για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).....	60
Εικόνα 4.8: Μέση μηνιαία θερμοκρασία Μ.Σ. Τυμπακίου (έτη 1959-1997) (Μελέτη για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).....	60
Εικόνα 4.9: Υδρολιθολογικός χάρτης Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13). ....	61
Εικόνα 4.10: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Τυμπακίου. Αλλουβιακές αποθέσεις (al), αποθέσεις του Ολόκαινου – ανώτερου Πλειστόκαινου (Pt), αποθέσεις του Πλειστόκαινου – ανώτερου Πλειόκαινου (Pl – Pt). Οι υπόλοιποι σχηματισμοί είναι ημιδιαπερατοί σχηματισμοί του Νεογενούς ή του Μεσοζωϊκού. Ακόμα φαίνονται τα όρια της περιοχής μελέτης, καθώς και τα ρήγματα (F1, F2, F3) που χωρίζουν τον υδροφορέα (Paritsis, 2005). 62	
Εικόνα 4.11: Ψηφιακό μοντέλο του εδάφους με βάση το γεωλογικό χάρτη της λεκάνης του Τυμπακίου (Paritsis, 2005). ....	64
Εικόνα 4.12: Χρήσεις γης στο Υ.Δ. Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13). ....	66
Εικόνα 4.13: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου – Αεροδρόμιο (Γεροπόταμος) (Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Μάιος 2007).....	68
Εικόνα 4.15: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Κόκκινος Πύργος – Πηγάδι (Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Μάιος 2007).....	69
Εικόνα 4.17: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης του σταθμού Κόκκινος Πύργος (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013). ....	70
Εικόνα 4.19: Ύψος νερού στον υδροφορέα Τυμπακίου στο τέλος της προσομοίωσης (20 <sup>ο</sup> έτος) (Paritsis, 2005).....	72
Εικόνα 4.20: Προσομοίωση της θαλάσσιας εισχώρησης στον υδροφορέα Τυμπακίου σε διάφορα βάθη (500 mg/L άλας ή 300 mg/L ιόντα χλωρίου στα 38, 78, 118 και 158 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας), στο τέλος της περιόδου μελέτης (Paritsis, 2005).....	72

Εικόνα 4.21: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα στο τέλος του 20 <sup>ου</sup> έτους της προσομοίωσης, η ισοαπόσταση των συγκεντρώσεων είναι 3000 mg/L ιόντα χλωρίου – τομή C1 (Paritsis, 2005).	73
Εικόνα 4.23: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα στο τέλος του 20 <sup>ου</sup> έτους της προσομοίωσης, η ισοαπόσταση των συγκεντρώσεων είναι 3000 mg/L ιόντα χλωρίου – τομή C3 (Paritsis, 2005).	74
Εικόνα 5.1: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού σε ένα παράκτιο υδροφόρο σύστημα (Barlow, 2003 - <a href="https://www.waterloohydrogeologic.com/seawat-saltwater-intrusion-applications">https://www.waterloohydrogeologic.com/seawat-saltwater-intrusion-applications</a> ).	77
Εικόνα 5.2: Πιεζόμετρα Α και Β, γεμάτα με φρέσκο και θαλασσινό νερό αντίστοιχα, ανοιχτά στο ίδιο σημείο στον υδροφορέα (Guo & Langevin, 2000).	79
Εικόνα 5.3: Μοναδιαίος όγκος ελέγχου σε ένα πορώδες μέσο (Guo & Langevin, 2002).	80
Εικόνα 5.4: Η σχέση των αξόνων α,β,γ της υδραυλικής διαπερατότητας με το σύστημα αξόνων x,y,z (Guo & Langevin, 2002).	82
Εικόνα 5.5: Χάρτης της περιοχής μελέτης (φαίνονται τα όριά της).	90
Εικόνα 5.6: Το πλέγμα της περιοχής μελέτης.	91
Εικόνα 5.7: Παράθυρο διαλόγου για την ανάθεση της αρχικής συγκέντρωσης.	94
Εικόνα 5.8: Παράθυρο διαλόγου για την ανάθεση του ορίου σταθερής συγκέντρωσης.	94
Εικόνα 5.10: Το όριο σταθερής συγκέντρωσης άλατος, στο παράκτιο όριο του υδροφορέα.	96
Εικόνα 5.12: Οι ομάδες Constant Head στα όρια του υδροφορέα μελέτης.	99
Εικόνα 5.13: Υπόμνημα της χρωματικής σκίασης της συγκέντρωσης του άλατος.	100
Εικόνα 5.14: Τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης, μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.	102
Εικόνα 5.15: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος – Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).	103
Εικόνα 5.16: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος – Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).	104
Εικόνα 5.17: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος – Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells off).	105
Εικόνα 5.18: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 3 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).	106
Εικόνα 5.19: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).	107
Εικόνα 5.20: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 24 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).	108
Εικόνα 5.21: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 24 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).	109
Εικόνα 5.22: Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δημιουργήθηκε από το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1 <sup>ης</sup> τάξης (Αγιουτάντη, 2016).	110
Εικόνα 5.23: Συγκέντρωση άλατος για διάφορα είδη νερού ( <a href="https://wocatpedia.net/wiki/Salinization">https://wocatpedia.net/wiki/Salinization</a> ).	111

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Κάλυψη γης της περιφέρειας Ηρακλείου, βάσει του Corine Land Cover 2000 (Μελέτη για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).....	67
Πίνακας 5.1: Υπορουτίνες που περιλαμβάνονται στον κώδικα SEAWAT (Zheng & Wang, 1998, Guo & Langevin, 2002, Visual MODFLOW v.4.2. User's Manual – Schlumberger Water Services, Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006, Δεττοράκη, 2012). ....	84
Πίνακας 5.2: : Μηχανές επίλυσης σε ένα μοντέλο SEAWAT (Guo & Langevin, 2002, Visual MODFLOW v.4.2. User's Manual – Schlumberger Water Services, Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006, Δεττοράκη, 2012).....	86
Πίνακας 5.3: Μονάδες παραμέτρων του προγράμματος.....	89
Πίνακας 5.4: Παράμετροι αποθηκευτικότητας του υδροφορέα μελέτης.....	89
Πίνακας 5.5: Παράμετροι για τη διασπορά του άλατος μέσα στον υδροφορέα.....	89
Πίνακας 5.6: Ρυθμοί άντλησης.....	92
Πίνακας 5.7: Ύψος νερού στα πηγάδια παρατήρησης.....	93
Πίνακας 5.8: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στις ζώνες της περιοχής μελέτης.....	93

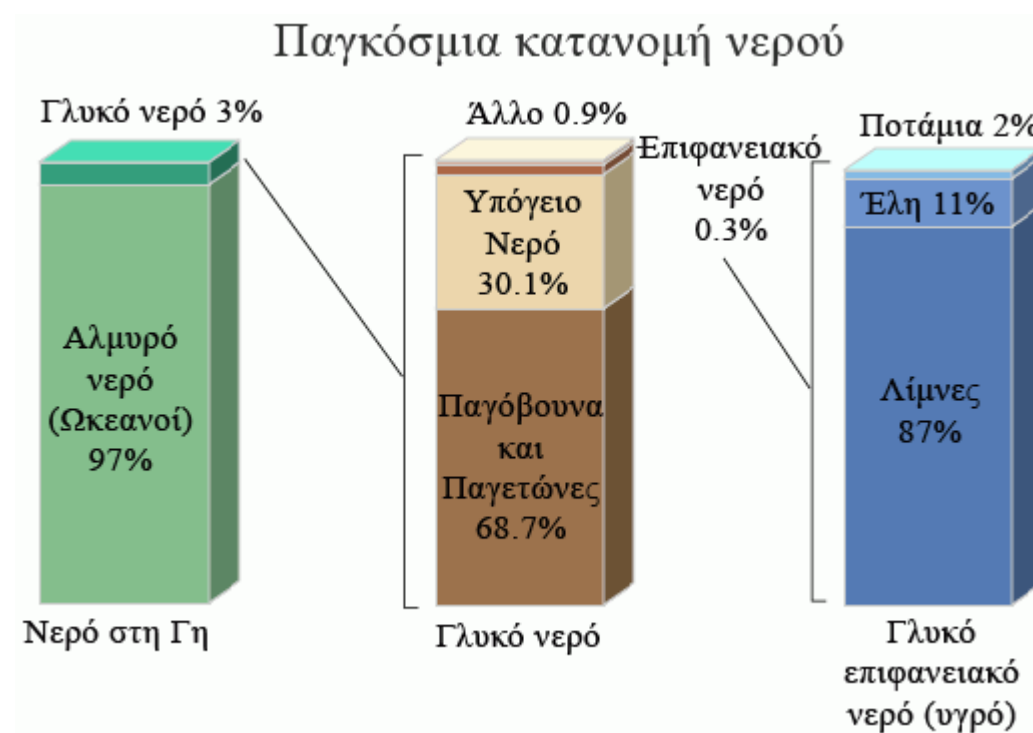
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

### 1.1 Νερό και Υδατικοί Πόροι

Το νερό είναι άχρωμο, άοσμο και όσο αφορά το πόσιμο, άγευστο. Εμφανίζεται σε τρεις μορφές: **α) υγρή** (νερό των ωκεανών, λιμνών, ποταμών κ.λπ.), **β) στερεή** (πάγος, χιόνι) και **γ) αέρια** (υδρατμοί). Αποτελεί ένα φυσικό πόρο με μεγάλη σημασία καθώς είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες για τη ζωή και την ανάπτυξη.

Το νερό φαίνεται ότι υπάρχει σε αφθονία στη γη, καθώς περίπου το 70% της επιφάνειάς της καλύπτεται από αυτό όμως η τελικά διαθέσιμη και κατάλληλη για χρήση ποσότητα είναι πολύ μικρή. Περίπου το 98% του νερού της γης βρίσκεται στις θάλασσες, στους ωκεανούς και στους πάγους. Ένα ποσοστό 1,4% είναι τεχνικά μη εκμεταλλεύσιμο, γιατί βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 800 m ή είναι υφάλμυρο. Έτσι τελικά μόνο το 0,6% του νερού σε παγκόσμια κλίμακα θεωρείται κατάλληλο και διατίθεται για χρήση.

Επιπλέον η κατανομή του νερού στη γη είναι άνιση. Έτσι, το 30% των ανθρώπων ζουν σε χώρες που δεν υπάρχουν αρκετά αποθέματα νερού, ενώ πάνω από 1 δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό. Κάθε χρόνο 3 εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν από έλλειψη ή κατανάλωση ακατάλληλου νερού, ενώ στις δυτικές χώρες γίνεται πολύ σπάταλη χρήση. Στην Ελλάδα συγκεκριμένα, γίνεται κατανάλωση των διπλάσιων ποσοτήτων από το παγκόσμιο μέσο όρο.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανομή του νερού (USGS).

Στη φύση το νερό συναντάται ως επιφανειακό και ως υπόγειο. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ υπόγειο είναι το νερό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών, που για το λόγο αυτό λέγονται υδροφορείς. Οι σχηματισμοί αυτοί (επιφανειακοί και υπόγειοι) οφείλονται στη συνεχόμενη κίνηση του νερού, γνωστή και ως κύκλο του νερού (υδρολογικός κύκλος). Μέσω αυτού περιγράφεται η παρουσία και η κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της γης, καθώς και κάτω και πάνω από αυτήν. Το νερό της γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα.

Όμως, όπως είναι γνωστό, κάθε υδάτινος χώρος δεν είναι κατ' ανάγκη διαθέσιμος και δεν μπορεί να διατεθεί για χρήση. Για να είναι κάποιος υδάτινος χώρος, πόρος, πρέπει ο υδάτινος όγκος του να είναι διαθέσιμος ή και να μπορεί να διατεθεί για χρήση σε επαρκή ποσότητα, κατάλληλη ποιότητα, ενώ θα πρέπει να προσδιορίζεται και η χρονική περίοδος μέσα στην οποία μπορεί να ικανοποιήσει τη συγκεκριμένη ζήτηση. Ένας υδατικός πόρος, είναι δυνατόν ήδη να χρησιμοποιείται ή να αποτελεί αποθηκευτικό δυναμικό στρατηγικής για το μέλλον. Αυτό όμως που καθορίζει αυτόν τον πόρο είναι η τρέχουσα και η μελλοντική του αξιοπιστία, ενώ είναι δυνατό μεταβολές στο φυσικό περιβάλλον και στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες μιας περιοχής, να επηρεάσουν το μέγεθος, την αξιοπιστία ή και να ακυρώσουν τη χρήση του (Σούλιος, 1995, Τσακίρης, 1996)

Το νερό λοιπόν είναι ένας ανανεώσιμος (γεγονός που μπορεί να μεταβάλλεται σε σχέση με το χώρο και το χρόνο) αλλά περιορισμένος πόρος. Τα αποθέματα του γλυκού νερού ανανεώνονται μέσω του υδρολογικού κύκλου, ωστόσο η διαθέσιμη ποσότητα νερού είναι περιορισμένη και η κατανομή του στο χώρο και το χρόνο άνιση. Περαιτέρω περιορισμό στη διαθεσιμότητα του νερού δημιουργεί και η ρύπανσή του από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (αστικές, βιομηχανικές, γεωργικές). Γενικά δεν είναι εμπόρευμα, όπως όλα τα άλλα, όμως δεν αποτελεί και ένα δημόσιο αγαθό στο οποίο η πρόσβαση μπορεί να είναι ανεξέλεγκτη.



Εικόνα 1.2: Ο υδρολογικός κύκλος (Illustration by John M. Evans, Howard Perlman, USGS Greek translation by Demetris Koutsoyiannis, National Technical University of Athens).

## 1.2 Υπόγεια ύδατα

### 1.2.1 Σχηματισμός υπόγειων υδροφορέων

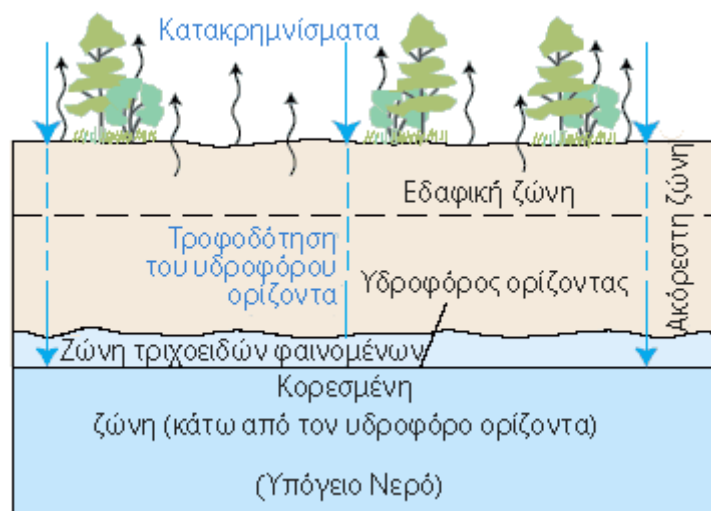
Ο σχηματισμός των υπόγειων υδροφορέων οφείλεται στη διαρκή κίνηση του υπόγειου νερού, τον υδρολογικό κύκλο. Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει διακρίνει 16 μέρη του υδρολογικού κύκλου, από τα οποία μας ενδιαφέρουν η διήθηση και η αποθήκευση του υπόγειου νερού.

Η διήθηση είναι η προς τα κάτω κίνηση του νερού από την επιφάνεια προς τα εδαφικά στρώματα και τα πετρώματα. Γενικά το υπόγειο νερό ξεκινά ως κατακρήμνισμα (βροχή ή χιόνι) και διηθείται μέσα στο έδαφος. Η ποσότητα του νερού που διηθείται εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων.

Τμήμα του νερού που διηθείται μένει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και μπορεί να καταλήξει τελικά σε ένα υδατόρευμα, ενώ ένα άλλο τμήμα του νερού μπορεί να διηθηθεί πιο βαθιά και να τροφοδοτήσει υπόγειους υδροφορείς. Αν οι υδροφορείς είναι κοντά στην επιφάνεια και αρκετά πορώδεις, ώστε να επιτρέπουν τη γρήγορη κίνηση του νερού, μπορεί να φτιαχτούν πηγάδια και να αντληθεί νερό για διάφορες ανάγκες. Το νερό μπορεί να ταξιδέψει μεγάλες αποστάσεις ή να μείνει αποθηκευμένο υπόγεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα πριν επανέλθει στην επιφάνεια μπαίνοντας σε ποτάμια ή τη θάλασσα.

Καθώς το νερό διηθείται προς το υπέδαφος, σχηματίζει συνήθως μία ακόρεστη και μία κορεσμένη ζώνη. Στην ακόρεστη ζώνη υπάρχει νερό αλλά και αέρας στα κενά (πόρους) του εδαφικού σχηματισμού. Το άνω μέρος της ακόρεστης ζώνης είναι η εδαφική ζώνη. Η εδαφική ζώνη έχει κενά που δημιουργούνται από τις ρίζες των φυτών, τα οποία επιτρέπουν

στο νερό να διηθηθεί. Το νερό στην ανώτερη αυτή ζώνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά. Κάτω από την ακόρεστη ζώνη βρίσκεται η κορεσμένη, στην οποία το νερό γεμίζει όλους τους πόρους του εδάφους.



**Εικόνα 1.3: Διήθηση κατακρημνισμάτων και σχηματισμός ακόρεστης/κορεσμένης ζώνης (Ο υδρολογικός κύκλος, Γεωλογική Υπηρεσία ΗΠΑ, USGS).**

Μεγάλες ποσότητες νερού βρίσκονται αποθηκευμένες κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το νερό αυτό συνεχίζει να κινείται, αν και συνήθως με πολύ μικρή ταχύτητα και συνεχίζει να αποτελεί μέρος του υδρολογικού κύκλου. Το περισσότερο υπόγειο νερό προέρχεται από διήθηση κατακρημνισμάτων. Τα ανώτερα στρώματα αποτελούν την ακόρεστη ζώνη και κάτω από αυτή βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη (Εικόνα 1.3). Ο όρος υπόγειο νερό χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κορεσμένη ζώνη. Ο χώρος αποθήκευσης του υπόγειου νερού αποδίδεται με τον όρο «υδροφορέας». Οι υδροφορείς ή τα υδροφόρα στρώματα, είναι μεγάλες αποθήκες νερού από τις οποίες εξαρτάται η εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού.

### 1.2.2 Σημασία των υπόγειων υδάτων

Η κατανόηση της σχέσης επιφανειακών και υπόγειων υδάτων είναι ουσιώδης στο πεδίο δράσης των διαχειριστών και των επιστημόνων που ασχολούνται με τα υδατικά συστήματα. Η διαχείριση μιας συνιστώσας του υδρολογικού συστήματος, όπως π.χ. ενός χειμάρρου ή ενός υδροφόρου ορίζοντα, συνήθως είναι εν μέρει αποτελεσματική, λόγω της υδραυλικής επικοινωνίας, σχέσης και ισορροπίας με άλλα υδατικά στοιχεία ή συστήματα. Το θέμα αυτό έχει να κάνει, τόσο με την ποσοτική πλευρά των υδατικών πόρων, όσο και με την ποιοτική τους πλευρά. Επίσης, το θέμα αυτό δεν περιορίζεται στις έμμεσες επιπτώσεις, που προκύπτουν από το γεγονός ότι τα υπόγεια νερά είναι επιφανειακά που πρωτογενώς ή δευτερογενώς, κατείσδυσαν ή από τα υπόγεια νερά που επιστρέφουν στην επιφανειακή απορροή μέσω πηγαίων εκφορτίσεων.

Το θέμα επεκτείνεται και στην άμεση ανάμειξη επιφανειακών και υπόγειων νερών και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν. Τέτοιες επιπτώσεις στα υδατικά

περιβάλλοντα (κυρίως από ανθρώπινη παρέμβαση) αφορούν την οξύτητα, τη θερμοκρασία και το διαλυμένο οξυγόνο. Η ροή ανάμεσα στα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά δημιουργεί ένα δυναμικό, τοπικό και συγκεκριμένο μικροκλίμα και μικροπεριβάλλον για την υδρόβια πανίδα, κοντά ή μέσα στη ζώνη ανάμειξης.

Οι διαμορφωμένες εσωτερικές (γεωλογική δομή) και εξωτερικές (ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, γεωμορφολογία) περιβαλλοντικές συνθήκες, καθορίζουν τόσο τα ποσοτικά (κίνηση και αποθήκευση υπόγειου νερού), όσο και τα ποιοτικά (χημισμός νερού, αντιδράσεις του με το περιβάλλον) χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής. Τα υπόγεια νερά αποτελούν το σύνολο σχεδόν των αποθεμάτων γλυκού νερού της γης, εκτιμώμενα στην τάξη μεγέθους των δέκα εκατομμυρίων δισεκατομμυρίων ( $10^{16}$ ) m<sup>3</sup>. Τα υπόγεια νερά συνδέονται με τα επιφανειακά, από τα οποία άλλωστε προέρχονται. Η σύνδεση αυτή είναι αμφίδρομη και ποικιλόμορφη. Τα επιφανειακά νερά οδηγούνται στο υπέδαφος, για να ενσωματωθούν στις υπόγειες υδροφορείες μέσα σε ένα πλαίσιο φυσικό ή τεχνητό. Στο φυσικό πλαίσιο εντάσσεται η πρωτογενής κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, αλλά και η δευτερογενής, κατά την απορροή. Στο τεχνητό πλαίσιο ανήκουν οι τεχνητοί εμπλουτισμοί των υδροφόρων οριζόντων. Η μετατόπιση υπόγειων νερών πίσω στα επιφανειακά γίνεται κι αυτή σε φυσικό και τεχνητό πλαίσιο. Στο πρώτο ανήκουν οι πηγαίες εκφορτίσεις, η τελική εκφόρτιση προς το επίπεδο βάσης (θάλασσα, λίμνη) και οι απώλειες από τριχοειδή ανύψωση και εξάτμιση. Στο δεύτερο οι αντλήσεις και κάθε μορφής αποστραγγίσεις.

Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών απαιτεί μικρότερες δαπάνες σε σχέση με την εκμετάλλευση των επιφανειακών, λόγω μικρότερου κόστους των υδροληπτικών έργων, μηδαμινών απαλλοτριώσεων, αλλά και μικρότερης διατάραξης του γενικότερου περιβάλλοντος. Παρουσιάζουν πάντα σε σχέση με τα επιφανειακά, μια σχετική σταθερότητα στη χημική σύσταση, στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και στους οργανοληπτικούς χαρακτήρες. Η εκμετάλλευση των υδροφόρων οριζόντων πραγματοποιείται με τη διαδικασία των αντλήσεων, που πολλές φορές, οδηγείται στην κατάσταση των υπεραντλήσεων.

Σε πολλές χώρες του κόσμου, και σε κράτη της Ε.Ε., το υπόγειο υδατικό δυναμικό αποτελεί ένα αξιοσημείωτο τμήμα των υδατικών όρων, πολλές φορές το επικρατούν. Η χρήση του δυναμικού αυτού εμφανίζει πλεονεκτήματα, αλλά υπόκειται σε περιορισμούς, με τη θεώρηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού μέσα στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου κάθε περιοχής, ετήσιου και υπερετήσιου. Εμφανίζει ευαισθησία σε εξωτερικές προσβολές, κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Συνδέονται με τα επιφανειακά νερά, καθώς προέρχονται απ' αυτά (πρωτογενής και δευτερογενής κατείσδυση) αλλά και τα ενισχύουν (εκφόρτιση πηγών στην απορροή). Το θέμα της διαχείρισης και της προστασίας των υπόγειων νερών δεν είναι δυνατό, παρά να θεωρηθεί μέσα στο γενικότερο θέμα διαχείρισης και προστασίας του συνολικού υδατικού δυναμικού. Η ιδιαιτερότητα των υπόγειων νερών ως υδατικού πόρου, είναι αποτέλεσμα των φυσικοχημικών του χαρακτήρων, της κατανομής τους και του καθεστώτος διακίνησής τους μέσα στο φυσικό μέσο και του ρόλου του στη συμπεριφορά του μέσου αυτού.



Τα υπόγεια νερά προσφέρουν, συνήθως, μια ποιότητα εξαιρετική, για όλες τις χρήσεις, με εξαίρεση, τα νερά που διακινούνται σε συγκεκριμένα γεωλογικά πεδία, που επιβαρύνουν την ποιότητά τους. Σημαντική είναι, επίσης η ποιοτική τους σταθερότητα στο χρόνο και η δυνατότητα αυτοκαθαρισμού τους, λόγω της στενής επαφής και της σχέσης τους με το γεωλογικό υλικό, με το οποίο ενεργοποιούν συγκεκριμένους μηχανισμούς καθαρισμού (διήθηση, κατακράτηση, προσρόφηση, οξειδώσεις στην ακόρεστη ζώνη, χημικές αντιδράσεις και παραγωγή ιζημάτων). Αποτέλεσμά όλων αυτών είναι ότι η επεξεργασία των υπόγειων νερών, για υδρευτική χρήση, είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη για τα επιφανειακά νερά.

Η διασύνδεση των υπόγειων υδατικών συστημάτων κάνει ώστε κάθε επιβάρυνση ενός υδροφόρου ορίζοντα να μεταφέρεται στα υπόλοιπα υδροφόρα στρώματα, με διαφορετικό βαθμό κάθε φορά, αναλόγως της υδρογεωλογικής δομής και των υδραυλικών συνθηκών, που επικρατούν στο εσωτερικό του υδατικού συστήματος. Από ποσοτικής πλευράς, η ευκολία που παρέχουν τα υπόγεια υδατικά συστήματα για απόληψη στιγμιαίων ή εποχικών παροχών, μεγαλύτερων από τις ετήσιες αφίξεις, οδηγεί μεν σε λύσεις μεγάλων προβλημάτων, οδηγεί όμως και σε ανεξέλεγκτες υπεραντλήσεις, πολλές φορές με αποτελέσματα μη αντιστρεπτά. Η θεώρηση του υπόγειου νερού αποκλειστικώς ως ενός πόρου στη διάθεση του ανθρώπου αποδυναμώνει τους πολλαπλούς του ρόλους στο φυσικό περιβάλλον, κυρίως ως βασικής συνιστώσας του υδρολογικού κύκλου, αλλά και ως βασικού στοιχείου της διαδικής σχέσης στερεής – υγρής φάσης, που διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής κάθε φορά, χαρακτηρίζει όλες τις πλευρές του φυσικού και γεωλογικού περιβάλλοντος.

Η παρουσία του υπόγειου νερού συμβάλλει, σε μεγάλο βαθμό, στις ζώνες ελεύθερων υδροφόρων οριζόντων στη ρύθμιση της υγρασίας των εδαφών, μία ρύθμιση χρήσιμη για τη δημιουργία και συνέχεια της βλάστησης, φυσικής ή καλλιεργήσιμης. Οι υδροφόροι ορίζοντες είναι οι κύριοι ρυθμιστές της επιφανειακής απορροής και διατηρούν τις σταθερές παροχές της περιόδου χαμηλών υδάτων και τα επίπεδα ορισμένων επιφανειακών υδατικών συγκεντρώσεων. Έτσι είναι απαραίτητο να υπογραμμιστεί ότι η διατήρηση και προστασία τους, πρέπει να έχουν ως σκοπό και στόχο, όχι μόνο την εγγυημένη προστασία των πλεονεκτημάτων τους, αλλά και τη διατήρηση της αναπαραγωγικότητάς τους (σε ποιότητα και ποσότητα), αλλά επίσης τη διατήρηση των εξαρτώμενων επιφανειακών πόρων.

### **1.3 Υδατικοί πόροι στην Ελλάδα – Υδατικά διαμερίσματα**

Το νερό είτε αντιμετωπίζεται ως «φυσικός πόρος», είτε ως «οικονομικό αγαθό», είτε ως «κοινωνικό αγαθό», είτε ως «περιβαλλοντικό στοιχείο» είναι βασικό και αναντικατάστατο στοιχείο, απαραίτητο όχι μόνο για την ανάπτυξη, αλλά και για την επιβίωση της ανθρωπότητας. Όμως είναι το πλέον ευαίσθητο και το πρώτο θιγόμενο περιβαλλοντικό συστατικό από τα δύο σύνδρομα της σύγχρονης κοινωνίας, την υπερκατανάλωση και τη ρύπανση.

Η αύξηση των πιέσεων στο υδατικό περιβάλλον καθιστά αναγκαία την εφαρμογή βιώσιμων πολιτικών ανάπτυξης και διαχείρισης των υδατικών πόρων, μέσω σχεδιασμού, υλοποίησης και βέλτιστης λειτουργίας έργων υποδομής και παρεμβάσεων διαχείρισης τόσο της προσφοράς όσο και της ζήτησης, πχ. μέσω μέτρων εξοικονόμησης και

επαναχρησιμοποίησης του νερού. Μια ορθολογική πολιτική ανάπτυξης οφείλει επίσης να λαμβάνει υπόψη την και τη διαχείριση ακραίων φαινομένων και κρίσεων, όπως τα προβλήματα λειψυδρίας και πλημμυρών αλλά και πιο μακροπρόθεσμους περιβαλλοντικούς στόχους, όπως η σε βάθος χρόνου προστασία των νερών και των σχετιζόμενων με αυτά οικοσυστημάτων, η βελτίωση της ποιότητας και της οικολογικής τους κατάστασης και βέβαια η σταδιακή μείωση απορρυπτόμενων ρυπαντικών ουσιών και η προοδευτική εξάλειψη τοξικών αποβλήτων.

Ειδικότερα για την Ελλάδα αξίζει να σημειωθεί ότι η χώρα μας είναι μια σχετικά ευνοημένη υδρολογικά χώρα της Μεσογείου, αν και η αναντιστοιχία της χρονικής και κυρίως χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων με τις χρονικές και χωρικές κατανομές της ζήτησης έχουν δημιουργήσει στο παρελθόν και εξακολουθούν να δημιουργούν προβλήματα έλλειψης νερού, ιδιαίτερα σε περιόδους ανομβρίας.

Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετά προβλήματα στον τομέα του νερού. Αυτά είναι η γενική έλλειψη στοιχείων και δεδομένων, η έλλειψη υποδομών, η πολυαρχία και η απουσία μίας εθνικής πολιτικής και ολιστικής θεώρησης, οπότε υπάρχουν θεσμικά και οργανωτικά προβλήματα. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός μίας ορθής υδατικής πολιτικής, έτσι ώστε να προστατεύει το νερό από τα παραπάνω προβλήματα και να εξασφαλίζει τις απαιτούμενες ποσότητες του στην κατάλληλη ποιότητα υπό συνθήκες αιφόρου ανάπτυξης και προστασίας του περιβάλλοντος. Στη χώρα μας υπάρχουν οι νόμοι Ν 1739/87 και Ν 3199/2003 που αφορούν τη προστασία και τη διαχείριση των υδατικών πόρων αλλά και την εναρμόνιση με την ευρωπαϊκή οδηγία 2000/60/ΕΚ (Μ.Α. Μιμίκου).

Έτσι τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν σε αυτήν την περίπτωση είναι να βρεθούν τα κύρια υδρολογικά χαρακτηριστικά της χώρας, οι εκμεταλλεύσιμοι υδατικοί πόροι (με τη χωρο-χρονική κατανομή και μεταβολή τους), την υφιστάμενη κατάστασή τους και εν τέλει να σχεδιασθεί η υδατική πολιτική. Για το σκοπό αυτό έχουν εκπονηθεί σχέδια διαχείρισης των υδατικών συστημάτων της χώρας. Έτσι έχει γίνει η διάκριση της χώρας σε 14 υδατικά διαμερίσματα, και έχει κατασκευασθεί υδατογραφικός χάρτης που περιέχει 46 λεκάνες απορροής (Εικόνα 1.6, 1.7). Οι υδατικοί πόροι μιας χώρας, αποτελούν το σύνολο του νερού που «παράγεται» σε αυτήν μαζί με την εξωτερική συνεισφορά νερού από τις γειτονικές χώρες. Στην Ελλάδα, το 80% των υδατικών πόρων χαρακτηρίζονται εσωτερικοί, δηλαδή παράγονται μέσα στη χώρα και το 20% προέρχονται από εξωτερική συνεισφορά. Σε αυτούς ανήκουν 5 διασυνοριακά ποτάμια και 3 διασυνοριακές λίμνες (Μ.Α. Μιμίκου).

Συγκεκριμένα το Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης (13), περιλαμβάνει τρεις (3) λεκάνες απορροής ποταμών,

- Ρεμάτων Βορείου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου (GR39), συνολικής έκτασης 3.676,06 km<sup>2</sup>,
- Ρεμάτων Νοτίου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου (GR40), συνολικής έκτασης 2.798,2 km<sup>2</sup>,
- Ρεμάτων Ανατολικής Κρήτης (GR41), συνολικής έκτασης 1.870,28 km<sup>2</sup>.

Ως «Λεκάνη Απορροής Ποταμού» ορίζεται η εδαφική έκταση από την οποία αποστραγγίζεται το σύνολο της απορροής (βροχόπτωση ή/και χιονόπτωση) μιας περιοχής, μέσω του υδρογραφικού δικτύου της (διαδοχικών ρευμάτων, χειμάρρων, ποταμών και πιθανώς λιμνών) και παροχετεύεται στη θάλασσα μέσω της εκβολής (ή δέλτα) ποταμού.



*Εικόνα 1.4: Υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας (Γ. Σούλιος - Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπόγειου νερού, Τμήμα Γεωλογίας - Τομέας Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).*



**Εικόνα 1.5: Υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας.**

Όσο αφορά τον εμπλουτισμό των υδατικών πόρων της χώρας, η κατακρήμνιση είναι η κύρια συνιστώσα του, τόσο στους επιφανειακούς όσο και στους υπόγειους υδροφορείς. Η μέση ετήσια κατακρήμνιση έχει υπολογιστεί στα 849 mm, με τη δυτική Ελλάδα να δέχεται το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων. Η ανατολική Ελλάδα με τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη έχουν σημαντικά μικρότερες βροχοπτώσεις. Στο εσωτερικό επίπεδο, η εξατμισοδιαπνοή είναι μία σημαντική υδρολογική απώλεια. Τόσο από τους επιφανειακούς

φορείς, όσο και από τις ανώτερες εδαφικές στρώσεις είναι αρκετά υψηλή, ιδιαίτερα στις ανατολικές περιοχές της χώρας (Μ.Α. Μιμίκου).

### 1.4 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Στην περιοχή του Τυμπακίου (Νομός Ηρακλείου), λόγω της ανεξέλεγκτης άντλησης των υπογείων υδάτων με σκοπό την άρδευση των αγροτικών περιοχών και σε συνδυασμό με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, έχει ενταθεί το φαινόμενο κατά το οποίο η στάθμη του γλυκού νερού μειώνεται. Οπότε καθώς πρόκειται για παράκτια υδροφόρα στρώματα στη συνέχεια παρατηρείται εισχώρηση αλμυρού νερού μέσα σε αυτά.

Σκοπός λοιπόν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι να γίνει ικανοποιητική προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα του Τυμπακίου, έτσι ώστε να:

- Μελετηθεί η γεωμορφολογία και η υδρολογία της περιοχής
- Προσομοιωθεί σωστά η κατάσταση του υδροφορέα (υδραυλικά ύψη) έτσι ώστε να υπάρχει αντιπροσωπευτική εικόνα της πιεζομετρίας της περιοχής
- Εξεταστεί η εισχώρηση του θαλασσινού νερού μέσα στον υδροφορέα με την προσέγγιση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και μεταβλητής πυκνότητας
- Συγκριθούν τα αποτελέσματα της εργασίας με άλλες μελέτες που έχουν γίνει στην περιοχή για να εξετασθεί η ακρίβειά τους αλλά και για να κατανοηθεί η έκταση του προβλήματος στην περιοχή.

### 1.5 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια, στα οποία γίνεται ανάλυση όλων των εννοιών που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του προβλήματος της υφαλμύρωσης στην περιοχή του Τυμπακίου και της μεθόδου προσέγγισής του.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην σπουδαιότητα του νερού γενικά. Στη συνέχεια γίνεται η διάκριση ανάμεσα σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα και στον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται τα υπόγεια ύδατα. Αναφέρονται η κατάσταση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα και στην περιοχή της Κρήτης, ο σκοπός και η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των υπόγειων υδροφορέων και των χαρακτηριστικών τους, καθώς και της ροής του νερού σε αυτούς. Αναφέρονται δηλαδή νόμοι, ιδιότητες και εξισώσεις απαραίτητες για την κατανόηση αυτών που αναλύονται παρακάτω.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο φαινόμενο της υφαλμύρινσης τόσο γενικά όσο και σε όλη την Ελλάδα. Έπειτα εξετάζεται μόνο στο Υδατικό Διαμέρισμα της Κρήτης και παραθέτονται αποτελέσματα μελετών από διάφορες περιοχές του νησιού που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα. Τέλος αναφέρονται οι μέθοδοι μελέτης του φαινομένου αλλά και οι τρόποι αντιμετώπισής του.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση της περιοχής μελέτης, οπότε εξετάζονται τα κλιματολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά, η γεωλογία και υδρογεωλογία της

περιοχής, ανθρωπογενή χαρακτηριστικά και τελικά το φαινόμενο της υφαλμύρισης σε αυτήν.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύεται το λογισμικό MODFLOW και συγκεκριμένα το SEAWAT με το οποίο γίνεται η προσομοίωση του φαινομένου στην περιοχή μελέτης. Οπότε παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας και οι εξισώσεις που επιλύονται, τα δεδομένα που είναι απαραίτητο να εισαχθούν, οι αρχικές και οριακές συνθήκες του. Έπειτα γίνεται ανάλυση του στησίματος του μοντέλου καθώς και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτό.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και των μέτρων που μπορούν να ληφθούν για να τον περιορισμό του φαινομένου.

Τέλος γίνεται παρουσίαση της βιβλιογραφίας, δηλαδή των διάφορων πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

### 2.1 Είδη υπόγειων υδροφορέων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υδροφορέας είναι το πέτρωμα ή ο σχηματισμός που ως γεωλογικό στρώμα ή στρωματοειδής σχηματισμός περιέχει εκμεταλλεύσιμο νερό. Λέγεται μερικές φορές και ταμιευτήρας. Ένας ενιαίος γεωλογικός σχηματισμός δεν είναι κατ' ανάγκη υδροφόρος σε όλο το πάχος, εφόσον δεν είναι υδροφόρος σε όλο το πάχος του. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι η επιφάνεια στην οποία η πίεση του νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική, πρόκειται δηλαδή για την υδροστατική στάθμη (Σούλιος, 2010).

Τα είδη των υδροφόρων στρωμάτων μπορούμε να τα διακρίνουμε με βάση τη θέση της στάθμης τους ως προς τον υδροφορέα ή ανάλογα με τη θέση της βάσης τους.

**Ελεύθερο υδροφόρο στρώμα ή φρεάτιο στρώμα (*unconfined aquifer*):** είναι το υδροφόρο στρώμα εκείνο του οποίου η στάθμη (ή ο ορίζοντας) που λέγεται και φρεάτια στάθμη βρίσκεται μέσα στον υδροφορέα ή το πολύ στην οροφή του σε όλη εκείνη την έκταση, στην οποία μπορεί να χαρακτηριστεί το στρώμα ως ελεύθερο. Στο ελεύθερο υδροφόρο στρώμα η φρεάτια στάθμη συμπίπτει με την πάνω επιφάνεια της ζώνης κορεσμού. Λέμε στην περίπτωση αυτή ότι το υδροφόρο στρώμα έχει ελεύθερη επιφάνεια, δηλαδή αυτή η επιφάνεια δεν εμποδίζεται από αδιαπέρατους σχηματισμούς να πάρει τη φυσική της θέση. Στην υδροστατική στάθμη των υδροφόρων αυτών στρωμάτων η πίεση του νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική (Σούλιος, 2010).

**Εγκλωβισμένο ή υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (*confined aquifer*):** είναι εκείνο το υδροφόρο στρώμα που υπόκειται ενός αδιαπέρατου σχηματισμού και η υδροστατική του στάθμη εμποδίζεται να λάβει τη φυσική της θέση μέσα στον υδροφορέα και βρίσκεται πάνω από αυτόν. Όταν ανοίξουμε φρέαρ ή γεώτρηση παρατηρούμε ότι μέσα σε αυτά το νερό ανεβαίνει από τον υδροφορέα.

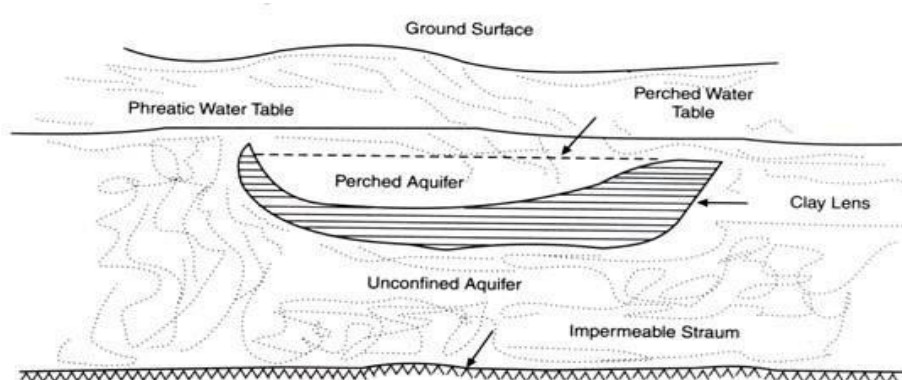
Το υπό πίεση υδροφόρο στρώμα δεν έχει ελεύθερη επιφάνεια. Σε όλα τα σημεία του στρώματος αυτού, όπως και στην οροφή του, η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Στο υπό πίεση υδροφόρο στρώμα η στάθμη του δεν συμπίπτει με την πάνω επιφάνεια κορεσμού, αλλά βρίσκεται πάνω από αυτήν. Η επιφάνεια αυτή λέγεται πιεζομετρική επιφάνεια και καθορίζεται από την υδροδυναμική ή υδροστατική ισορροπία του νερού που υπάρχει στον υδροφορέα. Για τους ελεύθερους υδροφόρους ορίζοντες η πιεζομετρική τους επιφάνεια συμπίπτει με την ελεύθερη επιφάνειά τους.

Μία υποπερίπτωση των υπό πίεση υδροφόρων στρωμάτων είναι το **αρτεσιανό υδροφόρο στρώμα (*artesian aquifer*)** στο οποίο η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Αποτέλεσμα της διάταξης αυτής είναι να σχηματίζεται πίδακας, λόγω υδροστατικής πίεσης, όταν ανοίγεται οπή (π.χ. φρέαρ, γεώτρηση) από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το υδροφόρο στρώμα (Σούλιος, 2010).

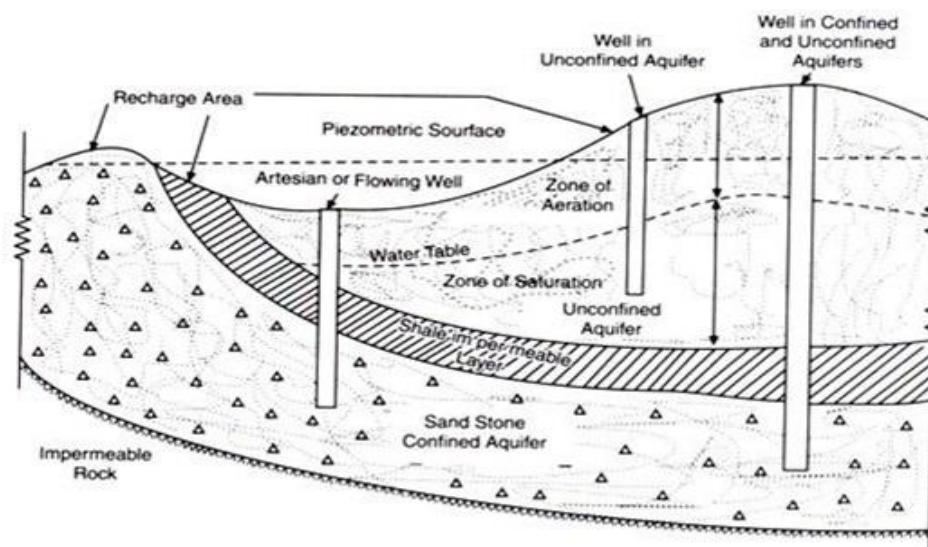
**Περιορισμένος υδροφορέας με διαρροή:** πρόκειται για ένα υδροφόρο στρώμα το οποίο περιορίζεται (άνωθεν και κάτωθεν) από δύο γεωλογικούς σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας, ένας εκ των οποίων παρουσιάζει διαρροή (θετική ή αρνητική) η οποία επιδρά στην παροχή του υδροφορέα. Αν και η διαρροή είναι ροή κάθετης κατεύθυνσης,

εντούτοις θεωρούμε ότι λόγω του ότι είναι σημαντικά μικρότερη της κύριας ροής του υδροφορέα, δεν επηρεάζεται η αρχική υπόθεση για οριζόντια ροή (Καρατζάς, 2016).

**Επικρεμάμενο υδροφόρο στρώμα (perched aquifer):** είναι το περιορισμένο υδροφόρο στρώμα που βρίσκεται πάνω από τον κύριο υδροφόρο ορίζοντα με τον οποίο δεν έχει άμεση ή καμία υδραυλική διασύνδεση. Είναι ένας υδροφορέας απομονωμένος συνήθως με τη δική του έξοδο (πηγή) προς την επιφάνεια του εδάφους. Είναι κατά κανόνα μικρός, περιορισμένος προς τα κάτω από αδιαπέρατο στρώμα, αλλά με δική του στάθμη. Επικρεμάμενα υδροφόρα στρώματα είναι συχνά επικαρστικά. Κάτω από τη βάση του υπάρχει μη κορεσμένη ζώνη και σχετικά αδιαπέρατος ή και στεγανός σχηματισμός (Σούλιος, 2010).



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ελεύθερου και επικρεμάμενου υδροφορέα.



Εικόνα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ενός υδροφόρου συστήματος.

## 2.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά – Παράμετροι υδροφορέων

### 2.2.1 Υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head)

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία ανά μονάδα όγκου ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της



υδροστατικής. Πρακτικά η ενέργεια αυτή ( $h$ ) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) είναι ίση με το άθροισμα του φορτίου πίεσης  $P/\gamma$  (pressure head) και φορτίου ύψους, της απόστασης δηλαδή από το επίπεδο αναφοράς  $z$  (elevation head):

$$h = \left(\frac{P}{\gamma}\right) + z, \text{ όπου}$$

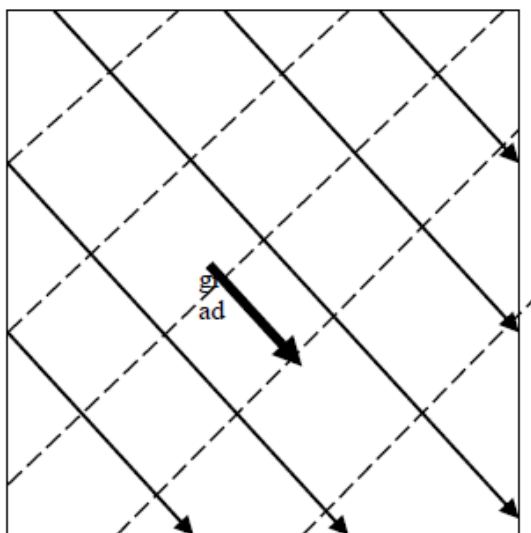
$P$ = υδροστατική πίεση και  $\gamma$ = το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Το φορτίο  $h$  αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

Έτσι η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς. Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου (ισοδυναμικές γραμμές) μπορεί να απεικονισθούν με τη βοήθεια χαρτών. Οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές γραμμές (Εικόνα 2.3).

Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{grad } h = \frac{dh}{dl}, \text{ (Βουδούρης, 2016).}$$



Εικόνα 2.3: Σχέση γραμμών ροής, ισοδυναμικών γραμμών και  $\text{grad } h$  (Καρατζάς, 2016).

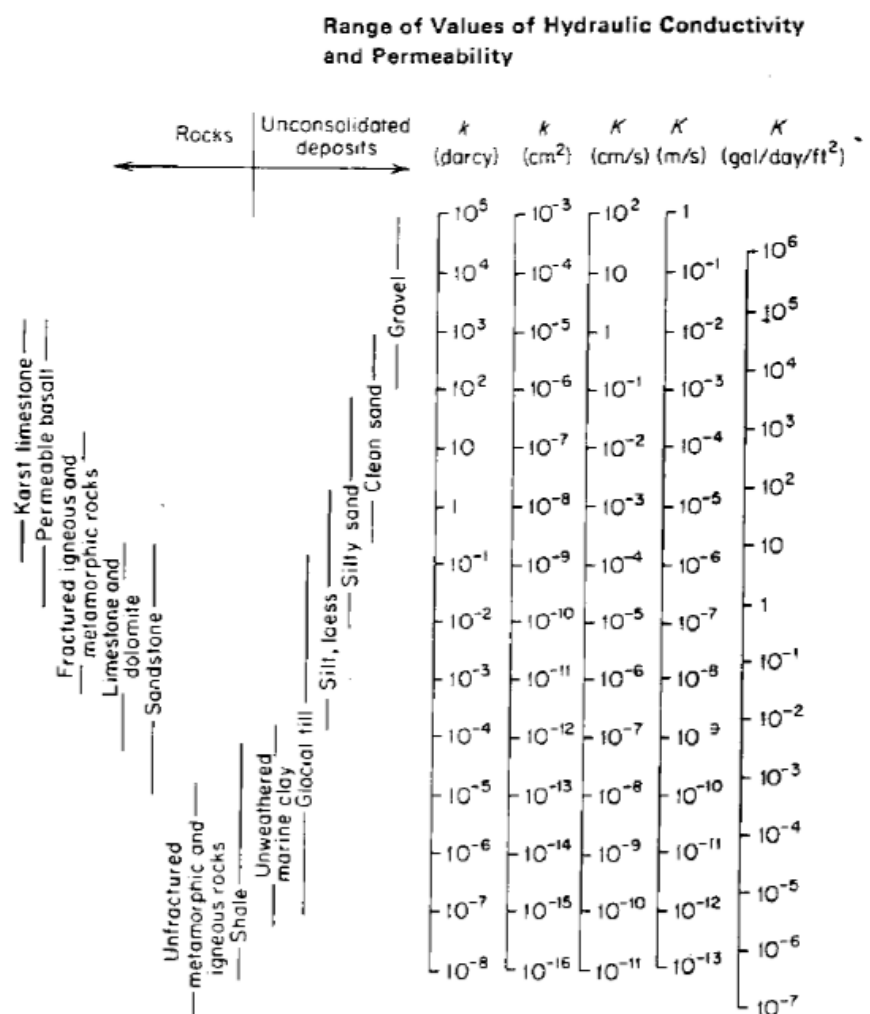
### 2.2.2 Διαπερατότητα – Υδροπερατότητα (Permeability – Hydraulic conductivity)

Η διαπερατότητα είναι μία σταθερά που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) με διαστάσεις  $L^2$ .

Η υδροπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα ( $K$ ) χρησιμοποιείται στην Υδρογεωλογία γιατί το ρευστό είναι το νερό. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν

μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου του νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους, με διαστάσεις L/T.

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται με επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, με δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, με εργαστηριακές μεθόδους, με γεωφυσικές μεθόδους και τέλος με ιχνηθετήσεις (Βουδούρης, 2016).



Εικόνα 2.4: Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, (Freeze & Cherry, 1979).

### 2.2.3 Μεταβιβασιμότητα (Transmissivity)

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας (T) χρησιμοποιείται ευρύτατα στην υπόγεια υδραυλική. Εκφράζει τον όγκο του νερού που περνά από μία μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) με το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος (b):

$T = K * b$  , με διαστάσεις  $L^2/T$  (Βουδούρης, 2016, Καρατζάς, 2016).

#### 2.2.4 Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Ο συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας ( $S$ ) είναι ο όγκος του νερού που μπορεί να αποληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφορέα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \Delta V / (A * \Delta h) , \text{ όπου}$$

$\Delta V$ = είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται (ή προστίθεται) από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας  $A$ , εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου  $\Delta h$ .

Από τον παραπάνω ορισμό προκύπτει ότι ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης ( $\Delta h/\Delta t$ ) σε έναν υδροφορέα επιφάνειας  $A$  και συντελεστή αποθηκευτικότητας  $S$ , για άντληση με παροχή  $Q$ , χωρίς να συμβαίνει εμπλουτισμός, δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{Q}{S * A} .$$

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι 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 νερού σε κάθε είδος υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα και συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχόμενου σε αυτόν υπόγειου νερού. Πρακτικά σημαίνει ότι για να πάρουμε αξιόλογες ποσότητες νερού από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα (Βουδούρης, 2016).

#### 2.2.5 Ολικό και ενεργό πορώδες

Τα διάφορα πετρώματα και οι υδροφόροι σχηματισμοί παρουσιάζουν περισσότερο ή λιγότερο ασυνέχειες, πόρους και γενικά κενά διάφορων τύπων. Ο βαθμός και η ένταση με τα οποία παρουσιάζονται αυτά τα κενά, εκφράζεται με μία υδρογεωλογική παράμετρο το ολικό πορώδες  $n$ .

Πορώδες (porosity) ολικό ή πραγματικό (total) ονομάζεται ο λόγος του όγκου όλων των κενών  $V_v$  ενός πετρώματος ή σχηματισμού δια του ολικού όγκου  $V_o$  αυτού, δηλαδή:

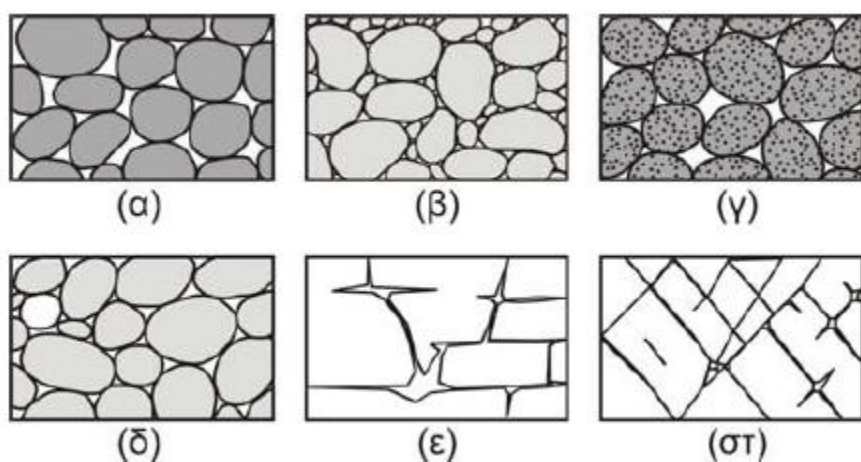
$$n = \frac{V_v}{V_o} .$$

Από τον ορισμό του προκύπτει ότι το ολικό πορώδες είναι απόλυτος αριθμός (δεν έχει δηλαδή διαστάσεις), και μπορεί να εκφράζεται ως κλάσμα ή ως ποσοστό. Το πορώδες επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (κοκκώδες ή ρωγμώδες). Έτσι οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι το σχήμα και η σύσταση και διάταξη των κόκκων του εδάφους ή η πυκνότητα και τα ανοίγματα των ρωγμών (Σούλιος, 2010).

Ενεργό πορώδες (effective porosity) είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων  $i$  δεν επικοινωνούν μεταξύ τους (dead – end porous). Πρόκειται λοιπόν για το λόγο του όγκου του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή του όγκου του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων προς το συνολικό όγκο του εδάφους:

$$n_e = \frac{V_v}{V_o}.$$

Στα ιζηματογενή πετρώματα δεν παρατηρούνται διαφορές μεταξύ ολικού και ενεργού πορώδους, ενώ στα αργιλώδη συναντάμε σημαντικές διαφορές (Καρατζάς, 2016).



*Εικόνα 2.5: Παραδείγματα διάκενων: α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, ε) πορώδες υπό διάλυση, στ) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923).*

### 2.2.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία (Homogeneity and Isotropy)

Όλες οι θεωρίες για ροή, αποθήκευση, κατανομή, κλπ. του υπόγειου νερού στηρίζονται σε μία αναγκαία υπόθεση την ομοιογένεια του υπεδάφους. Ομοιογενές χαρακτηρίζεται ένα υδροφόρο στρώμα ως προς μία ιδιότητά του όταν είναι ίδια σε όλα τα σημεία του. Αντίστοιχα όταν οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά πρόκειται για ετερογενές υδροφόρο στρώμα (Καρατζάς, 2016).

Για παραμέτρους που εκφράζονται με ανυσματικά μεγέθη, όπως π.χ. είναι η περατότητα που ενδιαφέρει ιδιαίτερα την υδρογεωλογία, υπεισέρχεται η έννοια της ισοτροπίας. Ισότροπος χαρακτηρίζεται ένας σχηματισμός για μία ανυσματική ιδιότητα όταν προς όλες τις κατευθύνσεις η ιδιότητα αυτή έχει την ίδια τιμή. Αν η τιμή της ιδιότητας αυτής αλλάζει κατά διάφορες διευθύνσεις τότε το έδαφος είναι ανισότροπο. Είναι δυνατό ένας σχηματισμός να είναι ισότροπος ως προς μία ιδιότητα π.χ. την αντοχή σε συμπίεση και ανισότροπος ως προς μία άλλη π.χ. την περατότητα (Σούλιος, 2010).

## 2.3 Κίνηση του υπόγειου νερού

### 2.3.1 Νόμος του Darcy (Darcy's Law)

Το υπόγειο νερό στη φυσική του κατάσταση βρίσκεται σε μία διαρκή – σταθερή κίνηση. Η κίνηση αυτή ελέγχεται από αποδεδειγμένες υδραυλικές αρχές. Η ροή μέσα στους υδροφορείς, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι φυσικά πορώδη μέσα, μπορεί να περιγραφεί από το νόμο του Darcy. Η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία είναι ένα μέτρο περατότητας των μέσων, είναι μία σημαντική σταθερά στην εξίσωση της ροής. Οι εφαρμογές του νόμου του Darcy επιτρέπουν να υπολογιστούν η κατεύθυνση και ο ρυθμός της υπόγειας ροής (Todd & Mays, 2005).

Όταν ένα μόριο του νερού ρέει μέσα στο υπέδαφος και ιδιαίτερα σε πορώδη πετρώματα, τότε δεν ακολουθεί μία ευθύγραμμη τροχιά, αλλά μία τροχιά πολύ σύνθετη γιατί προσκρούει στα τοιχώματα των τεμαχίων του πετρώματος αλλά και στα γειτονικά του μόρια. Έτσι μία φλέβα ρέοντος νερού αλλάζει συνεχώς διεύθυνση ροής και διακλαδίζεται. Όλες όμως αυτές οι αλλαγές διεύθυνσης και οι προσκρούσεις προκαλούν ιδιαίτερες τριβές με αποτέλεσμα να έχουμε απώλειες δηλαδή μείωση του υδραυλικού φορτίου. Η μείωση αυτή του φορτίου που εκφράζεται με την υδραυλική κλίση, αποτελεί το βασικό στοιχείο για τις ροές διήθησης, δηλαδή για τις υπόγειες ροές (Σούλιος, 2010).

Το 1856 ο Darcy (Γάλλος μηχανικός υδραυλικής) μελέτησε την ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα (Εικόνα 2.6). Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος του συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Η ανωτέρω διατύπωση είναι γνωστή σαν το Νόμο του Darcy – Darcy's Law (Καρατζάς, 2016).

Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy:

$$\frac{Q}{A} = -K * \frac{\Delta h}{L} \rightarrow q = -K * \frac{\Delta h}{L}, \text{ όπου}$$

$Q$ : η παροχή ( $L^3/T$ )

$A$ : η επιφάνεια ( $L^2$ )

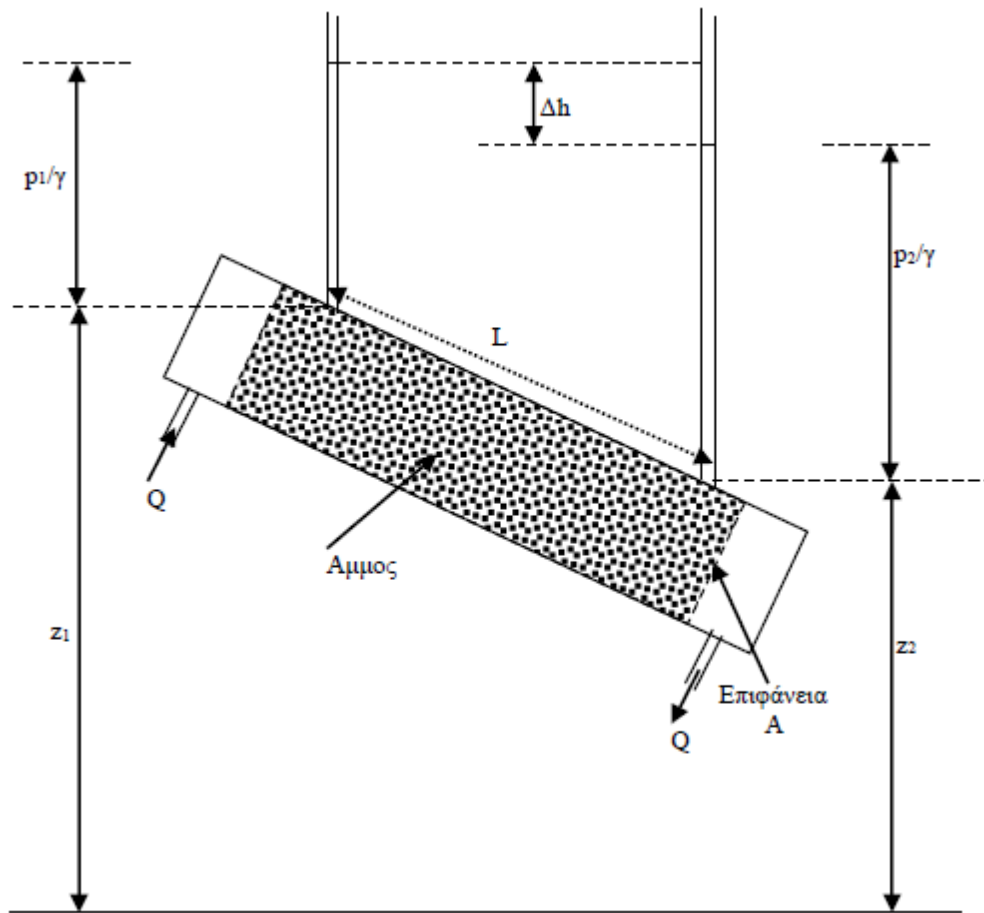
$K$ : η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$ : η απώλεια του φορτίου που εκφράζεται ως  $\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2\right)$  ( $L$ )

$L$ : το μήκος της στήλης ( $L$ )

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

**Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο (Καρατζάς, 2016).**



Εικόνα 2.6: Το πείραμα του Darcy – Darcy's Law (Καρατζάς, 2016).

### 2.3.2 Κριτήριο χρήσης του νόμου του Darcy

Για να εφαρμόσουμε το νόμο Darcy είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το εύρος εφαρμογής του. Η ταχύτητα όταν έχουμε στρωτή ροή είναι ανάλογη της υδραυλικής κλίσης, οπότε είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι ο νόμος του Darcy εκφράζει τη στρωτή ροή στα πορώδη μέσα. Για ροή σε αγωγούς και σωλήνες, ο αριθμός Reynolds, είναι ένα αδιάστατο μέτρο, που λειτουργεί σαν κριτήριο για να διακρίνουμε την στρωτή και τυρβώδη ροή. Έτσι ο αριθμός Reynolds χρησιμοποιείται για να καθορίσει το όριο των ροών που μπορούν να περιγραφούν από το νόμο του Darcy (Todd & Mays, 2005). Αυτό συμβαίνει γιατί ο νόμος του Darcy δεν εκφράζει παρά μία γραμμική σχέση μεταξύ της ταχύτητας ροής και των απωλειών φορτίου (υδραυλικής κλίσης) (Σούλιος, 2010).

Ο αριθμός Reynolds εκφράζεται ως

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu},$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $v$  η ταχύτητα,  $D$  η διάμετρος (αγωγού/σωλήνα), και  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Από πειράματα έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει για  $Re < 1$  και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και  $Re = 10$ . Αυτό λοιπόν είναι και το άνω όριο ισχύος του νόμου

Darcy. Είναι καλύτερα να δίνεται ένα εύρος τιμών παρά μία μόνο τιμή ως όριο, γιατί καθώς αυξάνονται οι δυνάμεις αδράνειας η τυρβώδης ροή αυξάνεται βαθμιαία (Todd & Mays, 2005).

Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει τη χρήση του νόμου του Darcy, χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων όπου έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση π.χ. κοντά σε ένα φρέαρ άντλησης, και σε περιπτώσεις που έχουμε τυρβώδη ροή π.χ. περιπτώσεις που έχουμε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2016).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ

### 3.1 Το φαινόμενο και που συναντάται

Το αλμυρό νερό είναι από τους πιο συχνούς ρυπαντές των υπογείων υδάτων. Η εισροή του αλμυρού νερού εμφανίζεται όταν το αλμυρό νερό μετατοπίζει ή ανακατεύεται με το νερό ενός υδροφορέα. Το φαινόμενο συναντάται σε βαθείς υδροφορείς λόγω της ανόδου αλμυρών νερών γεωλογικής προέλευσης, σε ρηχούς υδροφορείς λόγω επιφανειακών απορροών και σε παράκτιους υδροφορείς λόγω διείσδυσης θαλασσινού νερού. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ δύο αναμειγμένων υγρών σε πορώδη μέσα έχει μελετηθεί διεξοδικά τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό (πειράματα πεδίου) επίπεδο (Todd & Mays, 2005). Το πρόβλημα της υφαλμύρινης, λόγω διείσδυσης θαλασσινού νερού (seawater intrusion) στους παράκτιους υδροφορείς είναι γνωστό τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες χώρες (Ισραήλ, ΗΠΑ, Ισπανία, Κύπρο κ.λπ.) (Βουδούρης, 2016).

Η εισροή του αλμυρού νερού στους υπόγειους υδροφορείς είναι κυρίως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα περισσότερα μεγάλα υδροφόρα στρώματα βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, σε φυσικές πηγές αλμυρού υπόγειου νερού, ή σε άλατα από λύματα που προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Γενικά, το ρηχό γλυκό νερό υπέρκειται του αλμυρού γιατί η έκπλυση που γίνεται απομακρύνει άλατα από αρχαίες υποθαλάσσιες εναποθέσεις. Όμως σε μεγαλύτερα βάθη όπου η κίνηση του υπόγειου νερού είναι πολύ μικρότερη, αυτή η μετατόπιση του αλμυρού νερού είναι πολύ πιο αργή. Επιπλέον, σε μεγάλα βάθη (μερικές χιλιάδες μέτρα) είναι φυσικό να βρίσκονται πηγές αλμυρού νερού.

Το αλμυρό νερό μπορεί να καταλήξει στους υδροφορείς λόγω διάφορων παραγόντων:

- Διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιες περιοχές.
- Θαλασσινό νερό το οποίο είχε εισέλθει μέσα στους υδροφορείς σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους.
- Άλατα από διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς.
- Νερό το οποίο συγκεντρώνεται λόγω εξάτμισης σε λιμνοθάλασσες, παραλίες ή άλλες περιφραγμένες περιοχές.
- Ροές που επιστρέφουν σε ρεύματα μετά την άρδευση περιοχών.
- Ανθρώπινα απορρίματα που περιέχουν άλατα.

Οι μηχανισμοί οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την διείσδυση του αλμυρού νερού σε υδροφορείς κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες. (1) Μείωση ή αντιστροφή της υδραυλικής κλίσης των υπογείων υδάτων το οποίο επιτρέπει στο πιο πυκνό αλμυρό νερό να μετατοπίζει το γλυκό νερό. Αυτό συναντάται κυρίως σε παράκτιους υδροφορείς που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα και η φυσική υδροδυναμική ισορροπία διαταράσσεται λόγω της άντλησης με πηγάδια. (2) Καταστροφή των φυσικών ορίων που μπορεί να διαχωρίζαν τα αλμυρά και γλυκά ύδατα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η κατασκευή ενός παράκτιου καναλιού αποστράγγισης το οποίο θα επιτρέπει στο θαλασσινό νερό να εισέρχεται στην ενδοχώρα και να διεισδύει στο υδροφόρο στρώμα. (3) Υπόγεια διάθεση απορριμμάτων που περιέχουν αλμυρό νερό, όπως μέσα σε φρέατα απόρριψης,



χώρους υγειονομικής ταφής, ή σε άλλες περιοχές απομάκρυνσης απορριμμάτων (Todd & Mays, 2005).

Γενικά η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπόγειων νερών παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς, δηλαδή της εισροής θαλάσσιου νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Η εισροή αυτή μπορεί να είναι μόνιμη ή συνηθέστερα μη μόνιμη ροή. Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και αφορά συγκεκριμένους υδροφορείς, με γνωστά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Πρέπει να τονισθεί ότι το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο, γι' αυτό η αντιμετώπισή του συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Προβλήματα υφαλμύρισης παρατηρούνται σε μεγάλη – περιφερειακή ή μικρή – τοπική κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως π.χ. από εγχειοβελτιωτικά έργα. Λέγοντας μικρής κλίμακας προβλήματα, εννοείται η επίδραση που παρατηρείται στην διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού στην περιοχή γύρω και κάτω από ένα φρέαρ άντλησης.

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στις περισσότερες περιπτώσεις αναγνωρίζεται από τους υπεύθυνους υδρογεωλόγους και μηχανικούς. Συνήθως όμως είναι άγνωστη η έκτασή του, λόγω έλλειψης στοιχείων. Δεν είναι δηλαδή εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Κατά την εισροή της θάλασσας σε έναν υδροφορέα συνθήκες μόνιμης ροής στην πραγματικότητα δεν αποκαθίστανται εύκολα. Επιπλέον τις περισσότερες φορές το πρόβλημα φτάνει σε ανεπίτρεπτα όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν λαμβάνονται εγκαίρως. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών είναι συνήθως συνδεδεμένη με οικονομικούς, κοινωνικούς, νομικούς και πολιτικούς παράγοντες και αυτό δυσχεραίνει ιδιαίτερα το πρόβλημα (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).

### **3.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην Ελλάδα**

Ποσοστό περίπου 40% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές, σε απόσταση μικρότερη των 50 km από την ακτή. Στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αντίστοιχα μια δημογραφική κατάρρευση των ορεινών περιοχών και συσσώρευση του πληθυσμού στις παράκτιες περιοχές. Πολλές από αυτές τις περιοχές μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αγροτουριστικά κέντρα, με την έννοια των γεωργικά εκσυγχρονισμένων και τουριστικά ανεπτυγμένων περιοχών, που περικλείουν ένα δομημένο και οικιστικά συμπυκνωμένο αστικό χώρο (Βουδούρης, 2005). Το μήκος των ακτογραμμών της Ελλάδας στο σύνολο της χώρας ανέρχεται σε 16.000 km, ενώ στην ηπειρωτική χώρα είναι 6.200 km (Μουτζούρης, 2002).

Η αστικοποίηση σε συνδυασμό με την τουριστική ανάπτυξη και την εντατική γεωργία αύξησαν τις πιέσεις που ασκούνται στους υδατικούς πόρους. Οι αλλαγές στη γεωργία (αναδιάρθρωση με δυναμικές και πολύ απαιτητικές σε νερό καλλιέργειες) οδήγησαν σε αύξηση τόσο των αρδευόμενων εκτάσεων, όσο και στην αύξηση της κατανάλωσης σε αρδευτικό νερό. Έτσι αυξάνεται επιπλέον η ζήτηση κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, καθιστώντας κρίσιμη την κατάσταση των υπόγειων νερών.

Η αυξανόμενη ζήτηση για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών οδηγεί σε εξάρτηση από τα υπόγεια νερά. Λόγω του ότι, οι παροχές των ποταμοχειμάρρων επηρεάζονται από τις εποχιακές μεταβολές (την ξηρή περίοδο ελαττώνονται ή μηδενίζονται), τα υπόγεια νερά αποτέλεσαν τον πιο αξιόπιστο υδατικό πόρο και γι' αυτό αυξήθηκαν προοδευτικά οι απολήψεις υπόγειων νερών σε πολλές παράκτιες περιοχές (Βουδούρης, Scheidleder, Δασκαλάκη, 2004).

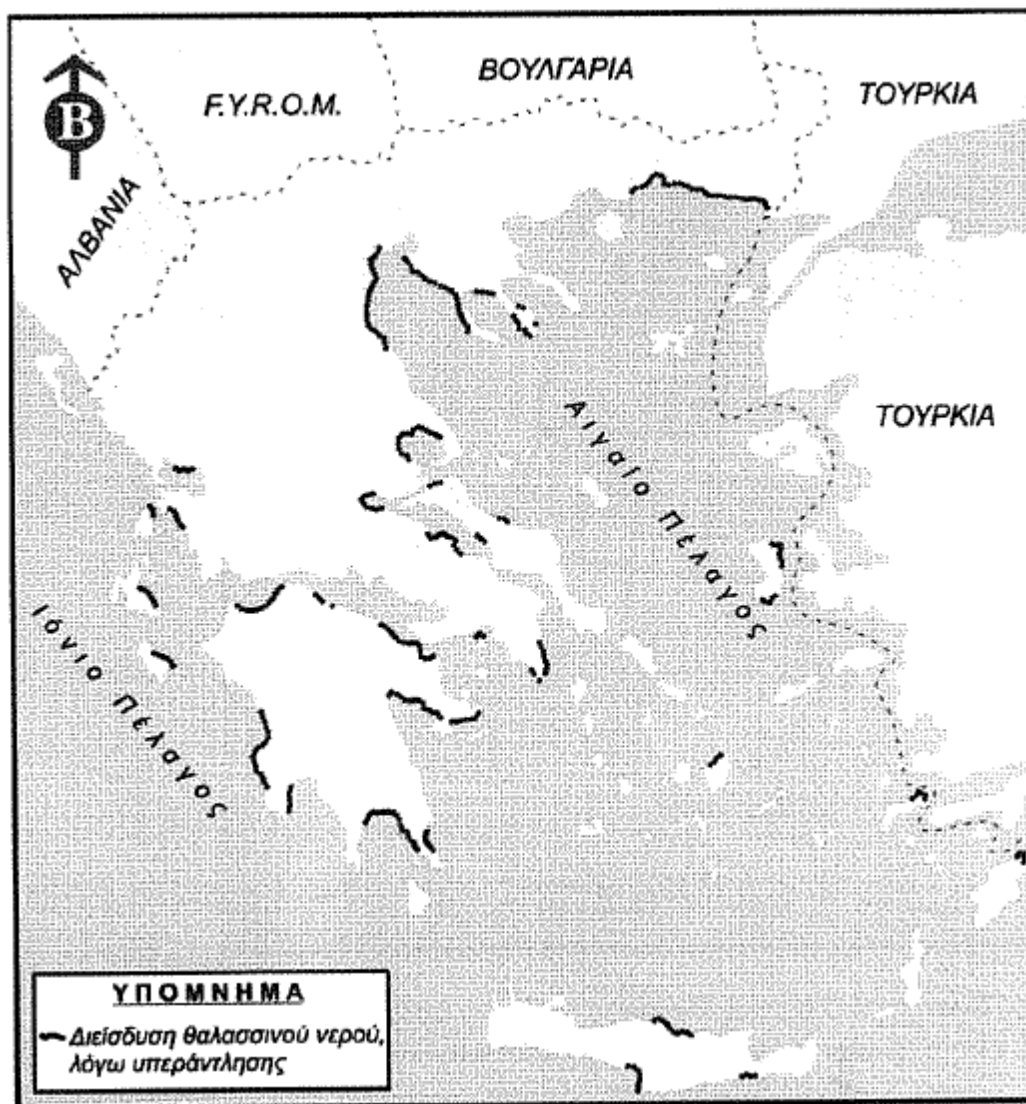
Η ραγδαία επέκταση των υπεραντλήσεων τα τελευταία χρόνια για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της αγροτικής και κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης παρατηρήθηκε σε περιοχές όπου οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι ήταν ανεπαρκείς, αβέβαιοι ή απαιτούν μεγάλο κόστος για την εκμετάλλευσή τους. Οι αρδεύσεις αποτελούν την κύρια αιτία υπεραντλήσης στις γεωργικές περιοχές της Ελλάδας και των χωρών της Μεσογείου γενικότερα. Η υπεραντλήση αυτή οδήγησε σε εξάντληση των υδατικών πόρων και υποβάθμιση της ποιότητας των νερών. Οι δύο κύριες επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων νερών είναι η υφαλμύριση λόγω θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους υδροφορείς και η νιτρορύπανση λόγω εντατικής χρήσης λιπασμάτων στη γεωργία.

Λόγω της γειτνίασης με τη θάλασσα οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται σε υψηλή διακινδύνευση θαλάσσιας διείσδυσης, όταν η εντατική εκμετάλλευση οδηγεί σε αλλαγές της δυναμικής ισορροπίας της διεπιφάνειας θαλασσινού/γλυκού νερού (Boudouris et al., 2004). Υπερεκμετάλλευση ενός υπόγειου υδροφορέα συμβαίνει όταν οι απολήψεις υπερβαίνουν τον εμπλουτισμό και αυτό οδηγεί σε ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού ή σε αντιστροφή της διεύθυνσης ροής. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης αναμένεται να πάρει μεγαλύτερες διαστάσεις, λόγω των κλιματικών αλλαγών και των συνεπειών τους, π.χ. άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ιδιαίτερα στις χώρες της Μεσογείου (Βουδούρης, Scheidleder, Δασκαλάκη, 2004).

Στην Ελλάδα η συνολική έκταση των υφάλμυρων υπόγειων νερών, λόγω υπεραντλήσεων, με περιεκτικότητα χλωριόντων  $> 500 \text{ mg/L}$  ανέρχεται σε  $1,6 \cdot 10^6$  στρέμματα (Περγιαλιώτης & Παπαδάκου, 1998, Σαμπατακάκης & Ζώραπας, 2001, Δασκαλάκη, 2002, Σούλιος, 2004). Ποσοστό 85% των παράκτιων υδροφορέων της χώρας μας έχουν υποστεί ανθρωπογενή υφαλμύριση (Εικόνα 3.1). Η ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών στους παράκτιους υδροφορείς αποτελεί τροχοπέδη στην οικονομική ανάπτυξη των περιοχών αυτών.

Η μακροχρόνια χρήση υφάλμυρου νερού για άρδευση ευαίσθητων καλλιεργειών έχει δυσμενή αποτελέσματα στο έδαφος και τα φυτά. Λόγω της συσσώρευσης νατρίου προκαλείται αποκροκκίδωση του εδάφους με συνέπεια τη μείωση της υδροπερατότητας και της γονιμότητας. Τα φαινόμενα της θαλάσσιας διείσδυσης προκαλούν επίσης σοβαρές αλλοιώσεις στα παράκτια ποτάμια και λιμναία οικοσυστήματα. Η πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού στους παράκτιους υδροφορείς προκαλεί αλάτωση των γλυκών νερών και υποβάθμιση των οικοσυστημάτων.

Ο χρόνος απορρύπανσης των υδροφορέων είναι σχετικά μεγάλος. Οι Καλλέργης κ.ά. (1997) υπολόγισαν ότι ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από 188 έως 1100 χρόνια σε παράκτιους υδροφορείς της Νότιας Ελλάδας, με την προϋπόθεση πλήρους διακοπής των αντλήσεων.



Εικόνα 3.1: Περιοχές θαλάσσιας διείσδυσης από υπεράντληση στην Ελλάδα (Βουδούρης, Scheidleder, Δασκαλάκη, 2004).

### 3.3 Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης στο Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης

Η υπεράντληση των περιορισμένων υδατικών πόρων σε περιοχές της Μεσογείου, σε συνδυασμό με τις πιθανές επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών, έχουν δημιουργήσει ανησυχίες όσο αφορά την αειφορία τους καθώς και την ευαισθησία της περιοχής σε μία πιθανή ερημοποίηση. Η Κρήτη βρίσκεται στη νοτιοανατολική Μεσόγειο και χαρακτηρίζεται από ένα ξηρό και σχετικά υγρό κλίμα (εξαρτάται από την εγγύτητα στη θάλασσα). Είναι μία περιοχή που θεωρείται ευαίσθητη σε μία πιθανή υποβάθμιση των εδαφών της, η οποία οφείλεται τόσο στις κλιματικές μεταβολές όσο και στις διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Croke et al., 2000).

Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή της Κρήτης το κλίμα θεωρείται υποτροπικό, με θερμά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Οι μέσες ετήσιες κατακρημνίσεις υπολογίζονται περίπου στα 900 mm, από τα οποία οι πιθανοί ανανεώσιμοι πόροι είναι  $2650 \text{ m}^3/\text{yr}$  και η πραγματική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται  $485 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ . Η μεγαλύτερη χρήση

νερού στο νησί είναι λόγω της άρδευσης για γεωργικές εκτάσεις (σχεδόν το 84,5% της συνολικής κατανάλωσης) ενώ η οικιστική (αστική) χρήση είναι το 12% και λοιπές χρήσεις το 3,5%. Υπάρχουν διάφορες διαβαθμίσεις κατά μήκος του νησιού όσο αφορά την διαθεσιμότητα του νερού, ειδικά στις παράκτιες περιοχές στα ανατολικά και νότια, λόγω του έντονου τουρισμού και των αγροτικών δραστηριοτήτων. Γενικά η διαθεσιμότητα νερού στην περιοχή ανά κάτοικο θεωρείται αρκετά υψηλή, λίγο χαμηλότερη από το μέσο όρο της χώρας. Η ζήτηση για νερό για άρδευση είναι πολύ μεγάλη τη στιγμή που μόνο το 31% των αγροτικών εκτάσεων ποτίζονται επαρκώς (Chartzoulakis et al., 2001).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα του προβλήματος στο Υδατικό Διαμέρισμα Κρήτης συναντάμε στις περιοχές της Χερσονήσου, Μεσσαράς, ΒΙΠΕ Ηρακλείου, στα Μάλια και Φαλάσαρνα (Χανιά). Σε όλες αυτές τις περιοχές το κοινό χαρακτηριστικό είναι η έντονη ανεξέλεγκτη άντληση φρέσκου νερού για την κάλυψη των αναγκών τους, δηλαδή για ύδρευση και άρδευση καθώς και τουριστική αλλά και βιομηχανική χρήση. Οι τέσσερις πρώτες περιοχές βρίσκονται στο νομό Ηρακλείου ενώ η τελευταία στο νομό Χανίων.

### **3.3.1 Παράκτιος υδροφορέας της Χερσονήσου, Ηράκλειο Κρήτης**

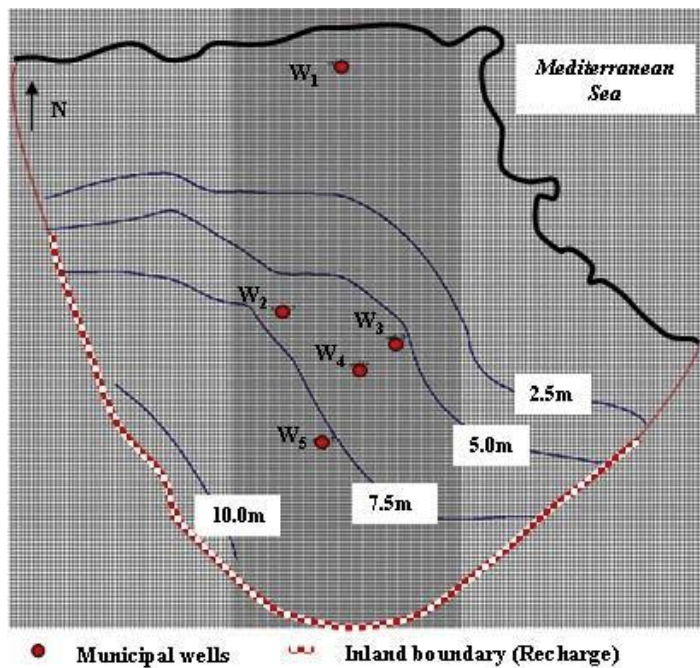
Πιο συγκεκριμένα, αρχικά στην περιοχή της Χερσονήσου Ηρακλείου, ο υδροφορέας της περιοχής, βρίσκεται στις βόρειες ακτές του νομού, σε απόσταση 25 km από την πόλη του Ηρακλείου. Η επιφάνεια της λεκάνης απορροής της περιοχής υπολογίζεται περίπου στα 18 km<sup>2</sup>. Οι κύριες δραστηριότητες της περιοχής είναι ο τουρισμός και η γεωργία. Ειδικά κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, οι ανάγκες σε φρέσκο νερό αυξάνονται λόγω των παραπάνω δραστηριοτήτων και γι' αυτό αυξάνεται και ο ρυθμός άντλησης από τον υδροφορέα με αποτέλεσμα τη σημαντική πτώση του υδραυλικού φορτίου του. Έτσι το ήδη υπάρχον πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης γίνεται πιο έντονο. Η λεκάνη απορροής αποτελείται κυρίως από καρστικοποιημένο ασβεστόλιθο με διάφορες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και αργιλώδη τμήματα, παράλληλα η παράκτια περιοχή αποτελείται από αλλουβιακές (προσχωματικές) εναποθέσεις υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας (Dokou Z. et al., 2016).

Καθώς πρόκειται για περιοχή υψηλού ενδιαφέροντος έχουν γίνει διάφορες μελέτες για την προσέγγιση, κατανόηση και επίλυση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι μελέτες που έχουν γίνει από τους M.P. Papadopoulou et al. (2009) και Dokou Z. et al. (2016), στις οποίες εξετάστηκε η ροή του υπόγειου υδροφορέα με διάφορες μεθόδους (αναλυτικές και γεωστατιστικές) και έγινε προσπάθεια βελτιστοποίησης της άντλησης με σκοπό τη μείωση της έντασης του φαινομένου, αντίστοιχα.

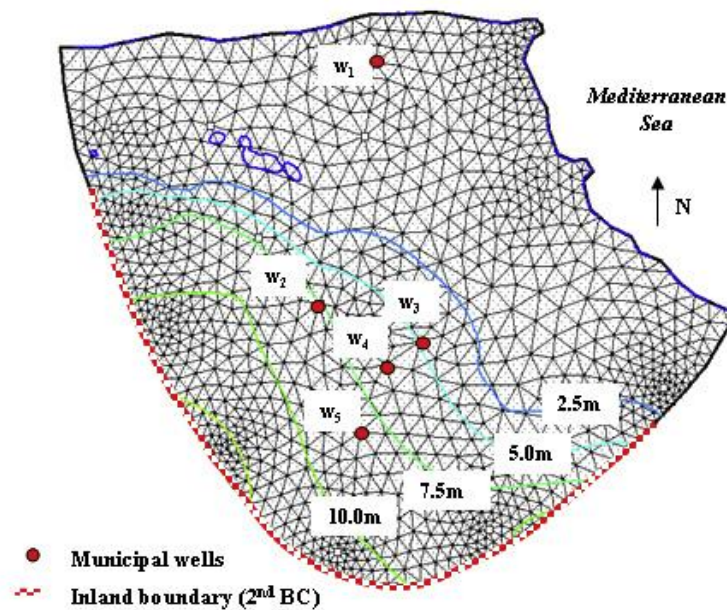
Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών φαίνονται παρακάτω (Εικόνα 3.2, 3.3, 3.4). Παρατηρούμε ότι στην περιοχή υπάρχουν πέντε (5) πηγάδια άντλησης τα οποία είναι ενεργά μόνο κατά την ξηρή περίοδο, έτσι ώστε να καλύπτονται οι αυξημένες ανάγκες λόγω του τουρισμού (Dokou Z. et al., 2016). Από τα αποτελέσματα της πρώτης μελέτης (Εικόνα 3.2, 3.3) φαίνεται η κατανομή του υδραυλικού ύψους του υδροφορέα, το οποίο είναι πολύ μειωμένο κοντά στην παράκτια ζώνη (M.P. Papadopoulou et al., 2009). Αντίστοιχα, στη δεύτερη μελέτη (Εικόνα 3.4) τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ροής στη λεκάνη της Χερσονήσου οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο της διείσδυσης του θαλασσινού



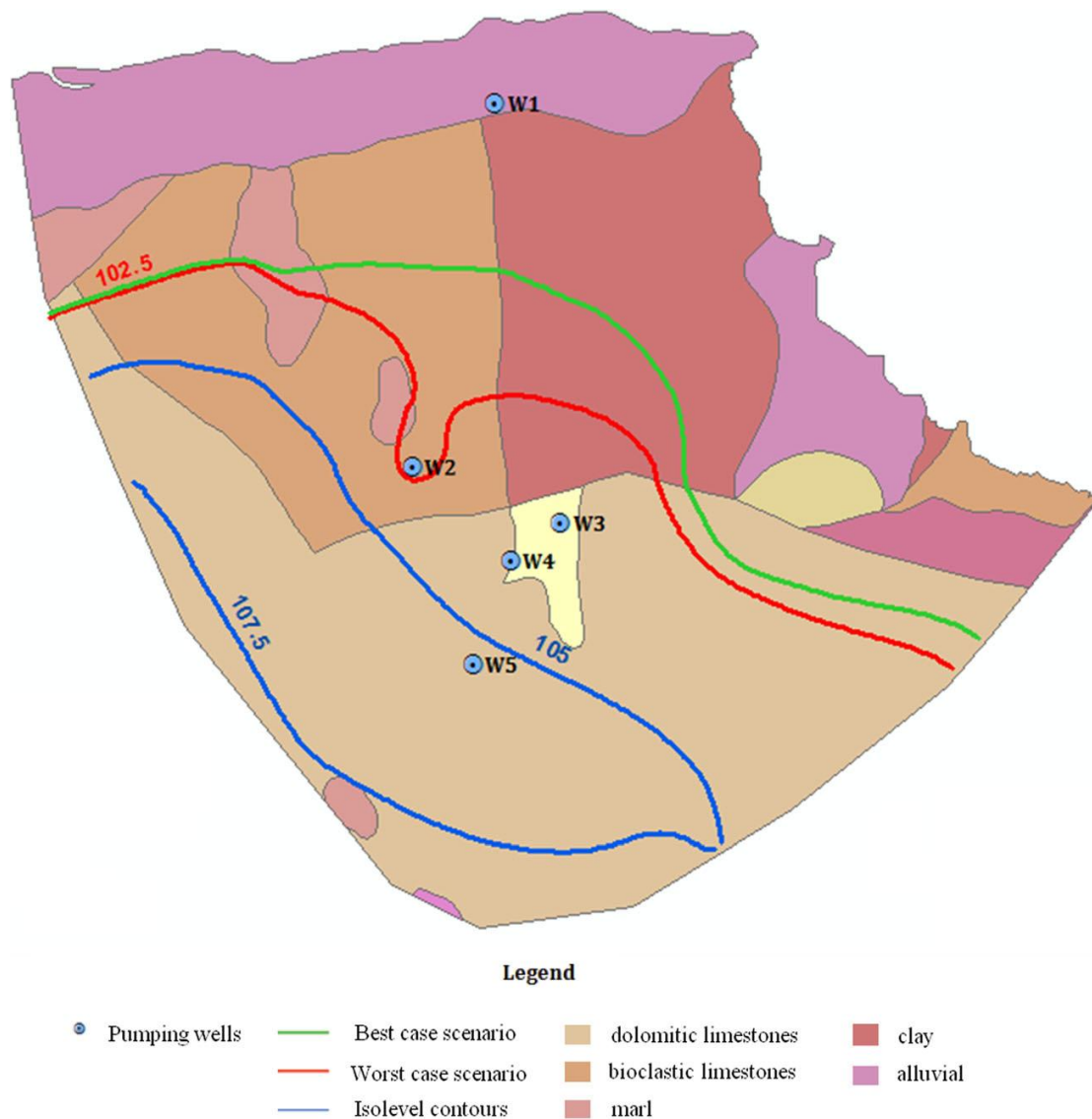
νερού είναι ιδιαίτερα έντονο στην περιοχή, με τη θαλάσσια εισχώρηση να φτάνει τα 1-2,5 km στην ενδοχώρα (Dokou Z. et al., 2016).



Εικόνα 3.2: Κατανομή υδραυλικού ύψους – Visual MODFLOW simulator grid cells (M.P. Papadopoulou et al., 2009).



Εικόνα 3.3: Κατανομή υδραυλικού ύψους – PTC-ArgusOne simulator triangular mesh (M.P. Papadopoulou et al., 2009).



*Εικόνα 3.4: Κατανομή υδραυλικού ύψους (m) για την ξηρή περίοδο άντλησης στον υδροφορέα Χερσονήσου (Dokou Z. et al., 2016).*

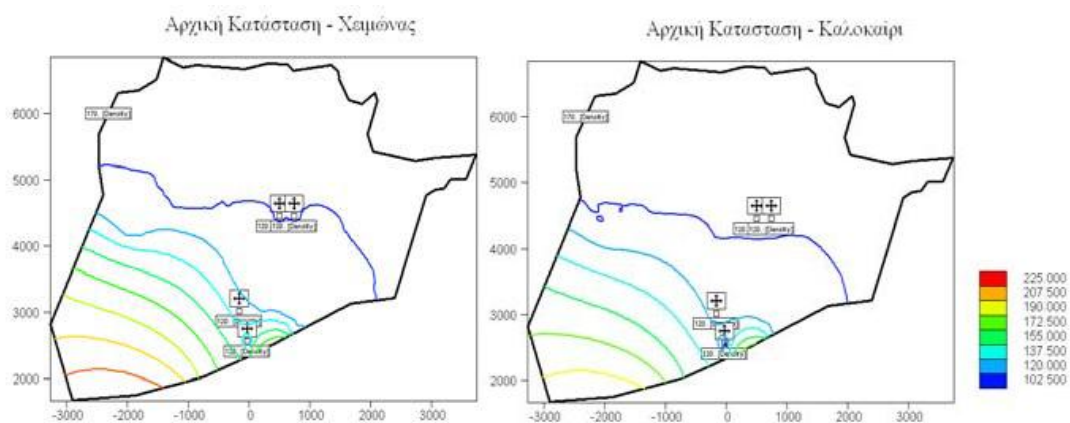
### 3.3.2 Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ) Ηρακλείου Κρήτης

Ο υδροφορέας της ΒΙ.ΠΕ Ηρακλείου Κρήτης, βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου. Περιλαμβάνει τη βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ) και τις ανατολικές συνοικίες της πόλης ενώ εκτείνεται στα νότια μέχρι τις συνοικίες Άνω Φορτέτσα – Νέα Αλάτσατα – Καλλιθέα – Πρασάς. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί με υδρογεωλογικό ενδιαφέρον στην περιοχή είναι κυρίως οι μαργαϊκοί σχιστόλιθοι οι οποίοι λόγω των καρστικών χαρακτηριστικών τους θεωρούνται υδροπερατοί. Αυτοί μόνο θεωρείται ότι μπορούν να έχουν υδροφορία μιας και οι λοιποί γεωλογικοί σχηματισμοί (μάργες και άργιλοι) είναι αδιαπέρατοι λόγω της σύστασης και κοκκομετρίας τους και δεν επιτρέπουν στο νερό της βροχής να κατεισδύει σε βάθος (Παπαδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005). Ακόμη το ανατόλικο ρήγμα της περιοχής μελέτης (Εικόνα 3.5) είναι υπεύθυνο για την εισροή υφάλμυρου νερού στη ΒΙ.ΠΕ (Καρατζάς, Δόκου, Παρουσίαση δεδομένων πεδίου: Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων).



**Εικόνα 3.5:** Γεωλογικός χάρτης της περιοχής με σημειωμένη την περιοχή μελέτης (Παραδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005).

Στην περιοχή εκτός από τις μικρής έκτασης πεδινές περιοχές, υπάρχουν ακόμα ορεινές και λοφώδεις κυρίως δασικές περιοχές, παραθαλάσσιες αμμώδεις και βραχώδεις περιοχές. Η περιοχή έχει έντονο ανάγλυφο το οποίο είναι πλούσιο σε χώνους που οφείλονται στην ασβεστολιθική σύσταση των πετρωμάτων και την τεκτονική τους. Το πεδινό έδαφος χαρακτηρίζεται από καλλιέργεια ελιάς και από μικρές άγονες ή χέρσες εκτάσεις και μικρή περιοχή γης υψηλής παραγωγικότητας (π.χ. θερμοκήπια). Οι ορεινές και λοφώδεις περιοχές αποτελούμενες από ημι-βραχώδη ή ασβεστολιθικά εδάφη χαρακτηρίζονται ως γυμνές εκτάσεις σε συνθήκες έντονης υποβάθμισης (Παραδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005).



**Εικόνα 3.6:** Υδραυλικό ύψος (m). Προσομοίωση της κατάστασης φυσικού συστήματος μετά το τέλος της χειμερινής και θερινής περιόδου στην αρχική κατάσταση (Παραδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005).

Στη μελέτη των Παραδοπούλου, Καρατζά, Τριχάκη, 2005, η βαθμονόμηση του μοντέλου υπόγειας ροής στην περιοχή μελέτης, έγινε με τη χρήση του μοντέλου PTC το οποίο δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική πυκνότητα μεταξύ φρέσκου και αλμυρού νερού. Έτσι ο

προσδιορισμός της υφάλμυρης ζώνης γίνεται υδραυλικά, και ως υφάλμυρες θεωρούνται οι περιοχές των οποίων το υδραυλικό ύψος είναι λιγότερο από 102,5 m. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.6, το μέτωπο της υφαλμύρισης βρίσκεται στην ενδοχώρα και τα πηγάδια της ΒΙ.ΠΕ βρίσκονται ήδη μέσα στη ζώνη υφάλμυρου νερού. Το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι σχετικά χαμηλό όπως αναμένεται σε μια περιοχή με μικρή βροχόπτωση. Η ίδια περίπου κατάσταση παρατηρείται και το χειμώνα με ελαφρά υψηλότερα υδραυλικά ύψη λόγω της βροχόπτωσης και των υψηλότερων εισροών που αναμένονται. Η βαθμονόμηση έγινε με βάση παρατηρήσεις που έδειξαν ότι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους τα πηγάδια της ΒΙ.ΠΕ βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρισης, ακόμα και στο τέλος της χειμερινής περιόδου το μέτωπο βρίσκεται προς την ενδοχώρα σε σχέση με τα πηγάδια αυτά.

Στη συνέχεια της μελέτης αυτής, γίνεται χρήση των αρχικών αποτελεσμάτων ως αρχικών συνθηκών της περιοχής, έτσι ώστε να κατασκευασθούν μελλοντικά σενάρια τα οποία επιχειρούν να επιτύχουν υδραυλική αναχαίτιση της υφαλμύρισης (Παπαδοπούλου, Καρατζάς, Τριχάκης, 2005).

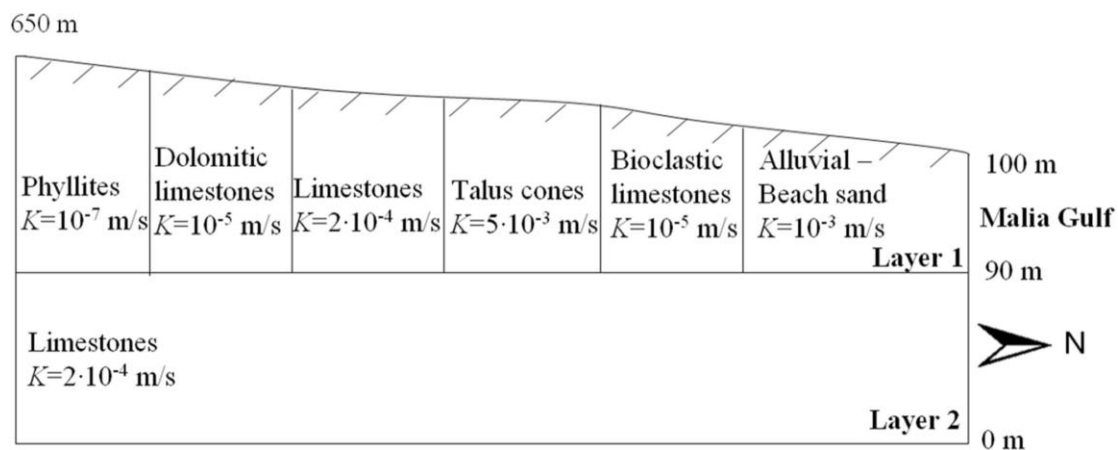
### **3.3.3 Παράκτιος υδροφορέας στα Μάλια, Ηράκλειο Κρήτης**

Ο παράκτιος υδροφορέας στα Μάλια, βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νησιού, 40 km ανατολικά από την πόλη του Ηρακλείου. Το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, χαρακτηρίζεται από μία ελαφριά κλίση στο βόρειο μέρος της πόλης και από την ύπαρξη βουνών στα νότια. Το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας, κυμαίνεται από 0-200 m στην παράκτια πεδινή περιοχή, και από 200-550 m στο νότιο τμήμα της πόλης και της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Το ορεινό έδαφος συνεχίζεται στο νότιο όριο της περιοχής μελέτης στο οποίο φτάνει και το μέγιστο υψόμετρο (1400 m) στην περιοχή Σελένα. Η καλλιεργήσιμη έκταση στο Δήμο Μαλίων είναι 1,75 km<sup>2</sup>. Η βλάστηση αποτελείται από λόχμες και γενικά περίπλοκα μοτίβα βλάστησης. Άλλες χρήσεις γης περιλαμβάνουν ελαιώνες, φυσικά λιβάδια/βοσκοτόπια, μη-αρδεύσιμες καλλιεργήσιμες εκτάσεις και μία μικρή αστική εργοστασιακή μονάδα υφασμάτων που έχει εγκαταληφθεί (Karatzas, Dokou, 2015).

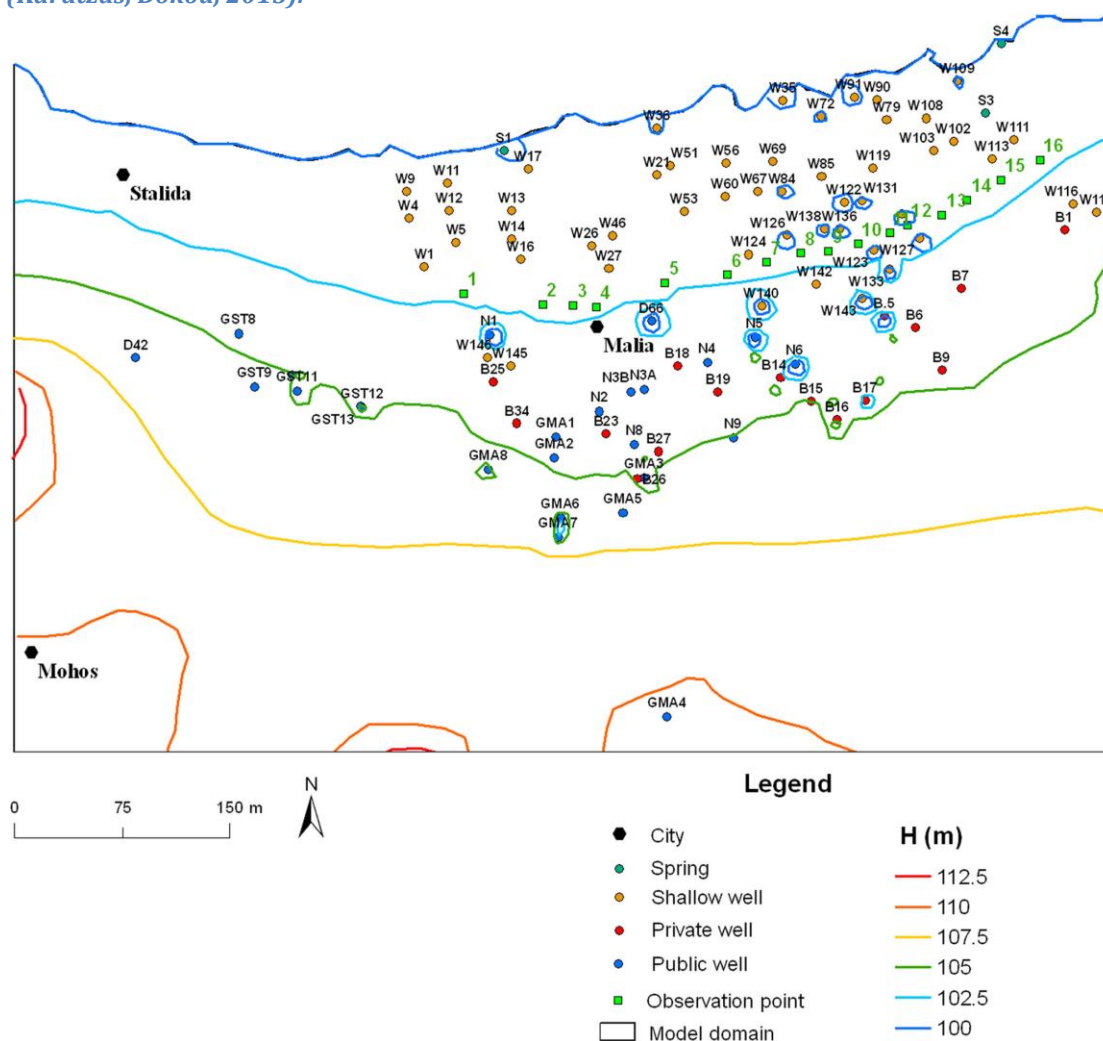
Ο παράκτιος καρστικός υδροφορέας στα Μάλια, βρίσκεται σε ασβεστολιθικά πετρώματα της ζώνης της Τρίπολης. Κάτω από αυτό το πέτρωμα, υπάρχουν χλωριτικοί σχιστόλιθοι, φυλλίτες και χαλαζίτες, που ανήκουν στη Φυλλιτική – Χαλαζίτικη σειρά και λειτουργούν ως το αδιαπέρατο υπόστρωμα της ευρύτερης περιοχής. Για να γίνει πιο εύκολα η μελέτη ροής στην περιοχή μελέτης, λήφθηκαν δεδομένα από γεωλογικά καρότα στο πεδίο, οπότε προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 3.7. Εκεί παρατηρούμε ότι κοντά στην ακτή η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους είναι μεγαλύτερη από ότι στην ενδοχώρα (Karatzas, Dokou, 2015).

Σκοπός της μελέτης είναι να γίνει έλεγχος της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή. Γι' αυτό το λόγο έγινε η αρχική βαθμονόμηση της περιοχής με δεδομένα που λήφθηκαν στο πεδίο από 7 πηγάδια το Νοέμβριο του 2011. Η προσομοίωση της περιοχής έγινε και για χρονικό διάστημα μετά από δέκα χρόνια με συνθήκες στην περιοχή ίδιες με τις αρχικές, δηλαδή έγινε θεώρηση ότι δεν έχουν ληφθεί καθόλου μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος, και αποτελεί το χειρότερο σενάριο για την περιοχή (Εικόνα 3.8).





Εικόνα 3.7: Κάθετη διακριτοποίηση του μοντέλου της περιοχής μελέτης, και βαθμονομημένες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ) για κάθε γεωλογικό σχηματισμό (Karatzas, Dokou, 2015).



Εικόνα 3.8: Αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση για τα υδραυλικά ύψη, η ζώνη υφαλμύρισης για χρονικό διάστημα μετά από 10 χρόνια (Karatzas, Dokou, 2015).

Τελικά τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι, αν η κατάσταση παραμείνει ως έχει και το υδραυλικό ύψος στο μέτωπο της υφαλμύρισης παραμείνει σε ύψος 102,5 m (το ύψος του

υδροφορέα θεωρήθηκε 100 m) τότε η περαιτέρω κίνηση του θαλασσινού νερού μέσα στον υδροφορέα μπορεί να αποφευχθεί (Karatzas, Dokou, 2015).

### **3.3.4 Πορώδες υδροφόρο σύστημα λεκάνης Μεσαράς – Πορώδες υδροφόρο σύστημα λεκάνης Τυμπακίου, Ηράκλειο Κρήτης**

Η προσχωματική λεκάνη της Μεσαράς, είναι η μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης και δομείται με αλλουβιακές τεταρτογενείς αποθέσεις ( $156,7 \text{ km}^2$ ) και πλειστοκαινικές αποθέσεις (κροκαλοπαγή) ( $62,6 \text{ km}^2$ ). Τα πλειστοκαινικά κροκαλοπαγή υπόκεινται των αλλουβίων σχεδόν σε όλη την έκτασή τους. Το αδιαπέρατο υπόβαθρο στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης είναι μάργες (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).

Η λεκάνη της Μεσαράς, καλύπτει μία επιφάνεια  $398 \text{ km}^2$  και βρίσκεται στο νότιο – κεντρικό τμήμα του νησιού, περίπου 50 km νότια από την πόλη του Ηρακλείου. Η λεκάνη είναι η πιο σημαντική αγροτική περιοχή του νησιού. Περίπου τα  $250 \text{ km}^2$  της συνολικής έκτασης της καλλιεργούνται. Οι κύριες χρήσεις γης αποτελούνται από ελαιώνες ( $175 \text{ km}^2$ ) και αμπελώνες ( $40 \text{ km}^2$ ). Το υπόλοιπο της καλλιεργήσιμης γης χρησιμοποιείται για την παραγωγή λαχανικών, φρούτων και δημητριακών. Η λεκάνη της Μεσαράς έχει παραμείνει αγροτική περιοχή, με σχετικά μικρό πληθυσμό 40.000 κατοίκων. Η κύρια πηγή νερού άρδευσης είναι το υπόγειο νερό της περιοχής καθώς δεν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες επιφανειακού νερού πέρα από τους μήνες της υγρής περιόδου (Croke et al., 2000).

Το υπόγειο νερό της περιοχής ουσιαστικά ελέγχει την οικονομική ανάπτυξή της, και βρίσκεται κάτω από ιδιαίτερα μεγάλη πίεση καθώς η ζήτηση σε νερό έχει αυξηθεί πολύ τα τελευταία δέκα χρόνια. Η στάθμη του υπόγειου νερού είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της ερημοποίησης της λεκάνης, λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων καθώς και των κλιματικών αλλαγών (Croke et al., 2000).

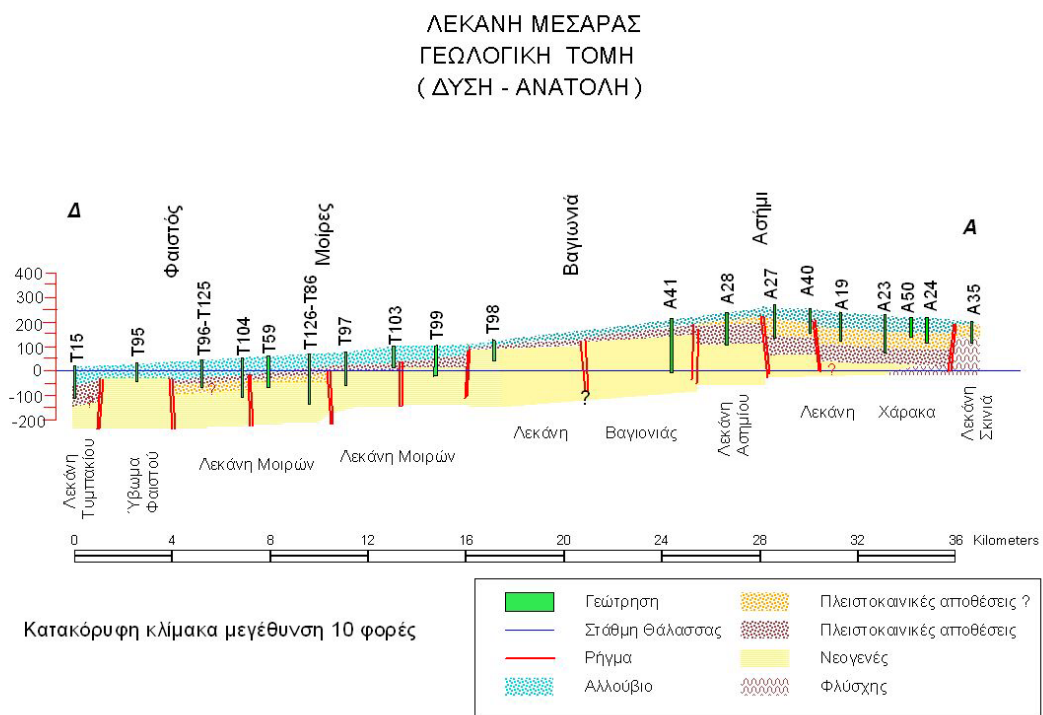
Ο όγκος του αποθηκεύμενου νερού στον αλλουβιακό υδροφορέα υπολογίστηκε σε 240 εκατ. κ.μ. και στον πλειστοκαινικό 255 εκατ. κ.μ. Οι ετήσιες αντλήσεις την περίοδο πριν το 1980 ανέρχονταν σε περίπου 6 εκατ. κ.μ. ενώ κατά την περίοδο της εντατικής εκμετάλλευσης μεταξύ 15 εκατ. κ.μ. από τη λεκάνη Μοιρών, 12 εκατ. κ.μ. από τη λεκάνη Βαγιονιάς – Ασημίου και 10 εκατ. κ.μ. από τη λεκάνη Μεσοχωρίου – Χάρακα. Κατά το έτος 1984 – 2005 τα ρυθμιστικά αποθέματα μειώνονταν με μέσο ρυθμό 10 εκατ. κ.μ. ανά έτος (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2015). Από το 1984 τοποθετήθηκε ένα μεγάλο δίκτυο σταθμών άντλησης, με αποτέλεσμα να αλλάξει το είδος της γεωργίας στην περιοχή. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας στην περιοχή και μία δραματική μείωση στη στάθμη των υπογείων υδάτων κατά 20 m (Croke et al., 2000). Η λεκάνη της Μεσαράς υποδιαιρείται σε τρία υδροφόρα συστήματα: Πραιτοριών, Ασημίου – Βαγιονιάς και Μοιρών (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).

Η λεκάνη της Μεσαράς αντιμετωπίζει πολλά προβλήματα όπως διάβρωση του εδάφους στις λοφώδεις εκτάσεις της, αλατοποίηση του εδάφους στην ενδοχώρα, συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση στην κατανάλωση νερού λόγω τουρισμού και γεωργίας, χημική αλλοίωση του νερού λόγω της εκτεταμένης γεωργικής δραστηριότητας και εισροή θαλασσινού νερού στο φρέσκο νερό των υπόγειων υδροφορέων. Όλα τα παραπάνω προβλήματα ευθύνονται για τον κίνδυνο υποβάθμισης και ερημοποίησης της περιοχής. Οι

περιοχές που κινδυνεύουν περισσότερο αποτελούν το 21,2% της λεκάνης της Μεσαράς (LEDD, 2012).



Εικόνα 3.9: Τοποθεσία της λεκάνης Μεσαράς, Ηράκλειο Κρήτης (LEDD, 2012).

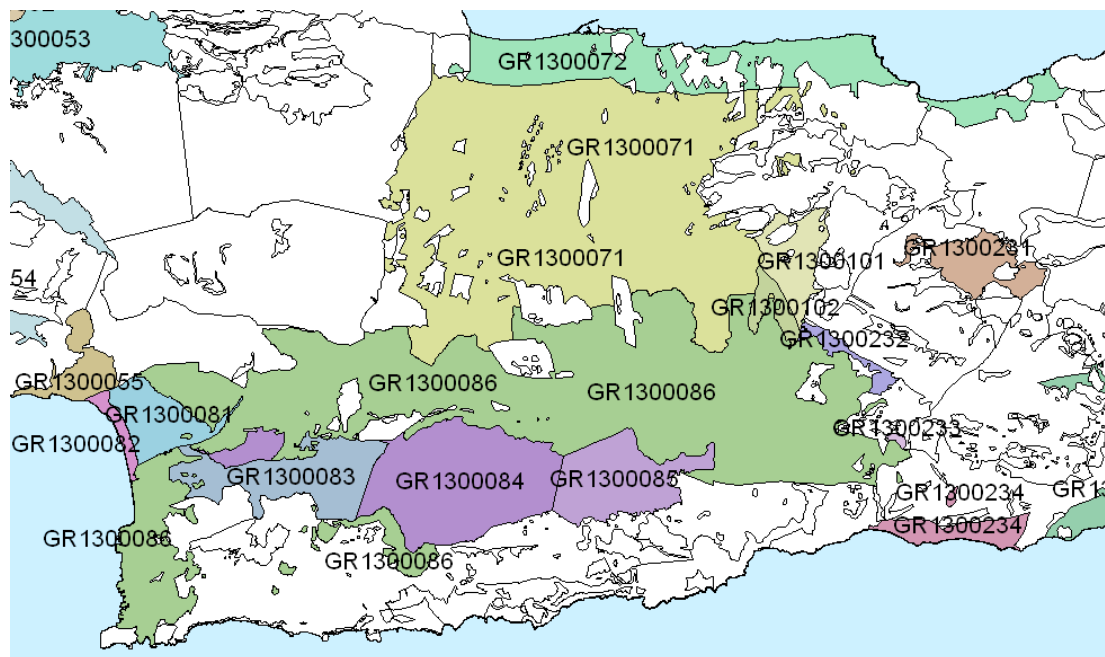


Εικόνα 3.10: Υδρογεωλογική τομής λεκάνης Μεσαράς (Α - Δ) (Kritsotakis, Tsanis, 2009).

Το πορώδες υδροφόρο σύστημα και το παράκτιο πορώδες υδροφόρο σύστημα της λεκάνης Τυμπακίου, βρίσκεται εντός της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης Μεσαράς (Εικόνα 3.11). Η πεδιάδα του Τυμπακίου και ο παράκτιος υπόγειος υδροφορέας της αποτελούν την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας κι έτσι το πρόβλημα στην περιοχή θα αναλυθεί εκτενέστερα στα παρακάτω κεφάλαια. Αξίζει όμως να αναφέρουμε ότι η πεδιάδα του Τυμπακίου είναι μία από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης, με αρδευόμενη έκταση που φτάνει τα 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται βασιζόταν κυρίως στο υπόγειο δυναμικό, όμως με την ολοκλήρωση

του φράγματος της Φανερωμένης υδροδοτείται και από αυτό (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).

Από μελέτες που έχουν γίνει στην περιοχή, έχει υπολογισθεί η σταδιακή πτώση της στάθμης του υδροφόρου στρώματος (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013) και η συνεχής υποβάθμιση της ποιότητας του νερού λόγω της θαλάσσιας εισχώρησης (Paritsis, 2005, Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013, Dokou Z. et al., 2016).

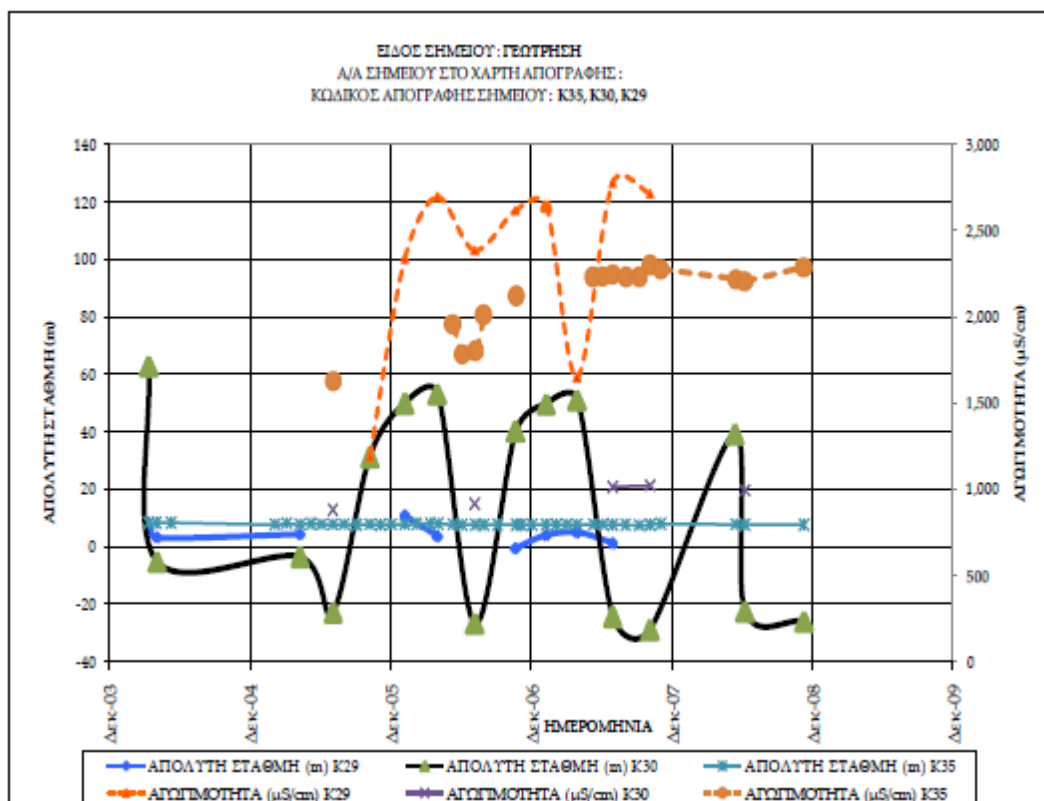


**Εικόνα 3.11: Πορώδη υδροφόρα συστήματα λεκάνης Ηρακλείου (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).**

### **3.3.5 Πορώδες υπόγειο υδατικό σύστημα Κισσάμου – Φαλάσαρνα, Χανιά Κρήτης**

Το πορώδες υδροσύστημα του κάμπου Κισσάμου διακρίνεται σε δύο υδροφόρα, των νεογενών και των τεταρτογενών. Ο υδροφόρος των νεογενών δεν είναι ενιαίος τόσο κατά την οριζόντιο (επάλληλοι υδροφορείς) όσο και κατά την κάθετη διάσταση. Το υδροσύστημα περιοδικά παρακολουθείται από μία γεώτρηση και το παράκτιο τμήμα του εμφανίζει υφαλμύριση καθώς και η περιοχή της Γραμβούσας (Πλάτανος, Φαλάσαρνα). Έχουν επιβληθεί μέτρα προστασίας και ειδικότερα απαγόρευση ανόρυξης γεωτρήσεων και περιορισμός στις αντλήσεις από το έτος 1990 (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).

Η ευρύτερη περιοχή της Φαλάσαρνας έχει χαρακτηριστεί ως περιοχή με ιδιαίτερο φυσικό κάλλος, με πλήθος από τύπους οικοτόπων, με αρχαιολογικό ενδιαφέρον και έχει καταχωρηθεί στα δίκτυα Natura 2000 και Corine. Οι υπαίθριες καλλιέργειες και ελαιώνες καλύπτουν το 48% του συνολικού κάμπου, το 4% είναι θερμοκηπιακές μονάδες (600 στρέμματα) και ο υπόλοιπος κάμπος καλύπτεται από φρυγανολιβαδική βλάστηση.



Εικόνα 3.12: Διαγράμμα γεωτρήσεων Γραμβούσας - Πλατάνου όπου φαίνεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).

### 3.3.6 Συμπεράσματα των ερευνών που αφορούν τις πληγείσες περιοχές

Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι η ανάγκη για άρδευση με πιο αποτελεσματικό τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μία αειφόρος γεωργική ανάπτυξη, αυξάνεται όλο και περισσότερο στο νησί της Κρήτης. Επιπλέον καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης νέων υδατικών πόρων, η μόνη λύση είναι να γίνει ικανοποιητικός σχεδιασμός έτσι ώστε η χρήση να είναι ελεγχόμενη και αποτελεσματική (Chartzoulakis et al., 2001).

Στις περιπτώσεις που έγινε συνδυασμός μοντέλων προσομοίωσης και μεθόδων βελτιστοποίησης της χρήσης των πόρων, είχαμε τα καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά τη λύση του προβλήματος διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων με υφαλμύριση του υπόγειου ύδατος. Επιπλέον προκύπτει ότι η αναχαίτιση της υφαλμύρισης είναι επίπονη και χρονοβόρα, ακόμη και αν το μέτωπο της υφαλμύρισης απωθηθεί, θα πρέπει να εκροφηθεί και το προσροφημένο στους κόκκους του εδάφους άλας. Έτσι σαν φαινόμενο είναι δύσκολο να αναχαιτισθεί και ίσως μη αναστρέψιμο, οπότε **η προσπάθεια θα πρέπει να είναι στην πρόληψη της υφαλμύρισης και όχι στην αναχαίτιση** (Dokou Z. et al., 2016).

### 3.4 Μέθοδοι μελέτης του φαινομένου

Γενικά το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι ιδιαίτερα σύνθετο και δεν είναι απλός ο τρόπος προσέγγισής του. Μία τεχνική η οποία ακολουθείται είναι η εφαρμογή κατά τη διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης. Επομένως για την αντιμετώπισή του απαιτούνται αφενός εξειδικευμένες γνώσεις ενός ιδιαίτερα δυσχερούς φαινομένου, όπως είναι η υφαλμύριση και αφετέρου δυνατότητα χρήσης



μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων και προσαρμογής των τεχνικών αυτών στις απαιτήσεις του υπό εξέταση προβλήματος.

Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για τον μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφορέων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες επίσης στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υδροφορέα μετά από μετρήσεις πεδίου.

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

Ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμοσμένες μαθηματικές προσομοιώσεις έχουν οι μετρήσεις πεδίου, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο, επιτρέπουν τη βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύουν για την επαλήθευσή του και συνεπώς την αύξηση της αξιοπιστίας του. Σε συνδυασμό με την οικονομική δαπάνη που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, είναι αντιληπτή η σημασία που έχει ο σωστός σχεδιασμός τους (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).

### 3.4.1 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού

Δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων:

- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς.
- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα.

#### 1. Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους

Η διείσδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά. Επομένως επιλύεται το πρόβλημα της υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση  $c$  εξαρτώμενη από την πυκνότητα  $\rho$  (για κορεσμένη ροή). Οι άγνωστοι του προβλήματος στις διάφορες θέσεις  $\vec{r}$  του πεδίου ροής και για διάφορους χρόνους  $t$ , είναι: συγκέντρωση  $c(\vec{r}, t)$ , ταχύτητα  $V(\vec{r}, t)$ , πίεση  $p(\vec{r}, t)$  και πυκνότητα  $\rho(\vec{r}, t)$ .

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Εξίσωση διατήρησης μάζας
- Εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς
- Εξισώσεις κίνησης (νόμος Darcy)
- $\rho = \rho(c)$  (συνήθως γραμμική σχέση)

## 2. Απότομη διεπιφάνεια

Εάν εξετάσουμε το φαινόμενο θεωρώντας απότομη διεπιφάνεια ανάμεσα στα δύο υγρά, μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη για αδιατάρκατες συνθήκες ροής, θεωρούμε ότι τα υγρά βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας άρα έχουμε μόνιμη ροή, και ότι η διεπιφάνεια είναι ακίνητη με ταυτόχρονη εκροή του γλυκού νερού στη θάλασσα πάνω από αυτήν. Στη δεύτερη περίπτωση λόγω της άντλησης η διεπιφάνεια κινείται, οπότε δεν έχουμε μόνιμη ροή και συνήθως υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής.

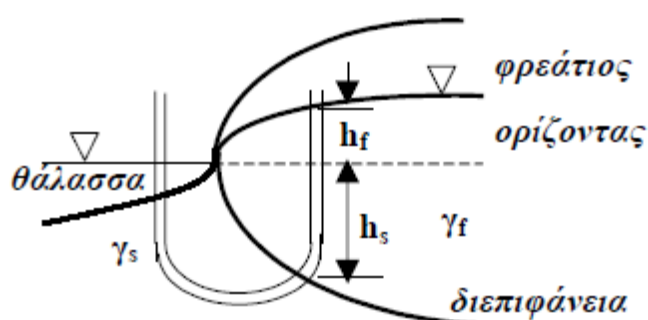
Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το γλυκό και το θαλασσινό νερό αντίστοιχα, είναι:

- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης (Νόμος Darcy)

Άγνωστοι του προβλήματος είναι η πίεση  $p$ , το βάθος  $z$  της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας και οι ταχύτητες  $V$  για το γλυκό και θαλασσινό νερό (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).

### 3.4.2 Προσέγγιση Ghyben – Herzberg

Περίπου 100 χρόνια πριν, δύο ομάδες ερευνητών οι οποίοι δούλευαν παράλληλα και ανεξάρτητα στην ευρωπαϊκή ήπειρο, βρήκαν ότι το θαλασσινό νερό, στην περίπτωση της θαλάσσιας διείσδυσης, εντοπιζόταν υπόγεια, όχι στο επίπεδο της θάλασσας αλλά σε βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας περίπου ίσο με 40 φορές το ύψος του γλυκού νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Αυτή η κατανομή οφείλεται στην υδροστατική ισορροπία ανάμεσα στα δύο υγρά διαφορετικής πυκνότητας. Η εξίσωση που τελικά περιγράφει το φαινόμενο ονομάζεται Ghyben – Herzberg, λόγω των ερευνητών αυτών.



Εικόνα 3.13: Υδροστατική ισορροπία μεταξύ φρέσκου και θαλασσινού νερού, σε σωλήνα – U (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).

Η υδροστατική ισορροπία μεταξύ του φρέσκου και θαλασσινού νερού μπορεί να απεικονιστεί εύκολα σε σωλήνα – U (Εικόνα 3.13). Η πίεση σε κάθε πλευρά του αγωγού πρέπει να είναι ίδια, οπότε ισχύει

$$\rho_s g z = \rho_f g (z + h_f) \rightarrow z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f ,$$

και προκύπτει η εξίσωση που είναι γνωστή ως Ghyben – Herzberg, όπου  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού,  $\rho_f$  είναι η πυκνότητα του φρέσκου νερού,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και τα  $z$  και  $h_f$  είναι τα ύψη που φαίνονται στην Εικόνα 3.13.

Αν θεωρήσουμε τις τυπικές τιμές για τις πυκνότητες των δύο αναμίξιμων υγρών,  $\rho_s = 1,025 \text{ g/cm}^3$  και  $\rho_f = 1,000 \text{ g/cm}^3$ , η εξίσωση Ghyben – Herzberg παίρνει τη μορφή,

$$z = 40h_f.$$

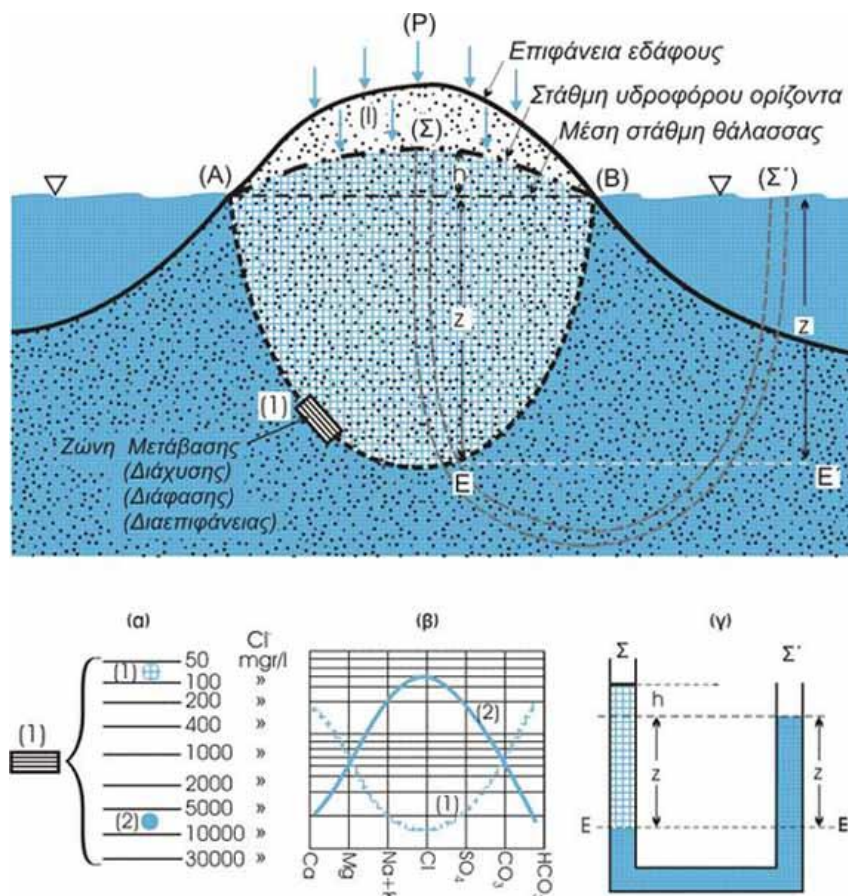
Μεταφέροντας την προσομοίωση αυτή σε πραγματικές συνθήκες σε μία παράκτια περιοχή (Εικόνα 3.14), το ύψος  $h_f$  είναι το ύψος του φρέσκου νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και  $z$  είναι το βάθος της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο αναμίξιμων υγρών κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Αυτή χαρακτηρίζεται ως υδροδυναμική και όχι υδροστατική ισορροπία γιατί το φρέσκο υπόγειο νερό ρέει προς τη θάλασσα. Αν λάβουμε υπόψη μας μόνο τις πυκνότητες των δύο υγρών, χωρίς την ύπαρξη ροής, θα δημιουργηθεί μία οριζόντια διεπιφάνεια με το φρέσκο νερό να επιπλέει πάνω από το θαλασσινό σε όλα τα σημεία της. Όπου η ροή είναι σχεδόν οριζόντια, η εξίσωση Ghyben – Herzberg δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όμως κοντά στην ακτή, που εμφανίζονται κάθετες συνιστώσες ροής, έχουμε σημαντικά προβλήματα στην ικανοποιητική προσομοίωση της θέσης της διεπιφάνειας.

Η εξίσωση Ghyben – Herzberg μπορεί να εφαρμοστεί και σε περιορισμένους υδροφορείς, όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζονται αντικαθίσταται από την πιεζομετρική επιφάνεια (Εικόνα 3.15). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για να εφαρμοστεί η εξίσωση Ghyben – Herzberg με την υδροδυναμική ισορροπία των δύο υγρών, είναι απαραίτητο η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ή η πιεζομετρική επιφάνεια (1) να βρίσκονται πάνω από το θαλασσινό νερό και (2) να έχουν κλίση προς τα κάτω, προς τη θάλασσα. Χωρίς αυτές τις συνθήκες, το θαλασσινό νερό θα αρχίσει να εισχωρεί στην ενδοχώρα (Todd & Mays, 2005).

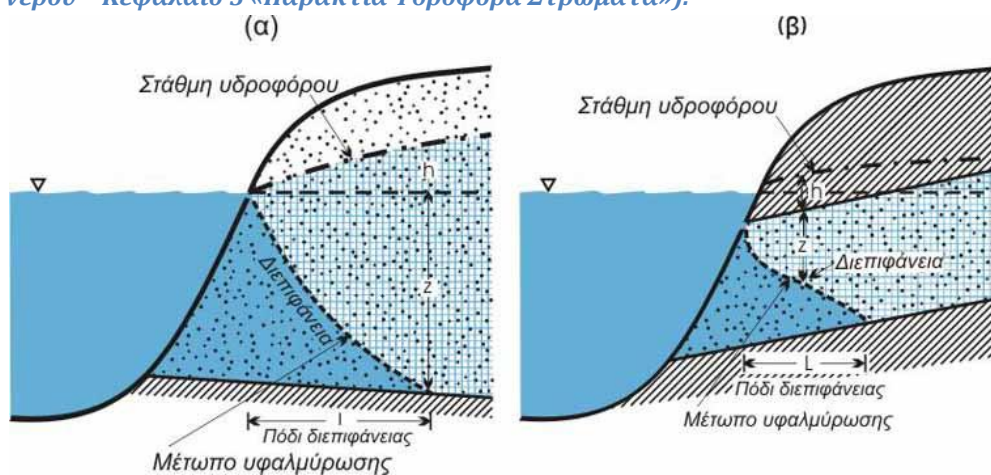
Η χρήση της εξίσωσης Ghyben – Herzberg επιτρέπει την ελυρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού, ως εξής(Νάνου – Γιάνναρου, 2001):

- 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.

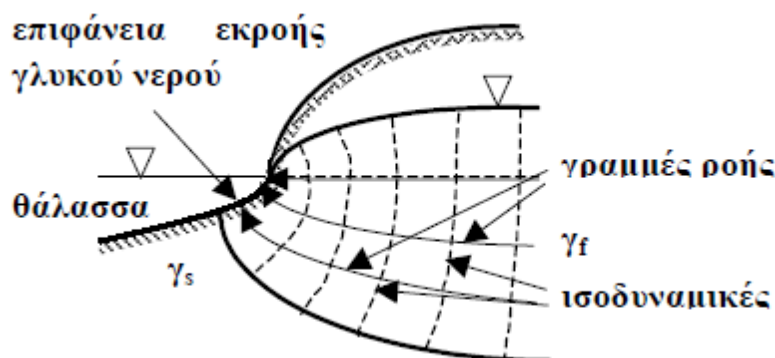




Εικόνα 3.14: Επαφή γλυκού - αλμυρού νερού και ο νόμος των Ghyben - Herzberg. (1) Ζώνη μετάβασης, (α): περιεκτικότητα σε ιόντα  $\text{Cl}^-$  της ζώνης μετάβασης, (β): χημικό διάγραμμα από τα σημεία (1) και (2) της ζώνης μετάβασης, (γ): μανομετρικό (υδραυλικό) ισότιμο της επαφής γλυκού - αλμυρού νερού. (Γ. Σούλιος, Εκμετάλλευση και Διαχείριση υπόγειου νερού - Κεφάλαιο 5 «Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα»).



Εικόνα 3.15: Ζώνη διεπιφάνειας, (α) σε ελεύθερο και (β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Γ. Σούλιος, Εκμετάλλευση και Διαχείριση υπόγειου νερού - Κεφάλαιο 5 «Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα»).



Εικόνα 3.16: Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας (Νάνου – Γιάνναρου, 2001).

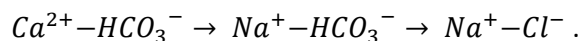
### 3.4.3 Υδρογεωχημική μελέτη της υφαλμύρισης

Η **συγκέντρωση  $Cl^-$**  είναι ένας ιδανικός ιχνηθέτης για την εξακρίβωση της θαλάσσιας διείσδυσης. Γενικά μία συγκέντρωση των  $Cl^-$  της τάξης των 100 mg/L θεωρείται δείκτης θαλάσσιας διείσδυσης. Η πλέον δραματική περίπτωση υφαλμύρισης αναφέρεται στη Λιβύη, όπου η περιεκτικότητα των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) αυξήθηκε από 265-657 mg/L το 1976 σε 10.000 mg/L το 1993 (El-Baruni, 1995).

Όταν η στάθμη του υπόγειου νερού κοντά στην ακτή είναι κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας τότε δεν ισχύει ο γνωστός νόμος του Ghyben – Herzberg υδροστατικής πίεσης για μη αναμείξιμα υγρά (Todd, 1980). Στις περιπτώσεις αυτές πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική προσέγγιση, κατά την οποία μία μεταβατική ζώνη μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού με αυξανόμενη συγκέντρωση ιόντων  $Cl^-$  από το γλυκό προς το θαλασσινό νερό, προκαλεί μεταφορά, διασπορά και διάχυση. Ανάλογα με τις υδρογεωχημικές συνθήκες της περιοχής μια υποθετική ζώνη αντιπροσωπεύει τη ζώνη ανάμειξης μεταβλητού πάχους, στην οποία το ανώτερο και το κατώτερο όριο συμμετοχής του θαλασσινού νερού είναι 1% και 95%, αντίστοιχα (Εικόνα 3.14) (Ergil, 2000).

Πράγματι το θαλασσινό και το γλυκό νερό είναι αναμείξιμα υγρά και η μεταβατική ζώνη προκαλείται κυρίως από την υδροδυναμική διασπορά. Η ανάπτυξη του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης σχεδόν συμπίπτει με την περιοχή, όπου η στάθμη του υπόγειου νερού είναι κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Η αύξηση της ταχύτητας ροής σε περιοχές με έντονες αντλήσεις επιταχύνει τη θαλάσσια διείσδυση (Xue et al., 1993).

Το υπόγειο γλυκό νερό κατά της κίνηση του από τις περιοχές εμπλουτισμού προς την ακτή, υφίσταται τις κάτωθι μετατροπές στον υδροχημικό τύπο:



Στους παράκτιους υδροφορείς όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού είναι σύνθετη, η κατιοανταλλαγή συμβάλλει σημαντικά στην τελική σύσταση του υπόγειου νερού, αποτελώντας μία αποτις πλέον σημαντικές γεωχημικές διαδικασίες της θαλάσσιας διείσδυσης.

Για τον προσδιορισμό της επιφανειακής εξάπλωσης της ζώνης υφαλμύρισης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε παραμέτρους όπως:

- Η κατανομή του TDS (ολικά διαλυμένα στερεά)
- Η κατανομή των χλωριόντων
- Η κατανομή του Br και διάφορων ιοντικών λόγων
- Η ιοντική ισχύς I (ionic strength)

Ένας ακόμη αποτελεσματικός τρόπος μελέτης του φαινομένου είναι με την μέτρηση της **ηλεκτρικής αγωγιμότητας** του διαλύματος, στη συγκεκριμένη περίπτωση του νερού του υδροφορέα, οπότε η ηλεκτρική αγωγιμότητα σχετίζεται με την αλατότητα. Γενικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος είναι μια μαθηματική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, το σθένος τους, τη κινητικότητα τους, τη συγκέντρωσή τους, τη θερμοκρασία, το ιξώδες του διαλύματος και το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού με την οποία γίνεται η μέτρηση. Τα διαλύματα των περισσότερων ανόργανων οξέων και βάσεων όλων των αλάτων είναι σχετικά καλοί αγωγοί του ρεύματος.

Υπάρχουν δύο παράμετροι αξιολόγησης της ποιότητας του νερού όσον αφορά την αλατότητά του. Αλατότητα νερού αναφέρεται μερικές φορές ως η συνολική συγκέντρωση των αλάτων ή των συνολικά διαλυμένων στερεών στο νερό (TDS). Οι μονάδες TDS εκφράζονται συνήθως σε χιλιοστόγραμμα των αλάτων ανά λίτρο νερού (mg/L). Το TDS επίσης συχνά αναφέρεται ως μέρος στο εκατομμύριο (ppm) και είναι το ίδιο αριθμητικά με τη μονάδα ppm. Όσο χαλότερο το TDS, τόσο υψηλότερη είναι η αλατότητα του νερού.

Η πιο χρησιμοποιούμενη μέτρηση όμως είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Η EC είναι πιο χρήσιμη μέτρηση από το TDS επειδή μπορεί να γίνει άμεσα και εύκολα. Τα διαλυμένα άλατα στο νερό άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, και επομένως η συγκέντρωση των αλάτων στο νερό συσχετίζεται άμεσα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Η EC του νερού και του εδαφικού εκχυλίσματος αναφέρεται και συμβολίζεται ως  $EC_w$  και  $EC_e$  αντίστοιχα.

Οι χρησιμοποιούμενες μονάδες της EC είναι:

- millimhos per centimeter (mmhos/cm)
- decisiemens per meter (dS/m)
- micromhos per centimeter (μmhos/cm).

Όπου  $1 \text{ mmhos/cm} = 1 \text{ dS/cm}$  και  $1 \text{ μmhos} = 1/1000 \text{ mmhos} = 1/1000 \text{ dS/m}$ .

Γενικά από γεωχημική άποψη η υφαλμύριση των υδροφορέων συνίσταται από ένα υψηλής αλατότητας διάλυμα (θαλασσινό νερό) αναμειγμένο με ένα αραιωμένο διάλυμα (γλυκό νερό) σε ένα πορώδες μέσο, που περιέχει πολλά δραστικά στερεά (ορυκτά) (Βουδούρης, 2016).

### 3.5 Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης

#### 3.5.1 Νομοθεσία στο πρόβλημα της υφαλμύρισης

Το πρόβλημα της σωστής διαχείρισης των υδάτινων πόρων είναι απαραίτητο να ρυθμίζεται από το κράτος. Σε κοινοτικό πλαίσιο, η οδηγία 2000/60/EK για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων ή αλλιώς οδηγία – πλαίσιο για τα νερά, μετά από μία μακρόχρονη περίοδο συζητήσεων και διαπραγματεύσεων μεταξύ των

κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τέθηκε σε ισχύ στις 22 Δεκεμβρίου 2000. Η οδηγία 2000/60/ΕΚ συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδάτινων πόρων και θέτει ως κεντρική ιδέα την ολοκληρωμένη διαχείρισή τους στη γεωγραφική κλίμακα των λεκανών απορροής ποταμών.

Επιπλέον, επαναπροσδιορίζει την έννοια της λεκάνης απορροής, η οποία περιλαμβάνει τα εσωτερικά επιφανειακά (ποταμοί, λίμνες), τα υπόγεια ύδατα, τα μεταβατικά (δέλτα, εκβολές ποταμών) και τα παράκτια οικοσυστήματα. Για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού καθορίζει μία σειρά από απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός των καθορισμένων προεσμιών, ώστε ο βασικός στόχος της οδηγίας που είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη «καλής κατάστασης». Η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της οδηγίας στηρίζεται σε οικονομικές αρχές και εργαλεία καθώς και στην εφαρμογή ολοκληρωμένων προγραμμάτων μέτρων.

Παράλληλα, αντιμετωπίζονται συνολικά όλες οι χρήσεις και υπηρεσίες νερού, συνυπολογίζοντας την αξία του νερού για το περιβάλλον, την υγεία, την ανθρώπινη κατανάλωση και την κατανάλωση σε παραγωγικούς τομείς. Η οδηγία ενισχύει και διασφαλίζει τη συμμετοχή του κοινού με τη δημιουργία συστηματικών και ουσιαστικών διαδικασιών διαβούλευσης. Παράλληλα, προωθεί την αειφόρο και ολοκληρωμένη διαχείριση των διασυννοριακών λεκανών απορροής ποταμών. Στο ίδιο πλαίσιο, η οδηγία 2000/60/ΕΚ δημιουργεί και εισάγει νέες προσεγγίσεις στην αντιμετώπιση κινδύνων από τις πλημμύρες και την ξηρασία. Ακόμη σε εθνικό επίπεδο, έχουμε την έκδοση του νόμου 3199/3000 και του προεδρικού διατάγματος 51/2007 για την εναρμόνιση με την ευρωπαϊκή νομοθεσία και γενικά να γίνει ο καθορισμός μέτρων και διαδικασιών για την ολοκληρωμένη προστασία και διαχείριση των υδάτων.

Παρόλο, που με το συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο γίνεται μία σημαντική προσπάθεια για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, το ζήτημα της υφαλμύρισης δεν αναφέρεται στη νομοθεσία παρά μεμονωμένα. Στην Ελλάδα υπάρχουν αρκετοί νόμοι και υπουργικές αποφάσεις για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτων, αφορούν όμως κυρίως ζητήματα όπως η διαχείριση των υγρών αποβλήτων ή η προστασία των υδάτων από τη νιτρορύπανση.

Το μόνο νομοθετικό πλαίσιο που σχετίζεται με το ζήτημα της υφαλμύρισης είναι η ισχύουσα ΚΥΑ 15393, ΦΕΚ 1022Β/5-8-2002 και η τροποποίησή της με το ΦΕΚ 1002Β/18-7-2005, για την κατάταξη δημόσιων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες σύμφωνα με το άρθρο 3 του Ν 1650/1986 όπως αντικαταστάθηκε με το άρθρο 1 του Ν 3010/2002 «Εναρμόνιση του Ν 1650/1986 με τις οδηγίες 97/11/ΕΕ και 96/61/ΕΕ κ.ά».

Σε αυτήν την ΚΥΑ τα έργα πρόληψης ή αντιμετώπισης της υφαλμύρισης των υπογείων υδάτων ή των εδαφών κατατάσσονται στο σύνολό τους στην ομάδα των υδραυλικών έργων (1<sup>η</sup> υποκατηγορία Α κατηγορίας). Κατατάσσονται δηλαδή στην κατηγορία των έργων που λόγω της φύσης τους, του μεγέθους και της έκτασής τους είναι πιθανό να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Ν 1650/1986 ΦΕΚ 160Α/18-10-1986 για την

προστασία του περιβάλλοντος με αντικατάσταση από το Ν 3010/2002 ΦΕΚ 91Α/25-4-2002). Λόγω των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον επιβάλλονται στα έργα αυτά γενικοί και ειδικοί περιβαλλοντικοί όροι, αφού προηγουμένως υποβληθεί Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Αβραμίδου, 2007).

### **3.5.2 Τρόποι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης**

Οι μέθοδοι για τον έλεγχο της διείσδυσης διαφέρουν αρκετά ανάλογα με την πηγή του αλμυρού νερού, την έκταση του προβλήματος, την τοπική γεωλογία της περιοχής, τη χρήση του νερού και φυσικά εξαρτώνται και από οικονομικούς παράγοντες. Καθώς ελάχιστη ποσότητα αλμυρού νερού (2%) στο φρέσκο είναι δυνατή για να καταστεί μη – πόσιμο, γενικά η προσοχή δίνεται στην πρόληψη του φαινομένου (Todd & Mays, 2005).

#### ***Προσαρμογή στο μοτίβο άντλησης***

Εάν αλλάξουμε τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης, μεταφέροντάς τα στην ενδοχώρα της περιοχής μελέτης, μπορούμε να βοηθήσουμε να δημιουργηθεί μία πιο σταθερή υδραυλική κλίση με πορεία προς τη θάλασσα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με μείωση του ρυθμού άντλησης από τα ήδη υπάρχοντα πηγάδια.

#### ***Τεχνητός εμπλουτισμός***

Η στάθμη του υπόγειου νερού μπορεί να αυξηθεί αλλά και να διατηρηθεί στα επιθυμητά επίπεδα με τη βοήθεια του τεχνητού εμπλουτισμού, με επιφανειακή εξάπλωση για τους ελεύθερους υδροφορείς και με πηγάδια εμπλουτισμού για τους περιορισμένους. Αυτό όμως κάνει απαραίτητη την εύρεση μίας εναλλακτικής πηγής νερού.

#### ***Φράγμα άντλησης θαλασσινού νερού***

Το φράγμα άντλησης δημιουργείται διατηρώντας ένα συνεχές αυλάκι άντλησης με μία σειρά πηγαδιών παρακείμενα στην ακτή. Το θαλασσινό νερό ρέει στην ενδοχώρα από τη θάλασσα προς το αυλάκι, καθώς φρέσκο νερό από τη λεκάνη ρέει προς τη θάλασσα μέσα στο αυλάκι. Το νερό που αντλείται είναι υφάλμυρο και συνήθως απορρίπτεται στη θάλασσα.

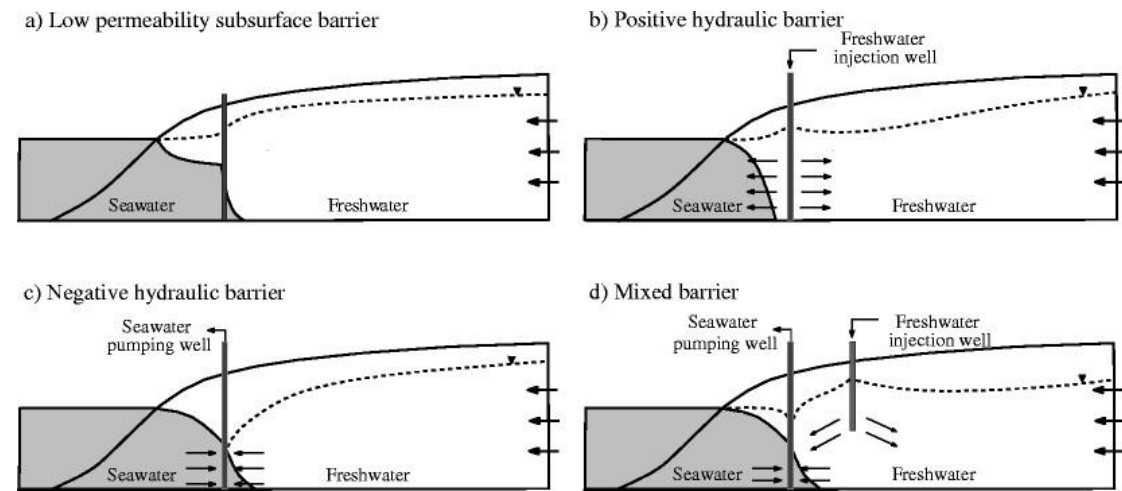
#### ***Φράγμα έκχυσης***

Αυτή η μέθοδος απαιτεί την ύπαρξη μίας σειράς πηγαδιών εμπλουτισμού παράλληλα στην ακτή. Το εισερχόμενο στα πηγάδια φρέσκο νερό, κινείται και προς τη θάλασσα και προς την ενδοχώρα. Γενικά είναι απαραίτητο το νερό που εισέρχεται στα πηγάδια εμπλουτισμού να είναι υψηλής ποιότητας. Είναι δυνατό να έχουμε και συνδυασμό πηγαδιών άντλησης και εμπλουτισμού, αυτό μειώνει τους ρυθμούς άντλησης και εμπλουτισμού, αλλά απαιτεί ένα μεγαλύτερο αριθμό πηγαδιών.

#### ***Υπόγειο φράγμα***

Η κατασκευή ενός αδιαπέρατου υπόγειου φράγματος, παράλληλα στην ακτογραμμή και κατά μήκος της κατακόρυφης έκτασης του υδροφορέα μπορεί να εμποδίσει την εισροή του θαλασσινού νερού μέσα στη λεκάνη. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός τέτοιου φράγματος 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 3.17: Είδη φραγμάτων που ελέγχουν τη θαλάσσια διείσδυση (Pool, Carrera, 2010).*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η Κρήτη, το μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και πέμπτο μεγαλύτερο στη Μεσόγειο, βρέχεται βόρεια από το Κρητικό και νότια από το Λιβυκό Πέλαγος, βρίσκεται 160 km νότια της Ελληνικής ηπειρωτικής χώρας, αποτελεί το νοτιότερο άκρο – σύνορο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και περιβάλλεται από πλήθος μικρών νήσων (Γαύδος, Γαυδοπούλα, Ντία, Διονυσάσας κ.ά.), οι οποίες είναι ακατοίκητες, με εξαίρεση τη νήσο Γαύδο. Η συνολική έκτασή του είναι 8.335 km<sup>2</sup>, έχει μήκος 260 km, πλάτος από 12 μέχρι 57 km και ακτογραμμή 1.306 km (συμπεριλαμβανομένων των νησιών). Ο πληθυσμός του, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ, το 1991 ήταν 540.054 κάτοικοι και το 2001 ήταν 601.131 κάτοικοι, παρουσιάζοντας αύξηση 11,3%.

Το νησί χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο και τέσσερα μεγάλα ορεινά συγκροτήματα με πολλά κοινά χαρακτηριστικά. Στους πρόποδες και τα πρόβουνα των ορεινών όγκων διαμορφώνονται τα πεδινά, εύφορα τμήματα του νησιού. Στα νότια και ανατολικά του Ψηλορείτη, με ηπιότερες κλίσεις, σχηματίζεται η κοιλάδα της Μεσαράς και αυτή του Ηρακλείου. Η κοιλάδα της Μεσαράς είναι η μεγαλύτερη και πιο συμπαγής του νησιού.



*Εικόνα 4.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο της Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13).*

Στην Κρήτη, τα περισσότερα ποτάμια είναι μικρού μήκους διαδρομής, εξ αιτίας του ιδιόμορφου σχήματος του νησιού (επιμήκες σχήμα), με την παρουσία των κυριότερων ορεινών όγκων κατά μήκος της μεγαλύτερης διάστασης. Ακριβώς όμως λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας του σχήματος της Κρήτης, σε συνδυασμό με τις απότομες πλαγιές των ψηλών οροσειρών της, τα ποτάμια είναι μεν μικρού μήκους διαδρομής αλλά ορμητικά, με αποτέλεσμα αρκετές ποσότητες φερτών υλικών, να εναποτίθενται στις ακτές και σε ορισμένες περιπτώσεις σχηματίζουν πολύ μικρά δέλτα.

Εκτός από τη βροχόπτωση και το ανάγλυφο, ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που καθορίζει τα επιφανειακά νερά της Κρήτης, είναι και η σύσταση των πετρωμάτων της. Το 45 – 50% της έκτασης της Κρήτης καλύπτεται από ανθρακικά πετρώματα συγκεντρωμένα στους τέσσερις σημαντικότερους ορεινούς όγκους του νησιού, που αποτελούν και τους κύριους υδροσυλλέκτες του. Το γεγονός ότι τα ανθρακικά πετρώματα είναι υδροπερατά, σε συνδυασμό με τις τεκτονικές δομές που εμφανίζονται στην Κρήτη (ρήγματα, ασυνέχειες κ.ά.), οδηγούν στη μεγάλη κατείσδυση του νερού της βροχής προς τον υπόγειο υδροφόρο.

Πάνω στα ασβεστολιθικά πετρώματα, συναντούμε κυρίως ποτάμια με διαλείπουσα ροή (χειμάρρους), η οποία χαρακτηρίζεται από μια περιοδικότητα, που συμπίπτει με την περιοδικότητα των βροχοπτώσεων, δηλαδή εμφανίζεται πάντα τους χειμερινούς και για λίγο τους ανοιξιάτικους μήνες. Εκτός από χειμάρρους, συναντούμε και λίγα ποτάμια μόνιμης ροής, με ορισμένα από αυτά να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο από την άποψη των φυσικοχημικών παραμέτρων τους, όσο και γιατί φιλοξενούν ένα σημαντικό αριθμό ενδημικών ή σπάνιων ειδών.

Η περιοχή μελέτης, δηλαδή ο παράκτιος υδροφόρος Τυμπακίου (Πορώδες Τυμπακίου – GR1300081 και Πορώδες Παράκτιο Τυμπακίου – GR1300082), ανήκει στη Λεκάνη Απορροής Ρεμάτων Νοτίου Τμήματος Χανίων – Ρεθύμνου – Ηρακλείου (GR40) και είναι τμήμα του μεγαλύτερου υδροφόρου συστήματος της λεκάνης της Μεσαράς. Βρίσκεται στο Τυμπάκι (Δημοτική Κοινότητα Τυμπακίου) και ανήκει στο δήμο Φαιστού (συνένωση τριών δήμων) μετά την εφαρμογή του προγράμματος Καλλικράτης. Έδρα του δήμου είναι οι Μοίρες. Πρόκειται για πεδινό και παραθαλάσσιο δήμο, με υψόμετρο 38 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Στην απογραφή του 2001 ο πληθυσμός του Καποδιστριακού τότε δήμου ήταν 5312. Οι κύριες ασχολίες του πληθυσμού στην περιοχή είναι ο τουρισμός και η γεωργία.

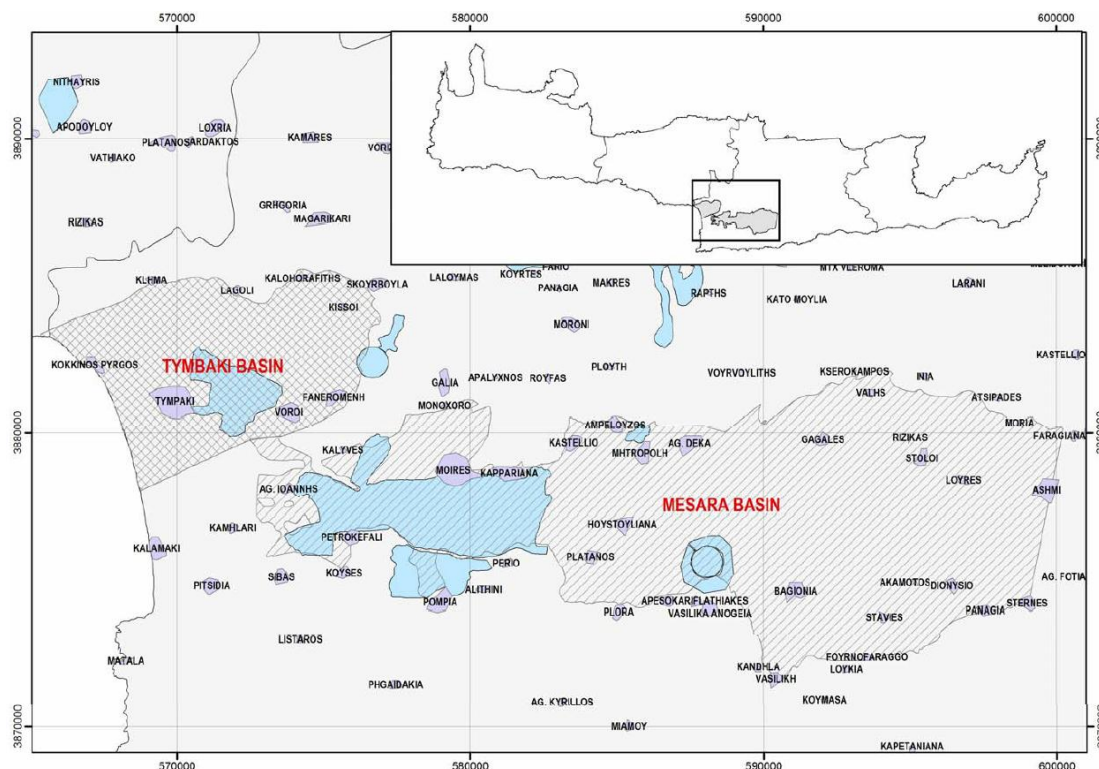
Πιο συγκεκριμένα η λεκάνη του Τυμπακίου ενώνεται με το δυτικό τμήμα της πεδιάδας της Μεσαράς, με τον ποταμό Γεροπόταμο μέσω του φαραγγιού της Φαιστού, κοντά στην αρχαία πόλη της Φαιστού, στο νότιο – κεντρικό τμήμα του νησιού με μέσο υψόμετρο τα 200 m. Η πεδιάδα του Τυμπακίου αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αγροτικές περιοχές της Κρήτης με καλλιέργεια πρώιμων κηπευτικών σε θερμοκήπια καθώς και ελαιόδεντρων. Η αρδευόμενη έκταση είναι 40.000 στρέμματα και το σύνολο του αρδευτικού νερού που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα προέρχεται από το υπόγειο δυναμικό. Η λεκάνη του Τυμπακίου καλύπτει μία επιφάνεια σχεδόν 55 km<sup>2</sup>.

Η βροχόπτωση στην περιοχή είναι πολύ μικρή, λιγότερο από 500 mm το χρόνο. Ο συντελεστής υγρασίας (Ih) της περιοχής, προκύπτει κι αυτός μικρός (0,53), γεγονός που δίνει οριακά ημιάγονη (ημιερημική) κατάσταση. Παρά αυτές τις όχι και τόσο ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες η λεκάνη είναι το επίκεντρο πολύ έντονης γεωργικής δραστηριότητας. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το υπόγειο νερό τροφοδοτεί όλες τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και η άντληση του το χρόνο φτάνει τα 7.000.000 m<sup>3</sup> (Paritsis, 2005).

Η προφανής σπουδαιότητα της τοπικής οικονομίας, τόσο της λεκάνης του Τυμπακίου αλλά και της Μεσαράς, οδήγησαν τη Διεθνή Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας (FAO) των Ηνωμένων Εθνών, να πραγματοποιήσουν κατά την περίοδο 1967 – 1970 μία εκτενή έρευνα της υδρογεωλογίας και των υδατικών πόρων της περιοχής. Τα αποτελέσματα εκδόθηκαν σε



μία σειρά αναφορών, όμως όπως φαίνεται η έρευνα αυτή δεν ασχολήθηκε καθόλου με την πιθανότητα μελλοντικής εισχώρισης του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα της περιοχής (Paritsis, 2005). Πλέον λόγω της σπουδαιότητας του υδροφορέα, έχουν εγκατασταθεί τρεις σταθμοί, δύο κοντά στην ακτή (Αεροδρόμιο – Γεροπόταμος και Κόκκινος Πύργος) και ένας στο κέντρο περίπου της λεκάνης (γεώτρηση A3).



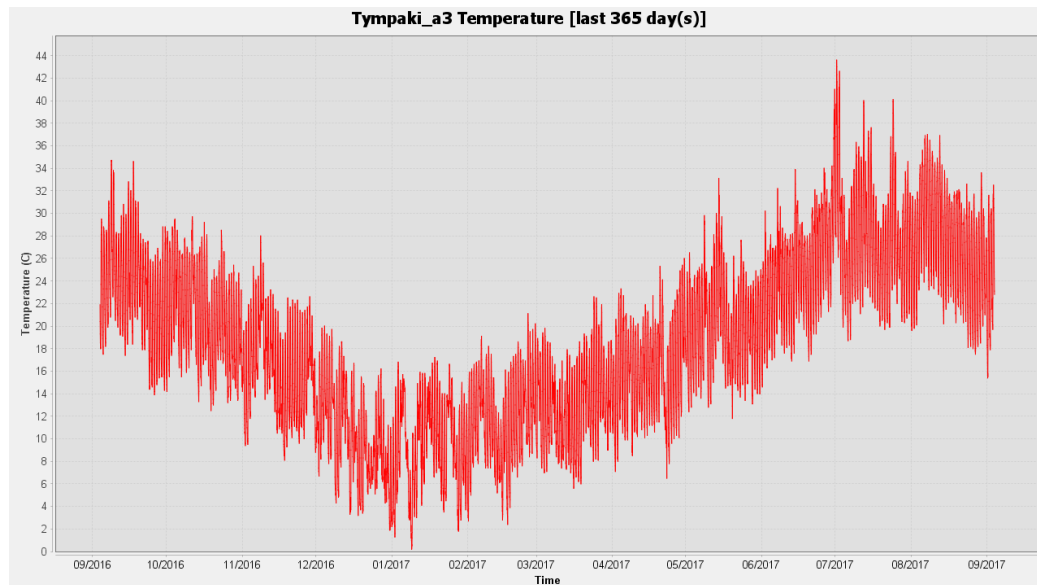
Εικόνα 4.2: Χάρτης της λεκάνης Τυμπακίου και Μεσαράς. Τα μεγάλα αρδευτικά έργα φαίνονται με μπλε χρώμα (Paritsis, 2005).

## 4.2 Κλιματολογικά στοιχεία & μετεωρολογικά χαρακτηριστικά

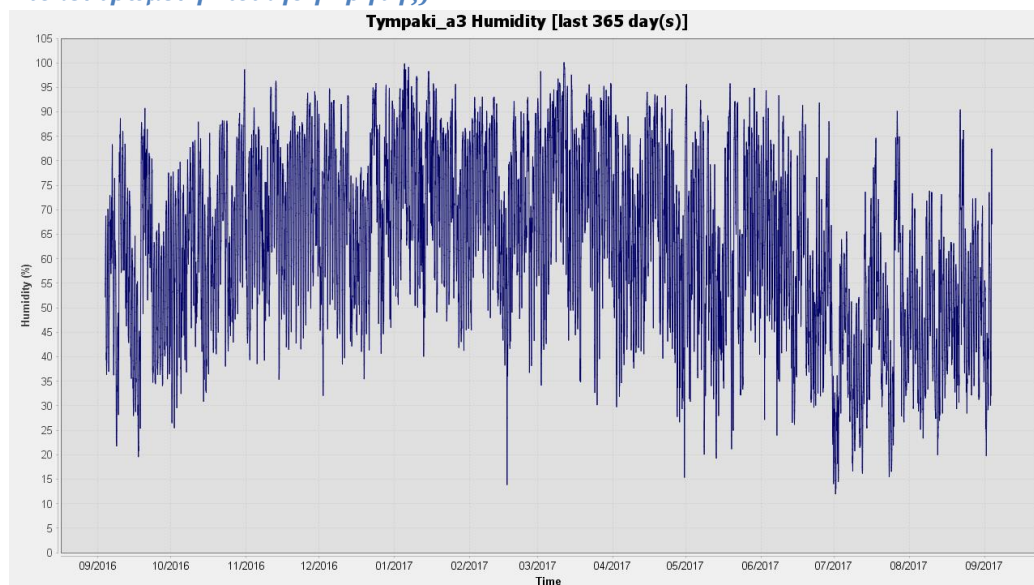
Γενικά το κλίμα του υδατικού διαμερίσματος της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως μεταβατικό ενδιάμεσο μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Σύμφωνα με τα συνοπτικά για τον ελληνικό χώρο κλιματολογικά χαρακτηριστικά η περιοχή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιοκλιματικών οροφών με διακυμάνσεις από τα ανατολικά προς τα δυτικά και τα πεδινά προς τα ορεινά.

Η πεδινή ζώνη της Κρήτης αποτελεί κλιματικά μια μετάβαση από το μεσογειακό προς το ημιερημικό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από μικρό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιο χειμώνα, και ξηρή περίοδο μεγάλης διάρκειας. Το καλοκαίρι, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από τον Ιούνιο μέχρι τον Σεπτέμβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Στην περιοχή αυτή, δεν παρατηρείται ποτέ παγετός και η θερμοκρασία σπάνια πέφτει κάτω από 0 °C. Οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι ήπιες. Όσο αφορά τη μέση ετήσια βροχόπτωση, στην ανατολική Κρήτη είναι κατά 22% μικρότερη σε σχέση με τη δυτική. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη. Το 25% περίπου της ετήσιας

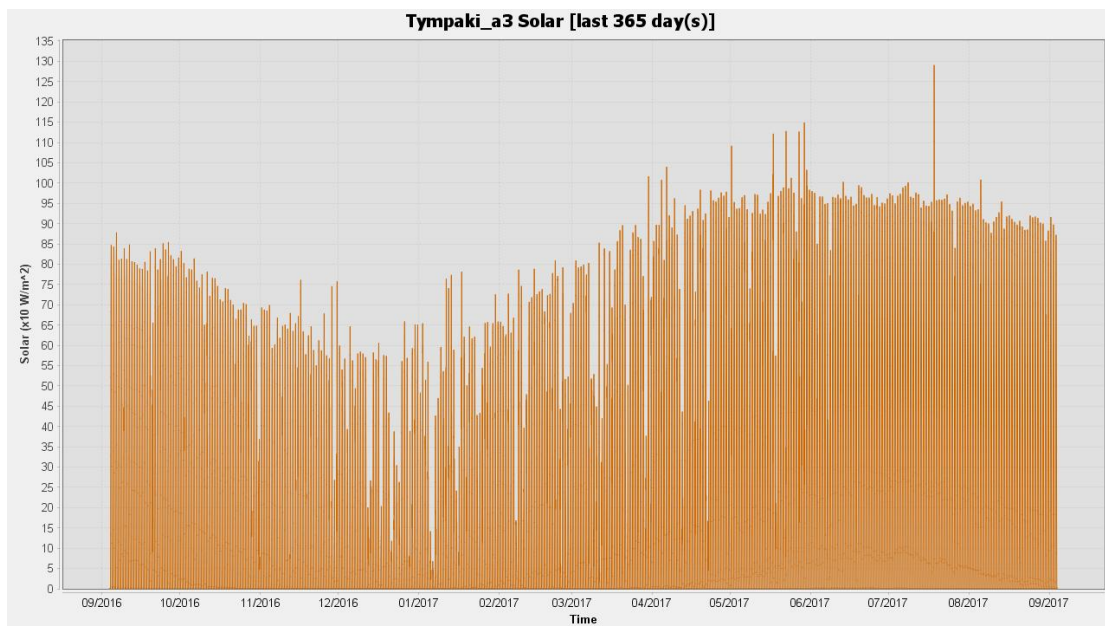
βροχόπτωσης συμβαίνει στους περισσότερους σταθμούς της Κρήτης στη διάρκεια του βροχότερου μήνα. Αντίστοιχα, ο μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής κυμαίνεται μεταξύ 15 ημερών περίπου κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο και 0,3 ημέρες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Έτσι και η λεκάνη του Τυμπακίου, χαρακτηρίζεται από ημερησικό κλίμα και το υδρολογικό της έτος μπορεί να διακριθεί σε δύο περιόδους, υγρή και ξηρή.



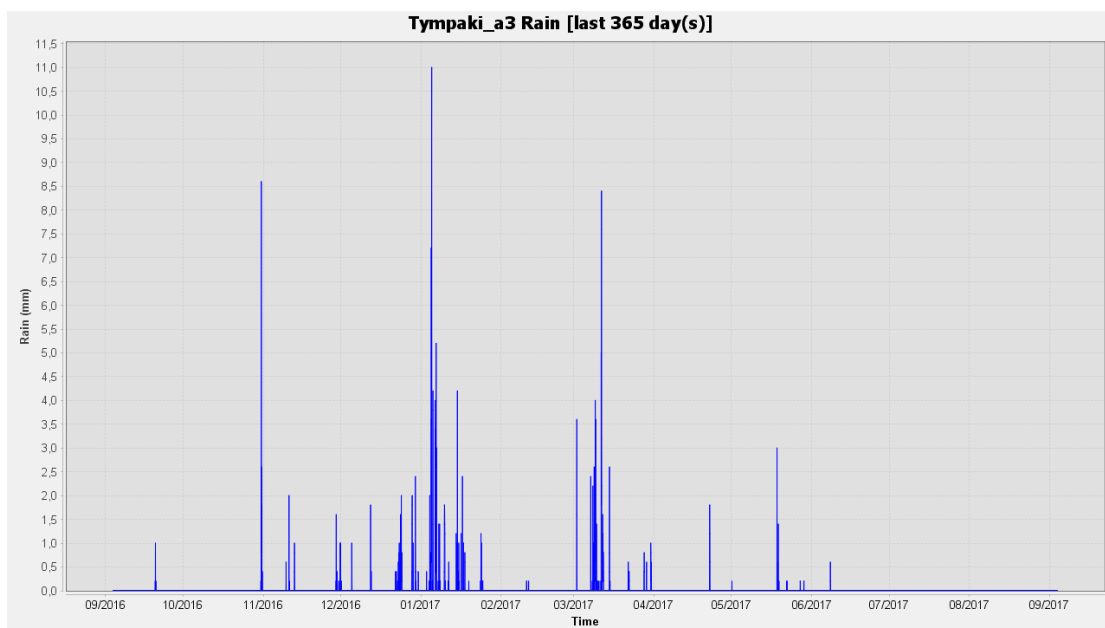
*Εικόνα 4.3: Θερμοκρασιακή διακύμανση στο σταθμό Α3 - Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης).*



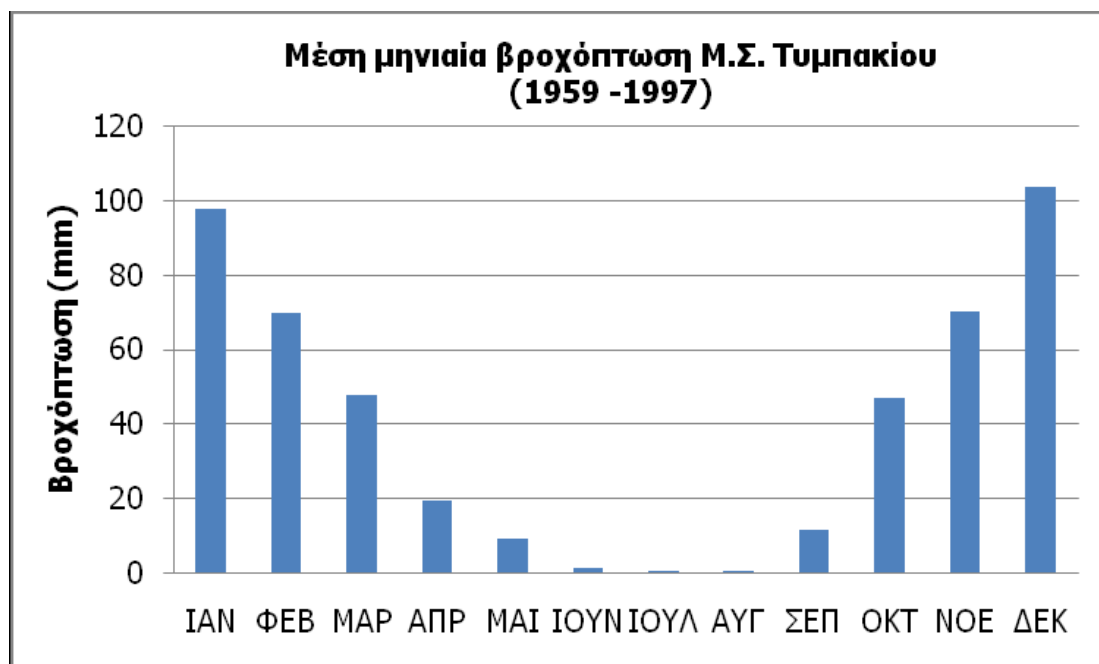
*Εικόνα 4.4: Διακύμανση υγρασίας στο σταθμό Α3 - Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης).*



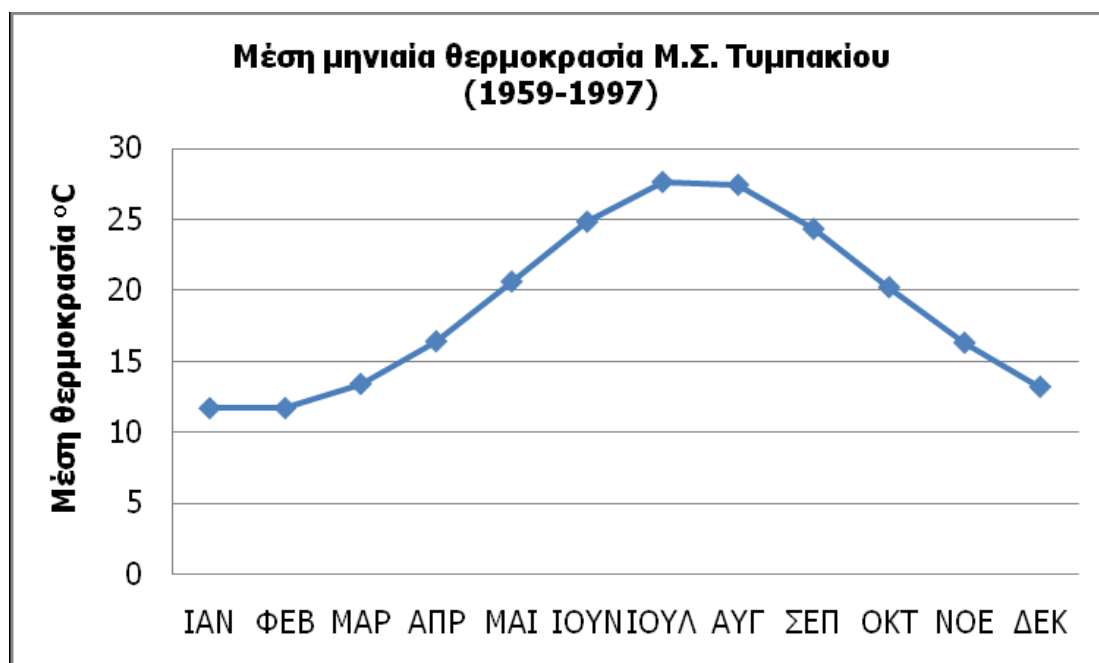
*Εικόνα 4.5: Διακύμανση ηλιοφάνειας στο σταθμό Α3 – Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης).*



*Εικόνα 4.6: Διακύμανση βροχοπτώσεων στο σταθμό Α3 – Τυμπάκι, για το υδρολογικό έτος 2016-2017 (Μετεωρολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Τυμπάκι Α3, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης).*



Εικόνα 4.7: Μέση μηνιαία βροχόπτωση Μ.Σ. Τυμπακίου (έτη 1959-1997) (Μελέτη για την αναθεώρηση - επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).



Εικόνα 4.8: Μέση μηνιαία θερμοκρασία Μ.Σ. Τυμπακίου (έτη 1959-1997) (Μελέτη για την αναθεώρηση - επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).

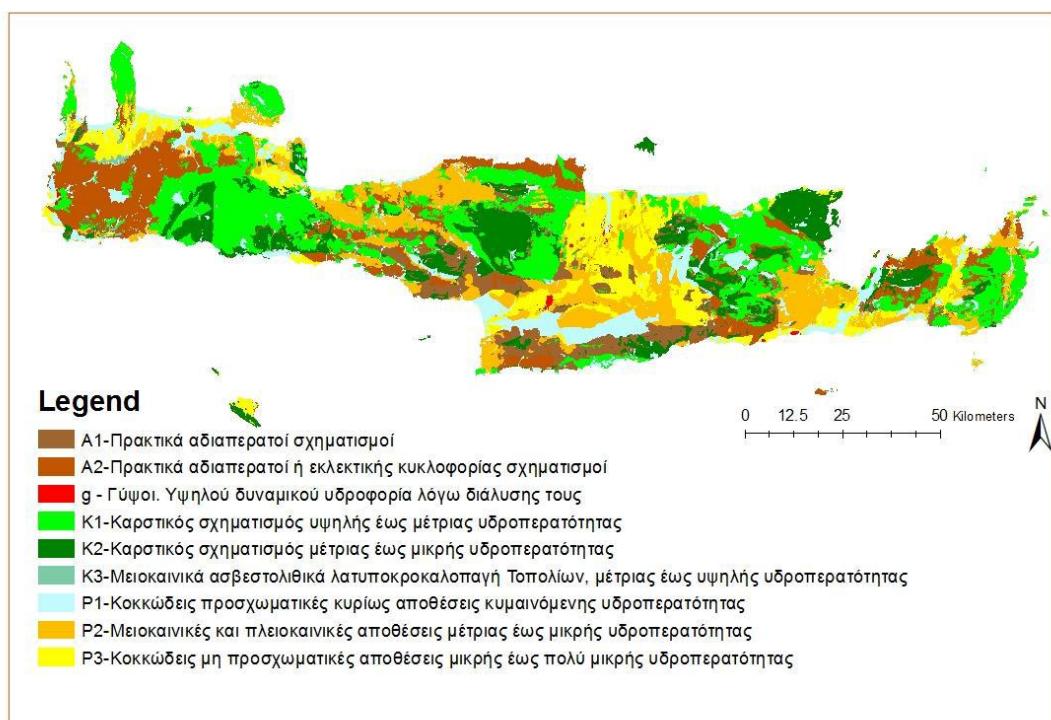
## 4.3 Γεωλογικά & Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

### 4.3.1 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η γεωλογική δομή της Κρήτης συνδέεται άμεσα με τη συνολική δομή της Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο ΒΔ – ΝΑ. Η Κρήτη έχει μία πολύπλοκη γεωλογική δομή και έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά με τη δομή της, αυτό οφείλεται στη γεωτεκτονική θέση που κατέχει σε σχέση με τις δύο συγκλίνουσες λιθοσφαιρικές πλάκες, την αφρικάνικη και την ευρασιατική. Χαρακτηριστικό στοιχείο της δομής της είναι τα αλληπάλγηλα τεκτονικά καλύμματα των διάφορων ζωνών, τα οποία αναπτύσσονται στην ενότητα Ταλέα Όρη, των πλακωδών ασβεστόλιθων.

Η ευρύτερη περιοχή της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου, καλύπτεται κατά κύριο λόγο από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους καθώς και μεσοζωϊκούς ασβεστόλιθους. Αρχίζοντας από τους νεότερους προς τους παλαιότερους στρωματογραφικά γεωλογικούς σχηματισμούς, απαντώνται οι εξής:

- Αλλουβιακές αποθέσεις του Ολόκαινου
- Σχηματισμός Φοινικιάς Άνω – Μέσου Πλειόκαινου
- Σχηματισμός Αγίας Βαρβάρας ηλικίας Κάτω Μειόκαινου
- Ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού



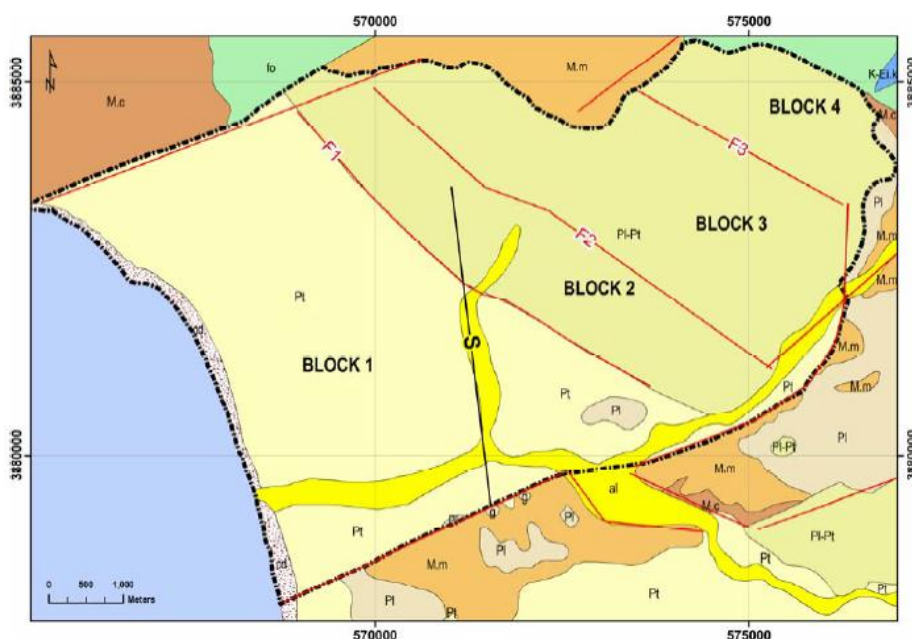
*Εικόνα 4.9: Υδρολιθολογικός χάρτης Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13).*



Το νησί χαρακτηρίζεται από μεγάλο αριθμό ρηγμάτων, γεγονός που υποδεικνύει έντονη τεκτονική δραστηριότητα. Αυτή η δραστηριότητα επηρέασε την ακεραιότητα και τη συνέχεια των διάφορων γεωλογικών στρωμάτων, με αποτέλεσμα τα ρήγματα να φέρνουν σε επικοινωνία μεταξύ τους στρώματα με διαφορετικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά (Recare, Case – study of Timpaki, Crete).

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης του Τυμπακίου, είναι το δυτικότερο άκρο της λεκάνης της Μεσαράς, η οποία βρίσκεται ανάμεσα στο όρος Ίδη στα βορειοδυτικά, στο όρος Δίκτη στα νοτιοανατολικά και στα Αστερούσια όρη στα νότια. Η εναπόθεση (καθίζηση) στη λεκάνη της Μεσαράς ξεκίνησε κατά το Μέσο Μειόκαινο και κατέληξε στην τελική εναπόθεση σειρών από κροκαλοπαγή, άμμο, μάργες και άργιλο, με απότομες οριζόντιες και κατακόρυφες λιθολογικές αλλαγές (Panagoroulou et al., 2013).

Η έντονη ρηγματώση είναι εμφανής και στην περιοχή μελέτης του υδροφορέα Τυμπακίου. Όπως έδειξαν και οι μελέτες του Παγκόσμιου Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), η λεκάνη του Τυμπακίου περιλαμβάνει BBD – NNA ρήγματα, τα οποία προέρχονται από ανύψωση του πλειστοκαινικού/νεογενούς οριακού στρώματος του υδροφορέα, με κατακόρυφη μετατόπιση η οποία αυξάνεται σταδιακά προς τα δυτικά (Εικόνα 4.10). Ακόμη αξίζει να αναφέρουμε ότι προχωρώντας βορειοανατολικά παρατηρούμε αύξηση του ύψους κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, στο οποίο συναντάμε το οριακό στρώμα του υδροφορέα. Λόγω αυτής της ρηγματώσης, ο υδροφορέας μπορεί εύκολα να διακριθεί σε τέσσερα τμήματα (Εικόνα 4.10) (Paritsis, 2005).



*Εικόνα 4.10: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης Τυμπακίου. Αλλουβιακές αποθέσεις (al), αποθέσεις του Ολόκαινου – ανώτερου Πλειστοκαινου (Pt), αποθέσεις του Πλειστοκαινου – ανώτερου Πλειόκαινου (Pl – Pt). Οι υπόλοιποι σχηματισμοί είναι ημιδιαπερατοί σχηματισμοί του Νεογενούς ή του Μεσοζωϊκού. Ακόμα φαίνονται τα όρια της περιοχής μελέτης, καθώς και τα ρήγματα (F1, F2, F3) που χωρίζουν τον υδροφορέα (Paritsis, 2005).*

Οι αλλουβιακές (προσχωματικές) αποθέσεις συναντώνται σε αυλάκια που έχουν δημιουργηθεί λόγω της διάβρωσης του κατώτερου Πλειστόκαινου και αποτελούνται από κόκκινο και άργιλο του ανώτερου Πλειστόκαινου, λάσπη, χαλίκια, αποθέσεις χαλικιών του Ολόκαινου με άμμο, λάσπη, άργιλο και οργανική ύλη. Οι αποθέσεις του κατώτερου Πλειστόκαινου αποτελούνται από χαλίκια, ελάχιστα έως καλά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή, άμμο, λάσπη και άργιλο. Σε εκτεταμένες εκτάσεις, που φτάνουν μερικά χιλιόμετρα στους λόφους της λεκάνης του Τυμπακίου, υπάρχουν προεξοχές με μεγάλα τμήματα κροκαλοπαγών. Οι εναποθέσεις αυτές χαρακτηρίζονται από έντονες αλλαγές (οριζόντιας διεύθυνσης) λόγω διάβρωσης. Ακόμη είναι ιδιαίτερα ανομοιογενή γεγονός που φαίνεται στις αντίστοιχες ιδιότητες του υδροφορέα. Τα στρώματα του Νεογενούς, έχουν εντοπισθεί σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις (των μελετών του FAO), περίπου στα 200 m, και αποτελούνται κυρίως από άμμο, αμμόλιθους και άργιλο (Paritsis, 2005).

#### 4.3.2 Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης

Το έντονο ανάγλυφο του υδατικού διαμερίσματος, οι μεγάλες ποσότητες ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, η έκταση του νησιού και η πολύπλοκη γεωλογική δομή του δημιουργούν ποικιλία στην διακίνηση του νερού, τόσο του επιφανειακού όσο και του υπόγειου. Ως αποτέλεσμα αυτών παρατηρείται η ανάπτυξη πολλών υδρολογικών λεκανών που η έκτασή τους δεν ξεπερνά τα 600 km<sup>2</sup>. Το πυκνό υδρογραφικό δίκτυο, χειμαρρώδους χαρακτήρα, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση των παροχών του. Λίγα είναι τα ρέματα που διατηρούν τη ροή σε όλη τη διάρκεια του χρόνου και τροφοδοτούνται κυρίως από πηγαία νερά.

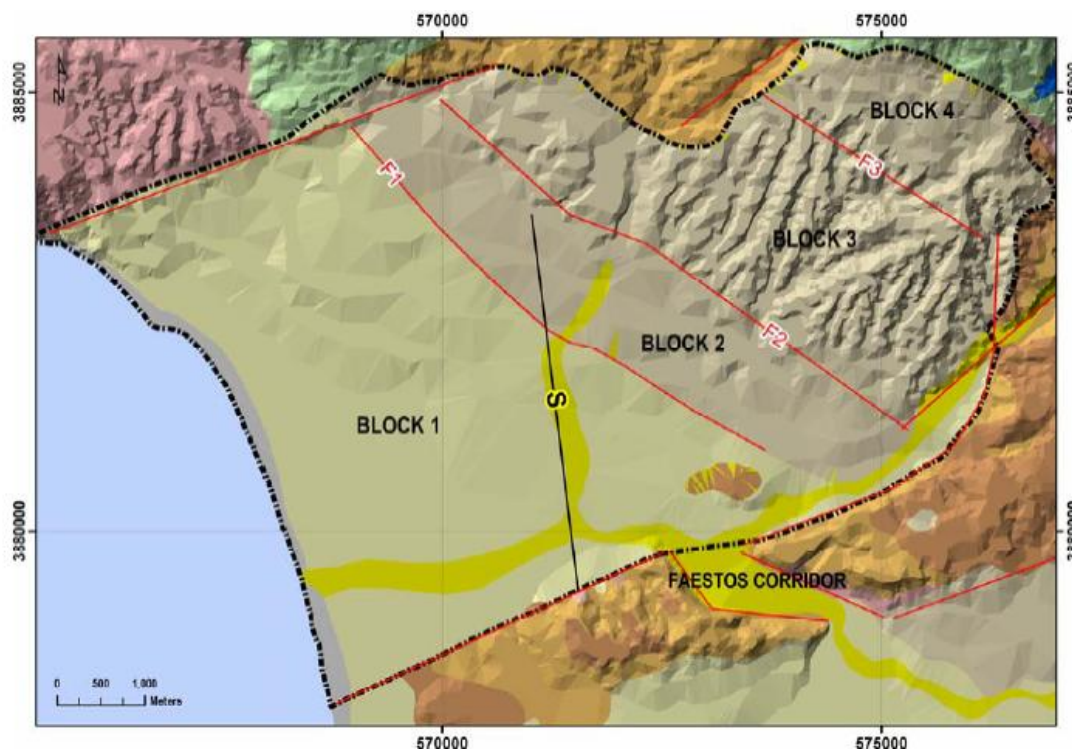
Η συνολική απορροή που διακινείται ετησίως επιφανειακά από τα κυριότερα υδατορεύματα του νησιού ανέρχεται σε 500\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ έτος περίπου. Η απορροή αυτή περιλαμβάνει τόσο πηγαία νερά που εκφορτίζονται εντός των αντίστοιχων λεκανών απορροής όσο και την καθεαυτό επιφανειακή απορροή.

Στην λεκάνη του Τυμπακίου, η πεδιάδα, ενδείκνυται περισσότερο για εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων σε σχέση με τις λοφώδεις εκτάσεις της, λόγω των υδρογεωλογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της. Η λεκάνη έχει αυτή τη μορφή (Εικόνα 4.11), είναι σχεδόν επίπεδη κοντά στην ακτή στα νοτιοδυτικά και στα βορειοανατολικά κοντά στο όρος Ίδη αναπτύσσει λοφώδεις εκτάσεις, λόγω της δράσης του ρήγματος Κλίμα στο βορρά και της Καρδιώτισσας στα ανατολικά (Panagoroulos et al., 2013). Στην λοφώδη περιοχή της λεκάνης, η εκμετάλλευση του υπόγειου νερού είναι πιο δύσκολη, λόγω της μορφολογίας του εδάφους και γι' αυτό δεν υπάρχουν πολλά υδρογεωλογικά δεδομένα για την περιοχή (Paritsis, 2005).

Όσο αφορά τις εισροές του νερού στον υδροφόρο σύστημα του Τυμπακίου, είναι η κατείσδυση λόγω των κατακρημνισμάτων, εμπλουτισμός από ρέματα/ποτάμια, πλευρικές εισροές από την πεδιάδα της Μεσαράς και επιστρεφόμενες ποσότητες λόγω της άρδευσης. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η μέση βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης κυμαίνεται στα 500 mm το χρόνο, παρ' όλα αυτά μπορεί να υπάρξει καθυστέρηση μέχρι και πέντε μήνες για να παρατηρηθεί η μέγιστη στάθμη στο υπόγειο νερό, λόγω μεγάλων βροχοπτώσεων.

Οι εισροές που οφείλονται στα ποτάμια και τα ρέματα αποτελούν και την κύρια πηγή εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφόρου συστήματος του Τυμπακίου. Ο εμπλουτισμός γίνεται μέσω των αλλουβιακών αποθέσεων μεγάλων ποταμών και ρεμάτων που διέρχονται

από την πεδιάδα (π.χ. Γεροπόταμος, Κουτσουρίδης, Μάγειρος και Κλεματιανός). Οι πλευρικές εισροές οφείλονται σε ένα μικρό φαράγγι, το φαράγγι της Φαιστού, το οποίο έχει προσανατολισμό ΒΒΑ – ΝΝΔ και αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις του Γεροπόταμου. Έτσι ο Γεροπόταμος ρέει στη λεκάνη του Τυμπακίου υπόγεια. Το φαράγγι της Φαιστού διαχωρίζει τη λεκάνη του Τυμπακίου από τη λεκάνη της Μεσαράς (Paritsis, 2005, Panagopoulos et al., 2013).



*Εικόνα 4.11: Ψηφιακό μοντέλο του εδάφους με βάση το γεωλογικό χάρτη της λεκάνης του Τυμπακίου (Paritsis, 2005).*

## 4.4 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά

### 4.4.1 Δομή της οικονομίας

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η περιοχή μελέτης, χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα και κατά τους θερινούς μήνες έντονη τουριστική δραστηριότητα. Επομένως, ο περισσότερος πληθυσμός απασχολείται στον πρωτογενή και τουριστικό τομέα.

Γενικά ο πρωτογενής τομέας κατέχει δεσπόζουσα θέση τόσο από άποψη προϊόντος, όσο και απασχόλησης, αλλά χαρακτηρίζεται από μικρό και διάσπαρτο κλήρο, από την εξάρτηση από παραδοσιακά πρότυπα και καλλιέργειες και διαρθρωτική υστέρηση με ατελείς υποδομές και παραγωγικά συστήματα σε μεγάλο βαθμό παρωχημένα. Επίσης το ποσοστό των αρδεύσιμων εκτάσεων στην Κρήτη είναι πολύ χαμηλότερο του αντίστοιχου μέσου όρου της Ελλάδας, ενώ η δομή των καλλιεργειών χαρακτηρίζεται από έμφαση σε παραδοσιακές καλλιέργειες. Οι κηπευτικές καλλιέργειες καλύπτουν το 3% του συνόλου των καλλιεργήσιμων εκτάσεων αλλά η Κρήτη διαθέτει το 50% των θερμοκηπίων στην Ελλάδα, με πλεονεκτήματα στην παραγωγή λαχανικών και άνθων. Διάσπαρτη είναι η κτηνοτροφία, με ελάχιστες οργανωμένες κτηνοτροφικές μονάδες.

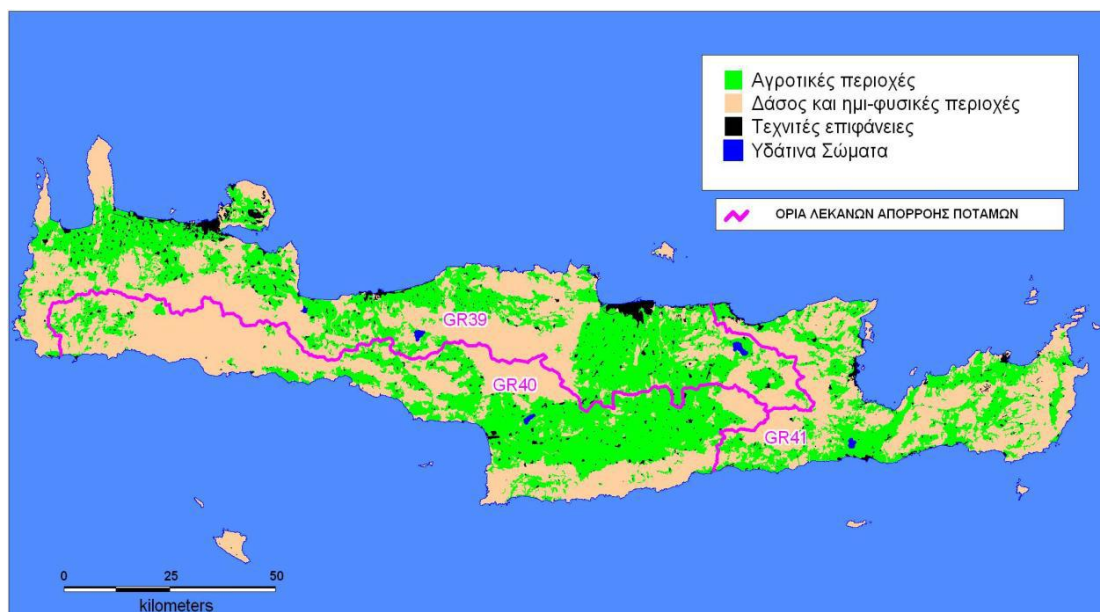


Η συμβολή του αγροτικού τομέα στον νομό Ηρακλείου έγκειται στην κοινωνική συνοχή στην ύπαιθρο, όπως και στην απασχόληση των κατοίκων ορεινών περιοχών. Είναι επίσης σημαντικός, διότι δημιουργεί προϋποθέσεις ανάπτυξης σε άλλες οικονομικές δραστηριότητες, ιδιαίτερα στον τομέα της μεταποίησης. Έτσι τελικά η γεωργία αποτελεί τη βάση της οικονομίας, με καλλιέργειες υψηλών στρεμματικών αποδόσεων. Το κύριο πλεονέκτημα στην ανάπτυξη του αγροτικού τομέα εστιάζεται κυρίως στο εδαφοκλιματικό περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής, που δίνει τη δυνατότητα για παραγωγή προϊόντων εκτός εποχής (οπωροκηπευτικών και ανθοκομικών), αλλά και προϊόντων υψηλής ποιότητας, τόσο από τις παραδοσιακές καλλιέργειες όσο και από τη βιολογική γεωργία. Οι δενδρώδεις καλλιέργειες κατέχουν υψηλή θέση στην ιεράρχηση του κλάδου, ενώ την αμέσως επόμενη θέση παίρνουν τα αμπέλια και τα κηπευτικά. Χαρακτηριστικό της γεωργικής παραγωγής είναι ο όγκος των καλλιεργειών του ελαιόλαδου, τις οποίες ακολουθούν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Ο τουρισμός είναι ο πιο δυναμικά αναπτυσσόμενος τομέας και η ζήτηση έδωσε κίνητρα για σημαντικές επενδύσεις σε ξενοδοχειακές μονάδες, με αποτέλεσμα την ποσοτική και ποιοτική αναβάθμιση της ξενοδοχειακής υποδομής. Την ίδια στιγμή αντιμετωπίζει διαρθρωτικά προβλήματα τα οποία εστιάζονται κυρίως στην έντονη εποχικότητα και την περιορισμένη διάχυση της τουριστικής κίνησης προς τους οικισμούς της ενδοχώρας, δεδομένου ότι οι ξενοδοχειακές υποδομές συγκεντρώνονται κυρίως στα βόρεια παράλια και σε μικρές εστίες στο νότο, ενώ η πορεία του σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από εξωγενείς, μη ελεγχόμενες συνθήκες, που συντελούν σε διακυμάνσεις των επιδόσεων του.

#### **4.4.2 Χρήσεις γης & χρήσεις νερού**

Οι χρήσεις γης στην περιφέρεια Κρήτης, καθορίζονται από την μορφολογία του εδάφους, το υπάρχον υδάτινο δυναμικό και την εν γένει ανάπτυξη της περιοχής. Στον χάρτη που ακολουθεί (Εικόνα 4.12), περιγράφονται χωρικά και κατηγοριοποιούνται οι χρήσεις γης σε τέσσερις κλάσεις: αγροτικές περιοχές, δάση και ημιφυσικές περιοχές, τεχνητές επιφάνειες και υδατικά συστήματα. Οι συγκεκριμένες περιοχές δύναται να αποτελέσουν σημειακές ή διάχυτες περιβαλλοντικές πιέσεις σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα. Στον πίνακα (Πίνακας 4.1) που ακολουθεί, παρουσιάζονται στοιχεία στο επίπεδο του νομού Ηρακλείου σύμφωνα με το Corine Land Cover 2000 για την εδαφική οργάνωση, τις χρήσεις γης και την κάλυψη του εδάφους.



*Εικόνα 4.12: Χρήσεις γης στο Υ.Δ. Κρήτης (Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης – GR13).*

Η Κρήτη, σαν νησιωτική περιοχή (σε αντίθεση με τις ηπειρωτικές που υπάρχουν μεγάλα ποτάμια), επωφελείται μόνο από τα νερά που φτάνουν σε αυτήν με τη μορφή κατακρημνισμάτων (βροχή, χαλάζι, χιόνι). Η γεωγραφική της όμως θέση και το γεωφυσικό της περιβάλλον, δεν ευνοούν τη συγκέντρωση μεγάλου όγκου νερού. Εξάλλου, η γεωγραφική της τοποθέτηση στη διεύθυνση ανατολής – δύσης, καθώς και η ύπαρξη υψηλών οροσειρών καθορίζουν το ύψος των νερών που δέχεται ετησίως. Έτσι, παρατηρείται μια σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης τόσο γεωγραφικά (η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα νότια προς τα βόρεια), όσο και φυσιογραφικά (πεδινές προς ορεινές περιοχές).

Η μέση ετήσια προσφορά (θεωρητικά) επιφανειακών και υδατικών πόρων ανέρχεται σε  $2860 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού ενώ η επιθυμητή ζήτηση ανέρχεται μόλις στα  $515 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (η πραγματική κατανάλωση για το έτος 2000 ανερχόταν σε  $372 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ). Όμως η υδιαίτερη γεωλογία και γεωμορφολογία του Υ.Δ. και οι κλιματολογικές συνθήκες μετατρέπουν αυτό το ισχυρά απόλυτο πλεόνασμα σε μικρότερο σχετικό, σε συνδυασμό δε με την έντονη εποχιακότητα της προσφοράς και την χωρική ανισοκατανομή των πόρων εμφανίζονται και αδυναμίες κάλυψης της υφιστάμενης ζήτησης κατά τόπους. Ενδεικτικό των ιδιαιτεροτήτων του νησιού είναι το γεγονός ότι οι τρεις μεγάλες υφάλμυρες καρστικές πηγές της νήσου (Αλμυρός Γεωργιούπολης, Αλμυρός Ηρακλείου και Αλμυρός Αγίου Νικολάου) εκφορτίζουν σε μέση ετήσια βάση περί τα  $450 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , δηλαδή το 15,7% της συνολικής προσφοράς νερού, το 87,3% της συνολικής επιθυμητής ζήτησης και το 120,9% της πραγματικής σημερινής κατανάλωσης.

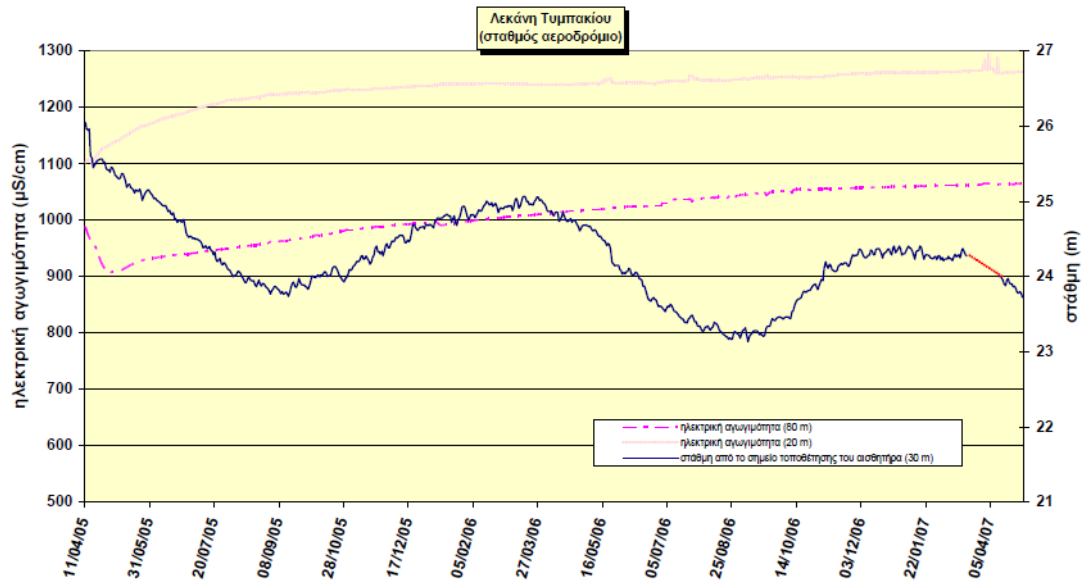
Τύπος κάλυψης γης	Π.Ε. Ηρακλείου (km <sup>2</sup> )
Αεροδρόμια	5,94
Αμπελώνες	193,17
Απογυμνωμένοι βράχοι	2,13
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	5,43
Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	239,96
Δάσος κωνοφόρων	15,98
Δάσος πλατύφυλλων	0,69
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	30,03
Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	5,71
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	97,44
Ελαιώνες	951,29
Θάμνοι και χερσότοποι	0,52
Λιβάδια	414,80
Μεταβατικές δασώδεις – θαμνώδεις εκτάσεις	48,16
Μη αρδύσιμη αρόσιμη γη	5,28
Μικτό δάσος	-
Μόνιμα αρδευόμενη γη	-
Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	1,88
Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	2,36
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	2,08
Σκληροφυλλική βλάστηση	442,11
Συλλογές υδάτων	8,06
Συνεχής αστική οικοδόμηση	2,05
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	161,33
Φυσικοί βοσκότοποι	0,95
Χώροι εξόρυξης ορυκτών	1,82
Χώροι οικοδόμησης	1,24
Ζώνες λιμένων	0,43
<b>Σύνολο</b>	<b>2.641</b>

*Πίνακας 4.1 Κάλυψη γης της περιφέρειας Ηρακλείου, βάσει του Corine Land Cover 2000 (Μελέτη για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Περιφέρεια Κρήτης).*

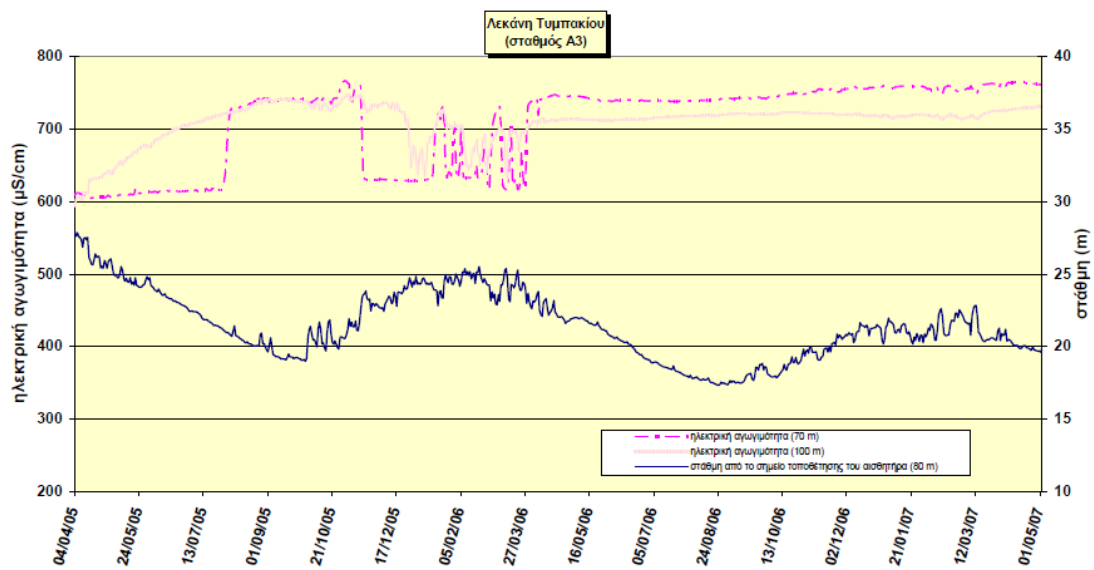
#### 4.5 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην περιοχή μελέτης

Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, ο υδροφόρας του Τυμπακίου βρίσκεται νοτιοδυτικά στο νομό του Ηρακλείου Κρήτης, και είναι τμήμα του υδροφόρου συστήματος της Μεσαράς. Καθώς αποτελεί περιοχή με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην οικονομία (γεωργία, τουρισμός) έχουν γίνει διάφορες μελέτες του φαινομένου της υφαλμύρισης, που παρατηρείται λόγω της γειτνιάσής του με τη θάλασσα και ιδιαίτερα στο βορειοδυτικό παράκτιο τμήμα (Κόκκινος Πύργος).

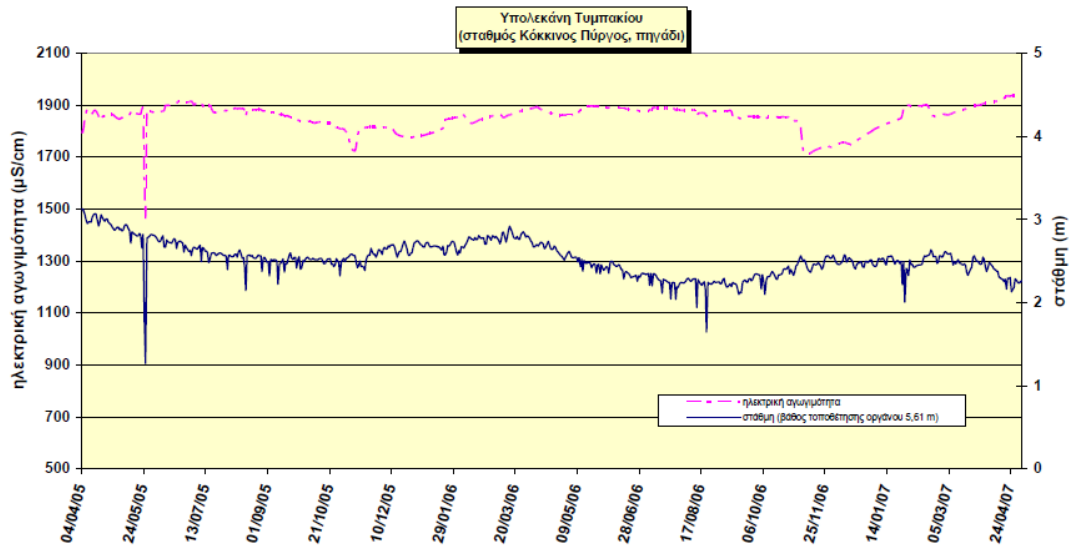
Αρχικά από τις μελέτες για την κατάσταση των υπόγειων υδροφορέων Κρήτης (2007, 2013), μπορούμε δούμε την μείωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, όπως φαίνεται από τις διακυμάνσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθώς και την σταδιακή πτώση της στάθμης.



Εικόνα 4.13: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου - Αεροδρόμιο (Γεροπόταμος) (Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Μάιος 2007).

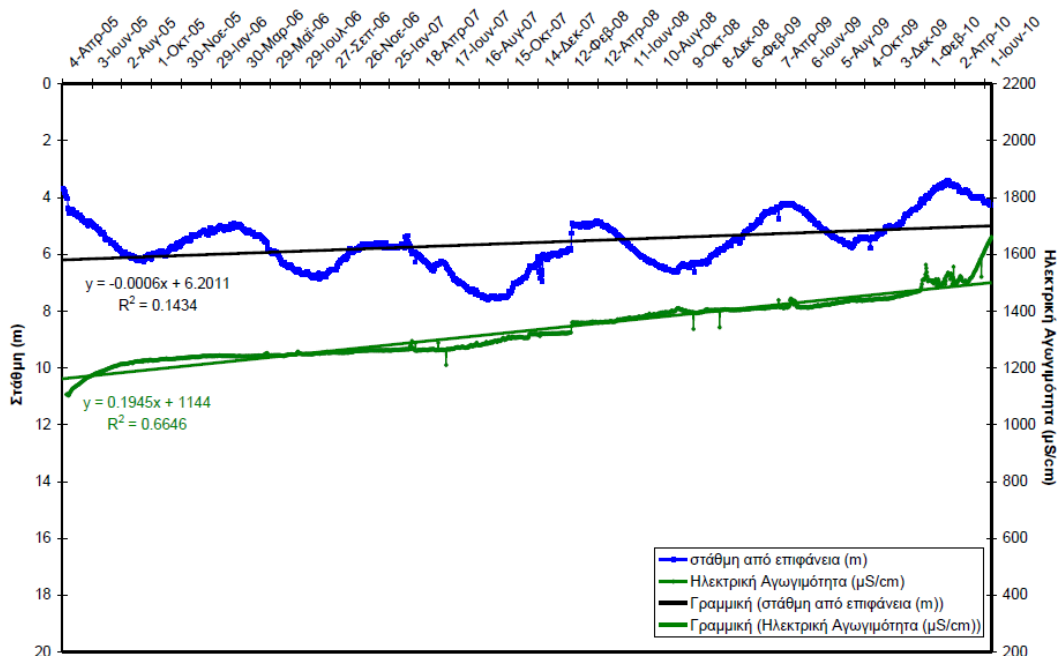


Εικόνα 4.14: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού A3 - Τυμπακίου (Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Μάιος 2007).

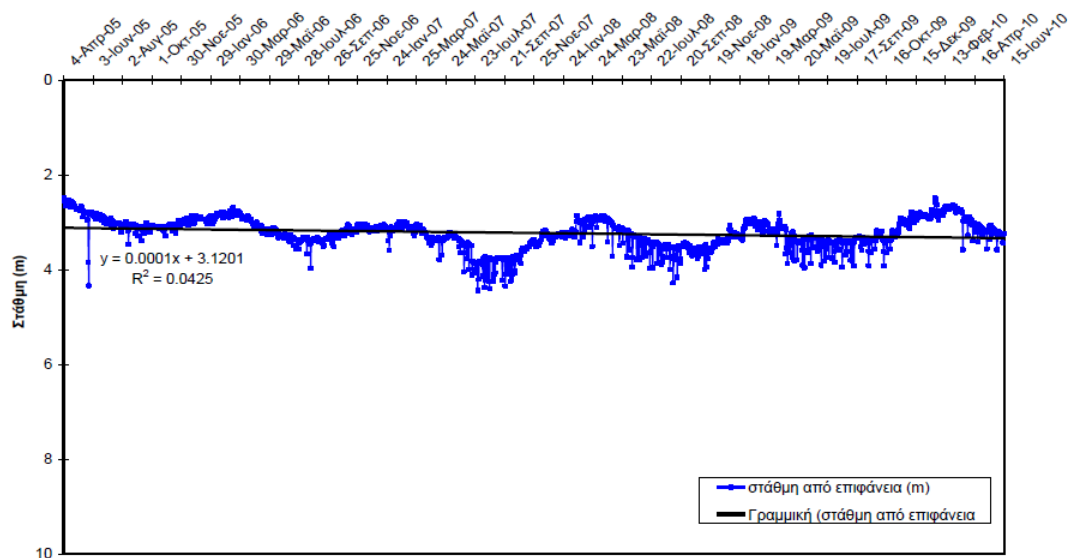


**Εικόνα 4.15:** Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής αγωγιμότητας του σταθμού Κόκκινος Πύργος - Πηγάδι (Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Μάιος 2007).

Όπως φαίνεται στις εικόνες (Εικόνα 4.13-4.17), είναι εμφανής η σταδιακή πτώση στάθμης καθώς και η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους. Γεγονός που δηλώνει τη συνεχή υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Χρειάζεται συνεχής παρακολούθηση, με δεδομένο την ελάττωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα, λόγω της παρακράτησης απορροών του Κουτσουλίδη από το φράγμα της Φανερωμένης.



**Εικόνα 4.16:** Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης και μεταβολής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σταθμού Τυμπακίου - Αεροδρόμιο (Γεροπόταμος) (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).



**Εικόνα 4.17: Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης του σταθμού Κόκκινος Πύργος (Κριτσωτάκης, Παυλίδου, 2013).**

Στη μελέτη των Dokou Z. et al. (2016) για να προσεγγισθεί καλύτερα η συμπεριφορά του υδροφορέα καθώς και το φαινόμενο της θαλάσσιας εισχώρησης, κατά την εφαρμογή του μοντέλου έγινε η επίλυσή του για δύο χρονικές περιόδους, υγρή και ξηρή. Με αυτόν τον τρόπο μελετάται το φαινόμενο σε ένα πλήρες υδρολογικό έτος. Η πρώτη προσομοίωση καλύπτει την περίοδο από τον Οκτώβριο μέχρι τον Απρίλιο, ενώ η ξηρή περίοδος ξεκινά τον Μάιο και τελειώνει τον Σεπτέμβριο.

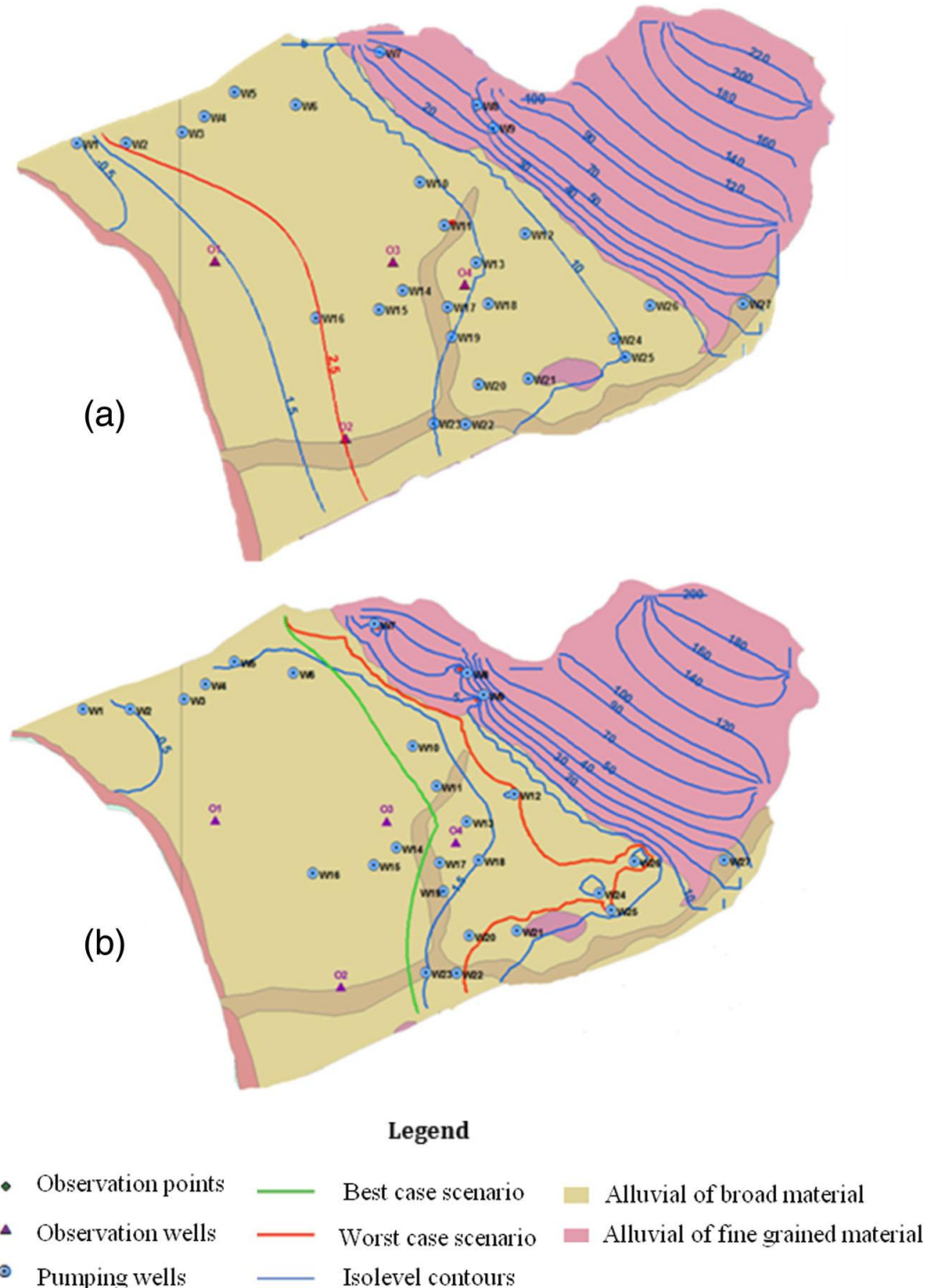
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Εικόνα 4.18), για τις υπάρχουσες συνθήκες στην περιοχή, η έκταση της υφάλμυρης ζώνης παρουσιάζει διακυμάνσεις στην διάρκεια του υδρολογικού έτους, από την υγρή στην ξηρή περίοδο. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, το θαλασσινό νερό αποσύρεται λόγω των μειωμένων αντλήσεων και των αυξημένων κατακρημνισμάτων. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, το φαινόμενο της υφαλμύρισης γίνεται πιο έντονο και το μέτωπο της υφαλμύρισης προχωρά στην ενδοχώρα, καθώς όλα τα πηγάδια βρίσκονται σε λειτουργία και με υψηλούς ρυθμούς άντλησης.

Στη μελέτη του MEDIS (Paritsis, 2005), γίνεται προσομοίωση της ροής του υδροφορέα του Τυμπακίου από τον Οκτώβριο του 1986 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 1987. Η έκταση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφορέα απεικονίζεται σε διάφορα βάθη (500 mg/L στα 38, 78, 118 και 158 μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας), στο τέλος της τελευταίας περιόδου μελέτης (στον 20<sup>ο</sup> χρόνο) (Εικόνα 4.20). Είναι εμφανές ότι στο νότιο άκρο της ακτής, εκεί που εκβάλλει ο ποταμός Γεροπόταμος η θαλάσσια σφήνα φτάνει μέχρι τα 550 – 600 m από την ακτή. Από την άλλη, στο βόρειο άκρο, στην περιοχή Μακρυμαλλιανά, η θαλάσσια σφήνα εντοπίζεται στα 1500 m από την ακτή. Αυτή η διαφορά ανάμεσα στο νότιο και στο βόρειο άκρο, οφείλεται στον Γεροπόταμο που εκρέει στο νότιο άκρο. Γενικά, οι ποσότητες νερού που εισέρχονται στον υδροφορέα από το Γεροπόταμο,



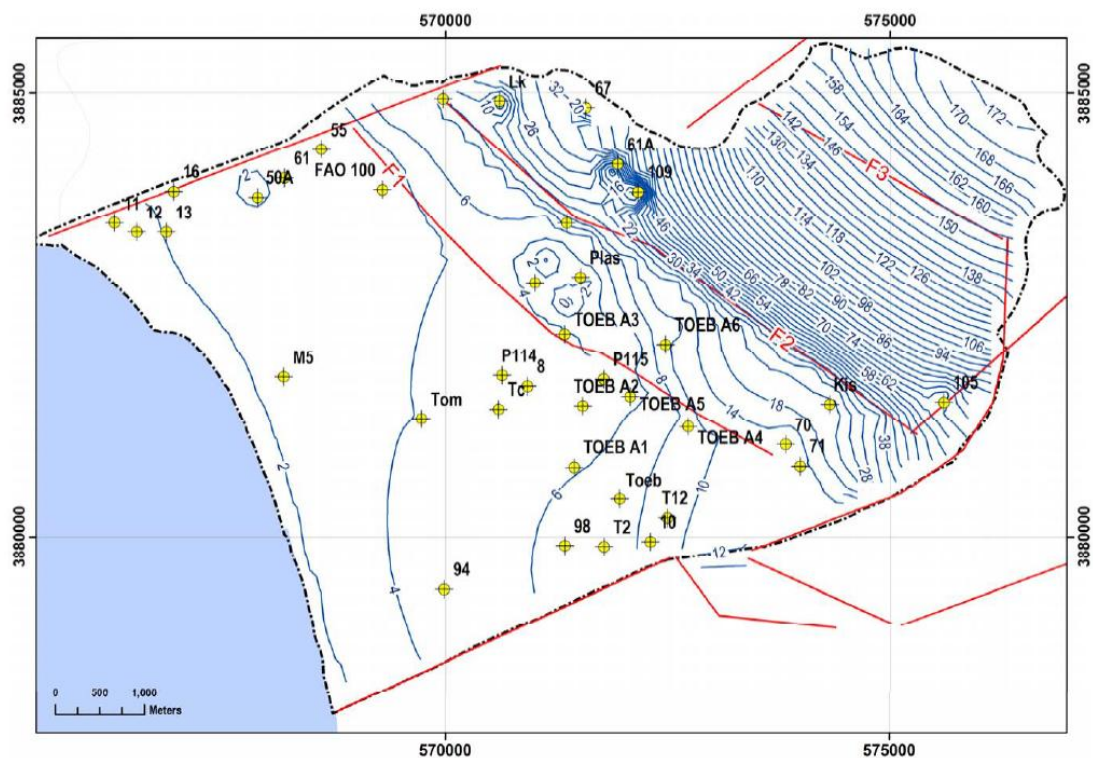
αποτελούν το 36% του συνολικού εμπλουτισμού του, οπότε τον καθιστούν την σημαντικότερη πηγή φρέσκου νερού σε αυτόν.

Στην Εικόνα 4.20 φαίνονται διάφορες τομές (C1, C2, C3) έτσι ώστε να δούμε αναλυτικά την εισχώρηση σε όλο το μήκος της ακτογραμμής (Εικόνες 4.21 – 4.23).

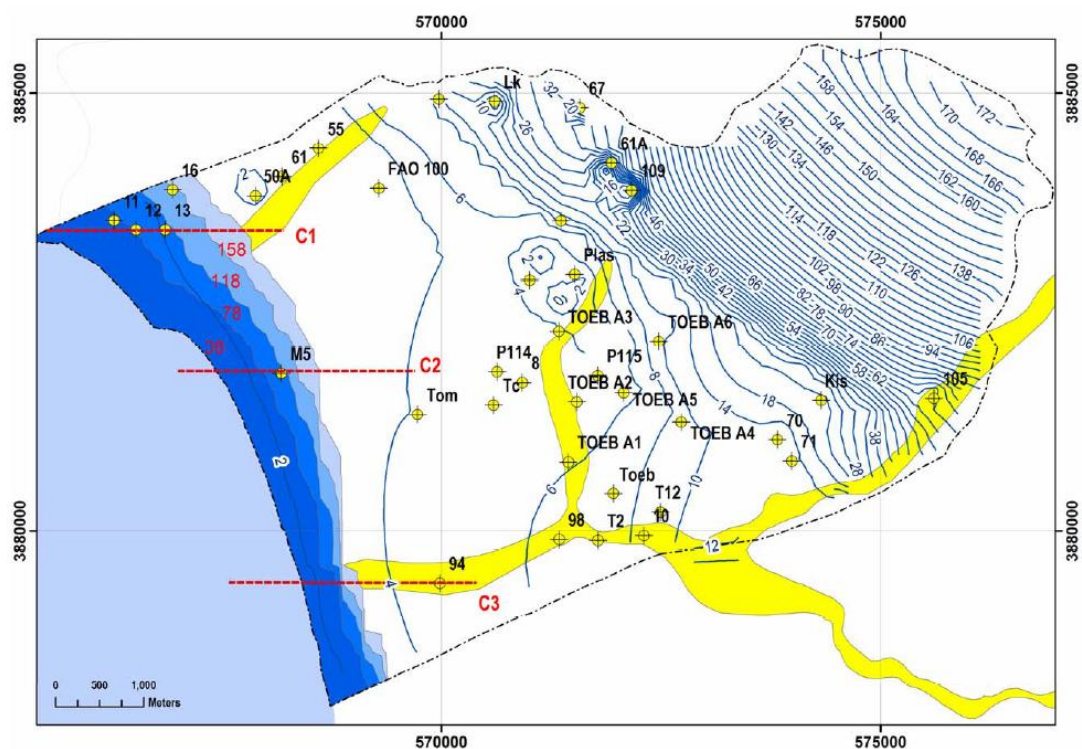


Εικόνα 4.18: Ισοδυναμικές γραμμές υδραυλικού ύψους κατά τη διάρκεια (α) της υγρής και (β) της ξηρής περιόδου στον υδροφόρα Τυμπακίου (Dokou Z. et al., 2016).

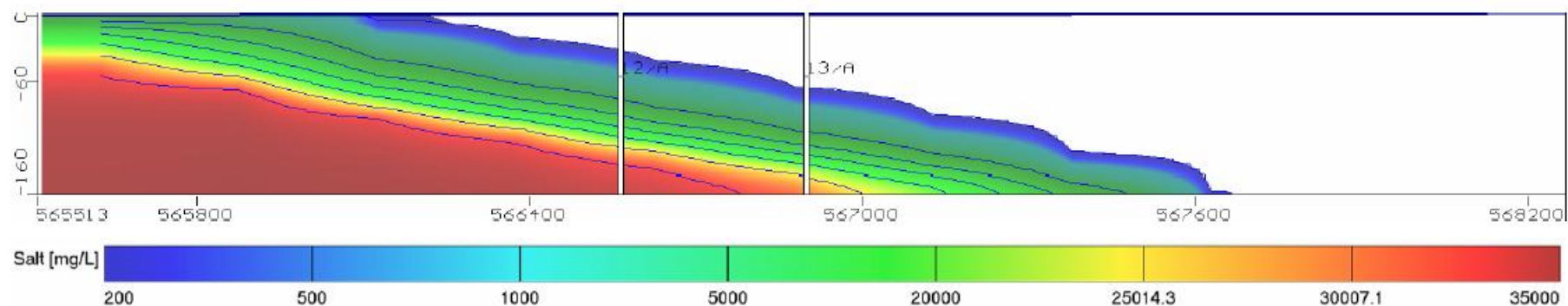




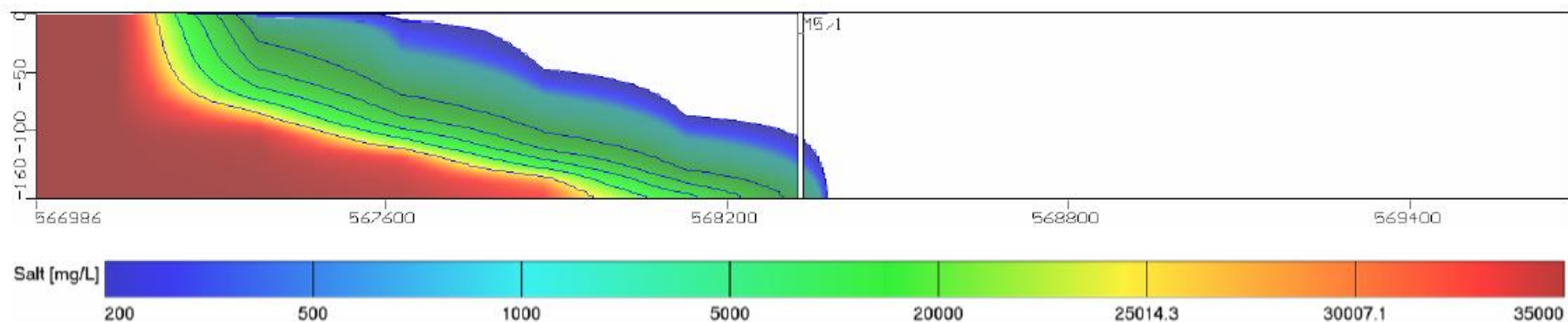
Εικόνα 4.19: Ύψος νερού στον υδροφορέα Τυμπακίου στο τέλος της προσομοίωσης (20<sup>ο</sup> έτος) (Paritsis, 2005).



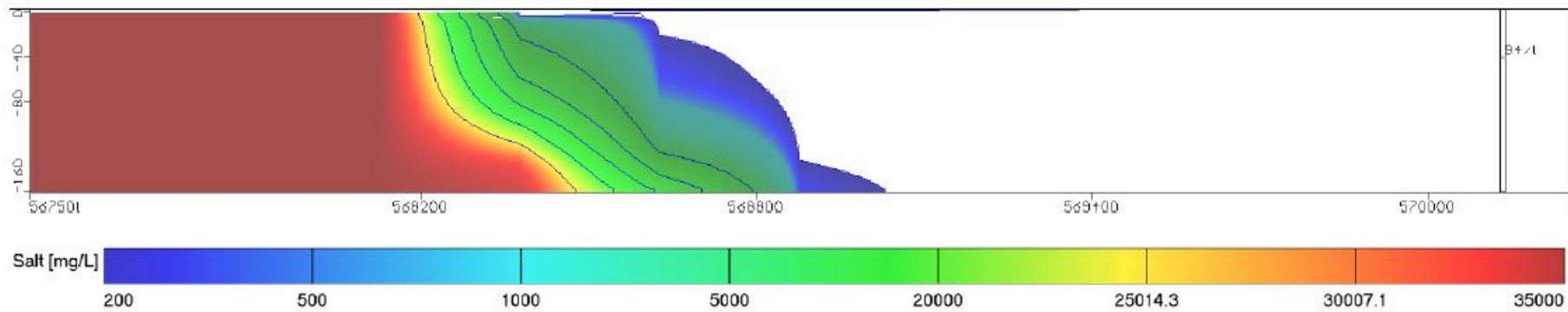
Εικόνα 4.20: Προσομοίωση της θαλάσσιας εισχώρησης στον υδροφορέα Τυμπακίου σε διάφορα βάθη (500 mg/L άλας ή 300 mg/L ιόντα χλωρίου στα 38, 78, 118 και 158 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας), στο τέλος της περιόδου μελέτης (Paritsis, 2005).



Εικόνα 4.21: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα στο τέλος του 20<sup>ου</sup> έτους της προσομοίωσης, η ισοαπόσταση των συγκεντρώσεων είναι 3000 mg/L ιόντα χλωρίου – τομή C1 (Paritsis, 2005).



Εικόνα 4.22: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα στο τέλος του 20<sup>ου</sup> έτους της προσομοίωσης, η ισοαπόσταση των συγκεντρώσεων είναι 3000 mg/L ιόντα χλωρίου – τομή C2 (Paritsis, 2005).



*Εικόνα 4.23: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα στο τέλος του 20<sup>ου</sup> έτους της προσομοίωσης, η ισοαπόσταση των συγκεντρώσεων είναι 3000 mg/L ιόντα χλωρίου – τομή C3 (Paritsis, 2005).*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MODFLOW – SEAWAT

### 5.1 Γενικά για το λογισμικό MODFLOW

Το MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model) του Ινστιτούτου Γεωλογικών Ερευνών Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) αποτελεί τον πιο διαδεδομένο υπολογιστικό κώδικα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού. Με το πρόγραμμα αυτό μπορεί να γίνει προσομοίωση της ροής ενός υδροφορέα, σε μία, δύο ή και τρεις διαστάσεις, με την αριθμητική επίλυση μίας κύριας διαφορικής εξίσωσης (όπως προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy). Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση των εξισώσεων στο κέντρο των κυψελίδων του κανάβου (block – centered), που προσομοιώνει την κίνηση του υπόγειου νερού στην κορεσμένη ζώνη του πορώδους μέσου (Todd & Mays, 2005, Γιαννέλη, 2009).

Γενικά, η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την μη – μόνιμη τρισδιάστατη ροή σε ένα ετερογενές και ανισότροπο μέσο, για ελεύθερο ή περιορισμένο υδροφορέα, είναι η παρακάτω:

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

Όπου  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  και  $K_{zz}$  είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των αξόνων  $x$ ,  $y$  και  $z$ , που θεωρούνται παράλληλοι με τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας,  $h$  είναι το υδραυλικό φορτίο,  $W$  η ογκομετρική παροχή που παίρνει θετικές ή αρνητικές τιμές για εισροές και εκροές νερού αντίστοιχα,  $S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου και  $t$  ο χρόνος. Οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας και της ειδικής αποθηκευτικότητας είναι συναρτήσεις του χώρου ( $x,y,z$ ) ενώ η ογκομετρική παροχή είναι συνάρτηση του χώρου και του χρόνου ( $x,y,z,t$ ).

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και εισάγοντας δεδομένα για τη ροή ή/και για τα υδραυλικά ύψη στα όρια του υδροφόρου συστήματος, καθώς και για τα αρχικά υδραυλικά ύψη (αρχικές συνθήκες), μπορούμε να προσομοιώσουμε την ροή σε έναν υπόγειο υδροφορέα. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η επίλυση της εξίσωσης γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου αντικαθιστά το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση με ένα πεπερασμένο σύνολο διακριτών σημείων στο χώρο και το χρόνο, έτσι ώστε οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από όρους, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα της διαφοράς των υδραυλικών υψών στα σημεία αυτά. Έτσι προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων παράλληλων γραμμικών αλγεβρικών διαφορών, το οποίο επιλύεται ως προς τα υδραυλικά ύψη σε συγκεκριμένα σημεία και χρονικές στιγμές, και αποτελούν την προσέγγιση στη χρονικά μεταβαλλόμενη κατανομή των υδραυλικών υψών (Todd & Mays, 2005).

Η προσομοίωση της ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, γίνεται σε καθορισμένα σημεία στο χώρο, τα οποία ονομάζονται κόμβοι του πλέγματος των πεπερασμένων διαφορών. Το πλέγμα ονομάζεται κανάβος, και ο κόμβος είναι ένα σημείο

μέσα σε κάθε κελί του πλέγματος στο οποίο υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος. Έτσι το υδροφόρο σύστημα μπορεί να παρασταθεί με τη βοήθεια κελιών, που αποτελούνται από σειρές, στήλες και επίπεδα. Στα κελιά αναφερομαστε με τους δείκτες  $i$ ,  $j$ ,  $k$ . Τα επίπεδα γενικά αναφέρονται σε οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες ή διαστήματα, οπότε ο δείκτης  $k$  υποδεικνύει αλλαγές κατά μήκος του άξονα  $z$  στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Τα επίπεδα αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω, οπότε η αύξηση στον  $k$  δείκτη σημαίνει μείωση του υψομέτρου. Οι σειρές είναι παράλληλες στον άξονα  $x$  και οι στήλες παράλληλες στον άξονα  $y$ .

Οπότε το λογισμικό MODFLOW μπορεί να προσομοιώσει σταθερή ή μεταβαλλόμενη ροή σε ένα ανομοιόμορφο σύστημα ροής, στο οποίο τα επίπεδα του υδροφορέα μπορεί να είναι ελεύθερα, περιορισμένα ή ένα συνδυασμός αυτών των δύο. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης της ροής λόγω εξωτερικών πιέσεων, δηλαδή ροή προς πηγάδια, λόγω επιφανειακής επαναφόρτισης, εξατμισοδιαπνοής, ροή προς αυλάκια ή από την κοίτη ποταμού. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες ή μεταβιβασιμότητες κάθε επιπέδου μπορούν να διαφέρουν χωρικά και να είναι ανισοτροπικές, αλλά και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας μπορεί να είναι ανομοιόμορφος.

Τελικά, το λογισμικό MODFLOW αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα και μία σειρά από ανεξάρτητες υπορουτίνες που ονομάζονται ενότητες (modules). Οι ενότητες αυτές ομαδοποιούνται σε συγκεκριμένα πακέτα, κάθε ένα από τα οποία εξετάζει μόνο ένα κομμάτι της προσομοίωσης (Todd & Mays, 2005). Ακόμα αποτελείται από μία σειρά αριθμητικών μηχανών επίλυσης, ως προς την υπόγεια ροή αλλά και τη μεταφορά μάζας.

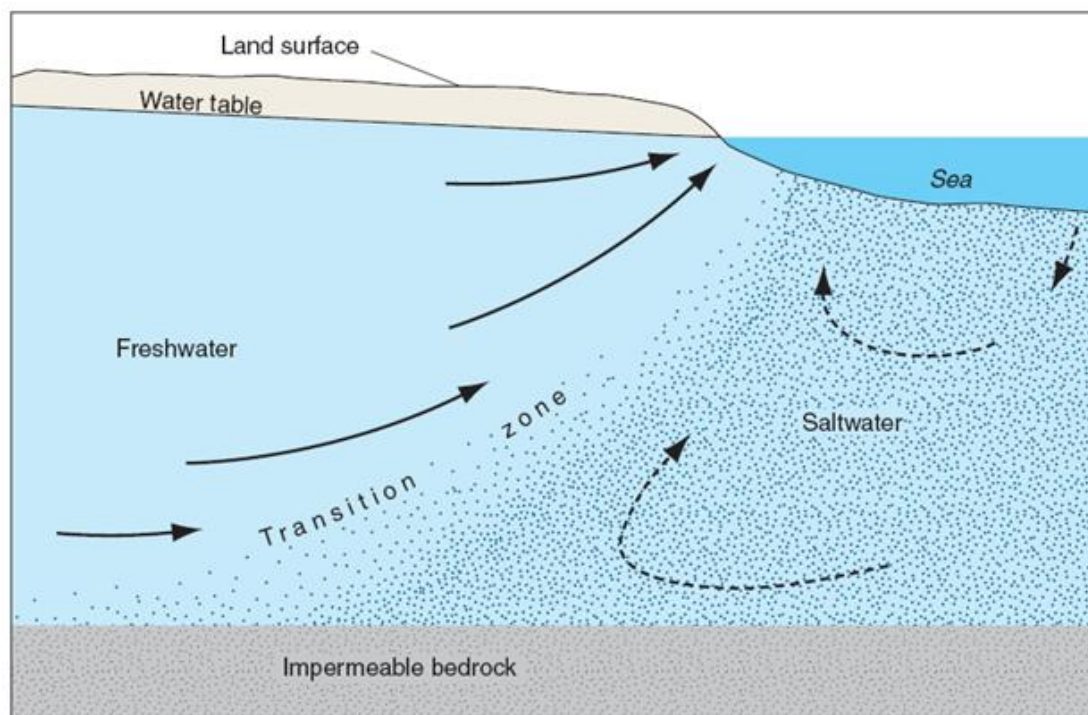
## 5.2 Γενικά για το SEAWAT

Το υπόγειο νερό περιέχει διαλυμένα συστατικά, όπως άλατα τα οποία συναντάμε στο θαλασσινό νερό. Σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις, τα διαλυμένα αυτά συστατικά ουσιαστικά δεν επηρεάζουν την πυκνότητα του ρευστού. Όμως αν έχουμε αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων συστατικών, τότε η μάζα των συστατικών αυτών επηρεάζει την πυκνότητα του ρευστού. Αν οι χωρικές αλλαγές στην πυκνότητα του ρευστού είναι μικρές, ανεξάρτητα από την πραγματική τιμή της πυκνότητας, οι μέθοδοι που ακολουθούμε (μαθηματικές ή πειραματικές) για να ποσοτικοποιήσουμε το ρυθμό και το μοτίβο της υπόγειας ροής είναι σχετικά απλές. Όταν όμως οι χωρικές μεταβολές στην πυκνότητα είναι αντιληπτές, όπως στους παράκτιους υδροφορείς, η διερεύνηση της υπόγειας ροής γίνεται πιο περίπλοκη καθώς οι διαφορές πυκνότητας επηρεάζουν το ρυθμό και το μοτίβο της υπόγειας ροής.

Οι χωρικές μεταβολές στην πυκνότητα ενός ρευστού, οι οποίες επηρεάζουν τελικά την ροή του υπόγειου νερού, έχουν παρατηρηθεί σε διάφορες υδρογεωλογικές μονάδες. Για παράδειγμα στους παράκτιους υδροφορείς, υπάρχει μία διεπιφάνεια ανάμεσα στο φρέσκο υπόγειο νερό το οποίο ρέει προς τη θάλασσα, και στο «αλμυρό» θαλασσινό νερό. Κατά μήκος αυτής της διεπιφάνειας, η πυκνότητα του ρευστού μπορεί να αυξηθεί από αυτή του φρέσκου «γλυκού» νερού (περίπου  $1000 \text{ kg/m}^3$ ) σε αυτή του «αλμυρού» θαλασσινού νερού (περίπου  $1025 \text{ kg/m}^3$ ), μία αύξηση κατά 2,5%. Από μετρήσεις στο πεδίο και μαθηματικές αναλύσεις έχει αποδειχθεί ότι αυτή η μικρή μεταβολή στην πυκνότητα του υπόγειου νερού έχει ουσιαστικές επιπτώσεις στο ρυθμό και το μοτίβο της υπόγειας ροής.



Οπότε, η κατανόηση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική, όπως στην περίπτωση των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων, όπου γίνεται μελέτη της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στο υδροφόρο στρώμα, μίας πιθανής αποκατάστασης της ρυπασμένης περιοχής και απόρριψη του φρέσκου υπόγειου νερού στους ωκεανούς.



*Εικόνα 5.1: Εισχώρηση του θαλασσινού νερού σε ένα παράκτιο υδροφόρο σύστημα (Barlow, 2003 - <https://www.waterloohydrogeologic.com/seawat-saltwater-intrusion-applications>).*

Η θεωρία της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας έχει μελετηθεί αρκετά χρόνια, ξεκινώντας με τους Ghyben (1888) και Herzberg (1901). Αργότερα ο Hubbert (1940), παρουσίασε μία απλή εξίσωση που συνδέει το υψόμετρο της απότομης διεπιφάνειας με το ύψος του φρέσκου νερού στη διεπιφάνεια και τις πυκνότητες του φρέσκου και θαλασσινού νερού. Ο Henry (1964) χρησιμοποίησε μία ημιαναλυτική εξίσωση για να ορίσει τη θέση και το σχήμα της διεπιφάνειας θεωρώντας συνθήκες μόνιμης ροής του υπόγειου φρέσκου νερού προς το «όριο» του θαλασσινού νερού.

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος από ιδιωτικούς ή δημόσιους υπολογιστικούς κώδικες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας. Για παράδειγμα το Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών, (USGS) προσφέρει τους εξής κώδικες, SUTRA (Voss, 1984), HST3D (Kipp, 1997) και MOCENSE (Sanford and Konikow, 1985). Οι κώδικες αυτοί παρέχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης ενός μεγάλου εύρους περίπλοκων προβλημάτων. Επιπλέον υπάρχει το λογισμικό SEAWAT (Guo and Bennet, 1998) το οποίο προσομοιώνει τη μη – μόνιμη, μεταβλητής πυκνότητας υπόγεια ροή σε τρεις διαστάσεις.



Για την ανάπτυξη του λογισμικού αυτού χρησιμοποιήθηκαν δύο άλλοι γνωστοί κώδικες, MODFLOW και MT3DMS, οι οποίοι «ενώθηκαν» σε ένα πρόγραμμα το οποίο μπορεί να επιλύει εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας. Το λογισμικό MODFLOW τροποποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να επιλύει ως προς τη μάζα του ρευστού και όχι του όγκου του, και χρησιμοποιεί τα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα ως την κύρια εξαρτημένη μεταβλητή. Η ροή μελετάται από κελί σε κελί, μέσω των υδραυλικών κλίσεων και των διαφορών πυκνότητας. Στη συνέχεια, το πεδίο ροής, μέσω του λογισμικού MT3DMS, χρησιμοποιείται για να εντοπιστεί η κίνηση του διαλυμένου ρύπου (άλατα), οπότε προκύπτει ένα νέο πεδίο πυκνοτήτων από τις συγκεντρώσεις του ρύπου.

Ο μηχανισμός της μεταβαλλόμενης πυκνότητας που επηρεάζει την ροή του φρέσκου υπόγειου νερού, είναι ο παρακάτω:

- Λόγω της κίνησης του υπόγειου νερού έχουμε μετακίνηση και της διαλυμένης ουσίας (συναγωγή, διάχυση).
- Οι μεταβολές στην συγκέντρωση προκαλούν μεταβολές στο ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο (Equivalent freshwater head – EFH).
- Οι μεταβολές στο υδραυλικό φορτίο προκαλούν μεταβολές στο μοτίβο της υπόγειας ροής.

### 5.2.1 Ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο

Βασική έννοια για τη λειτουργία του SEAWAT είναι το **ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο**. Αν θεωρήσουμε δύο πιεζόμετρα σε ένα σημείο N, σε έναν υπόγειο υδροφορέα στον οποίο έχει εισχωρήσει θαλασσινό νερό (Εικόνα 5.3), τότε στο πιεζόμετρο A βρίσκεται φρέσκο νερό και έχει έναν μηχανισμό ο οποίος εμποδίζει το θαλασσινό νερό να έρθει σε επαφή με το φρέσκο νερό που βρίσκεται μέσα σε αυτό, ενώ παράλληλα επιτρέπει στο πιεζόμετρο να ανταποκρίνεται σωστά στις τιμές πίεσης στο σημείο N. Στο πιεζόμετρο B υπάρχει νερό ίσης ποσότητας με το θαλασσινό νερό που έχει εισχωρήσει στο σημείο N. Το ύψος του νερού στο πιεζόμετρο A πάνω από το σημείο N είναι  $P_N/\rho_f g$ , οπότε το υδραυλικό ύψος στο σημείο N είναι το υψός του νερού στο πιεζόμετρο A πάνω από το επίπεδο αναφοράς, και εκφράζεται ως,

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

αντίστοιχα, στο πιεζόμετρο B, το ύψος του νερού πάνω από το σημείο N είναι  $P_N/\rho g$ , οπότε το φορτίο του θαλασσινού νερού είναι η στάθμη στο πιεζόμετρο B πάνω από το επίπεδο αναφοράς, και εκφράζεται ως,

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + Z_N , \text{ όπου:}$$

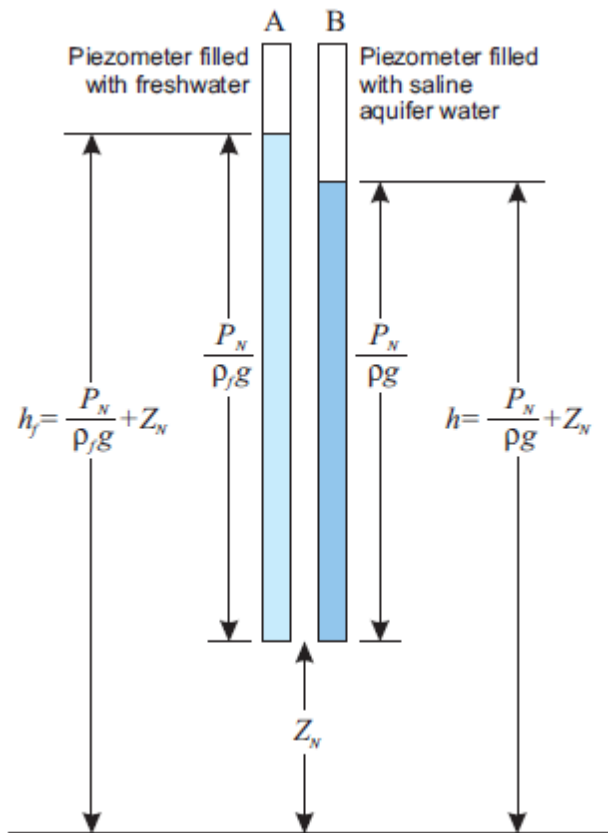
$h_f$  είναι το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος (L)

$h$  είναι το υδραυλικό ύψος του θαλασσινού νερού (L)

$\rho_f$  και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του φρέσκου και θαλασσινού νερού αντίστοιχα ( $M/L^3$ )

$P_N$  είναι η πίεση στο σημείο N ( $M/L \cdot T^2$ )

$g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $L/T^2$ ) και  
 $Z_N$  είναι το ύψος του σημείου N πάνω από το επίπεδο αναφοράς (L).



Εικόνα 5.2: Πιεζόμετρα A και B, γεμάτα με φρέσκο και θαλασσινό νερό αντίστοιχα, ανοιχτά στο ίδιο σημείο στον υδροφόρα (Guo & Langevin, 2000).

### 5.2.2 Μαθηματική περιγραφή της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας

Η λειτουργία του SEAWAT βασίζεται σε συγκεκριμένες μαθηματικές εκφράσεις, αυτές είναι:

- Γενική εξίσωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας σε ένα πορώδες μέσο

Έστω ένας στοιχειώδης όγκος (REV), σε ένα πορώδες μέσο. Με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας για το ρευστό και τη διαλυμένη ουσία (π.χ. άλας), ο ρυθμός συσσώρευσης της μάζας μέσα στον στοιχειώδη όγκο είναι ίσος με το αλγεβρικό άθροισμα των ροών μάζας κατά μήκος του στοιχείου και της ανταλλαγής μάζας λόγω πηγών ή καταβόθρων. Οπότε η μαθηματική έκφραση που προκύπτει τελικά είναι,

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

Όπου, το αριστερό μέλος της εξίσωσης περιγράφει την καθαρή ροή μάζας μέσα στον στοιχειώδη όγκο και το δεξί μέλος το ρυθμό με τον οποίο αλλάζει η ποσότητα μάζας μέσα στον στοιχειώδη όγκο. Ακόμα,

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \text{ (η μερική παράγωγος)}$$

$\rho$  η πυκνότητα του ρευστού ( $M/L^3$ )

$\bar{\rho}$  η πυκνότητα του ρευστού που εισέρχεται από κάποια πηγή ( $M/L^3$ )

$\vec{q}$  το διάνυσμα της ειδικής παροχής ( $L/T$ )

$q_s$  η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα που περιγράφει την ποσότητα που εισέρχεται σε αυτόν από πηγές ( $T^{-1}$ )

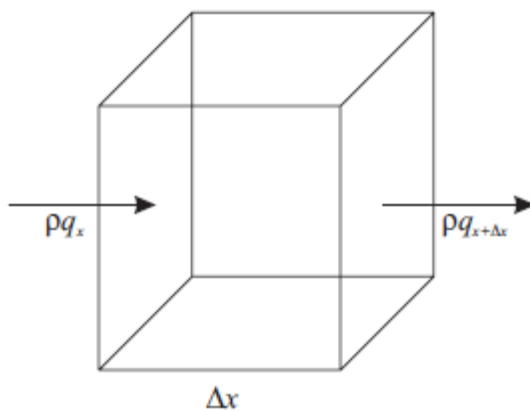
$\theta$  το πορώδες του πορώδους μέσου (-)

$P$  η πίεση του ρευστού στους πόρους ( $M/L^2 T^2$ )

$C$  η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας ( $M/L^3$ )

$S_p$  η ειδική αποθηκευτικότητα ( $M^{-1} L T^{-2}$ )

$t$  ο χρόνος ( $T$ ).



*Εικόνα 5.3: Μοναδιαίος όγκος ελέγχου σε ένα πορώδες μέσο (Guo & Langevin, 2002).*

- **Ο νόμος του Darcy για υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας**

Η κύρια εξίσωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας, περιλαμβάνει τον όρο της ειδικής παροχής, η οποία υπολογίζεται με τη βοήθεια του νόμου του Darcy. Αρχικά, παραθέτουμε την γενική εξίσωση του νόμου του Darcy, σε τρεις διαστάσεις, και στη συνέχεια την έκφρασή του ως προς το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο.

Αν θεωρήσουμε ότι οι άξονες της υδραυλικής διαπερατότητας, ταυτίζονται με τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$  ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, τότε,

$$\begin{aligned} q_x &= -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \\ q_y &= -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \\ q_z &= -\frac{k_z}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right) \end{aligned}$$

Η έκφραση του νόμου του Darcy για ένα οριζόντια στρωματοποιημένο υδροφορέα, ως προς το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο είναι,

$$q_x = -K_{fx} \frac{\mu_f}{\mu} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial x} \right]$$

$$q_y = -K_{fy} \frac{\mu_f}{\mu} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial y} \right]$$

$$q_x = -K_{fx} \frac{\mu_f}{\mu} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right]$$

Όπου,

$q_x, q_y, q_z$  οι συνιστώσες της ειδικής παροχής (L/T)

$k_x, k_y, k_z$  οι συντελεστές της υδραυλικής διαπερατότητας στους τρεις άξονες (L<sup>2</sup>)

$K_{fx}, K_{fy}, K_{fz}$  οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας του ρευστού, στους τρεις άξονες στο πορώδες μέσο (L/T)

$\mu$  το δυναμικό ιξώδες (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>)

$\mu_f$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού σε πρότυπες συνθήκες (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>)

$g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας (LT<sup>-2</sup>).

Σε πρακτικές εφαρμογές των παραπάνω εξισώσεων, μπορούμε να θεωρήσουμε το λόγο  $\mu_f/\mu$  ίσο με τη μονάδα, δηλαδή θεωρούμε ότι το ιξώδες του νερού μέσα στο υδροφόρο στρώμα είναι ίσο με το ιξώδες του φρέσκου νερού παρότι μπορεί να υπάρχουν διαφορές στην πυκνότητα. Οι διαφορές στο ιξώδες του ρευστού οφείλονται κυρίως στη διαφορά θερμοκρασίας. Έτσι αν δεν έχουμε ουσιαστικές διαφορές θερμοκρασίας, και η υδραυλική αγωγιμότητα έχει υπολογιστεί στην ίδια θερμοκρασία που θα υπολογισθεί και η ταχύτητα, ο διορθωτικός όρος του ιξώδους μπορεί να παραληφθεί.

- **Γενική εξίσωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας ως προς το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο**

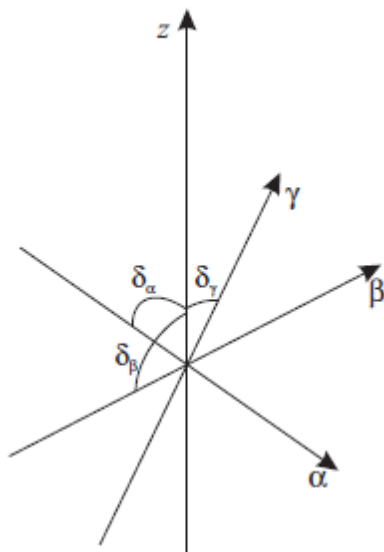
Η γενική εξίσωση της υπόγειας ροής μεταβλητής πυκνότητας σε πορώδες μέσο, μπορεί με τη βοήθεια του νόμου του Darcy, να γραφτεί ως προς το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο. Έστω σε αυτή την περίπτωση ότι δεν έχουμε οριζόντια στρωματοποιημένο υδροφορέα, οπότε δεν έχουμε ταύτιση με τους άξονες x,y,z. Εάν γ είναι η κατεύθυνση που είναι κάθετη στο αδιαπέρατο στρώμα του υδροφορέα, και α και β είναι οι κατευθύνσεις παράλληλες σε αυτό (Εικόνα 5.4), τότε,

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho K_{f\alpha} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right]) + \frac{\partial}{\partial \beta} (\rho K_{f\beta} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \beta} \right]) + \frac{\partial}{\partial \gamma} (\rho K_{f\gamma} \left[ \frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial \gamma} \right]) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \bar{\rho} q_s.$$

Όπου,

$z$  το ύψος οποιουδήποτε σημείου στον υδροφορέα πάνω από το επίπεδο αναφοράς (L)

$S_f$  η ειδική αποθηκευτικότητα ως προς το υδραυλικό φορτίο του νερού (L<sup>-1</sup>).



*Εικόνα 5.4: Η σχέση των αξόνων α,β,γ της υδραυλικής διαπερατότητας με το σύστημα αξόνων x,y,z (Guo & Langevin, 2002).*

- **Γενική εξίσωση της κίνησης της διαλυμένης ουσίας (π.χ. άλας)**

Για να περιγράψουμε πλήρως την κίνηση μιας διαλυμένης ουσίας μέσα σε ένα υδροφορέα είναι απαραίτητη και η χρήση μίας ακόμα μερικής διαφορικής εξίσωσης. Η ροή του υπόγειου νερού προκαλεί ανακατανομές της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, με αποτέλεσμα αυτή η ανακατανομή να προκαλεί αλλαγές στο πεδίο της πυκνότητας, επηρεάζοντας τελικά την κίνηση του υπόγειου νερού. Η κίνηση της διαλυμένης ουσίας αλλά και η κίνηση του υπόγειου νερού συνδέονται μεταξύ τους, οπότε οι εξισώσεις που τις περιγράφουν πρέπει να λύνονται από κοινού.

Η διαλυμένη ουσία μέσα στο πορώδες μέσο μετακινείται λόγω της ροής του νερού (συναγωγή), της μοριακής διάχυσης και της μηχανικής διασποράς. Κατά τους Zheng και Bennett (1995) η κίνηση της μάζας της διαλυμένης ουσίας στο υπόγειο νερό εκφράζεται από την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D * \nabla C) - \nabla(\vec{v}C) - \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k ,$$

όπου,

$D$  ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς ( $L^2T^{-1}$ )

$\vec{v}$  η ταχύτητα του ρευστού ( $LT^{-1}$ )

$C_s$  η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας που εισέρχεται από κάποια πηγή ( $ML^{-3}$ )

$R_k$  ( $k = 1, \dots, N$ ) ο ρυθμός παραγωγής ή αποδόμησης στην αντίδραση  $k$  όταν έχουμε  $N$  διαφορετικές αντιδράσεις ( $ML^{-3}T^{-1}$ ).

### 5.3 Υπορουτίνες του κώδικα SEAWAT

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο κώδικας του SEAWAT προκύπτει από το συνδυασμό των MODFLOW και MT3DMS. Και στους δύο αυτούς κώδικες τα διάφορα χαρακτηριστικά και οι επιλογές όσο αφορά τη ροή και τη διαλυμένη ουσία, προσεγγίζονται με τη βοήθεια των υπορουτίνων – ειδικών πακέτων που μπορούν να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται εύκολα από τους χρήστες. Οπότε οι υπορουτίνες του κώδικα SEAWAT, είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 5.1 (Guo & Langevin, 2002).

Πακέτο	Ακρωνύμιο	Περιγραφή	Πρόγραμμα
<b>Βασικό (Basic)</b>	<b>BAS</b>	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 και τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου. Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής περιόδου που προέρχεται από μετρήσεις πεδίου.	MODFLOW
<b>Κεντροβαρική διάταξη της ροής (Block – Centered Flow)</b>	<b>BCF2</b>	Εισάγονται πληροφορίες για τον τύπο του υδροφορέα, τις συνθήκες ροής, τις διαστάσεις των κυψελίδων του κανάβου, τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους υδροφορείς ή της μεταβιβασιμότητας για τους υπό πίεση, το συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες.	MODFLOW
<b>Γεωτρήσεις (Well)</b>	<b>WEL</b>	Αφορά τα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μία δεδομένη χρονική περίοδο. Ο εμπλουτισμός εισάγεται με θετικές τιμές παροχής, ενώ η άντληση με αρνητικές. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος τόσο από την έκταση της κυψελίδας όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σε αυτήν.	MODFLOW
<b>Αυλάκια – Καταβόθρες (Drain)</b>	<b>DRN</b>	Ουσιαστικά περιγράφει την απομάκρυνση νερού από τον υδροφορέα, με ρυθμό ανάλογο με διαφορά ενός καθορισμένου φορτίου και του φορτίου του υδροφορέα. Εάν το φορτίο του υδροφορέα είναι χαμηλότερο από το καθορισμένο φορτίο τότε δεν έχουμε καμία επίδραση στον υδροφορέα. Έτσι εισάγουμε δεδομένα για το καθορισμένο φορτίο (της ελεύθερης επιφάνειας) του αυλακιού, για το ύψος του πυθμένα του αυλακιού, ένα αθροιστικό συντελεστή απώλειας φορτίου ανάμεσα στο αυλάκι και τον υδροφορέα.	MODFLOW
<b>Υδρορεύματα (River)</b>	<b>RIV</b>	Περιγράφει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στον υπόγειο υδροφορέα και ένα επιφανειακό υδροφόρο στρώμα μέσω ενός διαπερατού στρώματος που χωρίζει τα δύο υδροφόρα στρώματα. Εισάγουμε πληροφορίες για τη στάθμη του επιφανειακού υδροφόρου στρώματος, το ύψος του πυθμένα του (άρα και το ύψος του διαπερατού στρώματος), μία αριθμητική παράμετρο που δείχνει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στα δύο στρώματα.	MODFLOW
<b>Εξατμισοδιαπνοή</b>	<b>EVT</b>	Αφορά τις επιδράσεις της διαπνοής και	MODFLOW



(Evapotranspiration)		εξάτμισης από τα φυτά, και της απομάκρυνσης (εξάτμισης) νερού από την κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα.	
Όριο γενικού φορτίου (General – Head Boundary)	GHB	Μέσω αυτής της οριακής συνθήκης, περιγράφουμε τις πλευρικές εισροές από ένα μεγάλο υδροφόρο σώμα, έξω από τα όρια μοντέλου με γνωστά ύψη νερού. Έτσι εισάγουμε δεδομένα (σε κάθε κυψελίδα) για το φορτίο και μία αριθμητική παράμετρο που δείχνει την αντίσταση ροής ανάμεσα στα δύο υδροφόρα στρώματα.	MODFLOW
Εμπλουτισμός (Recharge)	RCH	Εισάγονται πληροφορίες για την κατείσδυση λόγω κατακρημνισμάτων, άρδευσης, διαρροής ή λόγω τεχνητού εμπλουτισμού. Καθώς η κατείσδυση γίνεται από την επιφάνεια του εδάφους, οι τιμές αναθέτονται μόνο στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου.	MODFLOW
Σταθερό φορτίο (Time – Variant Constant Head)	CHD	Εισάγονται σταθερές τιμές φορτίων στις κυψελίδες του κανάβου, ανεξάρτητα από τις συνθήκες του υδροφορέα, οπότε λειτουργούν ως ανεξάντλητες πηγές του συστήματος ή ως ανεξάντλητες καταβόθρες, επηρεάζοντας σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης.	MODFLOW
Δεδομένα εξόδου (Output Control)	OC	Καθορίζουμε τον τρόπο με τον οποίο «σώζονται» και εμφανίζονται τα αποτελέσματα (φορτία, ή διαφορά φορτίων).	MODFLOW
Link – MT3DMS	LMT6	Αποθηκεύει τις πληροφορίες ροής ώστε να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό MT3DMS.	MODFLOW
Βασική μεταφορά (Basic Transport)	BTN	Ορίζονται οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να τρέξει το μοντέλο της μεταφοράς. Εισάγονται δεδομένα για τις οριακές και αρχικές συνθήκες, τη χρονική περίοδο προσομοίωσης, το βήμα κάθε περιόδου, την διατήρηση της μάζας.	MT3DMS
Συναγωγή – Οριζόντια μεταφορά (Advection)	ADV	Γίνεται επίλυση ως προς τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, λόγω της συναγωγής.	MT3DMS
Διασπορά (Dispersion)	DSP	Γίνεται επίλυση ως προς τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, λόγω της διασποράς.	MT3DMS
Sink & Source Mixing	SSM	Γίνεται επίλυση ως προς την αλλαγή της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, λόγω πηγών ή καταβόθρων.	MT3DMS
Χημικές αντιδράσεις (Chemical Reactions)	RCT	Γίνεται επίλυση ως προς την αλλαγή της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, λόγω χημικών αντιδράσεων.	MT3DMS

Πίνακας 5.1: Υπορουτίνες που περιλαμβάνονται στον κώδικα SEAWAT (Zheng & Wang, 1998, Guo & Langevin, 2002, Visual MODFLOW v.4.2. User's Manual – Schlumberger Water Services, Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006, Δεττοράκη, 2012).

## 5.4 Τρόποι επίλυσης ενός μοντέλου SEAWAT

Η επίλυση οποιουδήποτε μοντέλου SEAWAT, μπορεί να γίνει μόνο με έναν από τους παρακάτω τρόπους. Γενικά χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος και συγκεκριμένα οι έξι επαναληπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι,

Πακέτο	Ακρωνύμιο	Περιγραφή
<b>Προαπαιτούμενη συζυγής βαθμίδα (Preconditioned Conjugate Gradient)</b>	<b>PCG2</b>	Χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή για την επίλυση των ταυτόχρονων εξισώσεων που προκύπτουν από το μοντέλο. Μπορούν να προσομοιωθούν γραμμικές και μη – γραμμικές συνθήκες ροής. Γενικά υπάρχουν δύο προαπαιτούμενες επιλογές προσέγγισης, η τροποποιημένη μη ολοκληρωμένη προϋπόθεση Cholesky και η πολυωνυμική. Με τη μέθοδο αυτή η λύση προσεγγίζεται δουλεύοντας σε δύο επίπεδα, καθώς σε ένα χρονικό βήμα έχουμε εσωτερικές και εξωτερικές επαναλήψεις. Με τις εξωτερικές επαναλήψεις ενημερώνονται οι υδρογεωλογικές παράμετροι (π.χ. μεταβιβασιμότητα, αποθηκευτικότητα κ.ά.) στην προαπαιτούμενη ομάδα θεμελιώδων εξισώσεων. Οι εσωτερικές επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός εσωτερικών επαναλήψεων που έχει καθοριστεί από τον χρήστη, ή μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια σύγκλισης. Οι εξωτερικές επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι τα τελικά κριτήρια σύγκλισης να ικανοποιηθούν στην πρώτη εσωτερική επανάληψη μετά από μία ενημέρωση.
<b>Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure)</b>	<b>SIP</b>	Είναι μία μέθοδος επίλυσης μεγάλων συστημάτων ταυτόχρονων γραμμικών εξισώσεων μέσω επαναλήψεων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι σταθερή σαν επίλυση, και γενικά καταλήγει σε σύγκλιση, όμως συχνά γίνεται πολύ αργά. Γενικά δεν είναι τόσο γρήγορη όσο η μέθοδος PCG όμως απαιτεί λιγότερη μνήμη του συστήματος για τον υπολογισμό της τελικής λύσης.
<b>Διαδοχική χαλάρωση (Slice- Successive Over-Relaxation)</b>	<b>SOR</b>	Αντίστοιχα, είναι μία μέθοδος επίλυσης μεγάλων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων επαναληπτικά. Εφαρμόζεται χωρίζοντας το πλέγμα των πεπερασμένων διαφορών σε κάθετες «φέτες», και ομαδοποιώντας τις εξισώσεις στους κόμβους σε διακριτές ομάδες, όπου κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε μία «φέτα». Σε κάθε επανάληψη, αυτές οι ομάδες εξισώσεων επεξεργάζονται διαδοχικά, οπότε προκύπτουν νέες τιμές υδραυλικών υψών για κάθε «φέτα». Καθώς γίνεται η επεξεργασία των των εξισώσεων κάθε «φέτας», εκφράζονται πρώτα σε όρους των αλλαγών που έχουν γίνει στον υπολογισμό των φορτίων με κάθε επιτυχή επανάληψη. Έπειτα, η ομάδα εξισώσεων της κάθε «φέτας» επιλύεται άμεσα με την γκαουσιανή απαλοιφή, θεωρώντας ότι οι τιμές των γειτονικών «φετών» είναι γνωστές. Στη συνέχεια, οι μεταβολές φορτίου που έχουν υπολογισθεί για κάθε «φέτα» πολλαπλασιάζονται με μία μεταβλητή επιτάχυνσης, $T$ . Τα αποτελέσματα του πολλαπλασιασμού αυτού είναι τα τελικά αποτελέσματα της μεταβολής του φορτίου στην επανάληψη για τη συγκεκριμένη «φέτα». Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε «φέτα» στη σειρά, μέχρι όλες οι «φέτες» στο τρισδιάστατο πεδίο να έχουν επεξεργαστεί, και έτσι ολοκληρώνεται μία επανάληψη του πεδίου. Αυτή η ακολουθία επαναλαμβάνεται μέχρι οι διαφορές στις τιμές των φορτίων που έχουν υπολογιστεί να είναι μικρότερες από τα επιλεγμένα κριτήρια σε όλους τους κόμβους του πλέγματος.
<b>Μηχανή επίλυσης WHS (WHS Solver)</b>	<b>WHS</b>	Εδώ χρησιμοποιείται η ρουτίνα επιτάχυνσης Bi – Conjugate Gradient Stabilized μαζί με την ατελή αποσύνθεση Stone για να οριστούν οι προαπαιτούμενες συνθήκες των μερικά διαφορικών εξισώσεων της υπόγειας ροής. Αυτή η μηχανή επίλυσης, όπως όλες οι επαναληπτικές μηχανές επίλυσης, προσεγγίζει την λύση ενός μεγάλου συστήματος μερικά διαφορικών εξισώσεων επαναληπτικά και προσεγγιστικά.

		Με τη μέθοδο αυτή η λύση προσεγγίζεται δουλεύοντας σε δύο επίπεδα, καθώς σε ένα χρονικό βήμα έχουμε εσωτερικές και εξωτερικές επαναλήψεις. Μέσω των εξωτερικών επαναλήψεων γίνεται αλλαγή των παραγοντοποιημένων παραμέτρων της μητρικής εξίσωσης, έτσι ώστε να προσεγγιστεί η λύση. Με τις εξωτερικές επαναλήψεις «ενημερώνονται» οι υδρογεωλογικές παράμετροι του υδροφόρου συστήματος, στην παραγοντοποιημένη ομάδα εξισώσεων. Διαφορετικά επίπεδα παραγοντοποίησης επιτρέπουν στις εξισώσεις αυτές να αρχικοποιηθούν διαφορετικά έτσι ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητα και σταθερότητα του μοντέλου. Οι εσωτερικές επαναλήψεις λύνουν επαναληπτικά, τα αποτελέσματα των εξωτερικών επαναλήψεων.
<b>Αλγεβρικές πολυδικτυακές μέθοδοι για συστήματα (Algebraic Multigrid Methods for Systems)</b>	<b>SAMG</b>	Αυτή η μηχανή επίλυσης αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Αλγορίθμων και Επιστημονικού Προγραμματισμού Fraunhofer (FhG-SCAI), και μπορεί να αποκτηθεί μέσω του Ινστιτούτου μόνο για ερευνητικούς σκοπούς. Είναι μία ολοκληρωμένη πολυεπίπεδη δομή, σχεδιασμένη να ξεπεράσει τα προβλήματα σε απαίτηση μνήμης των προηγούμενων AMG μηχανών επίλυσης, διατηρώντας την επεκτασιμότητα και τους γρήγορους χρόνους εκτέλεσης. Το πακέτο SAMG σε σύγκριση με το PCG2 δίνει αποτελέσματα από 2.4-11.3 φορές πιο γρήγορα. Γενικά έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μηχανών επίλυσης, ειδικά σε περιπτώσεις μεγάλων πλεγμάτων (πάνω από 40000 κελιά), και περιοχών μελέτης με μεγάλη ποικιλία στο πεδίο των υδραυλικών αγωγιμοτήτων. Τα πλεονεκτήματα των πολυδικτυακών μεθόδων, έναντι όλων των άλλων επαναληπτικών μηχανών επίλυσης που έχουν αναφερθεί, είναι (1) η αποτελεσματικότητά του σαν μηχανή επίλυσης δεν εξαρτάται από την αρχική κατανομή των υδραυλικών υψών, και (2) ότι ο ρυθμός σύγκλισης αυξάνει σχεδόν γραμμικά.
<b>Γεωμετρική πολυδικτυακή μηχανή επίλυσης (Geometric Multigrid Solver)</b>	<b>GMG</b>	Έχει αναπτυχθεί από το USGS με σκοπό την επίλυση μοντέλων ροής πεπερασμένων διαφορών. Τα αποτελέσματα που δίνει δείχνουν αρκετά μειωμένους χρόνους «τρεξίματος» σε σχέση με άλλες μηχανές επίλυσης.

*Πίνακας 5.2: : Μηχανές επίλυσης σε ένα μοντέλο SEAWAT (Guo & Langevin, 2002, Visual MODFLOW v.4.2. User's Manual – Schlumberger Water Services, Waterloo Hydrogeologic Inc., 2006, Δεττοράκη, 2012).*

## 5.5 Οριακές & αρχικές συνθήκες σε ένα μοντέλο SEAWAT

Οι οριακές και αρχικές συνθήκες είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν πριν την εκκίνηση της επίλυσης του μοντέλου, καθώς είναι απαραίτητες για την επίλυση των μερικά διαφορικών εξισώσεων της ροής και μεταφοράς μάζας, που περιγράφουν μαθηματικά την υπόγεια ροή μεταβλητής πυκνότητας. Οι αρχικές συνθήκες είναι οι αρχικές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών, όπως το υδραυλικό φορτίο για την εξίσωση υπόγειας ροής και η συγκέντρωση του ρύπου (διαλύμενης ουσίας) για την εξίσωση μεταφοράς μάζας, σε κάποια αρχική στιγμή ( $t_0$ ). Σε προσομοίωσης μη – μόνιμης ροής, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι αρχικές συνθήκες τόσο για τη ροή, όσο και για τη μεταφορά μάζας (Guo & Langevin, 2002).

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, γενικά δηλαδή ορίζουν την αλληλεπίδραση της περιοχής μελέτης με το

εξωτερικό της περιβάλλον. Βασική προϋπόθεση για την ορθή κατασκευή του μοντέλου και την επίτευξη όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικής και αξιόπιστης προσομοίωσης της ροής, είναι η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών (Δεττοράκη, 2012). Στις αριθμητικές λύσεις, συναντούμε τρεις κατηγορίες οριακών συνθηκών, τύπου Dirichlet (σταθερό υδραυλικό ύψος ή συγκέντρωση), τύπου Neumann (ειδική ροή) και τύπου Cauchy (ροή εξαρτώμενη από το φορτίο ή μικτές οριακή κατάσταση) (Guo & Langevin, 2002).

- **Συνθήκη 1<sup>ης</sup> τάξης (τύπου Dirichlet)**

Με τη χρήση αυτού του ορίου, ορίζουμε τις τιμές του υδραυλικού φορτίου ή της συγκέντρωσης σε όλα τα σημεία (κελιά) κατά μήκος του ορίου. Οι τιμές του υδραυλικού φορτίου ή της συγκέντρωσης μπορούν να διαφέρουν από σημείο σε σημείο, ή να είναι συναρτήσεις του χρόνου και θεωρούνται γνωστές τιμές κατά την επίλυση των εξισώσεων. Όσο αφορά την προσομοίωση της ροής, ένα καθορισμένο υδραυλικό ύψος, καθορίζει αν έχουμε ροή από ή προς το όριο ανάλογα με τη διαφορά υδραυλικού ύψους ανάμεσα στην τιμή του ορίου και την τιμή σε κάποιο σημείο εντός της περιοχής μελέτης, κοντά στο όριο, που έχει υπολογιστεί. Όσο αφορά την προσομοίωση της μεταφοράς της διαλυμένης ουσίας, η καθορισμένη τιμή συγκέντρωσης στο όριο υποδεικνύει ότι έχουμε ροή η οποία διασπείρει τη διαλυμένη ουσία κοντά ή μακριά στο όριο ανάλογα με τη διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στις υπολογισμένες και καθορισμένες τιμές συγκέντρωσης. Η ροή λόγω συναγωγής της διαλυμένης ουσίας μέσα στην περιοχή μελέτης, από κάποιο καθορισμένο όριο, εξαρτάται από την ροή από το όριο και τις καθορισμένες τιμές συγκέντρωσης. Η ροή λόγω συναγωγής προς οποιοδήποτε τύπο ορίου εξαρτάται από την συγκέντρωση που έχει υπολογιστεί σε σημεία κοντά στο όριο και τη ροή προς το όριο.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός εξωτερικού ορίου Dirichlet είναι ένας χείμαρρος που εισχωρεί ολόκληρος στο όριο της περιοχής μελέτης με το εξωτερικό περιβάλλον, ή γενικά κάποιο άλλο επιφανειακό υδροφόρο στρώμα. Το υδραυλικό φορτίο ή η συγκέντρωση πρέπει να οριστούν κατά μήκος αυτού. Ένα εσωτερικό όριο Dirichlet θα ήταν κάποιο αυλάκι, σε κάποιο συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος, μέσα στην περιοχή μελέτης (Guo & Langevin, 2002).

- **Συνθήκη 2<sup>ης</sup> τάξης (τύπου Neumann)**

Με τα όρια τύπου Neumann περιγράφουμε την κατάσταση στην οποία η παράγωγος της εξαρτημένης μεταβλητής έχει οριστεί κάθετα στο όριο. Για την ροή του υπόγειου νερού, αυτή η οριακή συνθήκη, καταλήγει σε μία ειδική ροή νερού μέσα ή έξω από την περιοχή μελέτης. Για τη μεταφορά της διαλυμένης ουσίας, η παράγωγος της συγκέντρωσης ορίζεται κάθετα στο όριο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία ειδική ροή διασκορπισμού της διαλυμένης ουσίας, κατά μήκος του ορίου Neumann. Παρότι με το όριο Neumann εξασφαλίζουμε την ειδική ροή διασποράς, η ροή λόγω συναγωγής της διαλυμένης ουσίας εξαρτάται από τη ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού που είναι κάθετη στο όριο και στις υπολογισμένες συγκεντρώσεις σε αυτό. Οπότε η ολική ροή της διαλυμένης ουσίας κατά μήκος του ορίου Neumann δεν μπορεί να οριστεί πριν από την προσομοίωση.

Ένα αδιαπέρατο όριο, αντιπροσωπεύει μία ειδική περίπτωση του ορίου Neumann για ροή και μεταφορά της διαλυμένης ουσίας, όπου οι παράγωγοι του υδραυλικού φορτίου και της

συγκέντρωσης είναι μηδέν, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ροή και ροή διασποράς της διαλυμένης ουσίας, και η ροή της διαλυμένης ουσίας λόγω συναγωγής αποκλείεται λόγω της μη – ύπαρξης ροής. Ένα αδιαπέρατο όριο, μπορεί να προσομοιωθεί ορίζοντας κελιά στα οποία η εξίσωση της ροής δεν λύνεται. Επιπλέον, η ροή ανάμεσα σε ένα κελί μηδενικής ροής και ένα διπλανό του είναι μηδέν. Ένα παράδειγμα μη μηδενικού ορίου Neumann κατά την προσομοίωση ροής, μπορεί να είναι ένα επιφανειακό υδροφόρο στρώμα, στο οποίο συμβαίνει κάποια διαρροή με συγκεκριμένο ρυθμό (Guo & Langevin, 2002).

- **Συνθήκη 3<sup>ης</sup> τάξης (τύπου Cauchy)**

Μία κατάσταση στην οποία έχουμε ροή εξαρτώμενη από το υδραυλικό φορτίο αντιπροσωπεύει τα όρια τύπου Cauchy (Anderson & Woessner, 1992). Πάντως, το όριο Cauchy για τη μεταφορά της διαλυμένης ουσίας δεν είναι ανάλογο, αφού οι οριακές συνθήκες για τη μεταφορά της διαλυμένης ουσίας μπορεί να περιέχουν πληροφορίες συναγωγής και διασποράς, ενώ οι οριακές συνθήκες της ροή περιλαμβάνουν μόνο τη συνιστώσα της ροής. Με το όριο Cauchy για τη ροή, ορίζουμε ένα υδραυλικό ύψος ελέγχου, αλλά αυτό το υδραυλικό ύψος ελέγχου επικρατεί σε αν γίνει κάποιος υδραυλικός διαχωρισμός από το όριο. Το φορτίο στο όριο, υπολογίζεται από την προσομοίωση και συνδέεται με το φορτίο ελέγχου μέσω ενός όρου αγωγιμότητας, το οποίο μπορεί να περιγράφει για παράδειγμα, το ημιδιαπερατό υλικό στον πυθμένα ενός ρέματος ή την μείωση του υδραυλικού φορτίου τοπικά λόγω κάποιου αυλακιού.

Το όριο Cauchy για τη μεταφορά της διαλυμένης ουσίας αντιπροσωπεύει ένα όριο στο οποίο τόσο η συγκέντρωση αλλά και η παράγωγός της έχουν ορισμένη τιμή (Zheng & Bennett, 1995). Αυτό σημαίνει ότι η ροή λόγω διασποράς κατά μήκος του ορίου είναι ορισμένη και ότι η ροή λόγω συναγωγής κατά μήκος αυτού θα ποικίλει μόνο όπου ποικίλει και η ροή του νερού από την προσομοίωση (Guo & Langevin, 2002).

## **5.6 Προετοιμασία του μοντέλου SEAWAT για την περιοχή μελέτης (Τυμπάκι)**

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς του παράκτιου υπόγειου υδροφορέα στο Τυμπάκι, για ένα πλήρες υδρολογικό έτος (2007-2008), λαμβάνοντας υπόψη τις πιέσεις που μπορεί να υφίσταται λόγω άντλησης. Το υδρολογικό έτος μελέτης το διακρίνουμε σε δύο περιόδους, την υγρή (0 – 180d) και την ξηρή (180 – 365d), έτσι ώστε να μελετηθεί ικανοποιητικά η εξάπλωση του φαινομένου.

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το πρόβλημα της υφαλμύρινσης στην περιοχή είναι έντονο, ειδικά στο βορειοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης. Για να μπορέσει να γίνει καλύτερη προσέγγιση με τη βοήθεια του SEAWAT επιλέγουμε να δουλέψουμε με πυκνό πλέγμα, αποτελείται από 200 σειρές και 200 στήλες, αλλά και με παραπάνω από 1 στρώματα (layers) καθώς η σφήνα της υφαλμύρινσης φαίνεται στον κατακόρυφο άξονα (z). Έτσι η προσομοίωση γίνεται για μοντέλο με 3 και 24 layers. Η επιλογή του αριθμού των layers ορίζεται από το είδος της ροής που είναι μεταβλητής πυκνότητας, διαφορετικά η προσομοίωση είναι ικανοποιητική και με 1 layer.

Αρχικά εισάγουμε μία εικόνα (Εικόνα 5.5) η οποία είναι μία περιγραφή της περιοχής μελέτης, καθώς δίνει τα όρια του υδροφορέα, άρα ποια κελιά θεωρούμε ενεργά και ποια

όχι. Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε να γίνει επίλυση με βάση την αριθμητική μηχανή SEAWAT 2000, ορίζουμε τις μονάδες μέτρησης στις παραμέτρους ροής και μεταφοράς μάζας (Πίνακας 5.3) και το είδος της ροής, η οποία είναι μη – μόνιμη (transient) κορεσμένη μεταβαλλόμενης πυκνότητας (saturated, variable density).

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Μήκος (Length)	meters
Χρόνος (Time)	day
Υδραυλική αγωγιμότητα (Conductivity)	m/d
Ρυθμός άντλησης (Pumping rate)	m <sup>3</sup> /d
Εμπλουτισμός (Recharge)	mm/year
Μάζα (Mass)	kilogram
Συγκέντρωση (Concentration)	mg/L

Πίνακας 5.3: Μονάδες παραμέτρων του προγράμματος.

Στη συνέχεια στις επιλογές για την προσομοίωση της ροής, ορίζουμε το χρόνο της προσομοίωσης. Όπως έχουμε αναφέρει επιλέγουμε να «τρέξουμε» το μοντέλο για δύο χρονικές περιόδους, την υγρή και ξηρή ενός υδρολογικού έτους. Η υγρή περίοδος ξεκινά τον Οκτώβριο μέχρι και τον Απρίλιο, και η ξηρή από τον Μάιο μέχρι και τον Σεπτέμβριο. Οι τιμές που χαρακτηρίζουν την αποθηκευτικότητα του υδροφορέα μελέτης φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

Μέγεθος	Τιμή
Ειδική αποθηκευτικότητα ( $S_s$ )	$10^{-5} \text{ m}^{-1}$
$S_y$	0.2
Effective Porosity	0.15
Total Porosity	0.3

Πίνακας 5.4: Παράμετροι αποθηκευτικότητας του υδροφορέα μελέτης.

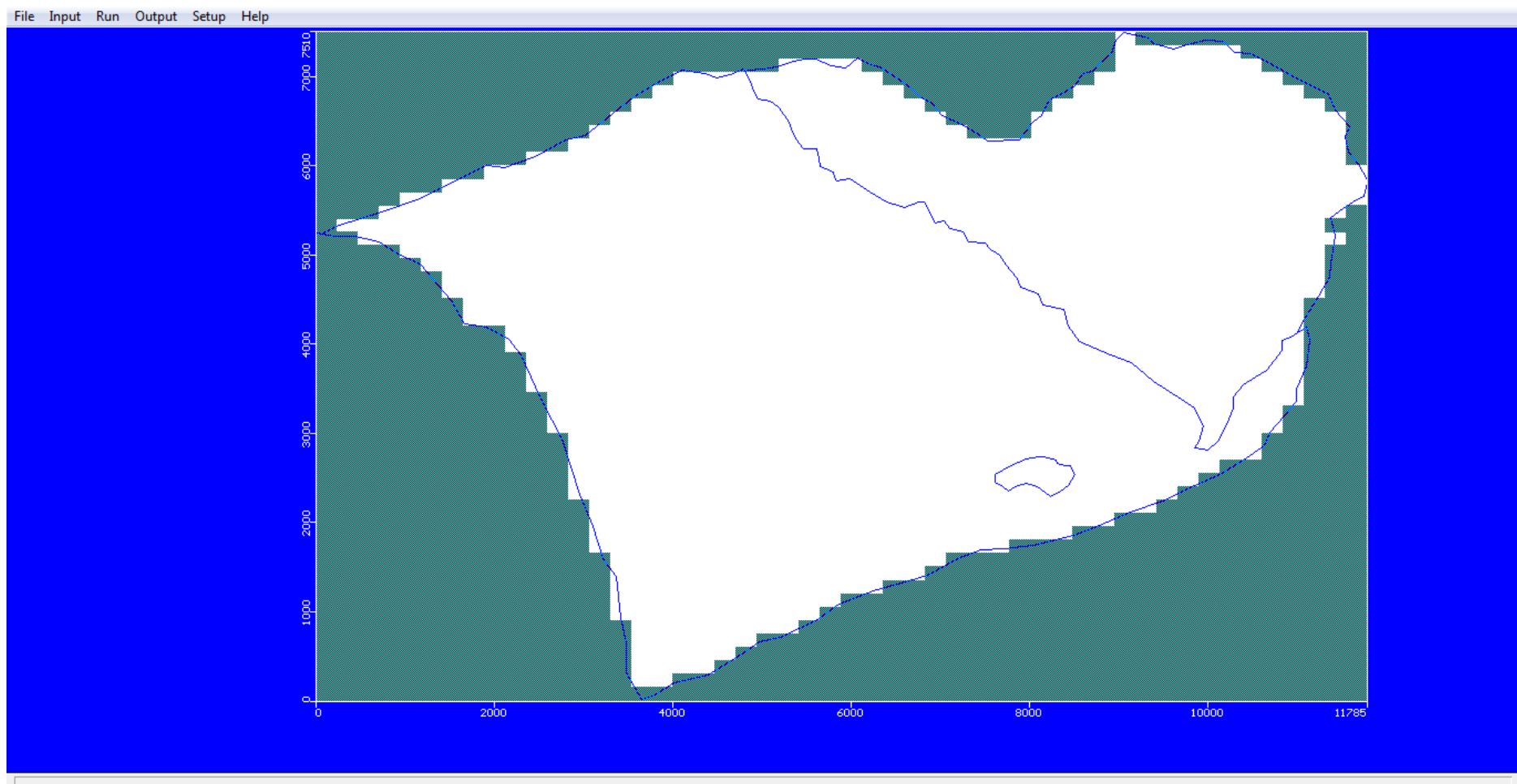
Στις επιλογές για την προσομοίωση της μεταφοράς μάζας χρειάζεται να οριστούν οι αρχικές συνθήκες για το σενάριο μεταφοράς του ρυπαντή. Επιλέγουμε λοιπόν τον αριθμό των ρυπαντών ενδιαφέροντος (1), το είδος τους (αλάτι – salt), τις αρχικές τους συγκεντρώσεις, τους ρυθμούς απομάκρυνσης/αποσύνθεσης, συντελεστές διάσπασης κ.ά. (Πίνακας 5.5). Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ρόφηση ή χημικές κινητικές αντιδράσεις.

Μέγεθος	Τιμή
Αρχική συγκέντρωση	22000 mg/L
Longitudinal Dispersivity (D)	10 m
Horiz. /Long. Dispersivity	0.1
Vert. /Long. Dispersivity	0.01
Diffusion Coefficient	0.308

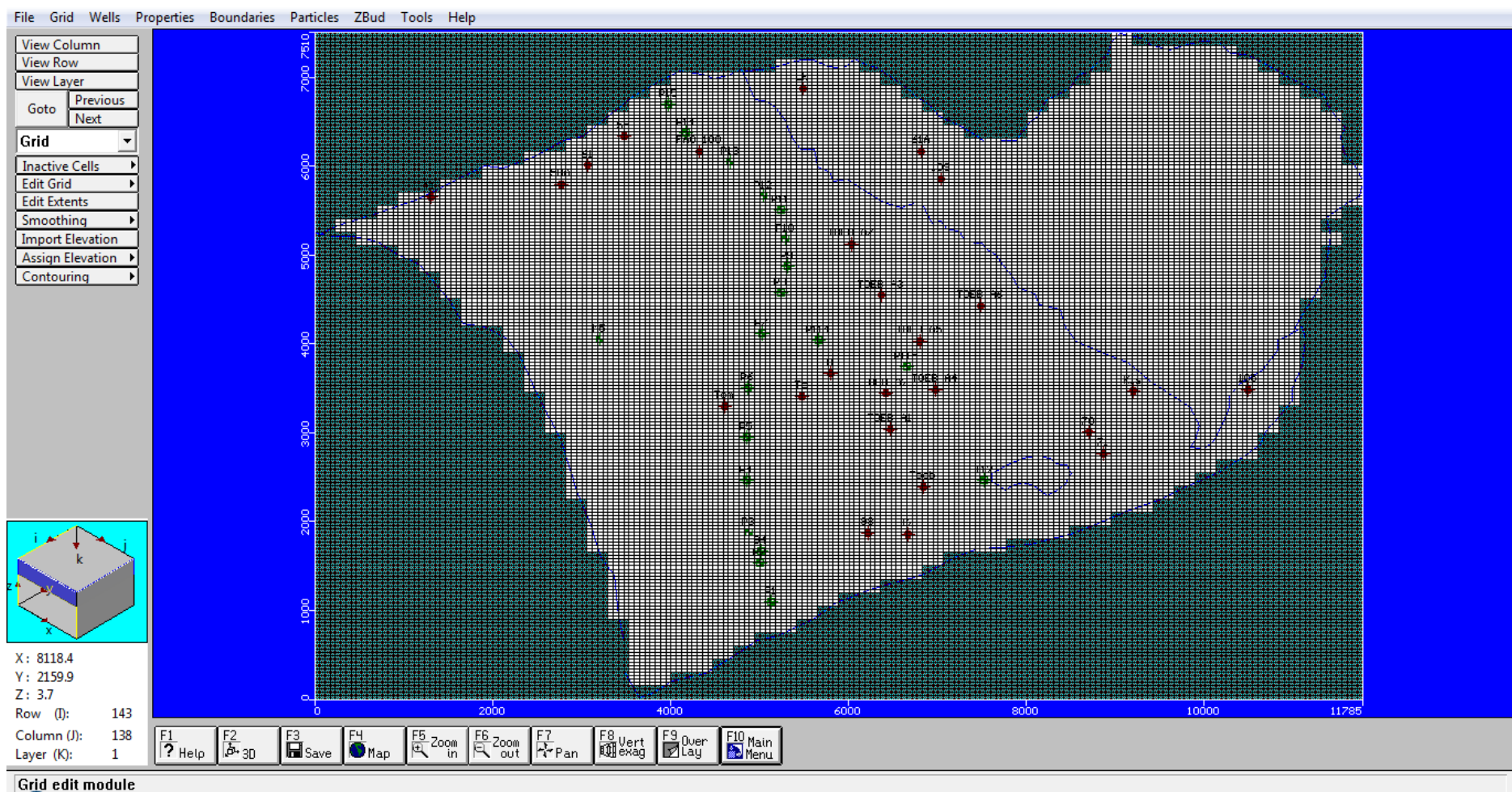
Πίνακας 5.5: Παράμετροι για τη διασπορά του άλατος μέσα στον υδροφορέα.

Το πλέγμα που θα περιγράφει την περιοχή μελέτης, έχουμε επιλέξει να αποτελείται από 200 στήλες, 200 γραμμές και από 3 και 24 layers αντίστοιχα, ώστε να επιτύχουμε ικανοποιητική διακριτοποίηση (Εικόνα 5.6).





Εικόνα 5.5: Χάρτης της περιοχής μελέτης (φαίνονται τα όριά της).



Εικόνα 5.6: Το πλέγμα της περιοχής μελέτης.

Επίσης εισάγουμε τα **πηγάδια άντλησης (Pump Wells) και παρατήρησης (Head Obs.)** που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης (Εικόνα 5.6). Μετά από δοκιμές για την πιο ικανοποιητική προσομοίωση της κατάστασης του υδροφορέα, οι τιμές του ρυθμού άντλησης των πηγαδιών φαίνονται στον Πίνακα 5.6. Οι τιμές των πηγαδιών παρατήρησης προέρχονται από μετρήσεις στο πεδίο και δίνονται στον Πίνακα 5.7.

Η λειτουργία των πηγαδιών άντλησης κρίνεται απαραίτητη κατά τη θερινή (ξηρή) περίοδο, γι' αυτό και παρατηρούμε αυξημένες τιμές σε σχέση με την υγρή περίοδο στον Πίνακα 5.6. Το μείον στους ρυθμούς άντλησης των πηγαδιών, έχει φυσική σημασία και δηλώνει την απομάκρυνση του νερού από τον υδροφορέα. Γενικά η αντλητική δυναμικότητα των πηγαδιών επηρεάζει τη στάθμη και τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα και κατά συνέπεια και το μέτρωπο της υφαλμύρισης.

Πηγάδι άντλησης	Ρυθμός άντλησης (m <sup>3</sup> /d)	
	Υγρή περίοδος	Ξηρή περίοδος
11	-56	-89.6
50A	-280	-448
61	-56	-89.6
55	-56	-89.6
FAO 10	-56	-89.6
Lk	-56	-89.6
61A	-56	-89.6
109	-56	-89.6
Tom	-7	-11.2
Tc	-56	-89.6
8	-56	-89.6
TOEB A1	-238	-380.8
TOEB A2	-280	-448
TOEB A3	-84	-134.4
TOEB A4	-210	-336
TOEB A5	-238	-380.8
TOEB A6	-70	-112
TOEB A7	-112	-179.2
ToeB	-280	-448
T2	-84	-134.4
98	-140	-224
Kis	-98	-156.8
70	-56	-89.6
71	-98	-156.8
105	-56	-89.6

*Πίνακας 5.6: Ρυθμοί άντλησης.*

Γενικά τα πηγάδια παρατήρησης αποτελούνται από ένα διάτρητο σε όλο το μήκος τους σωλήνα, που αντίθετα με το πιεζόμετρο, δεν στεγανοποιείται ως προς τον υδροφορέα που το περιβάλλει. Έτσι θεωρητικά τουλάχιστον, το πηγάδι αυτό δεν προκαλεί κανένα εμπόδιο στην υπόγεια ροή και μπορεί να χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης.

Πηγάδι παρατήρησης	Υδραυλικό φορτίο (m)	
	Ξηρή περίοδος	Υγρή περίοδος
M5	0.07	0.76
P15	2.5	2.84
P14	2.5	1.25
P13	2.5	1.48
P12	2.5	1.75
P11	2.5	1.85
P10	2.5	1.65
P9	2.5	1.85
P8	2.5	1.86
P7	2.5	1.76
P6	2.5	1.83
P5	2.5	1.56
P4	2.5	1.95
P3	2.5	1.48
94	2.51	1.56
P2	2.5	1.89
P1	2.5	1.94
P114	3.54	2.05
P115	5.62	2.68
T12	8.22	3.75

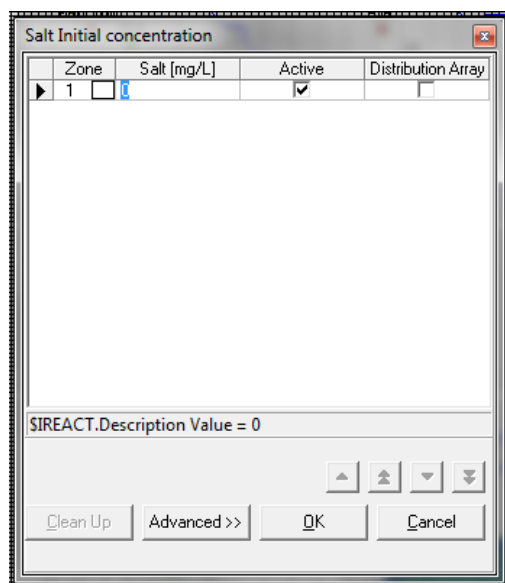
Πίνακας 5.7: Ύψος νερού στα πηγάδια παρατήρησης.

Από μελέτες που έχουν προηγηθεί στην περιοχή, γίνεται η διάκρισή της, σε τέσσερις ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας (**Conductivity**) σύμφωνα με τη γεωλογία της περιοχής (Πίνακας 5.8). Η διάκριση των ζωνών φαίνεται στην Εικόνα 5.9.

Ζώνη Υδραυλικής Αγωγιμότητας	Τιμές Υδραυλικής Αγωγιμότητας στους άξονες x, y, z (m/d)		
	K <sub>x</sub>	K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>
1	0.001	0.001	0.0001
2	0.006	0.006	0.0006
3	0.009	0.009	0.0009
4	0.004	0.004	0.0004

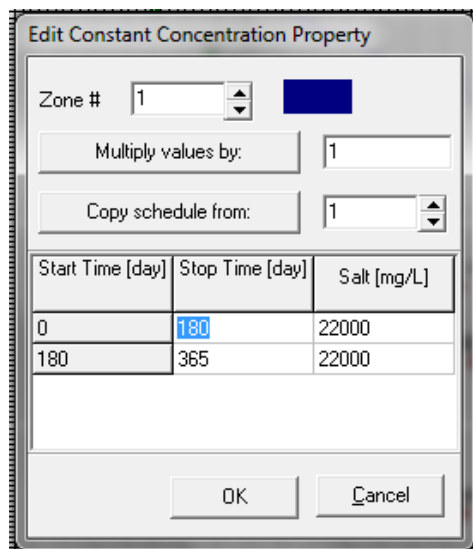
Πίνακας 5.8: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στις ζώνες της περιοχής μελέτης.

Για να γίνει η προσομοίωση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφορέα γλυκού νερού, είναι απαραίτητο να αναθέσουμε διάφορες ιδιότητες και όρια στο χώρο μελέτης. Αναθέτουμε λοιπόν **αρχική συγκέντρωση (Initial Conc.)** 0 mg/L σε όλη την έκταση του υδροφορέα, έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η εικόνα της εισχώρησης οφείλεται μόνο στην ύπαρξη θαλασσινού νερού, αφού δεν υπάρχει κάποια άλλη πηγή άλατος (Εικόνα 5.7).



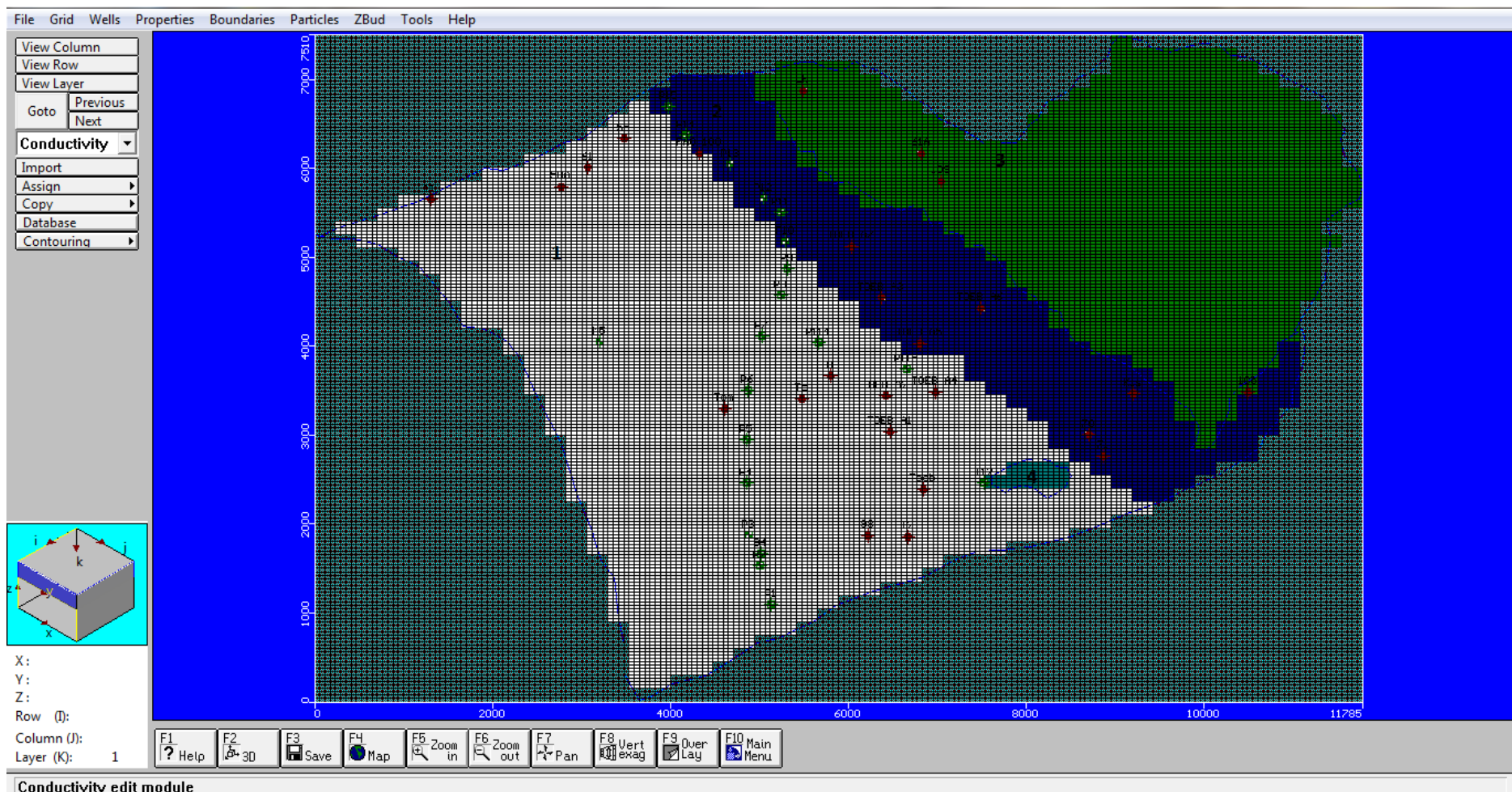
*Εικόνα 5.7: Παράθυρο διαλόγου για την ανάθεση της αρχικής συγκέντρωσης.*

Στη συνέχεια, αφού η υφαλμύριση οφείλεται μόνο στην εισχώρηση του θαλασσινού νερού, αυτή γίνεται στο παράκτιο όριο του υδροφορέα. Έτσι περιγράφουμε το θαλασσινό νερό που βρίσκεται στο παράκτιο όριο, δηλαδή την πηγή του θαλασσινού νερού, με την **οριακή συνθήκη σταθερής συγκέντρωσης (Constant Concentration Boundary Conditions)** (Εικόνα 5.8, 5.10).



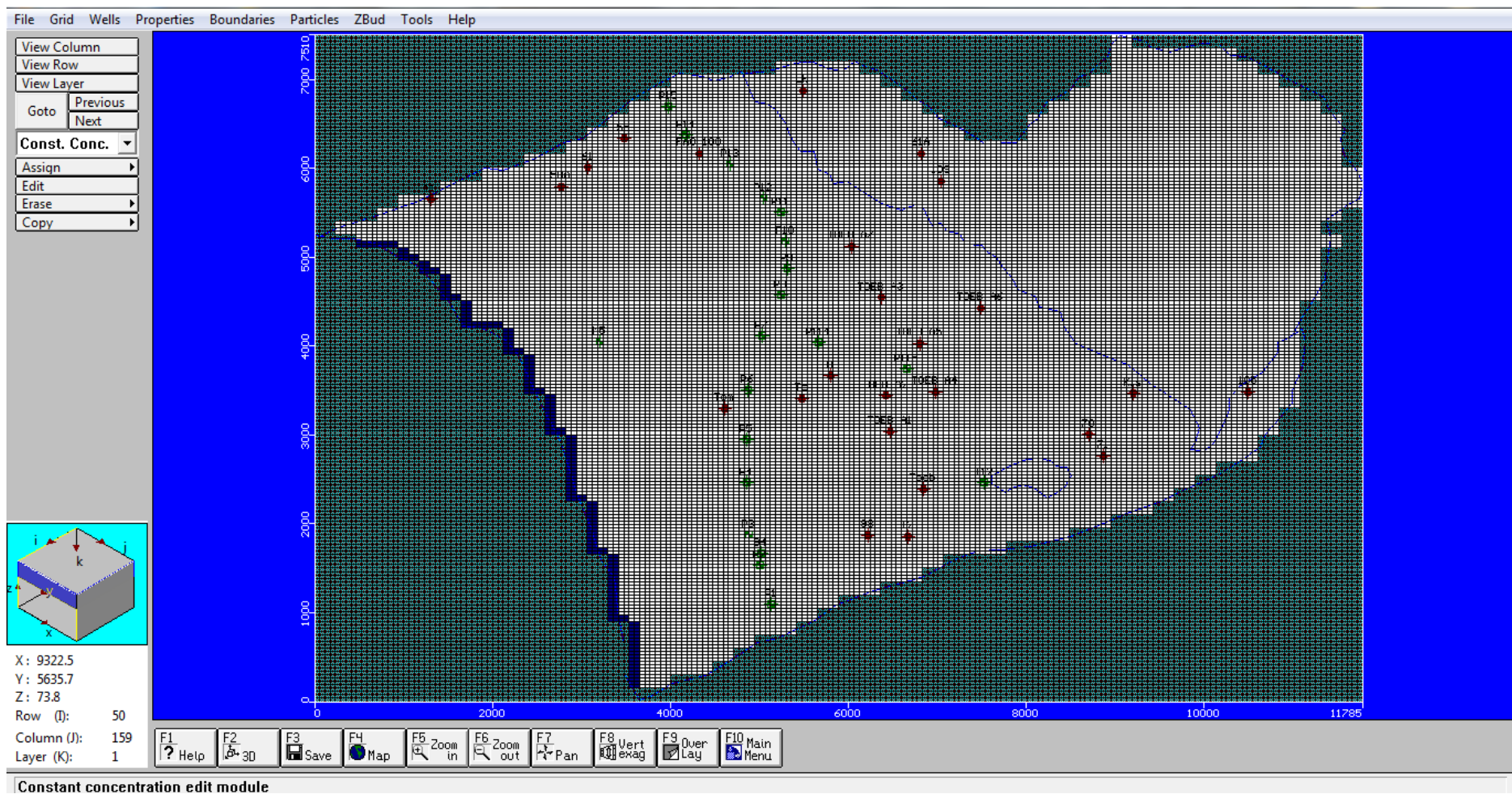
*Εικόνα 5.8: Παράθυρο διαλόγου για την ανάθεση του ορίου σταθερής συγκέντρωσης.*





Εικόνα 5.9: Χάρτης των ζωνών των γεωλογικών σχηματισμών.





Εικόνα 5.10: Το όριο σταθερής συγκέντρωσης άλατος, στο παράκτιο όριο του υδροφορέα.

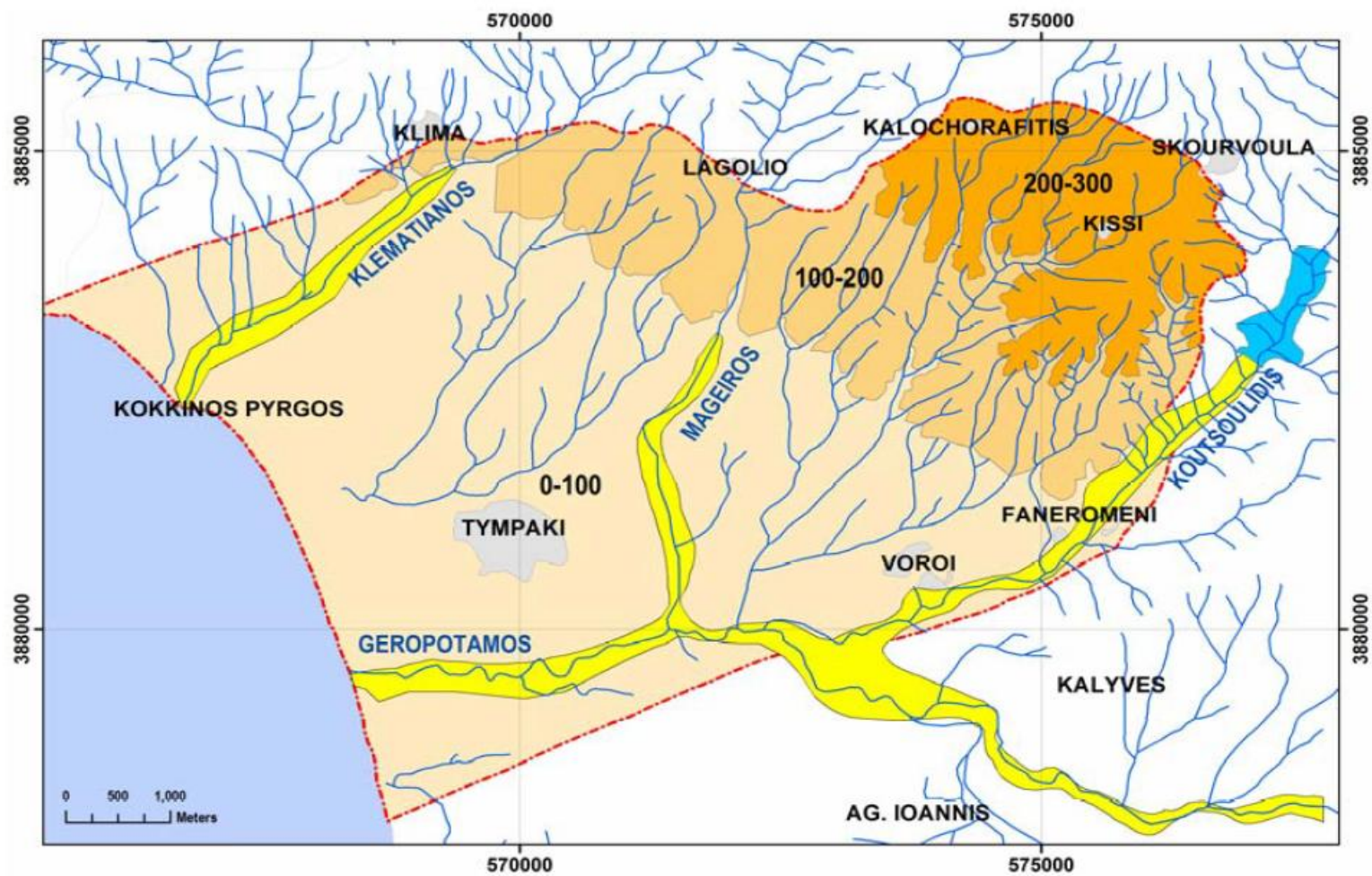
Στην παρούσα εργασία περιγράφουμε τον εμπλουτισμό του υδροφορέα μόνο μέσω των πλευρικών εισροών του. Για να εισάγουμε τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούμε την **οριακή συνθήκη σταθερού φορτίου (Constant Head Boundary Conditions)**. Με τη χρήση αυτού του ορίου μπορούμε να αναθέσουμε συγκεκριμένες τιμές σε επιλεγμένα σημεία, χωρίς να επηρεάζονται από τις συνθήκες στα σημεία γύρω από αυτά, με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν ως απεριόριστες πηγές νερού.

Μετά από δοκιμές και αλλαγές σε τιμές που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε άλλες εργασίες (Δεττοράκη, 2012, Αγιουτάντη, 2016) (διαδικασία βαθμονόμησης) καταλήξαμε σε αυτές που δημιουργούν σωστή αναπαράσταση των παρατηρούμενων υδραυλικών υψών στο πεδίο (Πίνακας 5.9). Όπως φαίνεται (Εικόνα 5.11, 5.12) οι πλευρικές εισροές που εισάγουμε στο μοντέλο περιλαμβάνουν τον εμπλουτισμό από πηγές και ποτάμια (Γεροπόταμος, Κουτσουλίδης, Μάγειρος και Κλεματιανός), που είναι και η μεγαλύτερη πηγή εμπλουτισμού του υδροφορέα (Paritsis, 2005).

Ομάδες σταθερού φορτίου (Constant Head Groups)	Ύψος νερού (m)	
	Ξηρή περίοδος	Υγρή περίοδος
0	0	0
7	0	0
12	0	0
86	10	5.5
88	4.3	2.4
89	3.8	1.9
90	4.4	2.2
91	13	6
92	13	6
93	20	10
94	20	10
95	20	10
96	20	10
97	20	10
98	22	11
99	20	10
100	18.8	9.4
101	13	6
102	8	4
103	4.4	2.2
104	4.4	2.2
105	1.3	0.6

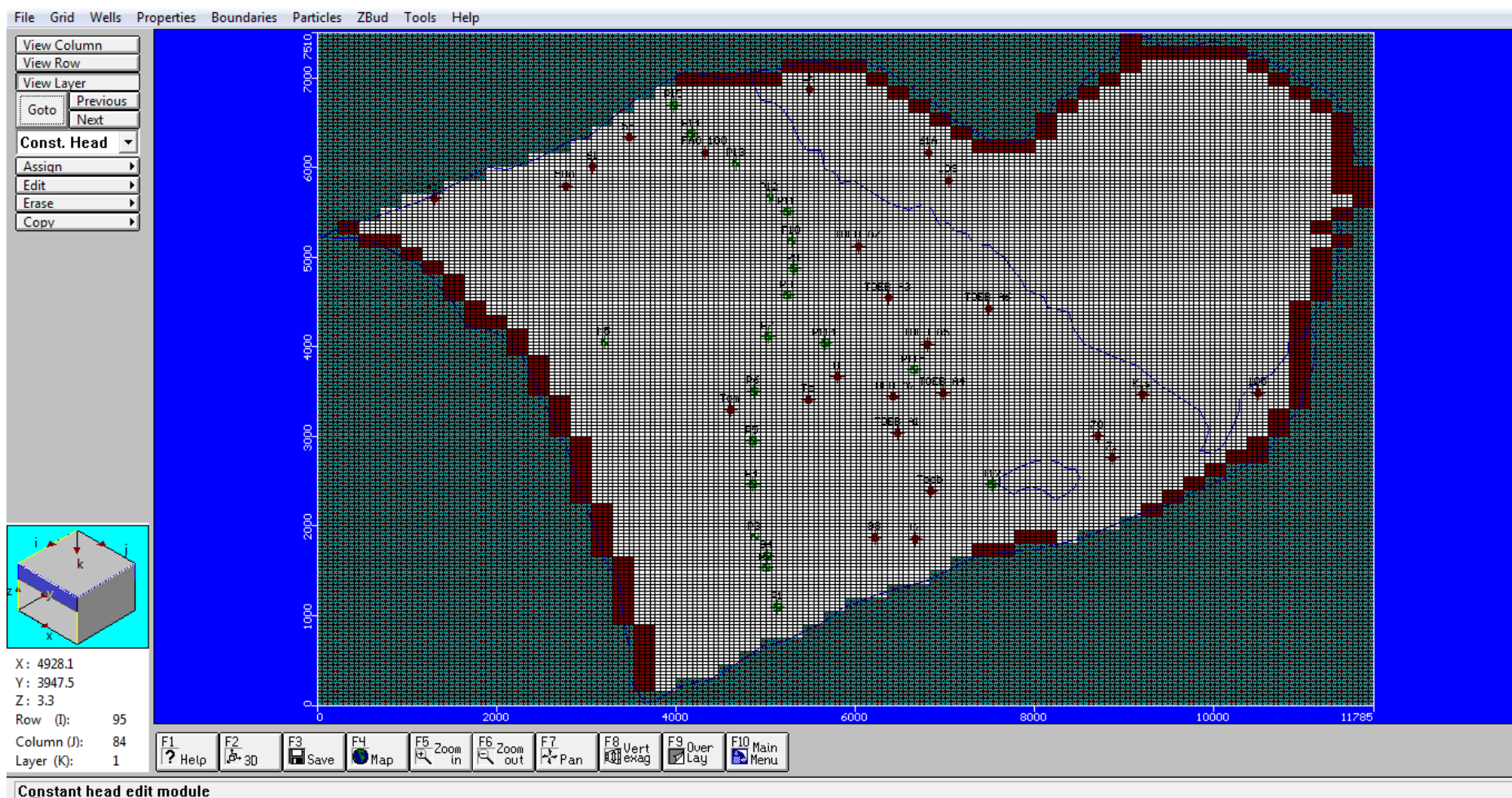
*Πίνακας 5.9: Τιμές ύψους νερού στα όρια Constant Head.*

Στις ομάδες που έχουμε αναθέσει την τιμή μηδέν, είναι γιατί βρίσκονται στο παράκτιο όριο της περιοχής μελέτης. Με αυτόν τον τρόπο δείχνουμε ότι από το παράκτιο όριο δεν έχουμε ροή γλυκού νερού προς τον υδροφορέα. Επιπλέον αξίζει να αναφέρουμε ότι τις τιμές σταθερής συγκέντρωσης και φορτίου τις «περνάμε» σε όλα τα layers του μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα 5.11: Εμπλουτισμός λόγω κατακρημνισμάτων και πηγών, τα κίτρινα τμήματα είναι αλλουβιακές αποθέσεις (Paritsis, 2005).





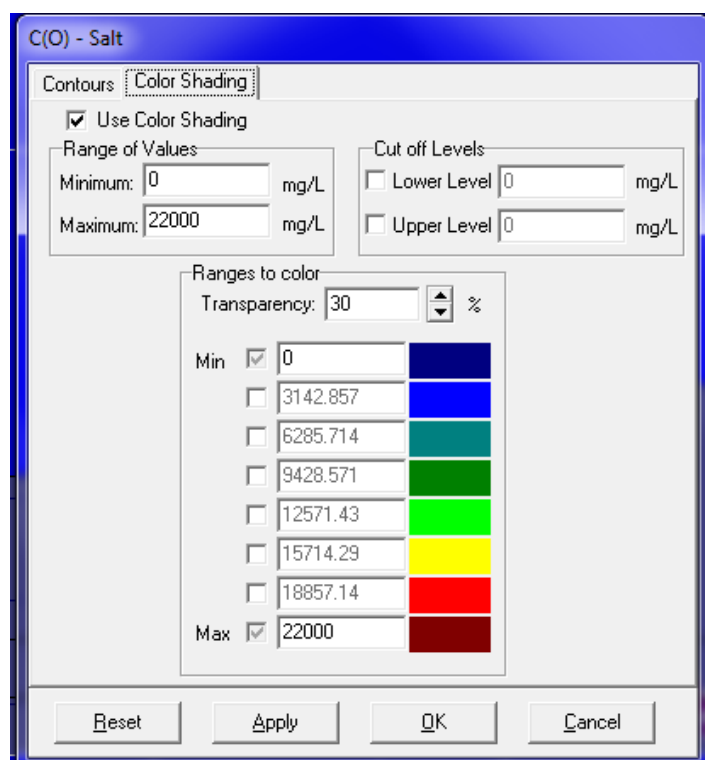
Εικόνα 5.12: Οι ομάδες Constant Head στα όρια του υδροφορέα μελέτης.

## 5.7 Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Η προσομοίωση της κατάστασης του υδροφορέα, όπως έχουμε αναφέρει γίνεται για 2 μοντέλα με μοναδική διαφορά τον αριθμό των layers τους, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε αν ο αυξημένος αριθμός τους οδηγεί σε καλύτερη εικόνα της σφήνας. Επιπλέον το μοντέλο με τα 3 layers το «τρέχουμε» για 2 σενάρια, στο ένα τα πηγάδια άντλησης λειτουργούν και στο άλλο όχι. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να ελέγξουμε πόσο επηρεάζεται η εισχώρηση του θαλασσινού νερού από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Το πρώτο από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που ελέγχουμε είναι αν το πεδίο των υδραυλικών φορτίων που προκύπτει ανταποκρίνεται στην πραγματική κατάσταση της περιοχής, με βάση τις τιμές του ύψους στα πηγάδια παρατήρησης (Εικόνα 5.15). Η ταύτιση που πετύχαμε με το εν λόγω μοντέλο είναι αρκετά ικανοποιητική.

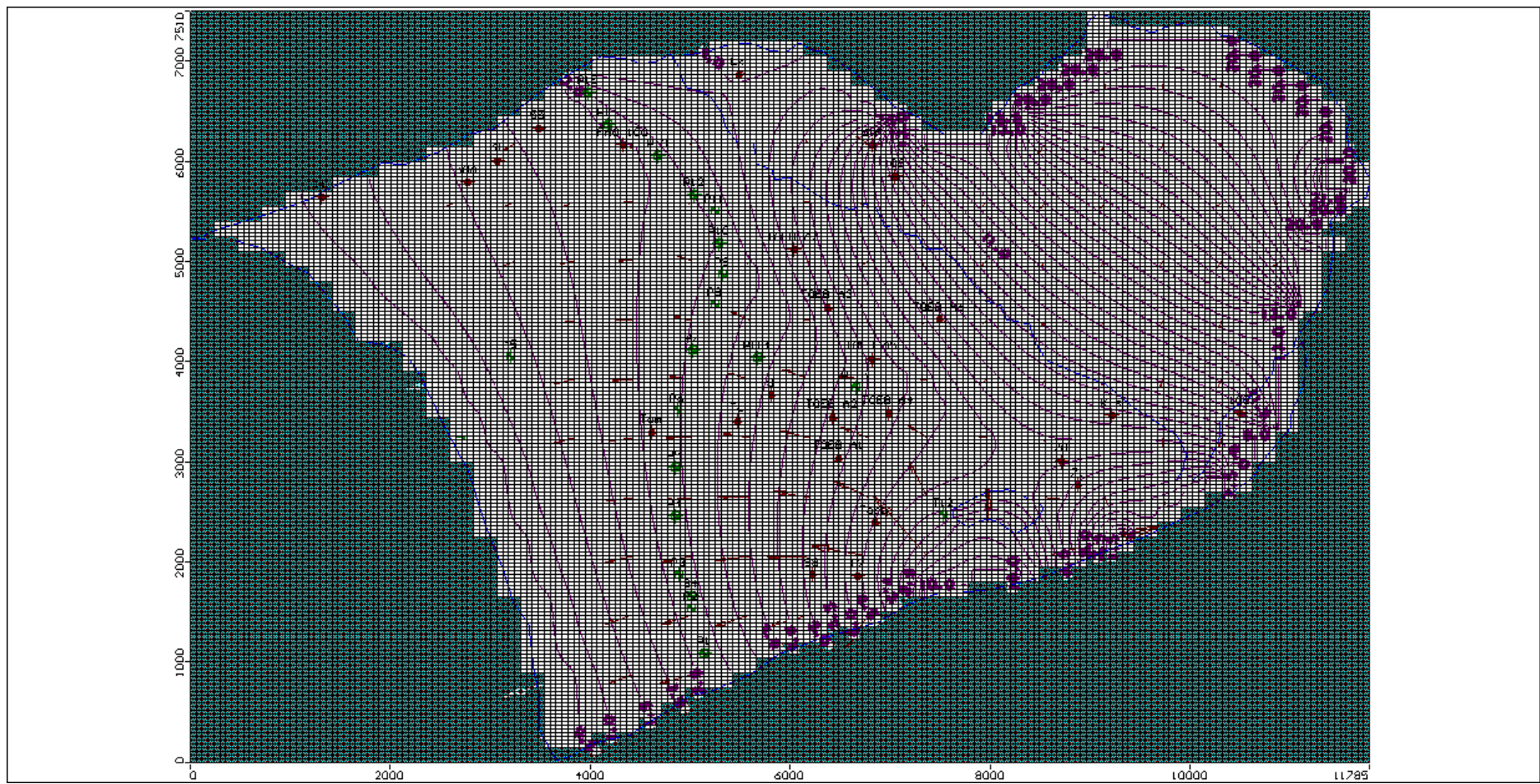
Στη συνέχεια μας ενδιαφέρει να ελέγξουμε κατά πόσο έχει εισχωρήσει το θαλασσινό νερό εντός της περιοχής μελέτης. Στους χάρτες που προκύπτουν, μπορούμε να εμφανίσουμε τα αποτελέσματα, είτε με τη βοήθεια ισοϋψών συγκέντρωσης είτε με χρωματική σκίαση των ισοϋψών συγκέντρωσης. Το υπόμνημα της χρωματικής σκίασης των χαρτών δίνεται στην Εικόνα 5.13. Στις Εικόνες 5.15 – 5.17 φαίνεται η διαβάθμιση της εξάπλωσης του φαινομένου σε όλο το παράκτιο άκρο της περιοχής, κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο, και για τα δύο σενάρια (ανοιχτά και κλειστά πηγάδια). Παρατηρούμε ότι το φαινόμενο είναι πιο έντονο στο βορειοδυτικό άκρο σε σχέση με το νότιο όπως έχει ήδη υπολογιστεί σε προηγούμενες μελέτες. Ακόμη στις Εικόνες 5.15 – 5.17 παρατηρούμε ότι από τα πηγάδια άντλησης μόνο το πηγάδι 11 βρίσκεται κοντά στη ζώνη υφαλμύρισης.



Εικόνα 5.13: Υπόμνημα της χρωματικής σκίασης της συγκέντρωσης του άλατος.

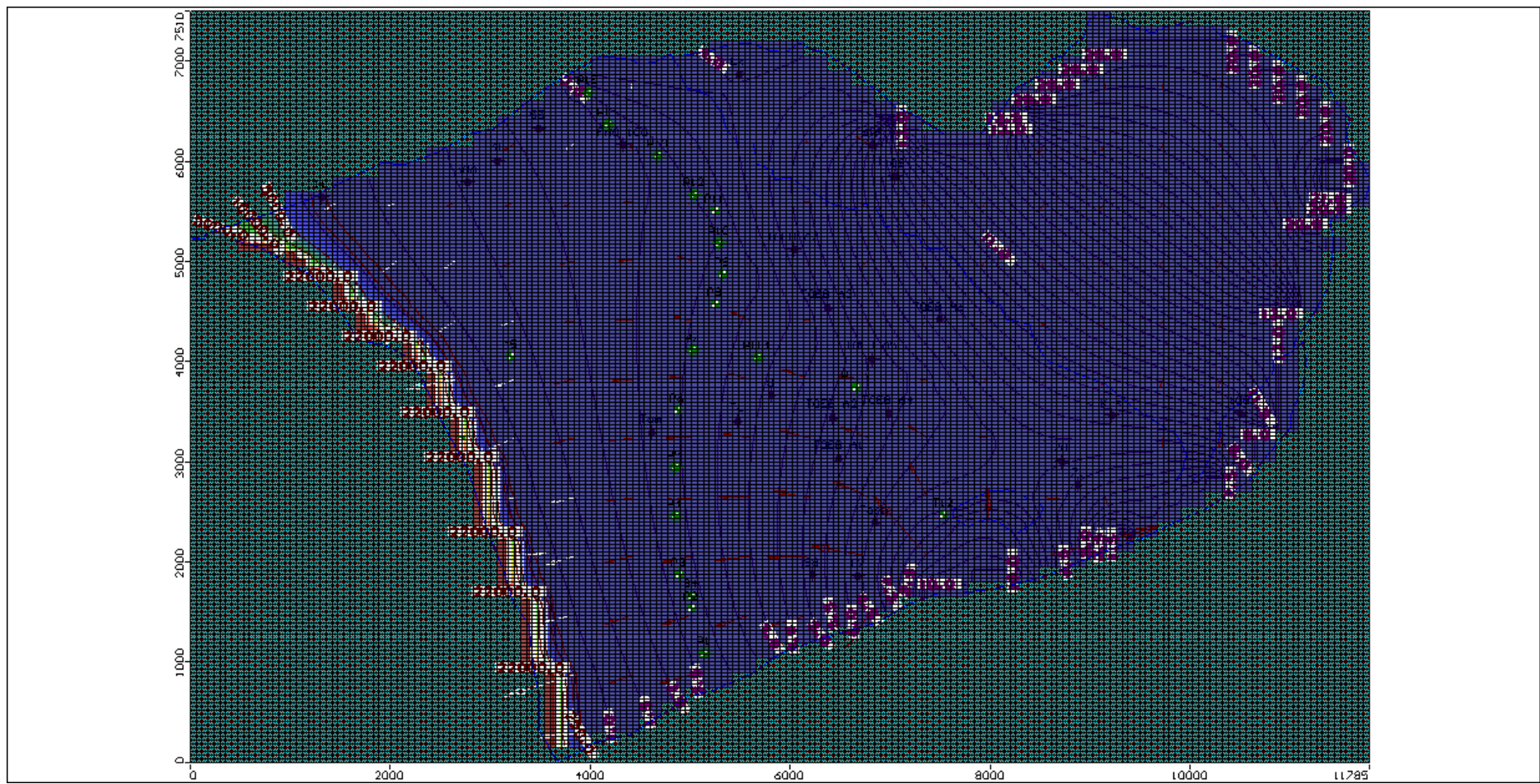
Στις Εικόνες 5.18 – 5.21, φέραμε τομή στη γραμμή 62 του πλέγματος, η οποία βρίσκεται στο βορειοδυτικό άκρο, έτσι ώστε να ελέγξουμε το μέγεθος της εισχώρησης της σφήνας και τις δύο χρονικές περιόδους και για τα 2 μοντέλα προσομοίωσης. Ανάμεσα στα δύο μοντέλα δεν παρατηρούμε έντονες αλλαγές, όμως η διαβάθμιση είναι πιο αναλυτική στο μοντέλο των 24 layers.





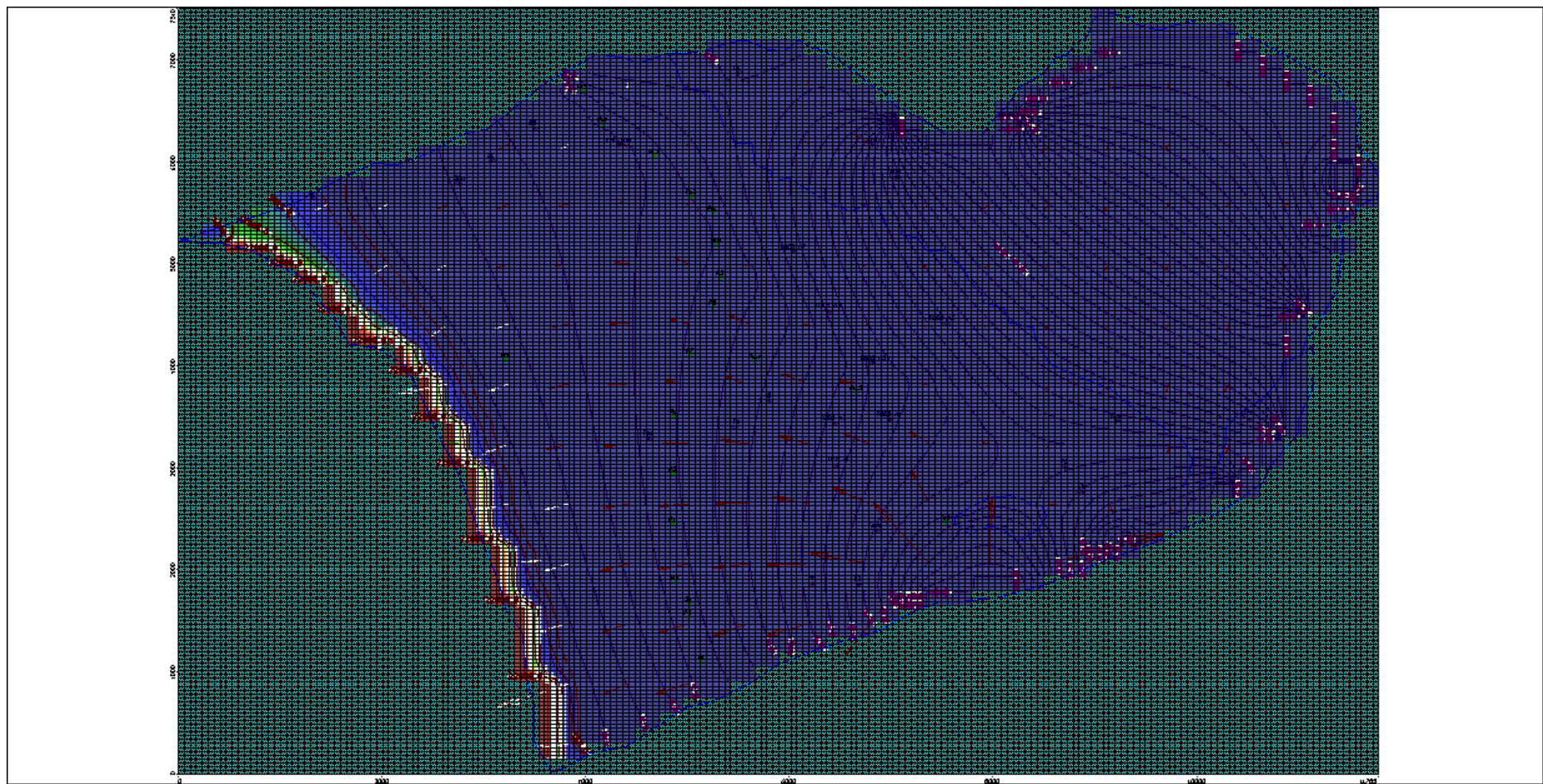
Εικόνα 5.14: Τα υπολογισμένα υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης, μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.





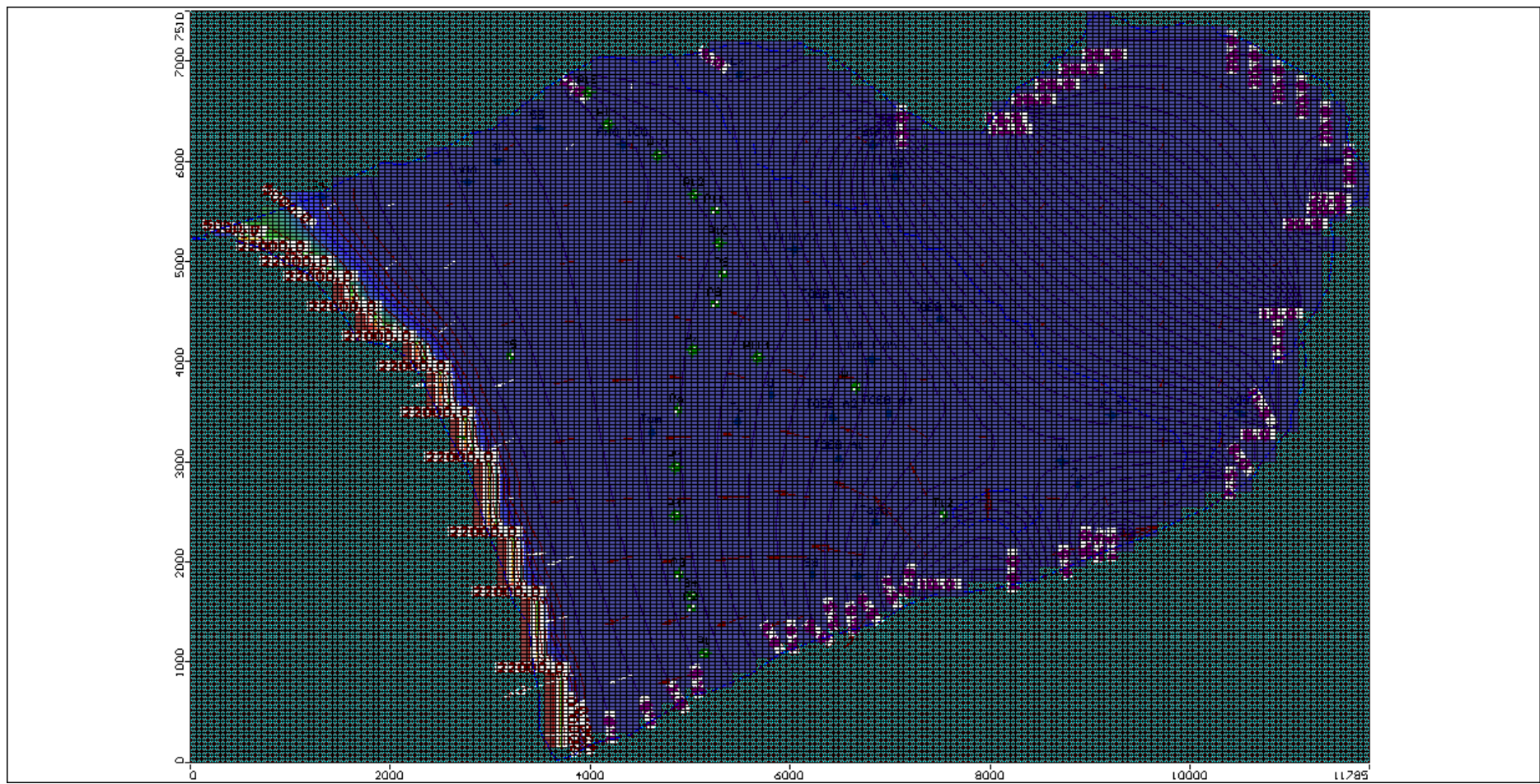
Εικόνα 5.15: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος - Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).



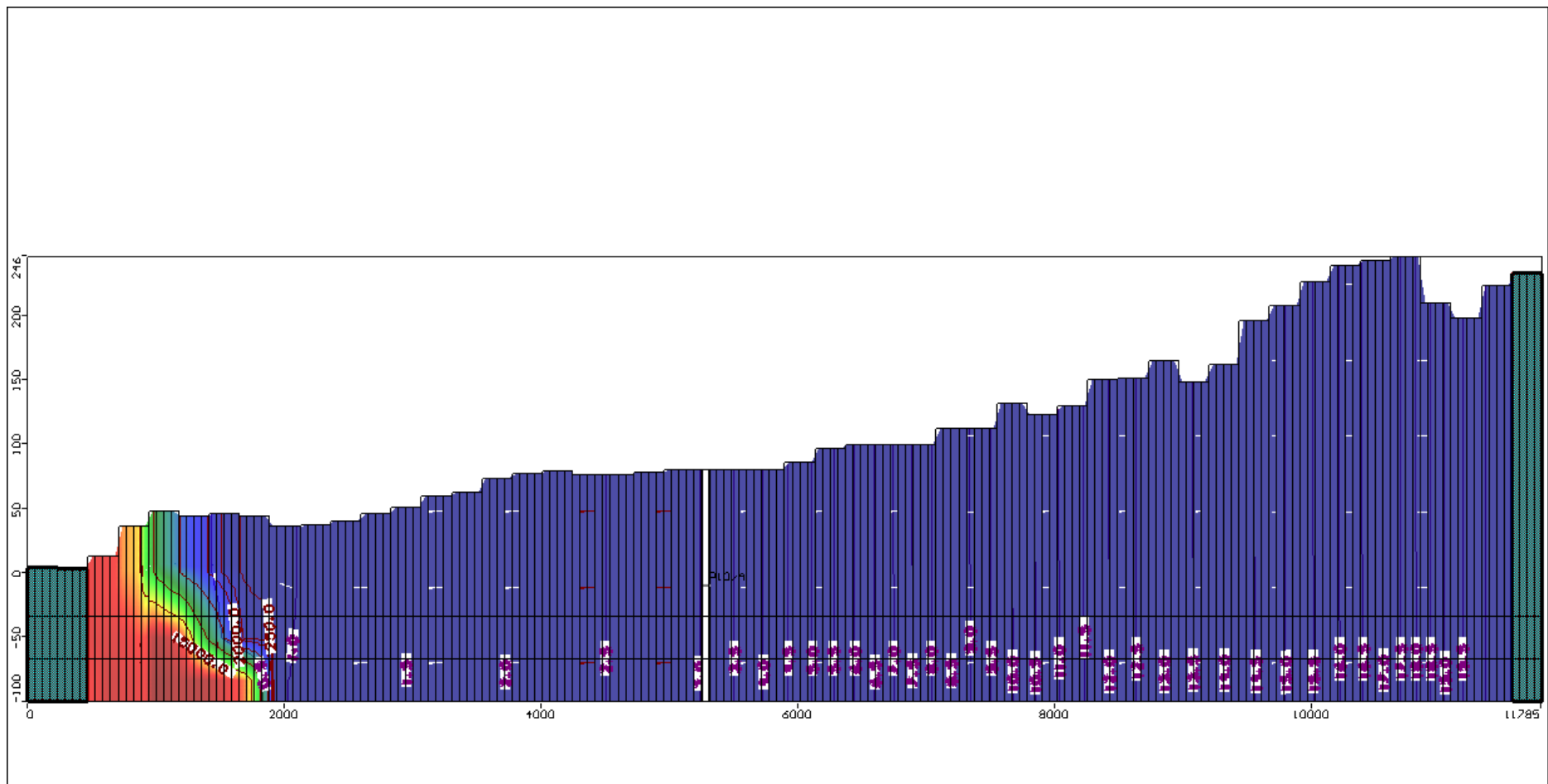


Εικόνα 5.16: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος - Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).

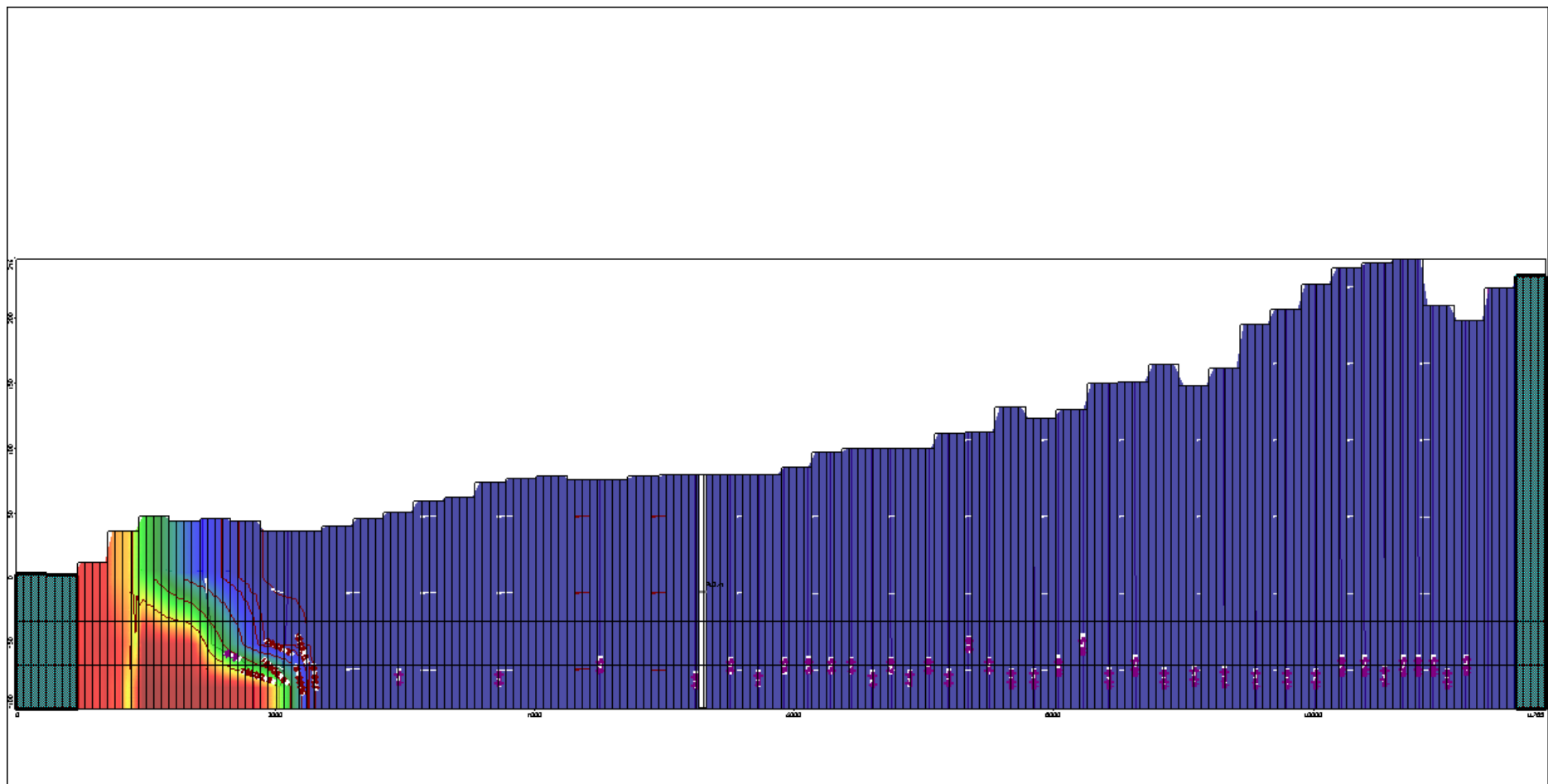




Εικόνα 5.17: Διαβάθμιση συγκέντρωσης άλατος - Μοντέλο προσωμοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells off).

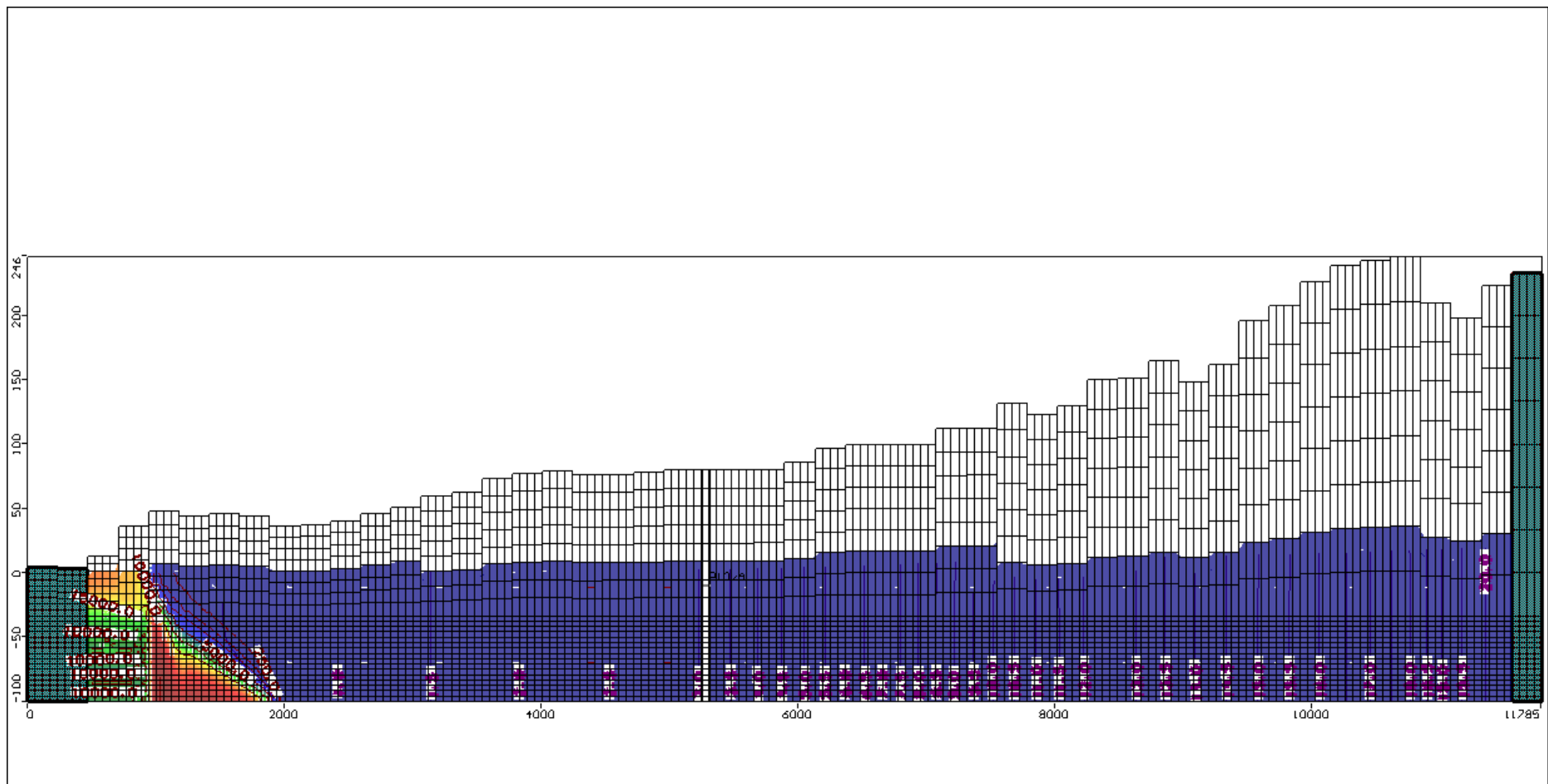


Εικόνα 5.18: Σφήνα της υφαλμύρινσης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 3 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).

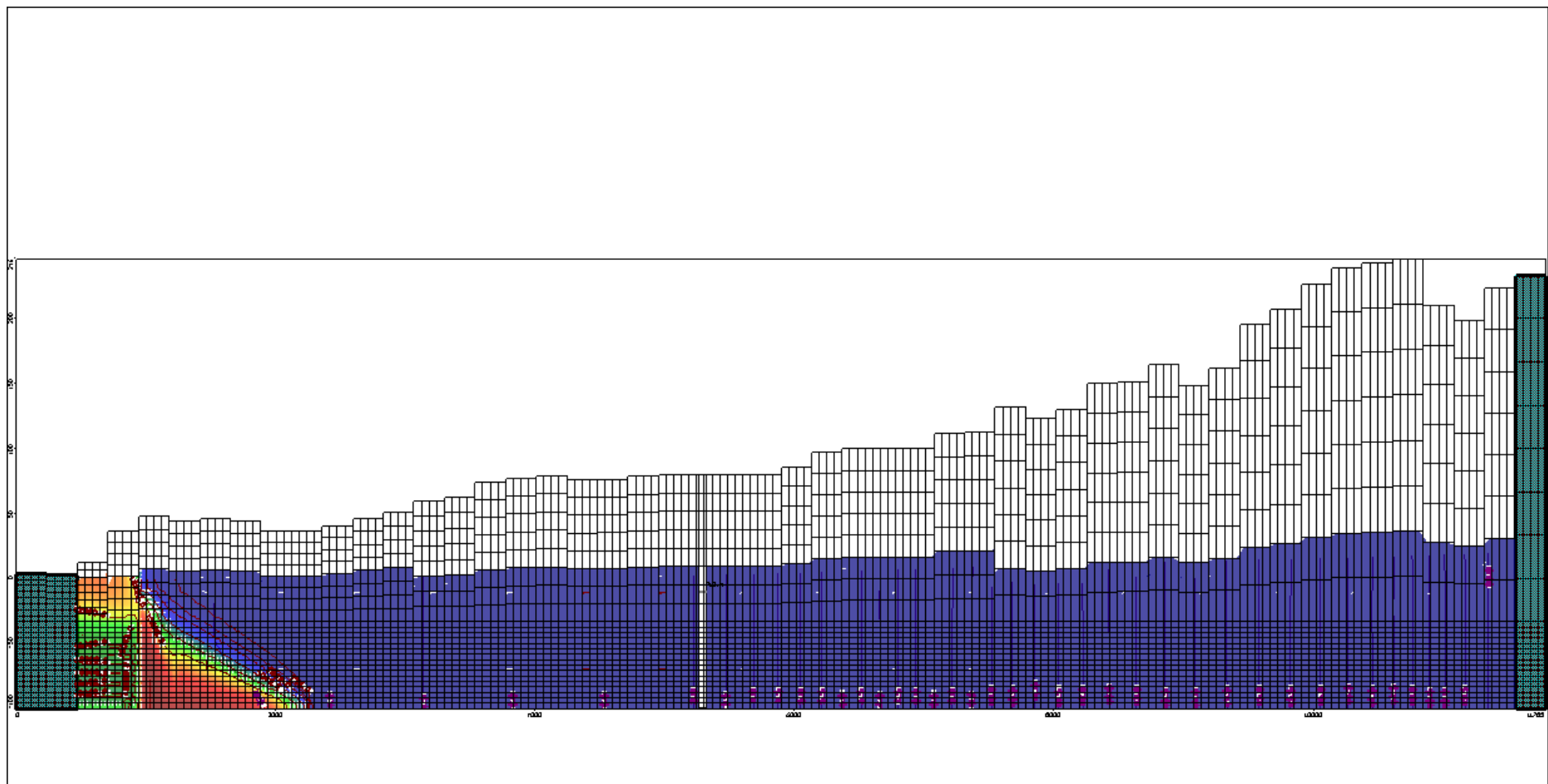


Εικόνα 5.19: Σφήνα της υφαλμύρινσης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 3 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).





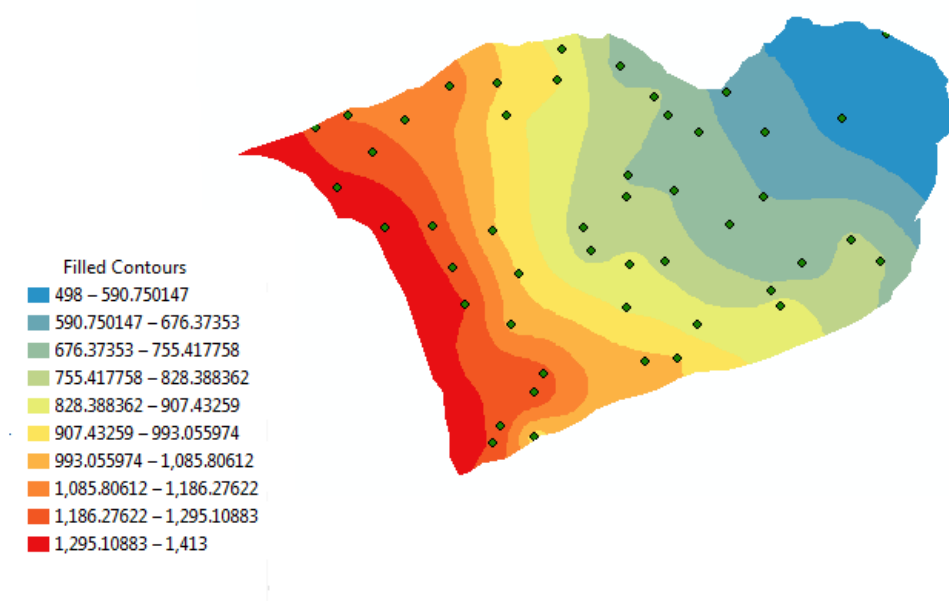
Εικόνα 5.20: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 24 layers κατά τη χειμερινή περίοδο (wells on).



Εικόνα 5.21: Σφήνα της υφαλμύρισης στη γραμμή 62 του πλέγματος – Μοντέλο προσομοίωσης με 24 layers κατά τη θερινή περίοδο (wells on).

## 5.8 Σύγκριση με αποτελέσματα άλλων εργασιών

Στο σημείο αυτό θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της εισχώρησης του θαλασσινού νερού της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα της εργασίας της Αγιουτάντη Ε. (2016). Και οι δύο εργασίες αναφέρονται στην περιοχή του Τυμπακίου με σκοπό τη μελέτη της εξέλιξης του φαινομένου της υφαλμύρισης. Η παρούσα εργασία όπως έχουμε αναφέρει εξετάζει το φαινόμενο με τη θεωρία της ζώνης υφαλμύρισης πεπερασμένου μεγέθους, ενώ η εργασία της Αγιουτάντη με τη θεωρία της απότομης διεπιφάνειας. Η προσομοίωση των ζωνών της υφαλμύρισης γίνεται με τη βοήθεια μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, οπότε προκύπτει ο χάρτης που φαίνεται στην Εικόνα 5.22.



*Εικόνα 5.22: Απεικόνιση της χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δημιουργήθηκε από το εκθετικό βαριόγραμμα με αφαίρεση τάσης 1<sup>ης</sup> τάξης (Αγιουτάντη, 2016).*

Πρόκειται για δύο διαφορετικές μεθόδους, ως προς την λήψη δεδομένων (τιμών) αλλά και την επεξεργασία τους, παρόλα αυτά περιγράφουν το ίδιο φαινόμενο και μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους,

$$1000 \frac{\mu S}{cm} = 640 ppm = \frac{1dS}{cm} \text{ και}$$

$$1 ppm = 1 \frac{mg}{L}.$$

Έτσι,

$$1000 \frac{\mu S}{cm} = 640 ppm * \frac{1mg}{L} \rightarrow 1000 \frac{\mu S}{cm} = 640 \frac{mg}{L} \rightarrow 1 \frac{\mu S}{cm} = \left( \frac{640}{1000} \right) \frac{mg}{L}.$$

Οπότε για να μελετήσουμε ικανοποιητικά την εισχώρηση και να καταφέρουμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των δύο εργασιών, επιλέγουμε να ελέγξουμε σε τι ποσότητα συγκέντρωσης άλατος αντιστοιχεί η πρώτη και η δεύτερη ζώνη υφαλμύρισης (Εικόνα

5.22), δηλαδή οι ζώνες 1,295.1 – 1,413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  και 1,186.3 – 1,295.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι ζώνες υφαλμύρισης αντιστοιχούν σε τιμές συγκέντρωσης 828.8 – 904.32 mg/L και 759.04 – 828.8 mg/L. Παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια απόκλιση σε σχέση με την προσομοίωση με το λογισμικό SEAWAT, όμως και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει ότι η εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην παράκτια ζώνη της περιοχής μελέτης είναι ιδιαίτερα έντονη.

%	g/l	mg/l or TDS or ppm	dS/m	Water type
0.35	0.35	0.0035	2.25	good drinking water
640	640	640	1.00	
1	1	1,000	1.56	
2	2	2,000	3.16	
3.5	3.5	3,500	5.47	seawater (average)
28	28	28,000	43.75	Dead Sea

*Εικόνα 5.23: Συγκέντρωση άλατος για διάφορα είδη νερού (<https://wocatpedia.net/wiki/Salinization>).*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινσης στην περιοχή του Τυμπακίου, με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης SEAWAT (MODFLOW) και την θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου μεγέθους μεταξύ των δύο αναμειγνυμένων υγρών. Με αυτόν τον τρόπο μελετήθηκε τόσο η ροή του νερού μέσα στον υπόγειο υδροφορέα, αλλά και η μεταφορά του ρύπου (στη συγκεκριμένη περίπτωση του άλατος). Επιπλέον έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το λογισμικό SEAWAT με αποτελέσματα χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης (Αγιουτάντη, 2016). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν λοιπόν είναι τα παρακάτω:

- Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του λογισμικού SEAWAT το μέτωπο της υφαλμύρινσης έχει προχωρήσει αρκετά μέτρα μέσα στον παράκτιο υδροφορέα (περίπου 1200 m κατά την χειμερινή περίοδο και 1500 m κατά την θερινή), επηρεάζοντας ένα από τα πηγάδια άντλησης.
- Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη ρηγμάτωση. Στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης το ρήγμα αυτό εξυπηρετεί στην εισροή σε αυτή φρέσκου νερού από την πεδιάδα της Μεσαράς. Αντίθετα στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης το ρήγμα που υπάρχει διευκολύνει την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε και έντονη διαφοροποίηση ανάμεσα στην εισχώρηση στο βόρειο και νότιο τμήμα της περιοχής.
- Η ένταση του φαινομένου είναι πιο έντονη κατά την ξηρή περίοδο προσομοίωσης (θερινοί μήνες) με την εισχώρηση να αυξάνεται, ειδικά στο βορειοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης.
- Ενδιαφέρον είναι ότι για τα δύο σενάρια, ανοιχτά και κλειστά πηγάδια άντλησης δεν παρατηρήθηκαν έντονες διαφορές. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ήδη μεγάλη καταπόνιση που έχει δεχτεί ο υδροφορέας.
- Τέλος, με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με το χάρτη χωρικής κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, γίνεται μία επιβεβαίωση της προσομοίωσης αλλά και της έντασης του προβλήματος που υπάρχει στην περιοχή μελέτης.

### 6.2 Προτάσεις

Όπως έχουμε αναφέρει και στο Κεφάλαιο 3, το φαινόμενο της υφαλμύρινσης είναι ιδιαίτερα δύσκολο στην διαχείριση και εξάλειψή του αφού εμφανιστεί, οπότε ο σκοπός θα έπρεπε να είναι η **πρόληψή** του και όχι η αναχαίτισή του. Γι' αυτόν το λόγο σε περιοχές που το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί εύκολα (λόγω των χαρακτηριστικών τους, γεωλογικών κ.ά., ή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων) είναι απαραίτητο να γίνονται οι κατάλληλες μελέτες για τον ακριβή προσδιορισμό του κινδύνου εμφάνισής του.

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη γεωργική δραστηριότητα, οπότε για την κάλυψη των απαιτήσεων σε νερό είναι απαραίτητη η άντληση μεγάλων ποσοτήτων νερού, καθώς το υπόγειο νερό είναι η κύρια πηγή νερού στην περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να λειτουργούν παράλληλα και χωρίς κάποιο συγκεκριμένο πρόγραμμα πολλά πηγάδια άντλησης. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα δηλωμένα πηγάδια άντλησης για τα οποία μπορούμε να λαμβάνουμε τιμές αλλά και παράνομες γεωτρήσεις των οποίων το μοτίβο δεν

μπορεί να προβλεφθεί. Θα βοηθούσε λοιπόν στη διαχείριση της κατάστασης ένας πλήρης έλεγχος των συνθηκών άντλησης και η δημιουργία ενός μοτίβου αντλήσεων που δεν θα εξαντλούσε τον υδροφόρα.

Ακόμα, σαν μέτρο πρόληψης, θα μπορούσε να θεωρηθεί η λειτουργία κάποιου ειδικού σταθμού στην περιοχή. Αυτό προϋποθέτει τη λειτουργία πηγαδιών παρατήρησης στην περιοχή με αυτοματοποιημένους μηχανισμούς μέτρησης της στάθμης του υδροφόρα και των συγκεντρώσεων άλατος έτσι ώστε να υπάρχει άμεση παρακολούθηση της κατάστασης και να διευκολύνεται η οποιαδήποτε προσπάθεια πρόληψης.

Στην περιοχή πλέον λειτουργεί και το φράγμα της Φανερωμένης το οποίο σταματά την εισροή νερού λόγω του Κουτσουλίδη στον υδροφόρα. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μία σημαντική μείωση στις ετήσιες εισροές. Οπότε ο εμπλουτισμός του υδροφόρα, π.χ. με νερό από από τις εκροές βιολογικού καθαρισμού (επαναχρησιμοποίηση) θα μπορούσε να αποτελέσει μία ενδιαφέρουσα λύση. Εδώ είναι απαραίτητο το νερό αυτό να προέρχεται από την εκροή απολύμανσης του βιολογικού ώστε να μην δημιουργηθούν κίνδυνοι για την υγεία τόσο των κατοίκων αλλά και του οικοσυστήματος της περιοχής.

Ένας ακόμη τρόπος μείωσης της έντονης κατανάλωσης θα ήταν η σωστή ενημέρωση και παιδεία των γεωργών όσο αφορά την αντλητική ικανότητα του υδροφόρα και επιπλέον η καλλιέργεια στην περιοχή φυτών που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε νερό. Άλλος τρόπος αντιμετώπισης με την βοήθεια των φυτών είναι η φυτοεξυγίανση (phytoremediation) κατά την οποία μπορούν στην περιοχή να φυτευθούν φυτά τα οποία αντέχουν σε συνθήκες αλατότητας και μπορούν να οδηγήσουν σε απομάκρυνση των αλάτων ακόμα και σε μεγάλα βάθη μέσω των ριζικών τους συστημάτων (Mitsuhiro Inoue, 2012).

Τέλος, είναι σημαντικό να γίνεται σωστή μελέτη αλλά και συντήρηση των δικτύων μεταφοράς υδάτων. Έτσι μπορεί να προληφθεί η κατάσταση κατά την οποία προκύπτουν διαρροές με αποτέλεσμα την άσκοπη κατανάλωση και σπατάλη νερού. Για να επιτευχθεί αυτό όμως είναι απαραίτητο να υπάρχει διαφάνεια και συνεργασία στις ενέργειες των αρμόδιων υπηρεσιών έτσι ώστε να μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης των απαραίτητων έργων και να ενημερώνονται σωστά οι πολίτες.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αβραμίδου, Ε. (2007), *Το Φαινόμενο της Υφαλμύρωσης στον Ελλαδικό Χώρο*, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Αγιουτάντη, Ε. (2016), *Μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης των υδατικών πόρων στη λεκάνη του Τυμπακίου Κρήτης με χρήση του μοντέλου Visual MODFLOW και μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας*, Διπλωματική Εργασία, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Αλεξανδρής, Σ., *Ποιότητα νερού άρδευσης – Ισοζύγιο και Έκπλυση Αλάτων στο Έδαφος*, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων – Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής.

Βουδούρης, Κώστας Στ. (2016), *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος – Υπόγεια Νερά & Περιβάλλον*, Εκδόσεις Τζιόλα.

Βουδούρης, Κ., Scheidleder, Α., Δασκαλάκη, Π. (2005), *Θαλάσσια Διείσδυση σε Παράκτια Υπόγεια Υδατικά Συστήματα λόγω Υπεράντλησης και η Οδηγία 2000/60/ΕΚ*, Τόμ. 15, σελ. 75-86.

Δάβου, Ε. (2014), *Υδρογεωλογική – Περιβαλλοντική Έρευνα Λεκάνης Βαγιών Βοιωτίας*, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών – Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής.

Δεττοράκη, Μ. (2012), *Συνδυασμός του μοντέλου προσομοίωσης ροής υπογείων υδάτων Visual MODFLOW με το μοντέλο βελτιστοποίησης GWM για τη βέλτιστη διαχείριση του παράκτιου υδροφορέα Τυμπακίου*, Μεταπτυχιακή Μελέτη, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Καρατζάς, Γ. (2016), *Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*, Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Καρατζάς, Γ. και Δόκου, Ζ., *Παρουσίαση Δεδομένων Πεδίου: Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Καρατζάς, Γ. και Δόκου, Ζ., *Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων – Προσδιορισμός και Αντιμετώπιση του Φαινομένου με Συνδυασμό Μοντέλων Προσομοίωσης και Μεθόδων Βελτιστοποίησης*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.

Κριτσωτάκης, Μ., Παυλίδου, Σ. (2013), *Κατάσταση Υπόγειων Υδροφόρων Κρήτης*, Ηράκλειο.

Μιμίκου, Μ.Α., *Οι Υδατικοί Πόροι στην Ελλάδα – Παρούσα Κατάσταση και Προοπτικές*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νάνου – Γιάνναρου, Α. (2001), *Συμπόσιο «Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη Ανάπτυξη»: Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων*.

Παπαδοπούλου, Μαρία Π., Καρατζάς, Γεώργιος Π., Τριχάκης, Ι. (2005), Διεθνής Έκθεση και Συνέδριο για τις τεχνολογίες του Περιβάλλοντος HELECO: Προσομοίωση υπόγειας ροής παράκτιου υδροφορέα στη Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου Κρήτης.

Περιφέρεια Κρήτης, (2012), Μελέτη για την αναθεώρηση – επικαιροποίηση του περιφερειακού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ), Ηράκλειο.

Περιφέρεια Κρήτης, Διεύθυνση Υδάτων – Τμήμα Παρακολούθησης και Ελέγχου της Ποιότητας και Ποσότητας των Υδάτων (2007), Κατάσταση Υπόγειων Υδροφορέων Κρήτης, Ηράκλειο.

Σούλιος, Γ., Εκμετάλλευση & Διαχείριση του Υπόγειου Νερού – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης – Τμήμα Γεωλογίας (<http://www.geo.auth.gr/763/>).

Σούλιος, Γεώργιος Χ. (2010), Γενική Υδρογεωλογία – Πρώτος Τόμος, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Θεσσαλονίκη: University Studio Press.

Στουρνάρας, Γεώργιος Κ., Υδάτινοι Πόροι – Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, Αθήνα.

Τσακίρης, Γ. (2013), ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ & ΚΕΠΕ, Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Ιανουάριος 2003.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2015), Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (GR13), Αθήνα.

Chartzoulakis, K.S. et al. (2001), Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use, *Water Policy* (3), pp. 193-205.

Croke, B. et al. (2000), Water resources in the desertification – threatened Messara Valley of Crete: estimation of the annual water budget using a rainfall – runoff model, *Environmental Modeling & Software* (15), pp. 387-402.

Dokou, Z. et al. (2016), Utilizing Successive Linearization Optimization to Control the Saltwater Intrusion Phenomenon in Unconfined Coastal Aquifers in Crete, Greece, *Environmental Modeling & Assessment*.

Guo, W. & Langevin, Christian D. (2002), *User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three – Dimensional Variable – Density Ground – Water Flow*, Tallahassee, Florida: USGS.

Karatzas, George P., Dokou Z. (2015), Optimal management of saltwater intrusion in the coastal aquifer of Malia, Crete (Greece), using particle swarm optimization, *Hydrogeology Journal*.

Kritsotakis, M., Tsanis, I. K. (2009), EWRA: *An integrated approach for sustainable water resources management of Messara basin, Crete, Greece*.

Panagopoulos, G. et al. (2013), *Definition of Inferred Faults Using 3D Geological Modeling Techniques: A Case Study in Tympani Basin in Crete, Greece*, Bulletin of the Geological Society of Greece, vol XLVII Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Congress, Chania, Sept.

Papadopoulou, M.P. et al. (2009), Simulation of complex aquifer behavior using numerical and geostatistical methodologies, *Desalination* (237), pp. 42-53.

Paritsis, Savvas N. (2005), *Simulation of Seawater Intrusion into the Tympani Aquifer, South Central Crete, Greece*, Heraklion.

Todd, David K. & Mays, Larry W. (2005), *Groundwater Hydrology*, 3<sup>rd</sup> Edition, WILEY – John Wiley & Sons, Inc.

Zheng, C. & Wang, Patrick P. (1998), *MT3DMS A Modular Three – Dimensional Multispecies Transport Model*, US Army Corps of Engineers.

*Visual MODFLOW v.4.2. – User's Manual*, (2006), Schlumberger Water Services, Waterloo Hydrogeologic Inc.

<http://leddris.aegean.gr/crete/messara-valley/285-general-description-of-messara-valley.html>

<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=245&language=el-GR>

<http://www.moa.gov.cy/moa/environment/environmentnew.nsf/All/D25F1D7119F43891C2257FE000413405?OpenDocument>

<https://www.waterloohydrogeologic.com/seawat-saltwater-intrusion-applications>

[http://novamatrixgm.com/help/vmod/index.html?vm\\_ch3\\_global9.htm](http://novamatrixgm.com/help/vmod/index.html?vm_ch3_global9.htm)

<https://water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>

<https://wocatpedia.net/wiki/Salinization>

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