



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική εργασία με θέμα:

*«Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μελέτη του φαινομένου της
υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής Μαλίων, Κρήτης με
τη χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας FEFLOW
(Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System)»*

Περάκη Μαρία

Εξεταστική επιτροπή:

Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Παλαιολόγος Ευάγγελος (αναπληρωτής)

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Summary	6
1 Εισαγωγή.....	7
1.1 Υπόγεια Ύδατα – Υδροφορείς	7
1.1.1 Υπόγεια Ύδατα.....	7
1.1.2 Υδροφορείς.....	7
1.1.3 Ιδιότητες των υδροφορέων	9
1.1.4 Νόμος του Darcy	11
1.1.5 Διαχείριση των υπόγειων αποθεμάτων νερού	13
1.2 Υφαλμύριση των υπογείων υδάτων	17
1.2.1 Υφάλμυρα υπόγεια ύδατα	18
1.2.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην Ελλάδα	19
1.2.3 Προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας (sharp-interface approximation).....	20
1.2.4 Προσέγγιση εξαρτώμενη από τη διαφορά πυκνοτήτων γλυκού-αλμυρού νερού (density-dependent approach)	22
2 Μέθοδοι μοντελοποίησης της υπόγειας ροής.....	24
2.1 Γενικά στοιχεία για τη μοντελοποίηση	24
2.2 Περιγραφή του μοντέλου FEFLOW	28
2.2.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method).....	28
2.2.2 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου	30
2.2.3 Αρχικές συνθήκες (Initial Conditions)	33
2.2.4 Οριακές συνθήκες (Boundary conditions).....	34
2.2.5 Ρήγματα (Discrete features)	36
3 Περιοχή μελέτης.....	38
3.1 Θέση – Υφιστάμενη Κατάσταση.....	38
3.1.1 Όρια της περιοχής μελέτης.....	38
3.1.2 Χρήσεις γης	38
3.1.3 Υδατικές ανάγκες	39
3.1.4 Υφιστάμενη κατάσταση	40
3.2 Γεωμορφολογία – Γεωλογία της περιοχής	43
3.2.1 Γεωμορφολογία	43
3.2.2 Γεωλογική δομή	43
3.2.3 Ρήγματα	46

3.3	Κλιματικά δεδομένα	47
4	Εφαρμογή του μοντέλου FEFLOW στην περιοχή μελέτης.....	48
4.1	Οριοθέτηση της περιοχής (Superelement Mesh).....	48
4.2	Δημιουργία του Δικτύου των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Mesh)...	48
4.3	Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	49
4.4	Τάξη του προβλήματος (Problem Class).....	50
4.5	Χρονικά δεδομένα και δεδομένα ελέγχου (Temporal and control data)	50
4.6	Υψόμετρα των slices	50
4.7	Δεδομένα ροής (Flow Data)	51
4.7.1	Αρχικές συνθήκες (Flow Initials).....	51
4.7.2	Οριακές συνθήκες (Flow Boundaries).....	53
4.7.3	Υδραυλική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών	62
4.7.4	Διηθούμενη ποσότητα ύδατος από βροχοπτώσεις.....	62
4.8	Δεδομένα μεταφοράς μάζας (Mass Transport Data)	63
4.8.1	Αρχικές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας (Mass Initials).....	63
4.8.2	Οριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας (Mass Boundaries)	64
4.8.3	Πρόσθετες παράμετροι.....	64
4.9	Ρήγματα (Discrete Elements)	64
5	Αποτελέσματα – Βαθμονόμηση μοντέλου	65
5.1	Μοντελοποίηση της ροής	65
5.2	Εξέταση του φαινομένου της υφαλμύρισης	70
6	Συμπεράσματα.....	74
7	Βιβλιογραφία.....	76

Για την πολύτιμη συμβολή τους στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Καρατζά και την Δρ. Ζωή Δόκου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια μοντελοποίησης της ροής του παράκτιου υδροφορέα στην ευρύτερη περιοχή των Μαλίων Κρήτης, ενώ παράλληλα εξετάζεται το ενδεχόμενο υφαλμύρισής του. Το φαινόμενο της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς έχει ενταθεί τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της υπεράντλησης ύδατος, η οποία οδηγεί στην διατάραξη της ισορροπίας των δύο υδάτινων συστημάτων. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται κάτω από υψηλή πίεση λόγω της ανεξέλεγκτης άντλησης και παρουσιάζει υψηλό βαθμό καρστικοποίησης με ένα μεγάλο πλήθος ρηγμάτων, καθιστώντας αναγκαία τη λεπτομερή μελέτη του φαινομένου αυτού. Στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας FEFLOW, το οποίο αποτελεί εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η δομή και το περιεχόμενο της εργασίας επιτρέπει στον αναγνώστη να αποκτήσει μία ολοκληρωμένη εικόνα της περιοχής μελέτης, αλλά και των αποτελεσμάτων. Αρχικά, παρατίθενται γενικές έννοιες και εξισώσεις που αφορούν τα υπόγεια ύδατα, το φαινόμενο της υφαλμύρισης και τις μεθόδους μοντελοποίησης, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται μία συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος μοντελοποίησης FEFLOW. Στη συνέχεια, αναφέρονται τα δεδομένα που αφορούν στα χαρακτηριστικά (γεωλογία, κλίμα κτλ) της περιοχής μελέτης και περιγράφεται ο τρόπος εφαρμογής του μοντέλου στην περιοχή. Τέλος, αναπτύσσονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου. Κύριο συμπέρασμα της μελέτης αυτής είναι ότι κάτω από την επίδραση των ρηγμάτων και της άντλησης που πραγματοποιείται στην περιοχή μελέτης, το θαλασσινό νερό έχει εισχωρήσει σχεδόν σε όλο το μήκος της ακτογραμμής αλλά και σε τμήματα της ενδοχώρας.

Summary

The present thesis constitutes an attempt at modeling the flow of the coastal aquifer in the wider region of Malia (Crete), while considering the possibility of sea water intrusion. The phenomenon of seawater intrusion into coastal aquifers has increased over the last decades due to overpumping of water which leads to an imbalance of the two water systems. The study area is under high stress due to unrestrained pumping and exhibits a high degree of karstification with a large number of fractures, deeming necessary the detailed study of this phenomenon. For this thesis the groundwater flow and transport model FEFLOW was used, which makes use of the finite elements method to solve the partial differential equations of flow and transport. The structure and the content of the study enable the reader to obtain a complete picture not only of the study area but also of the results. Initially general concepts and equations concerning the groundwater, the salt water intrusion and the modeling methods are listed and then a brief presentation of the modeling program, FEFLOW is made. Thereafter, the data related to the characteristics (geology, climate, etc.) of the study area are presented and the application of the model in the area is described. Finally, the results and the conclusions drawn from the process of model calibration are developed in detail. The main conclusion of this study is that under the influence of the geological fracturing and the pumping activity in the study area, the seawater has penetrated almost the entire length of the coastline and also parts of the inland.

1 Εισαγωγή

1.1 Υπόγεια Ύδατα – Υδροφορείς

1.1.1 Υπόγεια Ύδατα

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

Το σύστημα των υπογείων υδάτων αποτελεί τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Το νερό που τροφοδοτεί το σύστημα αυτό προέρχεται είτε από φυσικές είτε από τεχνητές πηγές. Φυσικές πηγές αποτελούν οι κατακρημνίσεις (βροχή, χιόνι κλπ.) μέσω της διήθησης του νερού στο έδαφος, καθώς και τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (ποτάμια, λίμνες) που αλληλεπιδρούν με τους υπόγειους ταμιευτήρες. Συνήθως, το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού των κατακρημνίσεων δεν τροφοδοτεί τα αποθέματα του υπόγειου ύδατος, αλλά αποθηκεύεται στην εδαφική ζώνη και διαφεύγει είτε μέσω της εξάτμισης είτε μέσω της διαπνοής των φυτών. Το ποσοστό που καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα ποικίλλει και η τιμή του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και οι ιδιότητες του επιφανειακού εδάφους και του υδροφορέα. Στην περίπτωση των παράκτιων υδροφορέων ενδέχεται να υπάρχει εισροή νερού στο σύστημα από τη θάλασσα με αποτέλεσμα την υφαλμύρισή του, φαινόμενο που θα μελετηθεί στη συνέχεια. Η υφαλμύριση αποτελεί και έναν από τους λόγους χρήσης τεχνητού εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα. Το νερό εξέρχεται από το σύστημα μέσω των πηγών, μέσω της επικοινωνίας με επιφανειακά υδάτινα σώματα, καθώς και με τεχνητή άντλησή του με χρήση πηγαδιών και γεωτρήσεων (Todd and Mays, 2005; Alley et al., 1999).

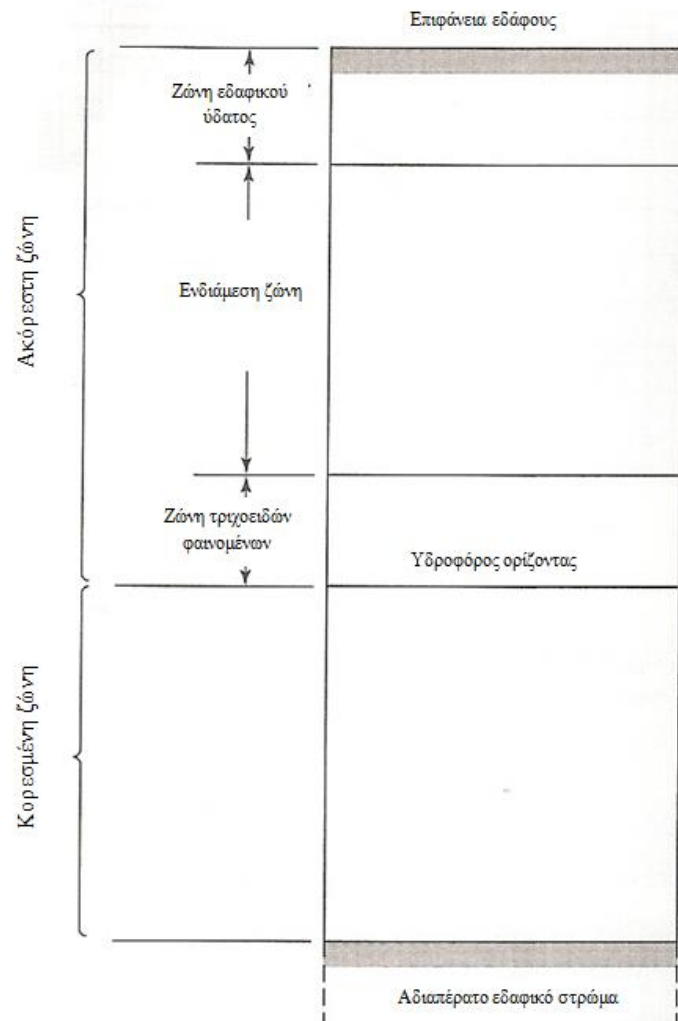
1.1.2 Υδροφορείς

Οι υδροφορείς αποτελούν τον σπουδαιότερο γεωλογικό σχηματισμό στον οποίο συναντάται υπόγειο νερό έχοντας διττό ρόλο ως αγωγοί και ταμιευτήρες του. Ένας ορισμός ο οποίος θα μπορούσε να περιγράψει την έννοια των υδροφορέων, είναι ότι αποτελούν χωρικά εκτεταμένους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι περιέχουν επαρκές, κορεσμένο, διαπερατό υλικό ώστε να αποδώσουν σημαντικές ποσότητες υπόγειου ύδατος σε πηγάδια και πηγές. Να σημειωθεί ότι στους υδροφορείς περιλαμβάνεται και το ακόρεστο τμήμα του εδαφικού υλικού (Todd and Mays, 2005).

Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Todd and Mays, 2005):

- *Ελεύθερος υδροφορέας (unconfined aquifer)*: είναι ο υδροφορέας του οποίου ο υδροφόρος ορίζοντας διαφέρει στην κυματοειδή μορφή και στην κλίση, ανάλογα με τις περιοχές φόρτισης και αποφόρτισης, την πιθανή άντληση από πηγάδια και τη διαπερατότητα. Οι αυξομειώσεις του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα αντιστοιχούν σε αντίστοιχες αυξομειώσεις του όγκου του ύδατος το οποίο είναι αποθηκευμένο στον υδροφόρα.
- *Περιορισμένος υδροφορέας (confined aquifer)*: είναι ο υδροφορέας στον οποίο το υπόγειο ύδωρ βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής λόγω της ύπαρξης υπερκείμενου αδιαπέρατου στρώματος. Στα πηγάδια που αντλούν νερό από περιορισμένο υδροφόρα, η στάθμη του νερού ανέρχεται πάνω από την κατώτερη επιφάνεια του αδιαπέρατου στρώματος, η οποία αποτελεί το άνω όριο του υδροφόρα. Οι αυξομειώσεις της στάθμης του νερού στα πηγάδια αυτά προκαλούνται κυρίως από αλλαγές στην πίεση και δευτερευόντως από αλλαγές στον αποθηκευμένο όγκο νερού.

Ο κάθε υδροφορέας διαιρείται σε δύο ζώνες, τη ζώνη αερισμού (ή ακόρεστη ζώνη) και την ζώνη κορεσμού (ή κορεσμένη ζώνη). Η ακόρεστη ζώνη αποτελείται από πόρους οι οποίοι εν μέρει είναι κατειλημμένοι από αέρα και εν μέρει από νερό, ενώ η κορεσμένη ζώνη αποτελείται από πόρους οι οποίοι είναι εξ ολοκλήρου κατειλημμένοι από νερό υπό την επίδραση της υδροστατικής πίεσεως. Η ακόρεστη ζώνη μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις επιμέρους ζώνες, τη ζώνη του εδαφικού ύδατος, την ενδιάμεση ζώνη και τη ζώνη των τριχοειδών φαινομένων (Karanth, 1987; Todd and Mays, 2005). Η προαναφερθείσα διαίρεση απεικονίζεται στο Σχήμα 1 που ακολουθεί. Η ζώνη κορεσμού εκτείνεται από το ανώτερο σημείο κορεσμού έως το υποκείμενο αδιαπέρατο στρώμα. Σε περίπτωση απουσίας υπερκείμενου αδιαπέρατου στρώματος ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί το άνω όριο της κορεσμένης ζώνης και η πίεση στο επίπεδό του ισούται με την ατμοσφαιρική. Τυπικά η ζώνη κορεσμού εκτείνεται ελαφρώς άνωθεν του υδροφόρου ορίζοντα λόγω των τριχοειδών φαινομένων, όμως το νερό διατηρείται στη θέση αυτή υπό την επίδραση αρνητικής πίεσεως (Todd and Mays, 2005).



Σχήμα 1: Διαίρεση υδροφορέα σε ζώνες (Todd and Mays, 2005)

1.1.3 Ιδιότητες των υδροφορέων

1.1.3.1 Πορώδες (porosity)

Τα τμήματα των εδαφικών σχηματισμών τα οποία δεν καταλαμβάνονται από συμπαγές εδαφικό υλικό μπορούν να καταληφθούν από το υπόγειο ύδωρ. Τα κενά αυτά είναι γνωστά ως εδαφικοί πόροι και η μελέτη τους πολύ σημαντική λόγω του ρόλου τους ως αγωγοί του ύδατος. Οι πόροι χαρακτηρίζονται από το σχήμα, το μέγεθος και την κατανομή τους. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους πόρους που δημιουργήθηκαν μέσω γεωλογικών διεργασιών κατά τη δημιουργία του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο ανήκουν και σε αυτούς που προέκυψαν μετά τη δημιουργία του όπως ρηγματώσεις και ανοίγματα που δημιουργήθηκαν από ζώα ή φυτά. Το πορώδες ενός εδαφικού σχηματισμού είναι ένα μέτρο των περιεχόμενων πόρων εκφρασμένο ως η αναλογία του όγκου των πόρων προς το συνολικό όγκο. Μια

διαφορετική έκφραση του πορώδους αποτελεί το ενεργό πορώδες. Αποτυπώνει το ποσό του χώρου των διασυνδεμένων πόρων το οποίο είναι διαθέσιμο για τη ροή του ύδατος και εκφράζεται ως η αναλογία του όγκου των διασυνδεμένων πόρων προς τον συνολικό όγκο. Το πορώδες και το ενεργό πορώδες μπορούν να εκφραστούν επίσης ως ποσοστό πολλαπλασιάζοντας το κλάσμα που προκύπτει από την αντίστοιχη αναλογία, με το 100. Οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται, τυπικά, από το 0 έως το 0.5 ανάλογα με το είδος και τις ιδιότητες του εδαφικού σχηματισμού (Todd and Mays, 2005).

1.1.3.2 Διαπερατότητα (permeability) - Υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity)

Η διαπερατότητα ενός εδαφικού σχηματισμού καθορίζει την ικανότητά του να άγει τη ροή. Είναι μία αποκλειστική ιδιότητα του υλικού και δεν σχετίζεται με τις ιδιότητες του ρευστού όπως συμβαίνει στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας (Todd and Mays, 2005). Η υδραυλική αγωγιμότητα υποδηλώνει την ικανότητα του υδροφορέα να άγει το νερό. Αποτελεί συνδυασμό ιδιοτήτων του πορώδους μέσου, καθώς και του ρευστού (Bear, 1988). Η σχέση που συνδέει τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι (Todd and Mays, 2005):

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

Όπου,

k: η διαπερατότητα (L²)

K: η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

ρ: η πυκνότητα του ρευστού (M/L³)

μ: το ιξώδες του ρευστού [M/(L·T)]

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (M/T²)

1.1.3.3 Αποθηκευτικότητα (storativity)

Συχνά αναφέρεται και ως συντελεστής αποθήκευσης (coefficient of storage) και υποδηλώνει τη σχέση μεταξύ των αλλαγών στην ποσότητα του αποθηκευμένου ύδατος σε έναν υδροφορέα και των αντίστοιχων αλλαγών στη στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας ή του υδροφόρου ορίζοντα για ελεύθερο υδροφορέα (Bear, 1988). Ο συντελεστής αποθήκευσης είναι αδιάστατο μέγεθος και η τιμή του κυμαίνεται από 0.0001 έως 0.01 για περιορισμένους υδροφορείς και από 0.15 έως 0.6 για ελεύθερους υδροφορείς (Καρατζάς, 2002).

1.1.3.4 Μεταβιβασιμότητα (transmissivity)

Η συνολική ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταβιβάζει το υπόγειο ύδωρ εξαρτάται από το πάχος και τις υδραυλικές αγωγιμότητες των συνιστωσών του υδροφορέα. Η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι (Karanth, 1987):

$$T = K \cdot b$$

Όπου,

T: η μεταβιβασιμότητα

K: η μέση υδραυλική αγωγιμότητα

b: το πάχος του υδροφορέα

1.1.4 Νόμος του Darcy

Η ροή διαμέσου των υδροφορέων μπορεί να εκφραστεί μέσω του νόμου του Darcy. Η πειραματική επαλήθευση του νόμου μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια συσκευή που περιλαμβάνει ένα κύλινδρο πληρωμένο με άμμο με εμβαδόν διατομής A μέσω του οποίου ρέει ύδωρ με ρυθμό Q και δύο πιεζόμετρα που βρίσκονται τοποθετημένα σε απόσταση L μεταξύ τους. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Με την εφαρμογή της εξίσωσης ενέργειας ανάμεσα στις θέσεις των πιεζομέτρων προκύπτει (Todd and Mays, 2005):

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

Όπου,

p: η πίεση

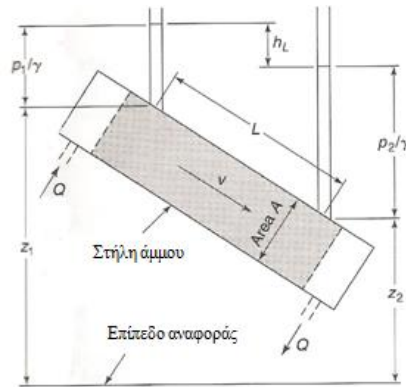
γ: το ειδικό βάρος του νερού

v: η ταχύτητα της ροής

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

z: η ανύψωση από το επίπεδο αναφοράς

h_L : οι απώλειες



Σχήμα 2: Πειραματική διάταξη για την επαλήθευση του Νόμου του Darcy (Todd and Mays, 2005)

Λόγω του γεγονότος ότι οι ταχύτητες εντός του πορώδους μέσου είναι συνήθως χαμηλές, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να τροποποιηθεί όπως φαίνεται παρακάτω (Todd and Mays, 2005):

$$h_L = \left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right)$$

Μετά από μετρήσεις τις οποίες πραγματοποίησε ο Darcy προέκυψε ότι η παροχή Q και οι απώλειες h_L είναι ποσά ανάλογα ενώ αντίθετα η παροχή Q και το μήκος L αντιστρόφως ανάλογα. Με την εισαγωγή της σταθεράς K προκύπτει η εξίσωση (Todd and Mays, 2005; Bear, 1988):

$$Q = -KA \frac{h_L}{L}$$

Η οποία εκφράζεται γενικά

$$Q = -KA \frac{dh}{dl}$$

Ή

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dl}$$

Η ταχύτητα q της παραπάνω εξίσωσης αναφέρεται ως ταχύτητα του Darcy λόγω της υπόθεσης ότι η ροή πραγματοποιείται μέσω όλης της διατομής του υλικού. Στην πραγματικότητα η ροή πραγματοποιείται μόνο διαμέσου των πόρων επομένως η πραγματική ταχύτητα ή αλλιώς ταχύτητα διήθησης, προκύπτει από την εξίσωση (Todd and Mays, 2005; Bear, 1988):

$$q_p = \frac{Q}{nA}$$

Όπου n το πορώδες του εδαφικού υλικού

Για την εφαρμογή του νόμου είναι σημαντική η γνώση του εύρους των περιπτώσεων στις οποίες είναι εφαρμόσιμος. Ο αριθμός Reynolds χρησιμοποιείται για την καθιέρωση των ορίων όσο αφορά την δυνατότητα εφαρμογής του νόμου. Ορίζει δηλαδή το όριο πάνω από το οποίο δεν ισχύει η γραμμική σχέση. Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από τη σχέση (Todd and Mays, 2005; Bear, 1988; Karanth, 1987):

$$N_R = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Όπου,

ρ : η πυκνότητα του ρευστού

v : η ταχύτητα

D : η διάμετρος

μ : το ιξώδες του ρευστού

Για να είναι δυνατή η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης σε πορώδες υλικό ως v θεωρείται η ταχύτητα του Darcy και η ενεργός διάμετρος των κόκκων (d_{10}) αντικαθιστά το D .

Πειράματα έδειξαν ότι ο νόμος ισχύει για $N_R < 1$ ενώ η απόκλιση δεν είναι σημαντική μέχρι $N_R = 10$, τιμή η οποία αποτελεί το ανώτερο όριο για την εφαρμογή του νόμου (Todd and Mays, 2005; Bear, 1988; Karanth, 1987).

Από το νόμο του Darcy προκύπτει ότι ο ρυθμός ροής του υπογείου ύδατος εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και από την υδραυλική κλίση. Οι ταχύτητες ροής των υπογείων υδάτων ποικίλλουν ανάλογα με τις εκάστοτε υδρογεωλογικές συνθήκες, τυπικές τιμές ωστόσο θεωρούνται στο εύρος 2m/year – 2m/day (Todd and Mays, 2005).

1.1.5 Διαχείριση των υπόγειων αποθεμάτων νερού

Η αυξημένη ζήτηση για νερό σε συνδυασμό με την έγερση του ζητήματος της μείωσης των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων, έχει οδηγήσει στην εντατικοποίηση των προσπαθειών για το σχεδιασμό ορθολογικών και αειφόρων προγραμμάτων διαχείρισης των υπογείων αποθεμάτων νερού. Στις διαδικασίες αυτές σημαντική θέση κατέχουν όχι μόνο γεωλογικοί και υδρολογικοί παράγοντες, αλλά επίσης οικονομικές, νομικές, πολιτικές και κοινωνικές πτυχές. Το επιθυμητό αποτέλεσμα της διαχείρισης των αποθεμάτων είναι η άντληση της μέγιστης ποσότητας υπόγειου ύδατος, του οποίου η ποιότητα να είναι η προβλεπόμενη, με το μικρότερο δυνατό κόστος (Todd and Mays, 2005).

Για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης είναι σημαντική η γνώση ότι σε επίπεδο λεκάνης, τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα αποτελούν μία ενοποιημένη πηγή λόγω της έντονης αλληλεπίδρασής τους. Ως εκ τούτου ο σχεδιασμός προγραμμάτων διαχείρισης των επιφανειακών υδάτων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον αντίστοιχο σχεδιασμό για τα υπόγεια ύδατα και αντίστροφα. Λόγω της άρρηκτης αυτής σύνδεσης, καθώς και λόγω της μεγάλης

έκτασης που καταλαμβάνει συνήθως ο κάθε υδροφορέας, ο σχεδιασμός σε επίπεδο λεκάνης απορροής κρίθηκε ως ο βέλτιστος (Todd and Mays, 2005; Alley et al., 1999).

Η εκμετάλλευση των αποθεμάτων μίας λεκάνης ξεκινάει συνήθως με τη διάνοιξη λίγων διασκορπισμένων γεωτρήσεων. Ο αριθμός τους σταδιακά αυξάνεται με αποτέλεσμα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων να υπερβαίνεται η ικανότητα επαναφόρτισης του συστήματος και να μειώνονται τα αποθέματα. Η προέλευση τέτοιων φαινομένων υπερεκμετάλλευσης των αποθεμάτων θα πρέπει να αναζητηθεί στη λανθασμένη αντίληψη ότι το υπόγειο νερό είναι ένα ανεξάντλητο αγαθό. Όμως αυτό μπορεί να ισχύσει μόνο στην περίπτωση που επιτυγχάνεται ισορροπία ανάμεσα στο ρυθμό επαναφόρτισης των αποθεμάτων της λεκάνης και στο ρυθμό άντλησης με αποτέλεσμα να αποκτήσει χαρακτήρα αειφόρο το υπό εκμετάλλευση σύστημα υπογείων υδάτων (Todd and Mays, 2005).

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της έννοιας της αειφορίας όσο αφορά τα υπόγεια ύδατα, είναι ότι προωθεί μία μακροπρόθεσμη προοπτική για την διαχείριση των αποθεμάτων. Οι παράγοντες που ενισχύουν το μακροπρόθεσμο σχεδιασμό είναι βασικά δύο. Πρώτον, το υπόγειο νερό δεν είναι μη ανανεώσιμος πόρος όπως τα ορυκτά ή το πετρέλαιο, αλλά ούτε είναι ανανεώσιμος με τον ίδιο τρόπο και το ίδιο χρονοδιάγραμμα όπως η ηλιακή ενέργεια και δεύτερον οι επιπτώσεις της άντλησης τείνουν να εμφανίζονται βραδέως στην πάροδο του χρόνου. Ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι μία εκ των προτέρων ανάλυση των αποθεμάτων του υπόγειου ύδατος, πριν από την έναρξη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ποσοτήτων που είναι διαθέσιμα προς κατανάλωση. Σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία εκμετάλλευσης των αποθεμάτων θεωρείται ασφαλής αν ο ρυθμός άντλησης δεν ξεπερνά των ρυθμό της φυσικής επαναφόρτισης των αποθεμάτων. Η άποψη αυτή, η οποία έγινε ευρέως γνωστή με την ονομασία “Water – Budget Myth”, είναι υπεραπλουστευμένη και δεν οδηγεί στην πλήρη κατανόηση των μελλοντικών επιπτώσεων. Το κάθε σύστημα υπόγειου ύδατος είναι άκρως δυναμικό και αντιδρά σε κάθε ανθρώπινη παρέμβαση τροποποιώντας το ισοζύγιό του. Η μελέτη των αλλαγών αυτών είναι απαραίτητη για το σωστό σχεδιασμό ενός προγράμματος διαχείρισης (Alley et al., 1999).

Οι καινοτόμες προσεγγίσεις που έχουν προκύψει για την βιωσιμότητα των συστημάτων περιλαμβάνουν συνήθως κάποια συνδυασμό της χρήσης των υδροφορέων ως δεξαμενές αποθήκευσης, τη συνδυαστική χρήση των επιφανειακών και των υπόγειων αποθεμάτων, τον τεχνητό εμπλουτισμό μέσω των πηγαδιών ή μέσω επιφανειακής διασποράς και τη χρήση ανακυκλωμένου ύδατος ή ύδατος που έχει αποκατασταθεί ποιοτικά (Alley et al., 1999). Οι μελέτες για τη διαχείριση αποτελούνται συνήθως από τέσσερα επίπεδα αν και δεν κρίνεται αναγκαία πάντα η χρήση και των τεσσάρων (Todd and Mays, 2005):

1. *Προκαταρκτική εξέταση*: βασίζεται στην κρίση έμπειρου προσωπικού και εξακριβώνει τις πιθανότητες της επίτευξης μίας συγκεκριμένης ανάγκης σε μία καθορισμένη περιοχή
2. *Αναγνώριση*: η θεώρηση δυνατών εναλλακτικών για την δημιουργία ενός σχεδίου διαχείρισης το οποίο να επιτυγχάνει την κάλυψη μίας συγκεκριμένης ανάγκης σε μία καθορισμένη περιοχή. Στη μελέτη συμπεριλαμβάνονται και εκτιμήσεις του κέρδους και του κόστους. Βασίζεται στα διαθέσιμα δεδομένα και δεν απαιτεί τη συλλογή μεγάλου πλήθους νέων δεδομένων.
3. *Σκοπιμότητα*: απαιτεί λεπτομερή μηχανική, υδρογεωλογική και οικονομική ανάλυση με ταυτόχρονη εκτίμηση του κόστους και του κέρδους, ώστε να διασφαλιστεί ότι το επιλεγμένο σχέδιο είναι το βέλτιστο.
4. *Καθορισμός του σχεδίου*: η έρευνα αυτή περιλαμβάνει μελέτες σχεδιασμού απαραίτητες για τον καθορισμό των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του επιλεγμένου σχεδίου.

Μία βασική πρόκληση για την επίτευξη της αειφορίας είναι η εμφάνιση στις υδρολογικές επιπτώσεις των διαφόρων εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης, ώστε να μπορούν αξιολογηθούν σωστά. Βασική παράμετρος για στη μελέτη για το σχεδιασμό ενός προγράμματος διαχείρισης, είναι η απόσταση του υδροφορέα από πιθανές πηγές ρύπανσης. Η σπουδαιότητα της παραμέτρου αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι η αποκατάσταση ενός υδροφορέα αποτελεί μία πολυδάπανη διαδικασία και τις περισσότερες φορές μέχρι ενός σημείου επιτυχημένη. Επομένως, η ρύπανση ενός υδροφορέα προκαλεί αποσταθεροποίηση των βάσεων του αειφόρου σχεδιασμού. Εντούτοις, το θεμέλιο κάθε ολοκληρωμένης ανάλυσης είναι η διαθεσιμότητα υψηλής ποιότητας δεδομένων. Ορισμένα, όπως τα δεδομένα των βροχοπτώσεων, είναι γενικά διαθέσιμα και σχετικά γρήγορα προσβάσιμα, όμως άλλα δεδομένα όπως γεωλογικοί και υδρογεωλογικοί χάρτες, απαιτούν σε πολλές περιπτώσεις χρόνια για να δημιουργηθούν, ενώ για άλλου είδους δεδομένα όπως οι τιμές των υδραυλικών υψών θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για διεξαγωγή μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Επομένως, μία βασική παράμετρος για την ανάπτυξη ενός διαχειριστικού σχεδίου είναι η ύπαρξη μίας βάσης δεδομένων διαχρονικά (Alley et al., 1999).

Η ανάπτυξη του τομέα των Η/Υ έχει διευκολύνει τη διαχείριση των αποθεμάτων και την πρόβλεψη της εξέλιξής τους μέσω της χρήσης μοντέλων (Todd and Mays, 2005). Ο ρόλος των μοντέλων προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας έχει ενισχυθεί όσο αφορά στην αξιολόγηση των στρατηγικών διαχείρισης. Αν και οι προβλέψεις με βάση την προσομοίωση είναι ασαφείς, σε μία δεδομένη στιγμή τα μοντέλα αυτά αποτελούν την καλύτερη διαθέσιμη λύση για την λήψη αποφάσεων. Αν ένα μοντέλο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της μελλοντικής αντίδρασης ενός συστήματος υπογείων υδάτων το οποίο είναι συνεχούς σημασίας για την κοινωνία, τότε η παρακολούθηση πρέπει να είναι συνεχής και το μοντέλο να επαναξιολογείται, ώστε να ενσωματώνει τις νέες πληροφορίες (Alley et al., 1999). Τα μοντέλα διαχείρισης χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες (Todd and Mays, 2005):

1. Υδραυλικά μοντέλα διαχείρισης (hydraulic management models) με σκοπό την διαχείριση της άντλησης και της επαναφόρτισης.
2. Μοντέλα αξιολόγησης της πολιτικής (policy evaluation models), τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους και τις οικονομικές πτυχές.

Η ανάπτυξη των παραπάνω μοντέλων πραγματοποιήθηκε βάσει τεσσάρων βασικών προσεγγίσεων (Todd and Mays, 2005):

1. *Προσέγγιση της ενσωμάτωσης (embedding approach)*: ενσωματώνει τις εξισώσεις του μοντέλου προσομοίωσης απευθείας στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρόκειται να λυθεί. Αυτή η μέθοδος έχει περιορισμένες εφαρμογές και χρησιμοποιείται κυρίως στην υδραυλική διαχείριση των υπογείων υδάτων.
2. *Προσέγγιση βέλτιστου ελέγχου (optimal control approach)*: συνδυάζει τις τεχνικές βελτιστοποίησης με έναν προσομοιωτή που αφορά τα υπόγεια ύδατα και λύνει επανειλημμένα τις εξισώσεις που διέπουν τη ροή του υπογείου ύδατος. Αυτή η μεθοδολογία μπορεί να θεωρηθεί ως μία παραλλαγή της προσέγγισης της ενσωμάτωσης.
3. *Προσέγγιση πίνακα απόκρισης (response matrix approach)*: δημιουργεί έναν πίνακα απόκρισης μέσω της επανειλημμένης λύσης του μοντέλου προσομοίωσης, κάθε φορά για μία μονάδα άντλησης σε ένα μόνο κόμβο. Για τον υπολογισμό της συνολικής πτώσης στάθμης χρησιμοποιείται η μέθοδος της επαλληλίας. Η προσέγγιση αυτή είναι ακριβής για τους περιορισμένους υδροφορείς, ωστόσο μπορεί να επιτύχει ικανοποιητική ακρίβεια και σε ελεύθερους υδροφορείς εάν οι πτώσεις στάθμης είναι μικρές σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα.
4. *Προσέγγιση της ευρετικής βελτιστοποίησης – προσομοίωσης (heuristic optimization – simulation approach)*: η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα μοντέλο προσομοίωσης διασυνδεδεμένο με μία ευρετική διαδικασία βελτιστοποίησης όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Είναι η πιο πρόσφατα διατυπωμένη προσέγγιση και η λιγότερο συμβατική.

1.2 Υφαλμύριση των υπογείων υδάτων

Η υφαλμύριση αποτελεί τη συνηθέστερη αιτία υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου ύδατος, λόγω της ανάμιξης του με αλμυρό νερό γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για την κάλυψη των αναγκών για άρδευση και για πόση. Προκαλείται σε υδροφορείς που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος λόγω της ύπαρξης αλμυρού νερού γεωλογικής προέλευσης, σε ρηχούς υδροφορείς λόγω της απόρριψης αποβλήτων στην επιφάνεια του εδάφους και σε παράκτιους υδροφορείς λόγω της εισχώρησης του θαλασσινού νερού (Todd and Mays, 2005).

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

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

Η υφαλμύριση αποτελεί ένα φαινόμενο που κατά κύριο λόγο είναι πολύ δύσκολο να αντιστραφεί. Η παρουσία του είναι εντονότερη στους παράκτιους υδροφορείς στους οποίους παρατηρείται αυξημένη άντληση και ειδικότερα στους παράκτιους καρστικούς υδροφορείς στους οποίους η ύπαρξη ρηγμάτων διευκολύνει την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα. Ωστόσο μετά από μελέτες και δοκιμές, έχουν προκύψει κάποιες μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την προσπάθεια αντιστροφής του φαινομένου αυτού ειδικότερα σε παράκτιους υδροφορείς. Οι κυριότερες από αυτές είναι (Todd and Mays, 2005):

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

αυτό μία νέα κατάσταση υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ των δύο αυτών συστημάτων και αποτρέποντας με τον τρόπο αυτό την περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού. Το νερό που αντλείται είναι φυσικά υφάλμυρο και συνήθως απορρίπτεται στη θάλασσα.

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

Όσο αφορά την περιγραφή της εξέλιξης του φαινομένου, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις: η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας (sharp-interface approximation) με χρήση της σχέσης Ghyben-Herzberg και η προσέγγιση που βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας του αλμυρού και του γλυκού νερού (density-dependent approach) (Dokou and Karatzas, 2012).

1.2.1 Υφάλμυρα υπόγεια ύδατα

Υφάλμυρο νερό, σε γενικούς όρους, θεωρείται το νερό το οποίο περιέχει πάνω από 1000 mg/L ολικά διαλυμένα στερεά (total dissolved solids). Σε περιπτώσεις διείσδυσης του θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς τα χλωριούχα ιόντα αποτελούν την κύρια παράμετρο υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων αποθεμάτων. Σε συγκεντρώσεις άνω των 250 mg/L προσδίδουν υφάλμυρη γεύση στο νερό όμως δεν αποτελούν κίνδυνο για τη δημόσια υγεία παρά μόνο για άτομα τα οποία πάσχουν από ασθένειες που αφορούν την καρδιά και τα νεφρά (Todd and Mays, 2005).

Όσο αφορά τη χρήση του υφάλμυρου νερού για άρδευση, η παρουσία των χλωριούχων ιόντων σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να βλάψει την ανάπτυξη των φυτών καθώς περιορίζουν την πρόσληψη του νερού μέσω οσμωτικών διαδικασιών, ενώ παρεμβαίνουν και στις διεργασίες του μεταβολισμού των φυτών. Το υφάλμυρο νερό επιδρά και στο έδαφος καθώς προκαλεί αλλαγές στη δομή του εδάφους, στην διαπερατότητα και στον αερισμό επηρεάζοντας εμμέσως και τις καλλιέργειες (Todd and Mays, 2005).

Παρά το γεγονός ότι το υφάλμυρο νερό αποτελεί παραδοσιακά έναν ανεπιθύμητο πόρο, οι σύγχρονες τεχνολογικές πρόοδοι μπορεί να αντιστρέψουν το ρόλο του. Η αλματώδης πρόοδος που αφορά τις μεθόδους αφαλάτωσης υποδεικνύει ότι τα υφάλμυρα υπόγεια ύδατα δύνανται να αποτελέσουν μία σημαντική πηγή νερού ενόψει της μείωσης των αποθεμάτων πόσιμου νερού (Todd and Mays, 2005).

1.2.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην Ελλάδα

Ο ελλαδικός χώρος διακρίνεται για το μεγάλο μήκος των ακτογραμμών του και για τον καρστικό χαρακτήρα της γεωλογίας του. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με την υπεράντληση που πραγματοποιούν οι γεωτρήσεις στους παράκτιους υδροφορείς καθώς και τη λειτουργία πλήθους παράνομων γεωτρήσεων, οδήγησαν στην εμφάνιση φαινομένων διείσδυσης του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς της χώρας.

Συγκεκριμένα τέτοια φαινόμενα υφαλμύρισης έχουν παρατηρηθεί στις παρακάτω περιοχές οι οποίες παρουσιάζονται και στο Σχήμα 3 (Μιμίκου και Παναγόπουλος, 2010):

- *Αττική*: Σούνιο, Φάληρο, Πειραιάς, Δραπετσώνα, Κερατσίνι, Βουλιαγμένη, Βάρη, Αγία Μαρίνα, Κορωπί, Θριάσιο πεδίο, στις περιοχές των Αγίων Αποστόλων, του Καλάμου, της Ριτσώνας ως και τα νότια τμήματα της πεδιάδας της Θήβας, Πόρτο Ράφτη, κάμπος Αταλάντης
- *Πελοπόννησος*: Η παραλιακή ζώνη από την Κορινθία ως και την Αχαΐα, το Αργολικό πεδίο και το Πόρτο Χέλι.
- *Μακεδονία και Θράκη*: Νέα Πέραμος, Νέα Καρβάλη και Δέλτα του Νέστου
- *Θεσσαλία*: έως το ύψος της Κάρλας
- *Δυτική Ελλάδα*: περιοχές του Αργοστολίου και της Σάμης στην Κεφαλονία
- *Κυκλάδες και Δωδεκάνησα*: τμήματα παράκτιων περιοχών σε νησιά όπως Ρόδος, Κως, Άνδρος, Σύρος, Νάξος κ.α.
- *Κρήτη*: σε ζώνες κυρίως στο βόρειο τμήμα του νησιού.



Σχήμα 3: Περιοχές με προβλήματα υφαλμύρισης στον ελλαδικό χώρο (Μιμίκου και Παναγόπουλος, 2010)

1.2.3 Προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας (sharp-interface approximation)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ξεχωριστά από τους Ghyben (1888) και Herzberg (1901). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το φυσικό σύστημα αποτελείται από δύο μη αναμίξιμα υγρά (γλυκό και θαλασσινό νερό) τα οποία διαχωρίζονται από διεπιφάνεια αμελητέου πάχους (Σχήμα 4) (Reilly and Goodman, 1985). Το υδροστατικό ισοζύγιο μεταξύ του θαλασσινού και του γλυκού νερού σε ένα ελεύθερο υδροφορέα που συνδέεται υδραυλικά με τη θάλασσα, δίνεται από τη σχέση Ghyben-Herzberg (Karanth, 1987):

$$\rho_s g h_s = \rho_f g (h_s + h_f)$$

Όπου,

h_s : το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας

h_f : η ανύψωση της στάθμης του υδροφορέα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας

ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

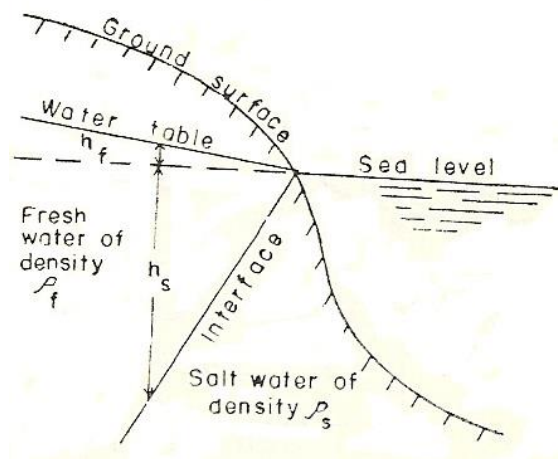
g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Θεωρώντας ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας διαφοροποιείται ελάχιστα σε μία δοθείσα περιοχή:

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

Αν οι μέσες τιμές της πυκνότητας του θαλασσινού και του γλυκού νερού είναι αντίστοιχα 1.025 και 1 g/cm³, τότε η εξίσωση Ghyben-Herzberg δηλώνει ότι για κάθε μέτρο της στάθμης του γλυκού νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, το πάχος του της ζώνης του γλυκού νερού που βρίσκεται άνωθεν της ζώνης του θαλασσινού είναι 40 m (Karanth, 1987).

$$h_s = 40h_f$$



Σχήμα 4: Κατανομή γλυκού και αλμυρού νερού σε ένα παράκτιο υδρόφορα για την επίδειξη της σχέσης Ghyben- Herzberg (Karanth, 1987)

Η εξίσωση Ghyben-Herzberg μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιορισμένους υδροφορείς. Σε αυτή την περίπτωση ως h_f θεωρείται η ανύψωση της πιεζομετρικής στάθμης πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Karanth, 1987).

Όταν το γλυκό νερό πάνω από μία διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού, αντλείται μέσω ενός πηγαδιού τότε η διεπιφάνεια ανυψώνεται με τη μορφή κώνου με τη μέγιστη ανύψωση να παρατηρείται κάτω από το πηγάδι, όπου η άντληση είναι μέγιστη (Σχήμα 5). Όταν η άντληση του υπόγειου ύδατος είναι αυξημένη σε σημεία κοντά στην διεπιφάνεια, τότε ο κώνος μπορεί να ανυψωθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να υπάρξει άντληση υφάλμυρου νερού. Αν ο ρυθμός άντλησης είναι χαμηλός, τότε μία νέα ισορροπία μπορεί να εδραιωθεί και να μην υπάρξει ζήτημα υφαλμύρινσης των αντλούμενων ποσοτήτων. Ένα κατά προσέγγιση ύψος του κώνου (z) μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή της εξίσωσης Ghyben-Herzberg (Karanth, 1987):

$$z = \frac{\rho_f s_w}{\rho_s - \rho_f}$$

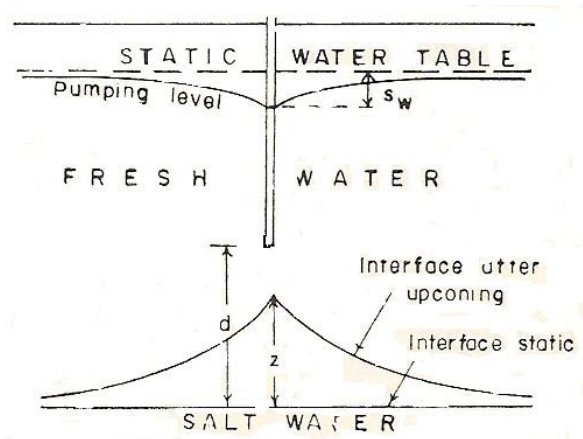
Όπου,

z : το ύψος του κώνου που δημιουργείται λόγω της άντλησης

ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

s_w : η πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα εντός του πηγαδιού άντλησης



Σχήμα 5: Μορφή της διεπιφάνειας γλυκού - αλμυρού νερού κατά την άντληση από μία γεώτρηση (Karanth, 1987)

Παρόλο που η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως είναι στην ουσία υπεραπλουστευμένη, εφόσον υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου στο επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα είναι ίδιο με εκείνο του γλυκού νερού στην διεπιφάνεια, κάτι που υποδηλώνει πως δεν υπάρχει κατακόρυφη υδραυλική κλίση (υπόθεση του Dupuit) (Reilly and Goodman 1985).

1.2.4 Προσέγγιση εξαρτώμενη από τη διαφορά πυκνοτήτων γλυκού-αλμυρού νερού (density-dependent approach)

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται η θεώρηση ότι το σύστημα γλυκού-αλμυρού νερού αποτελείται από ένα αναμίξιμο ρευστό το οποίο επηρεάζει την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού. Οι πρώτες προσπάθειες έρευνας της μεθόδου αυτής πραγματοποιήθηκαν από τους Schincariol and Schwartz (1990), ενώ η πρώτη προσπάθεια μοντελοποίησης με χρήση της συγκεκριμένης προσέγγισης πραγματοποιήθηκε από τον Henry (1964) (Dokou and Karatzas, 2012).

Σύμφωνα με τον Diersch (1988) θεωρείται ότι τα δύο ρευστά, γλυκό και αλμυρό νερό, είναι αναμίξιμα και τα πάχος της ζώνης ανάμιξης που προκύπτει είναι σημαντικό. Η μαθηματική αναπαράσταση της μεθόδου συνεπάγεται κάποιες υποθέσεις. Αρχικά, το πορώδες μέσο θεωρείται άκαμπτο και κορεσμένο. Επίσης η συνθήκη της μη συμπιεστότητας και η προσέγγιση του Boussinesq θεωρείται ότι ισχύουν, καθώς η χρονική μεταβολή της πυκνότητας του ρευστού δεν είναι σημαντική. Τέλος, θεωρείται ότι η ροή μπορεί να περιγραφεί κατάλληλα από το νόμο του Darcy (Diersch, 1988). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ροής και της μεταφοράς μάζας περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.2.2., καθώς έγινε χρήση τους μέσω του μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων FEFLOW για την περιοχή μελέτης. Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου της διαφοράς πυκνοτήτων (density difference ratio, α) και του ισοδύναμου υδραυλικού ύψους για το γλυκό νερό (equivalent hydraulic head, h_{eq}) (Dokou and Karatzas, 2012). Το ισοδύναμο

υδραυλικό επιτρέπει τη σύγκριση των πιεζομέτρων με νερό διαφορετικών πυκνοτήτων αλλά με την ίδια ανύψωση στάθμης (Kinzelbach and Stauffer, 2009).

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

Όπου,

α : ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού

ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού

$$h_{eq} = (1 + \alpha)h - \alpha z$$

Όπου,

h_{eq} : το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος

α : ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

h : το υδραυλικό ύψος

z : το υψόμετρο

2 Μέθοδοι μοντελοποίησης της υπόγειας ροής

2.1 Γενικά στοιχεία για τη μοντελοποίηση

Οι Anderson και Woessner (1992) ορίζουν τα μοντέλα ως μηχανισμούς οι οποίοι παρουσιάζουν μία προσέγγιση των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο, ενώ οι Alley et al. (1999) ως μία προσπάθεια να αποδοθούν τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος των υπογείων υδάτων με την βοήθεια μαθηματικών μέσων. Με οποιονδήποτε τρόπο και να οριστούν, τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν βασικό εργαλείο για τη μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα υπογείων υδάτων.

Οι στόχοι της μελέτης των μοντέλων υπόγειας ροής είναι η καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών λειτουργίας των υπόγειων ταμιευτήρων, η πρόβλεψη της αντίδρασης σε πιθανές μελλοντικές συνθήκες, η διενέργεια βασικών ερευνών όπως για παράδειγμα η μελέτη των νόμων που διέπουν τη ροή (Karanth, 1987).

Οι Anderson και Woessner (1992) πρότειναν την κατηγοριοποίηση των μοντέλων σε φυσικά και μαθηματικά. Τα φυσικά ή αναλογικά μοντέλα προσομοιώνουν απευθείας την υπόγεια ροή, ενώ τα μαθηματικά μοντέλα πραγματοποιούν έμμεση προσομοίωση της υπόγειας ροής μέσω των εξισώσεων που την διέπουν και μπορούν να λυθούν αναλυτικά ή αριθμητικά με πιθανή χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και στις δύο περιπτώσεις. Για να είναι δυνατή η εμπλοκή των H/Y στη διαδικασία μοντελοποίησης απαιτείται και η δημιουργία ενός κώδικα ο οποίος αποτελεί το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για τη λύση ενός μαθηματικού μοντέλου με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο κώδικας είναι γενικός, ενώ το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύνολο οριακών και αρχικών συνθηκών καθώς επίσης ένα δίκτυο κόμβων, τιμές παραμέτρων και υδρολογικές τάσεις για μία συγκεκριμένη περιοχή.

Τα αναλογικά μοντέλα κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις αρχές που εμπλέκονται στο σχεδιασμό τους, σε (Karanth, 1987):

1. *Μοντέλα πορώδους μέσου (sand tank models)*: τα πλέον εφαρμόσιμα σε περιπτώσεις απλών συστημάτων. Τα μοντέλα κατασκευάζονται σε στήλες ή σε πλαίσια με σφηνοειδή μορφή από ξύλο, πλεξιγκλάς ή ατσάλι. Για την προσομοίωση ενός ελεύθερου υδροφορέα πραγματοποιείται πλήρωση με άμμο ομοιόμορφης διαπερατότητας, ενώ για την περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων τοποθετείται αδιαπέρατο στρώμα άνωθεν του διαπερατού στρώματος. Για την παρακολούθηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ή του πιεζομετρικού ύψους τοποθετούνται σε κρίσιμα σημεία, πιεζόμετρα τα οποία αποτελούνται από λεπτούς, διαφανείς, πλαστικούς σωλήνες.

2. *Μοντέλα παχύρρευστου υγρού (viscous fluid models)*: βασίζονται στην αναλογία μεταξύ της δισδιάστατης ροής του υπόγειου ύδατος και της στρωτής ροής ενός παχύρρευστου υγρού διαμέσου ενός στενού καναλιού, ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες.

3. *Μοντέλα μεμβράνης (membrane models)*: βασίζονται στον Νόμο του Hooke. Αποτελούνται από μία λεπτή ελαστική μεμβράνη, αμελητέου βάρους, τεντωμένη, κάτω από ομοιόμορφη τάση, σε άκαμπτο πλαίσιο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μελέτη απλών, δισδιάστατων προβλημάτων υπό μόνιμες συνθήκες.

4. *Ηλεκτρικά αναλογικά μοντέλα (electric analog models)*: η βάση των μοντέλων αυτών είναι η φυσική και μαθηματική ισοδυναμία μεταξύ του Νόμου του Ohm που διέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος διαμέσου αγώγιμου μέσου και του Νόμου του Darcy.

Λόγω του γεγονότος ότι σε πολλές περιπτώσεις οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή μέσω του πορώδους μέσου δεν μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους, η χρήση αριθμητικών μοντέλων είναι η πλέον διαδεδομένη (Bear, 1988). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των δύο αυτών κατηγοριών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

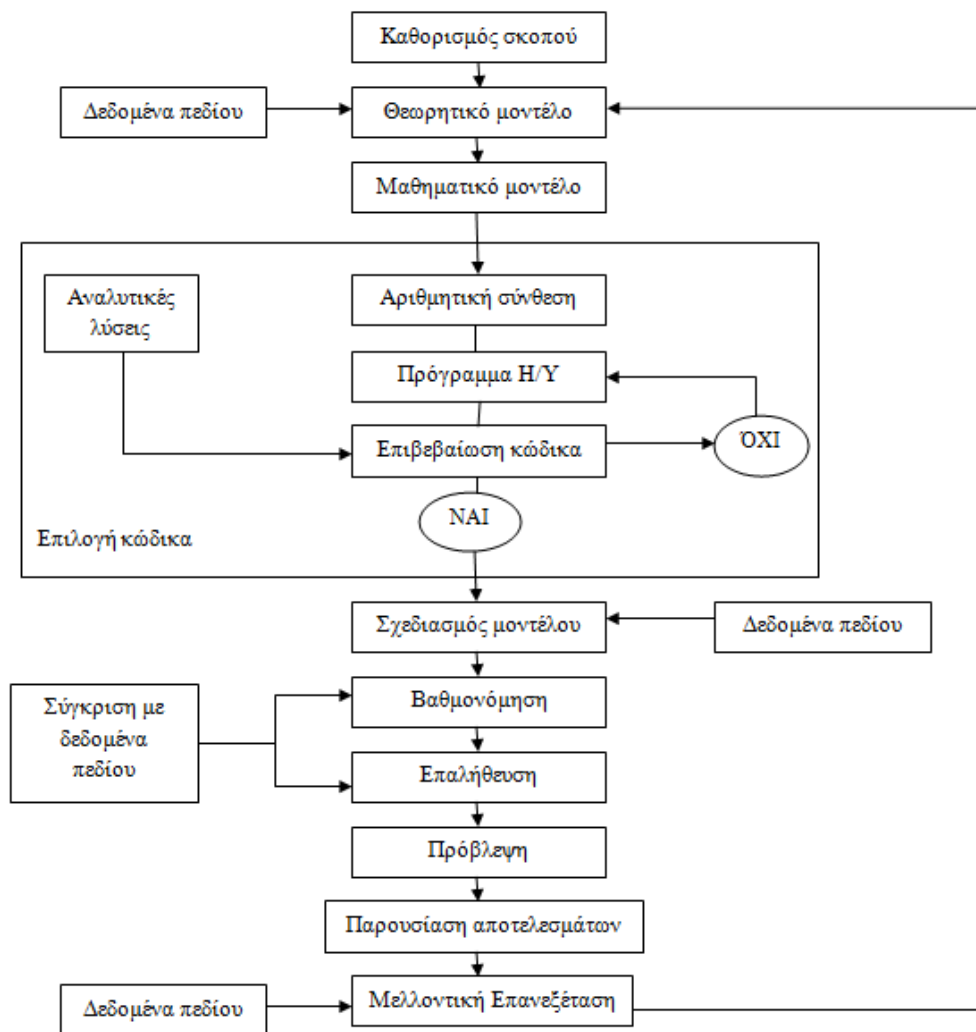
Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Αναλυτικών και των Αριθμητικών μοντέλων (USDA, 2007)

Αναλυτικά μοντέλα	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποδοτικά όταν τα δεδομένα του συστήματος είναι σποραδικά ή αβέβαια	Περιορισμένα σε συγκεκριμένες ιδεατές συνθήκες με απλή γεωμετρία
Οικονομικά συμφέροντα	Μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα σε προβλήματα που αφορούν το πεδίο με σύνθετες οριακές συνθήκες
Εφαρμόσιμα για αρχικές εκτιμήσεις όσο αφορά την έκταση της ρύπανσης ή της άντλησης	Μπορεί να μην είναι ικανά να χειριστούν άμεσα χωρικές ή χρονικές διακυμάνσεις του συστήματος
Μία πρόχειρη εκτίμηση των δεδομένων εισαγωγής είναι δυνατή μέσω των υπάρχουσών πηγών δεδομένων	
Η εισαγωγή δεδομένων για κώδικες H/Y είναι συνήθως απλή	
Αριθμητικά μοντέλα	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Εύκολος χειρισμός χωρικών και χρονικών διακυμάνσεων του υδρογεωλογικού συστήματος	Η εξοικείωση με τα σύνθετα αριθμητικά προγράμματα μπορεί να είναι χρονοβόρα και δαπανηρή
Εύκολος χειρισμός πολύπλοκων οριακών συνθηκών	Τα σφάλματα λόγω της αριθμητικής διασποράς μπορεί να είναι σημαντικά όσο αφορά τα μοντέλα μεταφοράς
Αντιμετωπίζουν χωρίς μεγάλη δυσκολία τρισδιάστατα προβλήματα	Μπορεί να μην είναι ικανά να χειριστούν άμεσα χωρικές ή χρονικές διακυμάνσεις του συστήματος
Μία πρόχειρη εκτίμηση των δεδομένων εισαγωγής είναι συχνά δυνατή μέσω των υπάρχουσών πηγών δεδομένων	Απαιτείται η εισαγωγή περισσότερων δεδομένων εισαγωγής, διαδικασία που μπορεί να αποδειχθεί χρονοβόρα
Η εισαγωγή δεδομένων για κώδικες H/Y είναι συνήθως απλή	

Τα κυριότερα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται είναι των πεπερασμένων διαφορών (finite differences), των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements), των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών (integrated finite differences), των αναλυτικών στοιχείων (analytic elements) και η μέθοδος συνοριακού ολοκληρώματος (boundary integral equation). Οι δύο τελευταίες μέθοδοι είναι σχετικά καινούριες και ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιούνται ευρέως. Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων είναι οι πιο κοινά χρησιμοποιούμενες (Anderson and Woessner, 1992).

Για τη μοντελοποίηση των φαινομένων που διέπουν την υπόγεια ροή ακολουθείται ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο τα βήματα του οποίου αριθμούνται παρακάτω και οπτικοποιούνται στο Σχήμα 6 που ακολουθεί (Anderson and Woessner, 1992):

1. Καθορισμός του σκοπού του μοντέλου
2. Ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου
3. Επιλογή των εξισώσεων που διέπουν τα υπό εξέταση φαινόμενα και του ηλεκτρονικού κώδικα
4. Σχεδιασμός του μοντέλου, δηλαδή η απόδοση του θεωρητικού μοντέλου σε μία μορφή κατάλληλη για μοντελοποίηση
5. Βαθμονόμηση, δηλαδή η επιβεβαίωση ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει υδραυλικά ύψη και ροές μετρημένες στο πεδίο
6. Ανάλυση ευαισθησίας της βαθμονόμησης, δηλαδή ο καθορισμός της επίδρασης της αβεβαιότητας στο βαθμονομημένο μοντέλο
7. Επαλήθευση του μοντέλου. Οι τιμές των βαθμονομημένων παραμέτρων χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή μίας δεύτερης συλλογής δεδομένων πεδίου, ώστε αποκτήσει μεγαλύτερη σιγουριά το μοντέλο
8. Πρόβλεψη για ποσοτικοποίηση της απόκρισης του συστήματος σε μελλοντικά γεγονότα
9. Πρόβλεψη για ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας
10. Παρουσίαση του σχεδιασμού και των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης
11. Περαιτέρω ανάλυση (post-audit analysis) στο μέλλον με χρήση νέων δεδομένων από το πεδίο
12. Επανασχεδιασμός του μοντέλου με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από την προαναφερθείσα ανάλυση.



Σχήμα 6: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης υπόγειας ροής (Anderson and Woessner, 1992)

2.2 Περιγραφή του μοντέλου FEFLOW

Το FEFLOW (Finite Element subsurface Flow system) είναι ένα διαδραστικό σύστημα μοντελοποίησης της ροής υπογείων υδάτων, καθώς και της μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε τρισδιάστατη ή δισδιάστατη μορφή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να περιγραφεί η χωρική και χρονική κατανομή των ρύπων στα υπόγεια ύδατα, για να μοντελοποιηθούν γεωθερμικές διαδικασίες, για να προσδιοριστεί η διάρκεια και ο χρόνος μετακίνησης των ρύπων στους υδροφορείς, για να οργανωθούν και να σχεδιαστούν στρατηγικές αποκατάστασης, καθώς και για να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός εναλλακτικών και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης (Diersch, 2003).

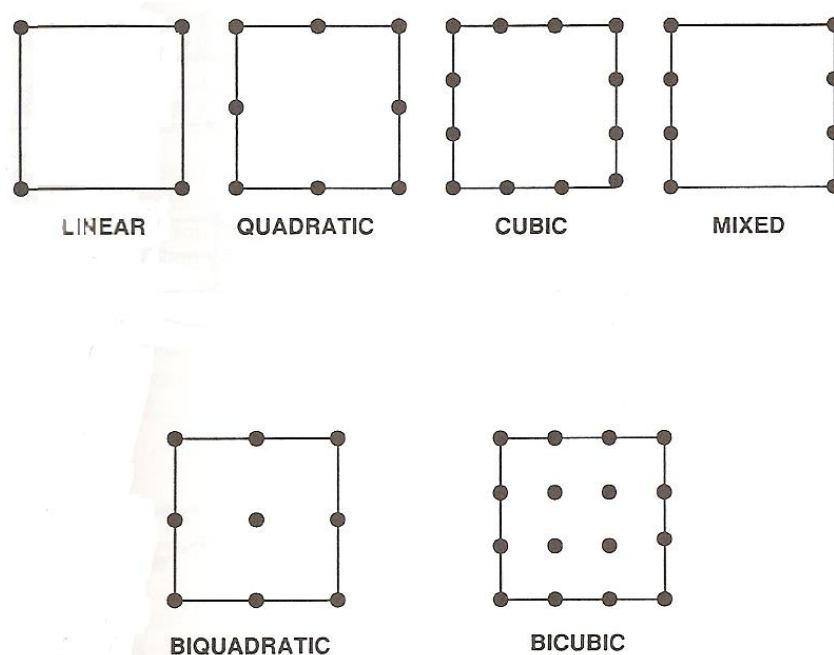
Το λογισμικό είναι συμβατό και μπορεί να αλληλεπιδράσει με διάφορες εφαρμογές του GIS, όπως το ArcInfo, το ArcView και το ArcGIS. Είναι διαθέσιμο για συστήματα Windows, καθώς και για διάφορες πλατφόρμες Unix. Από την δημιουργία του το 1979, το λογισμικό αναβαθμίζεται συνεχώς. Ο πηγαίος κώδικάς του (source code) είναι γραμμένος σε ANSI C/C++ και περιλαμβάνει περισσότερες από 1,100,000 γραμμές. Χρησιμοποιείται ευρέως σαν εργαλείο μοντελοποίησης σε πανεπιστήμια, ερευνητικά ινστιτούτα, κυβερνητικά γραφεία και επιχειρήσεις (Diersch, 2003).

2.2.1 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method)

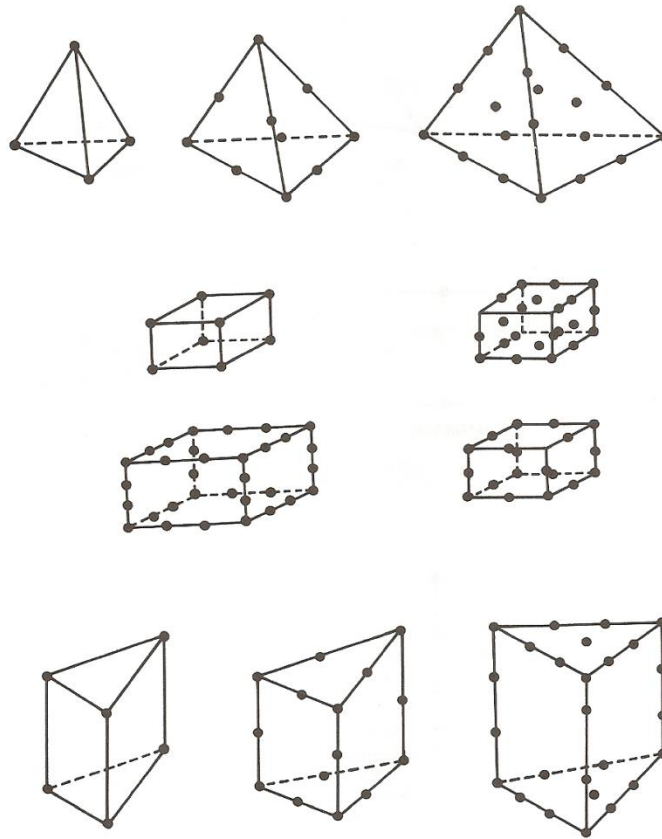
Το FEFLOW όπως υποδεικνύει και η ονομασία του, κάνει χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί μία συναρτησιακή σχέση (functional), η οποία σχετίζεται με την ίδια την μερική διαφορική εξίσωση. Η συναρτησιακή σχέση προϋποθέτει μία αντιστοιχία η οποία εκχωρεί έναν αριθμό σε κάθε εξίσωση που ανήκει σε κάποια τάξη. Είναι ένα ιδιαίτερο είδος εξίσωσης όπου κάθε εξαρτημένη μεταβλητή είναι και μία εξίσωση (Bear, 1988). Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη (Bear, 1988):

1. Εξάγεται το παραμετρικό πρόβλημα (variational problem) για την μερική διαφορική εξίσωση που διέπει την υπό εξέταση ροή.
2. Διαχωρίζεται το πεδίο σε στοιχεία
3. Διαμορφώνεται η παραμετρική συναρτησιακή σχέση (variational functional) εντός του στοιχείου
4. Λαμβάνονται παράγωγα σε σχέση με τις εξαρτημένες μεταβλητές σε όλους τους κόμβους του στοιχείου
5. Συλλέγονται οι εξισώσεις για όλα τα στοιχεία
6. Εκφράζονται οι οριακές συνθήκες σε όρους κομβικών τιμών
7. Ενσωματώνονται οι οριακές συνθήκες στις εξισώσεις και λύνεται το πρόβλημα

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο αποδοτική για την προσέγγιση ορίων με ανώμαλο σχήμα, καθώς είναι ευκολότερη η διευθέτηση των ξεχωριστών στοιχείων όπως επίσης και ο καθορισμός της θέσης των διαφόρων συνθηκών (αρχικών ή οριακών). Επίσης ορίζεται επακριβώς η διακύμανση του υδραυλικού ύψους εντός ενός στοιχείου με χρήση της μεθόδου της παρεμβολής. Τέλος, επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία όσο αφορά το σχεδιασμό του δικτύου των κόμβων (grid) λόγω των διαφορετικών σχημάτων των στοιχείων. Τα δισδιάστατα στοιχεία είναι είτε τρίγωνα είτε τετράεδρα, ενώ τα τρισδιάστατα στοιχεία είναι τετράεδρα, εξαέδρα ή πρίσματα. Αναλυτικά τα διάφορα σχήματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7 και 8. Η φύση της παρεμβολής που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του υδραυλικού ύψους εντός του στοιχείου, ορίζει αν το στοιχείο θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό με τα γραμμικά στοιχεία να είναι αυτά που χρησιμοποιούνται συχνότερα (Anderson and Woessner, 1992)



Σχήμα 7: Δισδιάστατα στοιχεία



Σχήμα 8: Τρισδιάστατα στοιχεία

2.2.2 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Εξίσωση ροής (i j=1,2,3):

$$S_o \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_i^f}{\partial x_i} = Q_\rho + Q_{EB}$$

Όπου,

S_o : ο συντελεστής αποθήκευσης (συμπιεστότητα)

h : το υδραυλικό ύψος

q_i^f : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

Q_{EB} : ο παράγοντας της επεκταμένης προσέγγισης Boussinesq

Q_ρ : η συνάρτηση της ροής

Ταχύτητα Darcy (i j=1,2,3):

$$q_i^f = -K_{ij}f_\mu \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right)$$

Όπου,

q_i^f : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

K_{ij} : ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας

f_μ : η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με την πυκνότητα

h : το υδραυλικό ύψος

ρ^f, ρ_o^f : η πυκνότητα του ρευστού και η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού αντίστοιχα

e_j : το μοναδιαίο διάνυσμα της ταχύτητας

Αρχή διατήρησης μάζας (i j=1,2,3):

$$\varepsilon R_d \frac{\partial C}{\partial t} + q_i^f \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (\varepsilon R \vartheta + Q_\rho) C = Q_c$$

Όπου,

ε : το πορώδες

R_d : παράγωγος όρος της επιβράδυνσης

R : ο παράγοντας επιβράδυνσης

C : η συγκέντρωση του χημικού συστατικού

q_i^f : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

D_{ij} : ο τανυστής της υδροδυναμικής διασποράς

ϑ : ο ρυθμός διάσπασης

Q_c : η συνάρτηση της συγκέντρωσης των ρύπων

Υδραυλικό ύψος:

$$h = \frac{\rho^f}{\rho_o^f g} + x_l$$

Όπου,

h : το υδραυλικό ύψος

ρ^f, ρ_o^f : η πυκνότητα του ρευστού και η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού αντίστοιχα

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

x_l : η ανύψωση σε καρτεσιανές συντεταγμένες υπό την επίδραση της βαρύτητας

Υδραυλική αγωγιμότητα ($i, j=1,2,3$):

$$K_{ij} = \frac{k_{ij} \rho_o^f g}{\mu_o^f}$$

Όπου,

K_{ij} : η υδραυλική αγωγιμότητα

k_{ij} : ο τανυστής της διαπερατότητας

ρ_o^f : η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

μ_o^f : η τιμή αναφοράς του δυναμικού ιξώδους

Υδροδυναμική διασπορά ($i, j=1,2,3$):

$$D_{ij} = (\varepsilon D_d + \beta_T V_q^f) \delta_{ij} + (\beta_L - \beta_T) \frac{q_i^f q_j^f}{V_q^f}$$

Όπου,

D_{ij} : η υδροδυναμική διασπορά

ε : το πορώδες

D_d : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης

β_L, β_T : η διαμήκης και εγκάρσια δυνατότητα διασποράς των χημικών ειδών αντίστοιχα

$$V_q^f: \sqrt{q_i^f q_i^f}$$

q_i^f : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

δ_{ij} : ο ταυστής του Kronecker, $\delta_{ij}=1$ όταν $i=j$, ενώ $\delta_{ij}=0$ όταν $i \neq j$

2.2.3 Αρχικές συνθήκες (Initial Conditions)

Αρχικές συνθήκες για τη ροή

Αποτελούν τις τιμές των υδραυλικών υψών σε όλη την έκταση της υπό μελέτη περιοχής τη χρονική στιγμή για την οποία ξεκινάει η προσομοίωση της ροής, δηλαδή για $t=0$.

$$h(x_i, 0) = h_I(x_i)$$

Όπου,

h_I : γνωστή, χωρικά μεταβαλλόμενη σχέση των αρχικών κατανομών

Αρχικές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας

Αποτελούν τις τιμές των συγκεντρώσεων των ρύπων σε όλη την έκταση της υπό μελέτη περιοχής και στις τρεις διαστάσεις, τη χρονική στιγμή για την οποία ξεκινάει η προσομοίωση της μεταφοράς μάζας, δηλαδή για $t=0$.

$$C(x_i, 0) = C_I(x_i, h)$$

Όπου,

C_I : γνωστή, χωρικά μεταβαλλόμενη σχέση των αρχικών κατανομών η οποία στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση εξαρτάται και από το υδραυλικό ύψος

2.2.4 Οριακές συνθήκες (Boundary conditions)

Οριακές συνθήκες για τη ροή

1^{ov} είδους (τύπος του Dirichlet)

Περιγράφει ένα σταθερό δυναμικό σε έναν κόμβο.

$$h(x_i, t) = h_1^R(t)$$

Όπου,

h_1^R : καθορισμένες οριακές τιμές του υδραυλικού ύψους

2^{ov} είδους (τύπος του Neumann)

Εκχωρεί μία τιμή ρυθμού ροής σε έναν κόμβο και ισχύει μόνο στην περίπτωση που οριστεί μία απόσταση επιλέγοντας διαδοχικούς κόμβους.

$$q_{n_h}(x_i, t) = q_h^R(t) = -K_{ij}f_\mu \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\rho^f - \rho_o^f}{\rho_o^f} e_j \right) n_i$$

Όπου,

q_{n_h} : κανονική ροή του ρευστού σύμφωνα με το νόμο του Darcy

q_h^R : καθορισμένη κανονική οριακή ροή του ρευστού

K_{ij} : ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας

f_μ : η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με την πυκνότητα

ρ^f, ρ_o^f : η πυκνότητα του ρευστού και η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού αντίστοιχα

e_j : το μοναδιαίο διάνυσμα της ταχύτητας

n_i : κανονικό μοναδιαίο διάνυσμα

4^{ov} είδους (μοναδικός τύπος πηγαδιού)

Περιγράφει την άντληση του υπόγειου ύδατος σε έναν συγκεκριμένο κόμβο.

$$Q_\rho^w(x_i, t) = \sum_m Q_m^w \prod_i \{\delta(x_i - x_i^m)\}$$

Όπου,

Q_p^w : η εξίσωση λειτουργίας του πηγαδιού

Q_m^w : η παροχή άντλησης του πηγαδιού

x_i^m : συντεταγμένες του πηγαδιού

Οριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας - Περιορισμοί

1^{ov} είδους (τύπος του Dirichlet)

Αποτελούν γνωστές τιμές συγκεντρώσεων των ρύπων που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένους κόμβους.

$$C(x_i, t) = C_1^R(t)$$

Όπου,

C_1^R : καθορισμένες οριακές τιμές της συγκέντρωσης

Περιορισμοί (constraints) για το 1^o είδος

Μία οριακή συνθήκη που αφορά τη μεταφορά μάζας μπορεί να λάβει περιορισμούς είτε μέσω του υδραυλικού ύψους είτε μέσω της ροής της μάζας.

$$C_1^R(t) \text{ if } \begin{cases} \text{Max: } \begin{cases} Q_C^R < Q_C^{\max_1}(t) \\ \text{and} \\ h^{\min_1} \leq h^R \leq h^{\max_1} \end{cases} & \text{else } \begin{cases} Q_C^R = Q_C^{\max_1}(t) \text{ as long as } h^{\min_1} \leq h^R \leq h^{\max_1} \\ Q_C^R = 0 \text{ if } h^R < h^{\min_1} \text{ or } h^R > h^{\max_1} \end{cases} \\ \text{Min: } \begin{cases} Q_C^R > Q_C^{\min_1}(t) \\ \text{and} \\ h^{\min_1} \leq h^R \leq h^{\max_1} \end{cases} & \text{else } \begin{cases} Q_C^R = Q_C^{\min_1}(t) \text{ as long as } h^{\min_1} \leq h^R \leq h^{\max_1} \\ Q_C^R = 0 \text{ if } h^R < h^{\min_1} \text{ or } h^R > h^{\max_1} \end{cases} \end{cases}$$

Να σημειωθεί ότι παρουσιάστηκαν μόνο οι εξισώσεις, τα είδη οριακών συνθηκών και περιορισμών που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη περίπτωση. Αναλυτική περιγραφή όλων των εξισώσεων είναι διαθέσιμη στο εγχειρίδιο Reference Manual του FEFLOW (Dierckx, 2003).

2.2.5 Ρήγματα (Discrete features)

Το FEFLOW προσφέρει τη δυνατότητα συνδυασμού ενός τρισδιάστατου συστήματος πορώδους μέσου με την παρουσία ρηγμάτων, ώστε να πραγματοποιηθεί μία προσέγγιση που αφορά τους καρστικούς υδροφορείς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όλα τα ρήγματα της περιοχής εισήχθησαν ως δισδιάστατα στοιχεία τα οποία διέπονται από το Νόμο Hagen-Poiseuille (Dokou and Karatzas, 2012):

$$v = -Kf_{\mu}(\nabla h + \alpha\eta_j)$$

Όπου,

v : η μέση ταχύτητα του νερού εντός του ρήγματος

K : η υδραυλική αγωγιμότητα

f_{μ} : η καταστατική εξίσωση σχετιζόμενη με την πυκνότητα

h : το υδραυλικό ύψος

α : ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

η_j : διάνυσμα της βαρύτητας

$$K = \frac{b^2 \rho_f g}{12 \mu_f} I$$

Όπου,

K : η υδραυλική αγωγιμότητα

b : το άνοιγμα του ρήγματος

ρ_f : η πυκνότητα του ρευστού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

μ_f : το ιξώδες του ρευστού

I : ο μοναδιαίος πίνακας

Η εκφόρτιση ενός ρήγματος εκφράζεται ως (Dokou and Karatzas, 2012):

$$Q = -\frac{\pi b^4}{8\mu_f} (\nabla h + \alpha\eta_j)$$

Όπου,

Q : η εκφόρτιση του ρήγματος

b : το άνοιγμα του ρήγματος

μ_f : το ιξώδες του ρευστού

h : το υδραυλικό ύψος

α : ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων

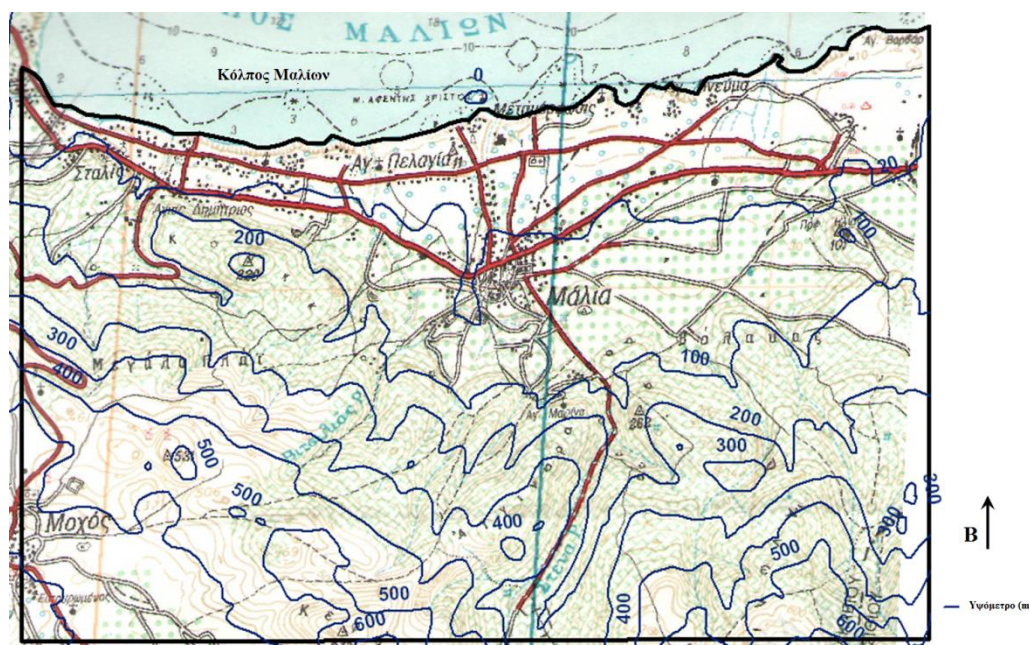
η_j : διάνυσμα της βαρύτητας

3 Περιοχή μελέτης

3.1 Θέση – Υφιστάμενη Κατάσταση

3.1.1 Όρια της περιοχής μελέτης

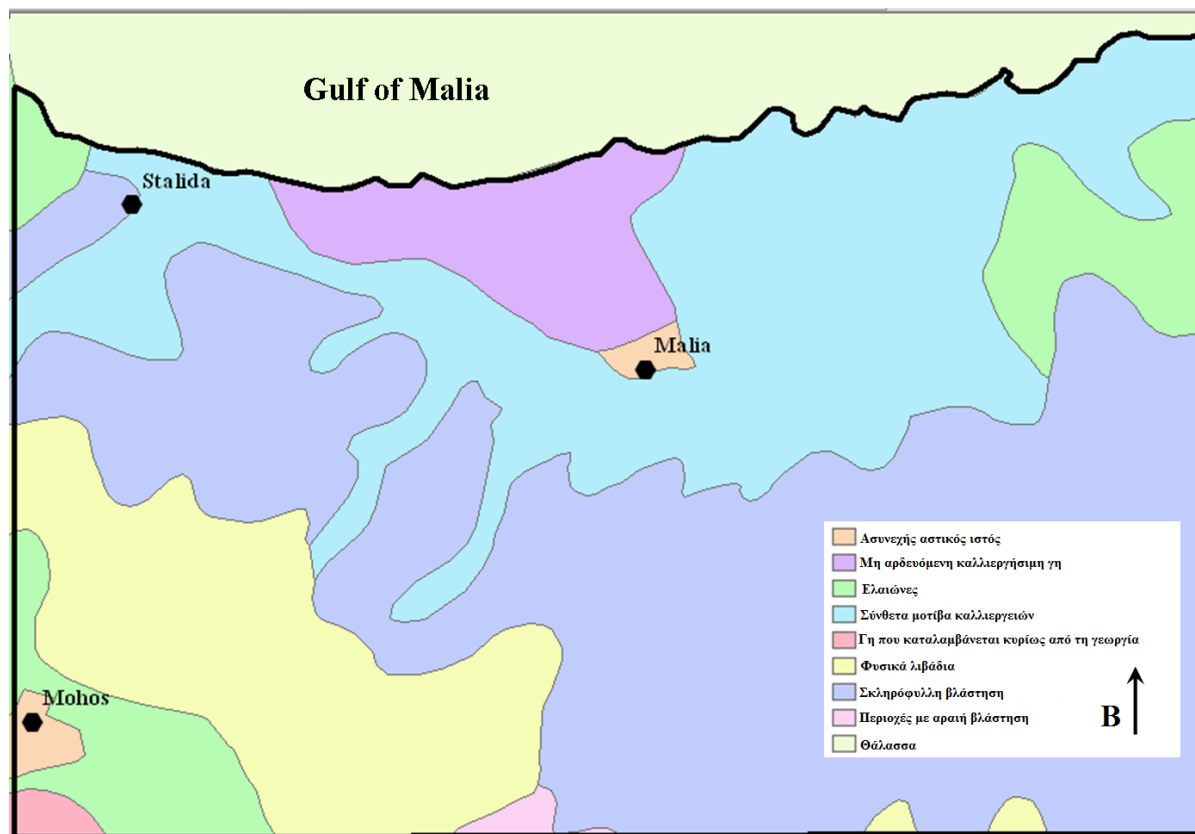
Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στον καλλικρατικό Δήμο Χερσονήσου της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου. Ουσιαστικά, η περιοχή μελέτης εκτείνεται περίπου στα όρια της Δημοτικής ενότητας Μαλίων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 9 στο οποίο οριοθετείται η περιοχή. Τα Μάλια απέχουν 40 km από την πόλη του Ηρακλείου. Η μελετηθείσα περιοχή βρέχεται στα βόρεια από το Κρητικό πέλαγος, δυτικά και νότια περιορίζεται από τα όρια της Δημοτικής Ενότητας Χερσονήσου και ανατολικά από τα διοικητικά όρια της Περιφερειακής Ενότητας Λασιθίου.



Σχήμα 9: Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης

3.1.2 Χρήσεις γης

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή από το Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών (2000) προέκυψε ότι η καλλιεργούμενη έκταση στην περιοχή ανέρχεται στα 1.75 km² από τα οποία τα 0.5 km² είναι αρδευόμενα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10, η σκληρόφυλλη βλάστηση και τα σύνθετα μοτίβα καλλιεργειών καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση, ενώ στην περιοχή επίσης περιλαμβάνονται ελαιώνες, φυσικά λιβάδια, μη αρδευόμενη καλλιεργήσιμη γη και μικρές περιοχές αστικού ιστού στην περιοχή γύρω από τις πόλεις των Μαλίων και του Μοχού.



Σχήμα 10: Χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης

3.1.3 Υδατικές ανάγκες

3.1.3.1 Ύδρευση

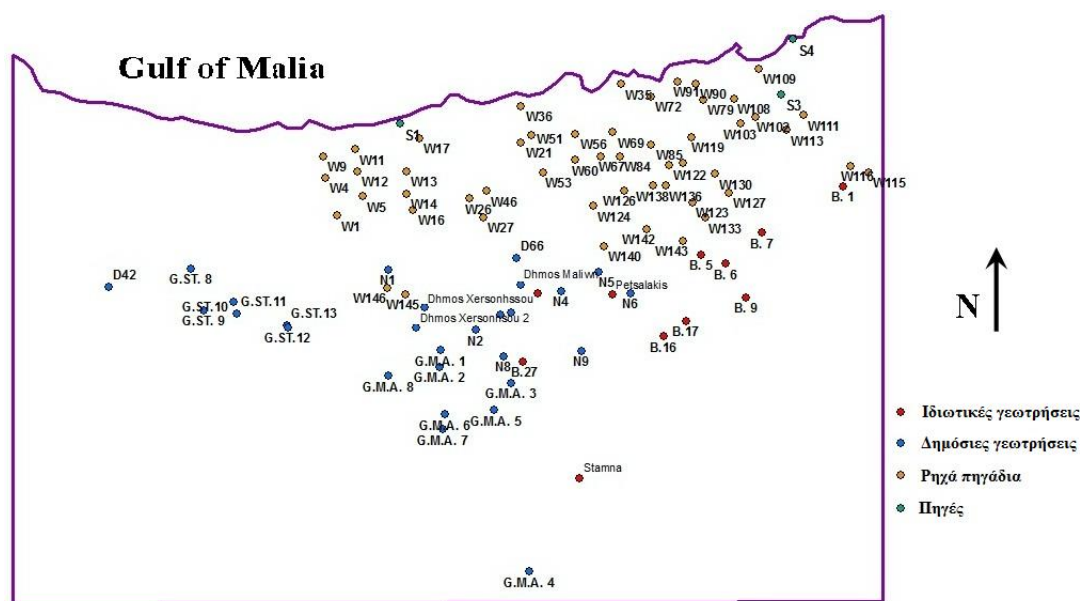
Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 η Δημοτική Ενότητα Μαλίων έχει πληθυσμό 5056 κατοίκων, όμως ο αριθμός αυτός τετραπλασιάζεται περίπου κατά την καλοκαιρινή περίοδο λόγω της τουριστικής ανάπτυξης με αποτέλεσμα ο πληθυσμός να φτάνει περίπου τα 20000 άτομα. Αν θεωρήσουμε ως μέση ημερήσια κατανάλωση τα 200 lt/άτομο τότε προκύπτει ότι για τους 6 μήνες της χειμερινής περιόδου απαιτούνται περίπου 182000 m³, ενώ για τη θερινή περίοδο περίπου 720000 m³. Συνολικά η ετήσια κατανάλωση ισούται με 902000 m³ περίπου.

3.1.3.2 Άρδευση

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή από το Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών (2000) με χρήση της αρδευόμενης έκτασης και του όγκου του νερού που απαιτείται για κάθε είδος καλλιέργειας, προέκυψε ότι για τα 0.5 km² αρδευόμενης έκτασης απαιτούνται ετησίως περίπου 1538000 m³ νερού.

3.1.4 Υφιστάμενη κατάσταση

Η κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής μελέτης πραγματοποιείται μέσω της εκμετάλλευσης του υπόγειου ταμιευτήρα και των πηγαίων νερών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11 εντός της περιοχής λειτουργεί πλήθος γεωτρήσεων, ενώ εντοπίζονται και τρεις πηγές. Στους Πίνακες 2, 3 και 4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα στοιχεία των πηγαδιών και των γεωτρήσεων άντλησης, ενώ τα δεδομένα για την ποσότητα του ύδατος που εκφορτίζουν οι πηγές παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 4.7.



Σχήμα 11: Πηγάδια και γεωτρήσεις άντλησης

Πίνακας 2: Ρηχά πηγάδια άντλησης

Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας	Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας
W1	Ιδιώτης	θερινή	W90	Ιδιώτης	θερινή
W4	Ιδιώτης	θερινή	W91	Ιδιώτης	θερινή
W5	Ιδιώτης	θερινή	W102	Ιδιώτης	θερινή
W9	Ιδιώτης	θερινή	W103	Ιδιώτης	θερινή
W11	Ιδιώτης	θερινή	W108	Ιδιώτης	θερινή
W12	Ιδιώτης	θερινή	W109	Ιδιώτης	θερινή
W13	Ιδιώτης	θερινή	W111	Ιδιώτης	θερινή
W14	Ιδιώτης	θερινή	W113	Ιδιώτης	θερινή
W16	Ιδιώτης	θερινή	W116	Ιδιώτης	θερινή
W17	Ιδιώτης	θερινή	W115	Ιδιώτης	θερινή
W21	Ιδιώτης	θερινή	W119	Ιδιώτης	θερινή
W26	Ιδιώτης	θερινή	W122	Ιδιώτης	θερινή

Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας	Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας
W27	Ιδιώτης	θερινή	W123	Ιδιώτης	θερινή
W35	Ιδιώτης	θερινή	W124	Ιδιώτης	θερινή
W36	Ιδιώτης	θερινή	W126	Ιδιώτης	θερινή
W46	Ιδιώτης	θερινή	W127	Ιδιώτης	θερινή
W51	Ιδιώτης	θερινή	W130	Ιδιώτης	θερινή
W53	Ιδιώτης	θερινή	W131	Ιδιώτης	θερινή
W56	Ιδιώτης	θερινή	W133	Ιδιώτης	θερινή
W60	Ιδιώτης	θερινή	W136	Ιδιώτης	θερινή
W67	Ιδιώτης	θερινή	W138	Ιδιώτης	θερινή
W69	Ιδιώτης	θερινή	W140	Ιδιώτης	θερινή
W72	Ιδιώτης	θερινή	W142	Ιδιώτης	θερινή
W79	Ιδιώτης	θερινή	W143	Ιδιώτης	θερινή
W84	Ιδιώτης	θερινή	W145	Ιδιώτης	θερινή
W85	Ιδιώτης	θερινή	W146	Ιδιώτης	θερινή

Πίνακας 3: Ιδιωτικές γεωτρήσεις άντλησης

Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας
B1	Ιδιώτης	θερινή
B5	Ιδιώτης	θερινή
B6	Ιδιώτης	θερινή
B7	Ιδιώτης	θερινή
B9	Ιδιώτης	θερινή
B16	Ιδιώτης	θερινή
B17	Ιδιώτης	θερινή
B18	Ιδιώτης	θερινή
B27	Ιδιώτης	θερινή
Petsalakis	Πετσαλάκης	θερινή
Stamna	"Στάμνα"	ετήσια

Πίνακας 4: Δημόσιες γεωτρήσεις άντλησης

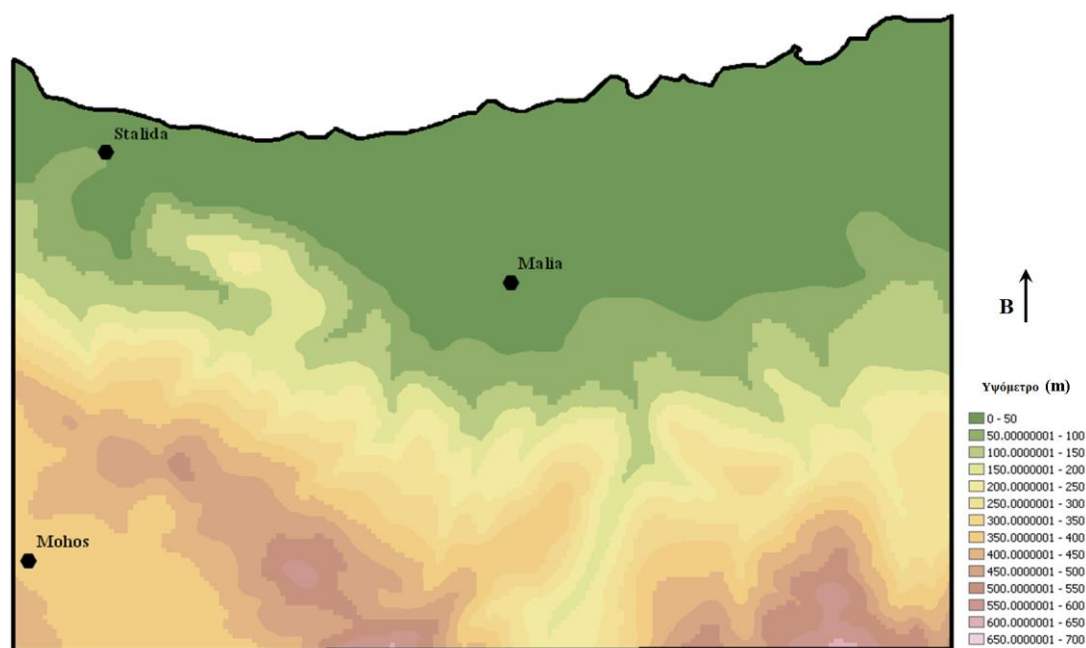
Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας	Κωδικός πηγαδιού	Ιδιοκτήτης	Περίοδος λειτουργίας
G.MA.1	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	Dhmos Maliwn	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	θερινή
G.MA.2	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	Dhmos Xersonhsou	Δημ. Ενοτ. Χερσονήσου	θερινή
G.MA.3	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	θερινή	Dhmos Xersonhsou 2	Δημ. Ενοτ. Χερσονήσου	θερινή
G.MA.4	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	θερινή	D42	ΙΓΜΕ	ετήσια
G.MA.5	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	θερινή	D66	ΙΓΜΕ	ετήσια
G.MA.6	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N1	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.MA.7	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N2	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.MA.8	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N3A	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.8	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N3B	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.9	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N4	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.10	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N5	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.11	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N6	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.12	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N8	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια
G.ST.13	Δημ. Ενοτ. Μαλίων	ετήσια	N9	Δημ. Ενοτ. Ηρακλείου	ετήσια

3.2 Γεωμορφολογία – Γεωλογία της περιοχής

3.2.1 Γεωμορφολογία

Όπως φαίνεται στο χάρτη του Σχήματος 12, η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ήπιες γενικά κλίσεις. τα υψόμετρα κυμαίνονται από 0 -200 m στην παράκτια πεδινή ζώνη και από 200 – 650 m στα νότια και στην περιοχή του Μοχού.

Η περιοχή μελέτης δεν έχει σημαντική μόνιμη ροή ποταμών, ενώ και τα προσωρινά ρεύματα που βρίσκονται στην ορεινή περιοχή δεν ανήκουν στην περιοχή που θα μελετηθεί (Καλλέργης κ.α., 2000).



Σχήμα 12: Χάρτης υψομέτρων της περιοχής μελέτης

3.2.2 Γεωλογική δομή

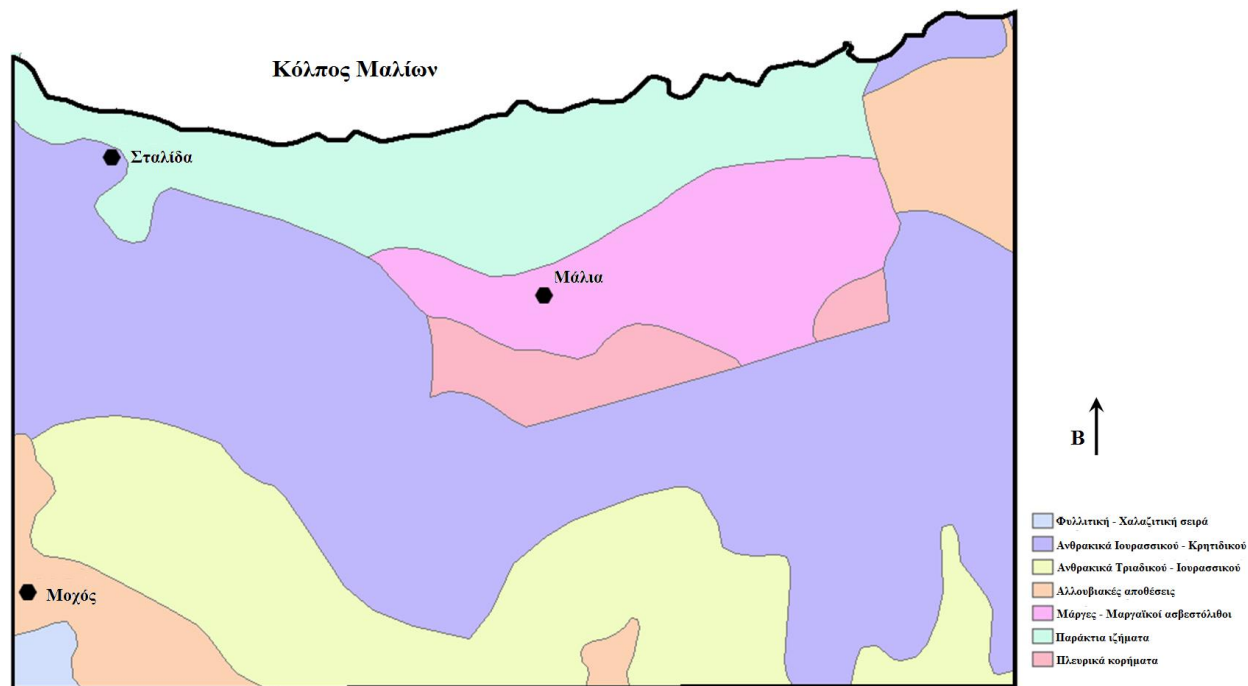
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 13, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαντώνται στην περιοχή μελέτης χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: προ-νεογενείς, νεογενείς, τεταρτογενείς.

Οι προ-νεογενείς απαρτίζονται από τους ασβεστόλιθους που ανήκουν στην ενότητα της Τρίπολης (τα ανθρακικά Τριαδικού – Ιουρασσικού και τα ανθρακικά Ιουρασσικού – Κρητιδικού) και από την ενότητα Φυλλιτών - Χαλαζιτών. Τα ανθρακικά Τριαδικού – Ιουρασσικού αποτελούνται από παχυστρωματώδεις δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, γκριζόμαυρους στρωματολιθικούς ασβεστόλιθους και σπανιότερα από δολομιτικά ή ασβεστολιθικά λατυποπαγή (Καλλέργης κ.α., 2000). Στην περιοχή μελέτης απαντώνται στο νοτιότερο τμήμα της

και εκτείνονται σχεδόν σε όλο σχεδόν τον άξονα Ανατολής – Δύσης. Τα ανθρακικά Ιουρασσιικού – Κρητιδικού, αποτελούνται από ασβεστόλιθους τεφρούς έως τεφρόμαυρους, μεσοπαχυστρωματώδεις έως άστρωτους, βιτουμενιούχους και πλούσιους σε νηριτική πανίδα (Καλλέργης κ.α., 2000). Στην περιοχή μελέτης απαντώνται στο κεντρικό τμήμα αυτής, νοτίως της πόλης των Μαλίων, και εκτείνονται σε όλο το μήκος του άξονα Ανατολής – Δύσης, ενώ καλύπτουν κι ένα σχετικά μικρό τμήμα της ανατολικής παραλιακής ζώνης. Ποσοστιαία καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη γεωλογικών σχηματισμών, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος αποτελούν για την περιοχή το μοναδικό γεωλογικό είδος. Η ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών της περιοχής απαρτίζεται κυρίως από εναλλαγές σερικιτικών και χλωριτικών σχιστολίθων και από ένα κατώτερο σχηματισμό από γραφιτικούς σχιστόλιθους. Καταλαμβάνει μικρή έκταση στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης.

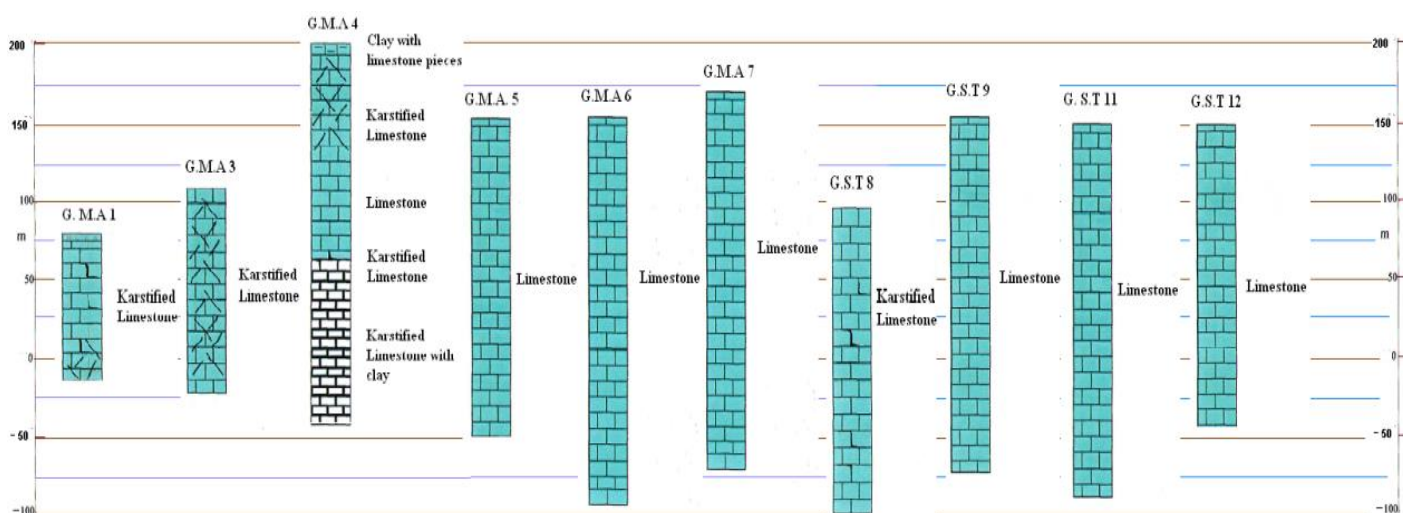
Στους νεογενείς σχηματισμούς ανήκουν τα παράκτια ιζήματα και οι μάργες. Τα παράκτια ιζήματα απαρτίζονται από άμμο και θαλάσσιες αναβαθμίδες πλειστοκαινικής έως και ολοκαινικής ηλικίας (Παρίτσης, 2001). Καταλαμβάνουν σχεδόν εξ' ολοκλήρου την παραλιακή ζώνη της υπό εξέταση περιοχής. Οι μάργες της περιοχής ανήκουν στο σχηματισμό της Αγίας Βαρβάρας και συνίστανται από βιοκλαστικούς, εν μέρει λατυποπαγείς ή κροκαλοπαγείς ασβεστόλιθους, καθώς και από υφαλώδεις ασβεστόλιθους (Καλλέργης κ.α., 2000). Αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της πόλης των Μαλίων και της ευρύτερης περιοχής με το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασής τους να εντοπίζεται στα ανατολικά της πόλεως.

Τέλος, οι τεταρτογενείς γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούνται από τις αλλουβιακές αποθέσεις και τα πλευρικά κορήματα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά, από ερυθρογή με κροκαλολατύπες σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και από υλικά ελλουβιακού μανδύα (Καλλέργης κ.α., 2000). Εντοπίζονται κυρίως στο βορειοανατολικό και στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης. Τα πλευρικά κορήματα περιλαμβάνουν λατύπες, κυρίως ασβεστολιθικής προέλευσης, ποικίλων μεγεθών, αναμεμιγμένες με ερυθρογή (Καλλέργης κ.α., 2000). Εμφανίζονται νότια και νοτιοανατολικά της πόλης των Μαλίων, στα πρανή των ορεινών όγκων.



Σχήμα 13: Γεωλογικό υπόβαθρο περιοχής μελέτης

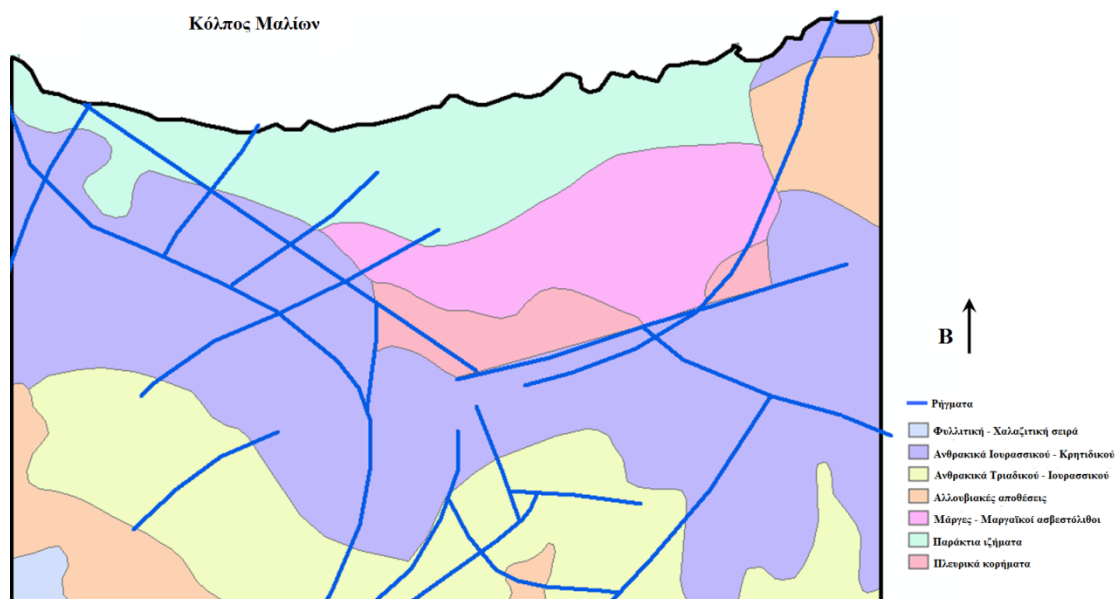
Στο Σχήμα 14 που ακολουθεί εμφανίζεται η διαστρωμάτωση των εδαφικών υλικών μετά από τη δειγματοληψία (γεωλογικά καρότα) που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες γεωτρήσεις. Μέσω του Σχήματος αυτού ορίστηκαν ως υψόμετρο του κατώτερου slice τα -100 m (υποκεφάλαιο 4.6), ενώ καθίσταται σαφές ότι ο κυρίαρχος γεωλογικός σχηματισμός είναι οι ασβεστόλιθοι. Με τον τρόπο αυτόν επιβεβαιώνεται η χρήση της υδραυλικής αγωγιμότητας των ανθρακικών για τα layers 2-11 (υποκεφάλαιο 4.7.).



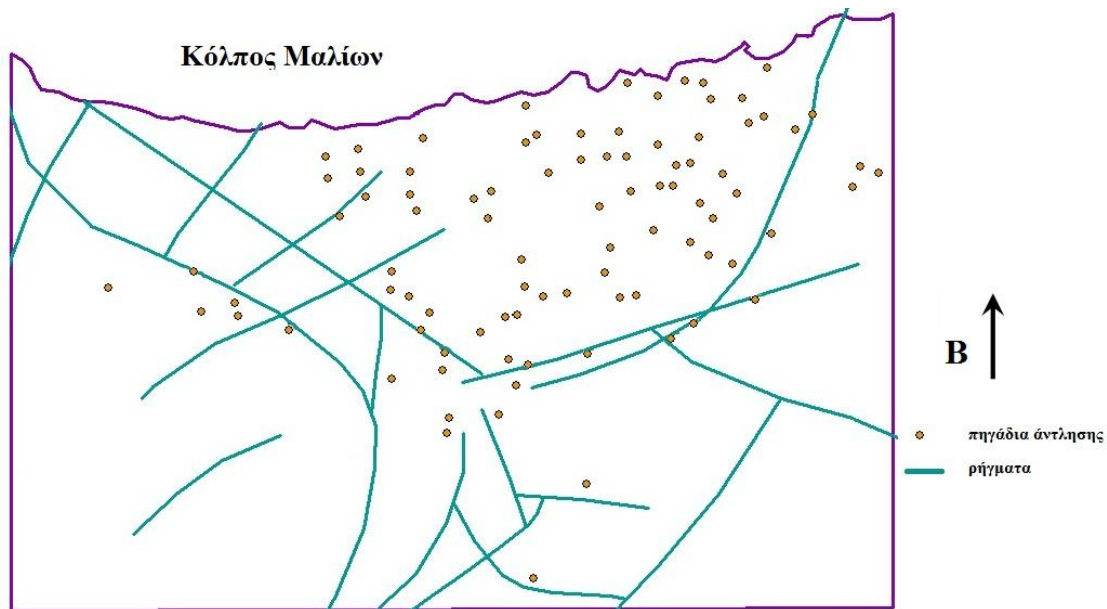
Σχήμα 14: Γεωλογικά καρότα από γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης

3.2.3 Ρήγματα

Το εφελκυστικό τεκτονικό καθεστώς με διεύθυνση στον άξονα Βορρά – Νότου το οποίο ξεκίνησε να εφαρμόζεται στην Κρήτη κατά το μέσον του Μειόκαινου και συνεχίζει μέχρι και σήμερα, προκάλεσε τη δημιουργία ρηγμάτων γενικότερα στην Κρήτη και ειδικότερα στην περιοχή μελέτης (Παρίτσης, 2001). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 15, η περιοχή διατρέχεται από πλήθος ρηγμάτων στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασής της, αν και κατά κύριο λόγο εντοπίζονται στην ίδια περιοχή με τα ανθρακικά της ζώνης της Τρίπολης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σημασία των ρηγμάτων στον έλεγχο της υδροφορίας είναι καταλυτική σε περιοχές με περίπλοκη τεκτονική όπως η υπό εξέταση περιοχή, καθώς επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή των υδραυλικών φορτίων σε έναν υδροφορέα. Η περίπτωση της περιοχής αυτής παρουσιάζει και ειδικότερο ενδιαφέρον, καθώς πλήθος πηγαδιών αντλούν από σημεία τα οποία βρίσκονται επάνω ή κοντά σε ρήγματα (Σχήμα 16). Τέλος, εφόσον στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εξετάζεται και το φαινόμενο της υφαλμύρισης του υδροφορέα, είναι ουσιώδες να αναφερθεί ότι κάποια από τα ρήγματα συνδέονται με τη θάλασσα με αποτελέσματα που εξετάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.



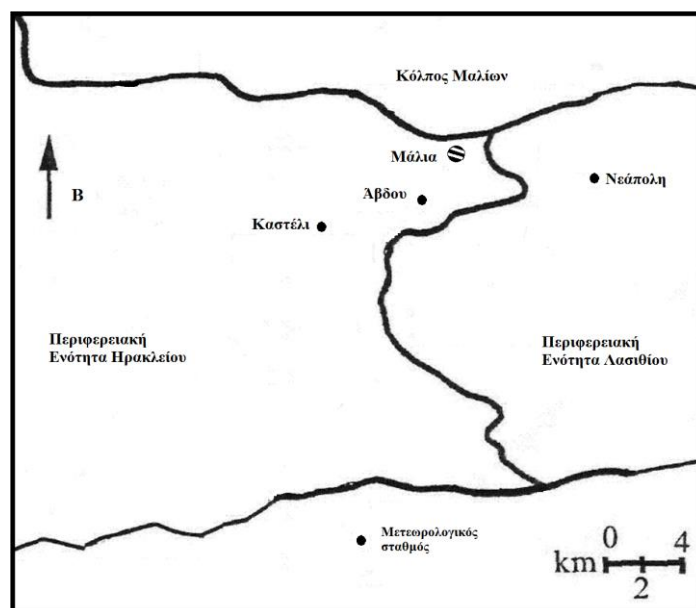
Σχήμα 15: Γεωλογική δομή και ρήγματα της περιοχής



Σχήμα 16: Ρήγματα και πηγάδια άντλησης στην περιοχή μελέτης

3.3 Κλιματικά δεδομένα

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκαν βροχομετρικά δεδομένα από τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς, η θέση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 17. Οι μετρήσεις αφορούν το διάστημα από τον Ιανουάριο του 1996 έως και το Μάρτιο του 2008 και είναι μηνιαίες, ενώ στη συνέχεια έχει εξαχθεί ένας μέσος όρος από τις τιμές όλων των σταθμών για κάθε μήνα του κάθε έτους. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στο Παράρτημα της εργασίας αυτής.



Σχήμα 17: Θέση μετεωρολογικών σταθμών

4 Εφαρμογή του μοντέλου FEFLOW στην περιοχή μελέτης

4.1 Οριοθέτηση της περιοχής (Superelement Mesh)

Η δημιουργία του αρχικού αυτού πλαισίου έχει ως σκοπό τον καθορισμό των εξωτερικών ορίων της περιοχής, καθώς και της θέσης των πηγαδιών, γεωτρήσεων και πηγών. Το πλαίσιο αυτό κατασκευάζεται μέσω του Mesh Editor του μενού Edit.

Αρχικά, εισήχθηκε ένα αρχείο στο οποίο παρουσιάζονταν τα όρια της περιοχής μελέτης και στη συνέχεια με την επιλογή Add polygons οριοθετήθηκε το περίγραμμα της περιοχής μελέτης. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε εισαγωγή ενός δεύτερου αρχείου στο οποίο εμφανίζονταν οι θέσεις των πηγαδιών, γεωτρήσεων και πηγών και με την επιλογή Add point add-ins προστέθηκαν ως σημεία του πλέγματος, ώστε όταν πραγματοποιήθηκε η δημιουργία των κόμβων του πλέγματος (Finite Element Mesh) η θέση τους να αντιστοιχεί σε ένα κόμβο και η πυκνότητα των κόμβων να είναι αυξημένη στις περιοχές αυτές.

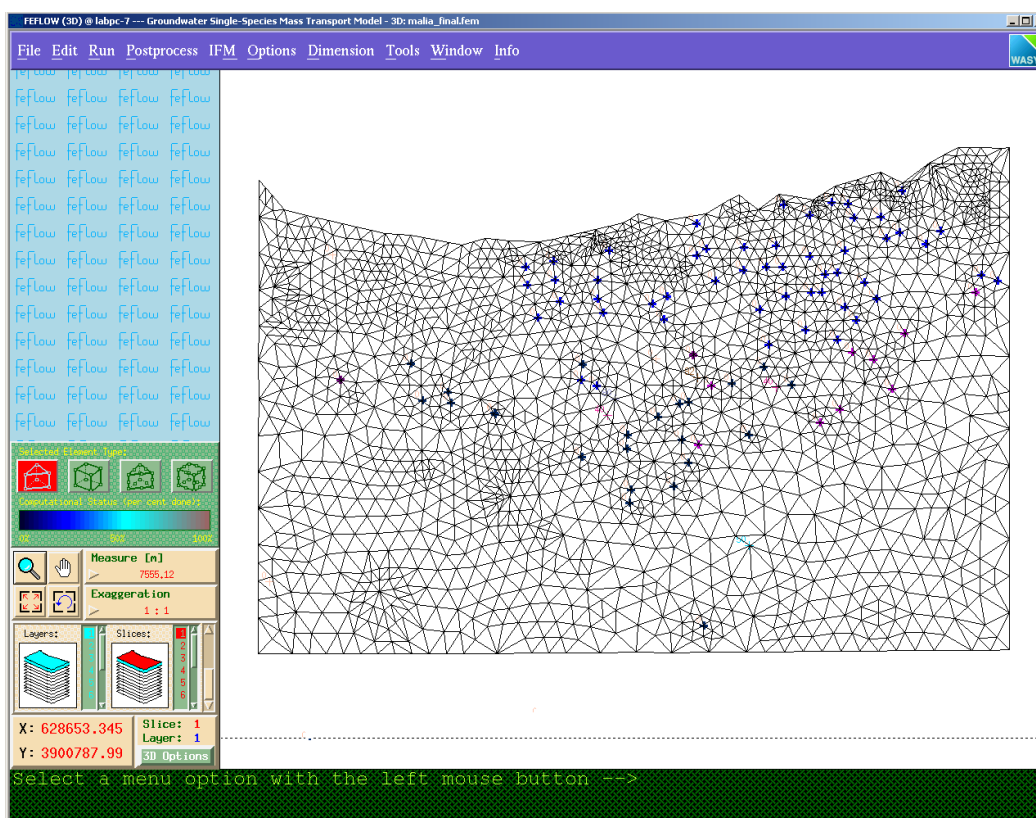
4.2 Δημιουργία του Δικτύου των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Mesh)

Το δίκτυο αυτό κατασκευάζεται μέσω του μενού Mesh Generator Editor. Η εντολή Start mesh generator πραγματοποιεί την έναρξη δημιουργίας και «ανοίγει» το μενού στο οποίο εισάγονται οι επιλογές σχεδιασμού του δικτύου (Generator options). Στις επιλογές συμπεριλαμβάνεται η εντολή για δημιουργία πιο πυκνών κόμβων στις περιοχές γύρω από τα σημεία (add-ins) που προστέθηκαν στο προηγούμενο βήμα (Superelement mesh). Η κατασκευή του δικτύου γίνεται αυτόματα σύμφωνα με το πλήθος των κόμβων – πεπερασμένων στοιχείων που εισήχθηκε από το χρήστη.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση μετά την κατασκευή του δικτύου κρίθηκε αναγκαία η πύκνωση των κόμβων κατά περιοχές, ώστε να δοθεί μία πιο ομαλή εικόνα και να αποκτήσουν μεγαλύτερη ακρίβεια οι υπολογισμοί του μοντέλου. Ιδιαίτερη έμφαση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πύκνωσης δόθηκε στην παράκτια περιοχή λόγω του γεγονότος ότι εξετάζεται και το φαινόμενο της υφαλμύρισης, το οποίο είναι εντονότερο στη ζώνη αυτή. Το μενού μέσω του οποίου πραγματοποιήθηκε η προαναφερθείσα διαδικασία, είναι το Mesh geometry και η εντολή Mesh enrichment.

4.3 Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Το δίκτυο που προέκυψε από τα προηγούμενα βήματα είναι δισδιάστατο, όμως στα πλαίσια της εργασίας αυτής απαιτείται η εισαγωγή και της τρίτης διάστασης, δηλαδή του βάθους. Ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από κομβικά επίπεδα, τα οποία ονομάζονται slices. Οι «φέτες» αυτές θεωρούνται ως το άνω και κάτω επίπεδο κάθε στρώματος (layer). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η δημιουργία 12 slices και ως εκ τούτου 11 layers μέσω του μενού Dimension. Μετά το πέρας όλων των παραπάνω διαδικασιών το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων στην τελική του μορφή αποθηκεύτηκε ξεχωριστά ώστε να μην αλλοιωθεί λόγω των μετέπειτα βημάτων. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η τελική μορφή του πλέγματος σε συνδυασμό με τις θέσεις των διαφόρων πηγαδιών και γεωτρήσεων, ώστε να είναι εμφανής η σωστή εκτέλεση των εντολών που αφορούσαν το κομμάτι αυτό (θέση κόμβων και πυκνότητα κόμβων). Να σημειωθεί ότι το σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι γραμμικό πρισματικής μορφής.



Σχήμα 18: Δίκτυο Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Mesh)

4.4 Τάξη του προβλήματος (Problem Class)

Το βήμα αυτό πραγματοποιείται για τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου μέσω του Problem Editor του μενού Edit. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής επιλέχθηκε η ροή και η μεταφορά μάζας σε μη μόνιμες συνθήκες (transient flow and mass transport) στην κορεσμένη ζώνη (saturated media) ενός ελεύθερου υδροφορέα (unconfined aquifer). Η ανώτερη επιφάνεια του υδροφορέα τέθηκε ελεύθερη και μετακινούμενη, ώστε στη συνέχεια να ενσωματώσει τις τιμές των υδραυλικών υψών που θα προκύψουν μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

4.5 Χρονικά δεδομένα και δεδομένα ελέγχου (Temporal and control data)

Από το μενού Temporal and Control Data καθορίζονται και εισάγονται όλες οι παράμετροι που σχετίζονται με το χρόνο, με τις λειτουργίες οι οποίες είναι χρονικά εξαρτώμενες και οι νόρμες που αφορούν το σφάλμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το χρονικό βήμα ρυθμιζόταν αυτόματα μέσω της μεθόδου Forward Adams-Bashforth/ Backward trapezoid (A/B time integration scheme). Ως αρχικό μήκος του χρονικού βήματος επιλέχθηκαν οι 0.001 μέρες και ως τελικός χρόνος οι 4470 μέρες. Η μέγιστη τιμή του χρονικού βήματος ορίστηκε στη μία ημέρα και η ανοχή σε σφάλμα του μοντέλου στο 0.001.

4.6 Υψόμετρα των slices

Η εισαγωγή του υψόμετρου που αντιστοιχεί σε κάθε slice πραγματοποιήθηκε μέσω της επιλογής 3D- Slice Elevation. Μοναδική περίπτωση αποτελεί το πρώτο slice, καθώς λόγω της τοπογραφίας της περιοχής το υψόμετρο διαφέρει σε κάθε σημείο. Για το λόγο αυτό έγινε εισαγωγή ενός αρχείου στο οποίο περιέχονταν τα δεδομένα των υψομέτρων, ενώ όσο αφορά τα υπόλοιπα slices οι τιμές που ορίστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Να σημειωθεί ότι το υψόμετρο των 0 m αντιστοιχεί στην επιφάνεια της θάλασσας.

Πίνακας 5: Τα υψόμετρα που αντιστοιχούν σε κάθε slice

Slice	Υψόμετρο (m)
1	0 έως περίπου 650
2	-1
3	-10
4	-20
5	-30
6	-40
7	-50
8	-60
9	-70
10	-80
11	-90
12	-100

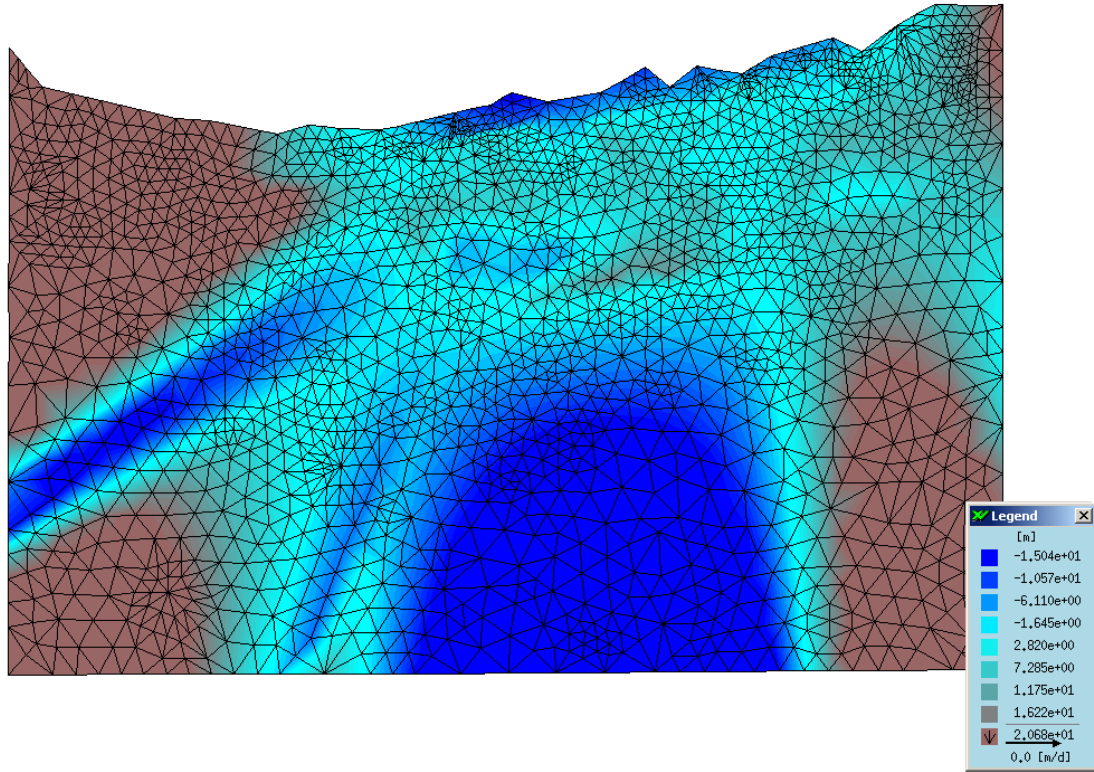
4.7 Δεδομένα ροής (Flow Data)

4.7.1 Αρχικές συνθήκες (Flow Initials)

Οι αρχικές συνθήκες επιτρέπουν τον προσδιορισμό της επιφάνειας του υδροφορέα στην αρχή της διαδικασίας της προσομοίωσης. Η εισαγωγή των αρχικών συνθηκών, οι οποίες στην ουσία αφορούν τις τιμές των υδραυλικών υψών για χρόνο $t = 0$ d, πραγματοποιήθηκε μέσω ενός shape file το οποίο περιείχε τα υδραυλικά ύψη για τα ρηχά πηγάδια της περιοχής για το μήνα Ιανουάριο του 1996 (Πίνακας 6) με χρήση της μεθόδου παρεμβολής Akima inter/extrapolation για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Το Σχήμα 19 αποτυπώνει τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας. Να σημειωθεί ότι οι αρχικές συνθήκες έχουν τις ίδιες τιμές για όλα τα slices.

Πίνακας 6: Υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στα ρηχά πηγάδια (01/1996)

Κωδικός πηγαδιού	Υδραυλικό ύψος (m)	Κωδικός πηγαδιού	Υδραυλικό ύψος (m)
W4	5.75	W91	-1.52
W5	7.32	W102	7.92
W9	2.58	W103	8.68
W11	0.58	W109	1.08
W13	4.82	W111	11.46
W14	8.15	W113	8.9
W17	4.27	W115	9.73
W21	1.14	W116	8.32
W26	6.78	W119	3.53
W35	-5.21	W122	2.93
W36	-6.11	W123	5.72
W46	4.72	W124	6.49
W51	7.7	W126	8.55
W53	5.83	W127	1.24
W56	3.35	W130	7.76
W60	6.45	W131	2.9
W67	3.49	W133	6.64
W69	3.46	W136	-0.14
W72	1.66	W138	0.59
W79	0.81	W140	11.75
W85	0.59	W142	3.13
W90	-1.47	W143	2.58



Σχήμα 19: Τα αρχικά υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης

4.7.2 Οριακές συνθήκες (Flow Boundaries)

Οριακές συνθήκες 1ου είδους (1st kind)

Οι οριακές συνθήκες αυτού του είδους τοποθετούνται κατά μήκος της ακτογραμμής (Σχήμα 20). Σύμφωνα με τη μέθοδο Density-depend το υδραυλικό ύψος ορίστηκε ίσο με μηδέν για το πρώτο slice, ενώ για τα υπόλοιπα ορίστηκε μία ισοδύναμη με το γλυκό νερό τιμή. Θεωρώντας ως πυκνότητα του θαλασσινού νερού τα 1025 kg/m^3 , ο λόγος πυκνότητας (density ratio, α) στην περίπτωση αυτή προέκυψε ίσος με 0.025. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή των υδραυλικών υψών σε ισοδύναμα υδραυλικά ύψη είναι:

$$h_{eq} = (1 + \alpha)h - \alpha z$$

Όπου,

h_{eq} : η ισοδύναμη τιμή του υδραυλικού ύψους

h : το υδραυλικό ύψος

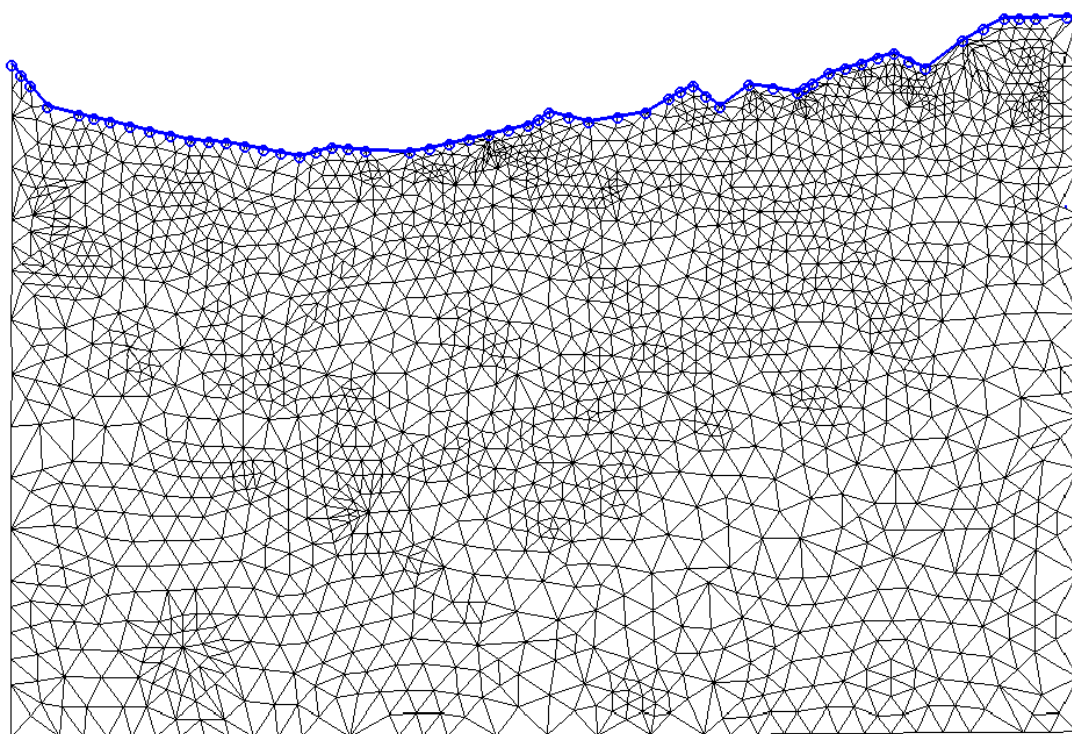
α : ο λόγος πυκνοτήτων

z : το υψόμετρο που αναλογεί σε κάθε slice

Στον Πίνακα 7 εμφανίζονται τα ισοδύναμα υδραυλικά ύψη που προέκυψαν μέσω της προαναφερθείσας εξίσωσης και τα οποία εισήχθησαν στο μοντέλο.

Πίνακας 7: Ισοδύναμο υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στις 1ου είδους οριακές συνθήκες ροής

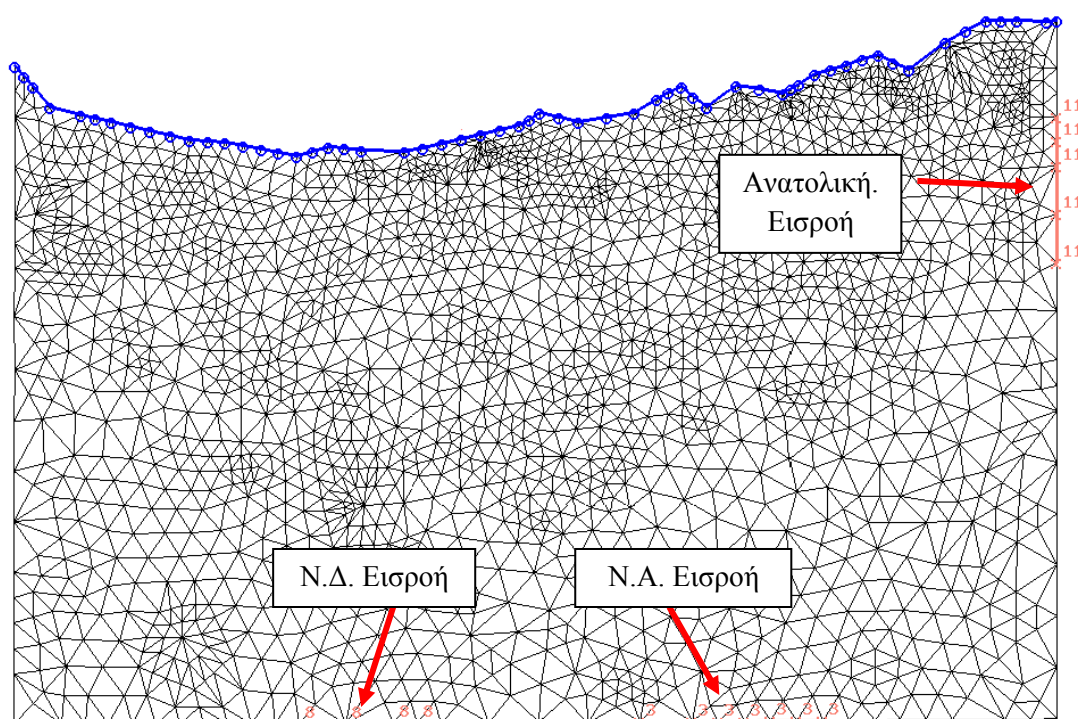
Slice	Υψόμετρο (m)	Υδραυλικό ύψος (m)	Ισοδύναμο υδραυλικό ύψος (m)
1	0	0	0,00
2	-1	0	0,03
3	-10	0	0,25
4	-20	0	0,50
5	-30	0	0,75
6	-40	0	1,00
7	-50	0	1,25
8	-60	0	1,50
9	-70	0	1,75
10	-80	0	2,00
11	-90	0	2,25
12	-100	0	2,50



Σχήμα 20: Οριακές συνθήκες 1ου είδους

Οριακές συνθήκες 2ου είδους (2nd kind)

Οι οριακές συνθήκες αυτού του είδους αφορούν το ρυθμό με τον οποίο εισρέει ή εκρέει νερό από τον υδροφορέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ρυθμοί αυτοί, καθώς δεν ήταν δυνατόν να είναι γνωστοί κατά τη διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων, προέκυψαν μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου και με σύγκριση της κατανομής των υδραυλικών υψών με τις αντίστοιχες κατανομές προηγούμενων μελετών που αφορούσαν την ίδια περιοχή (Παρίτσης, 2001; Καλλέργης κ.α., 2000). Συγκεκριμένα η θέση των νότιων εισροών υποδηλώθηκε από την κατανομή των υδραυλικών υψών στις μελέτες αυτές, γιατί τα μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη εντοπίστηκαν στο νότιο τμήμα και μειωνόταν με κατεύθυνση προς το Βορρά. Η ανατολική εισροή προέκυψε από μετρήσεις υδραυλικών υψών σε πηγάδια του βορειανατολικού άκρου στις οποίες εμφανιζόταν μία αύξηση στις τιμές τους που μπορούσε να εξηγηθεί μόνο με την εισροή νερού στο σύστημα στο συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής. Μετά από πλήθος δοκιμών και επαναλήψεων κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, η θέση αλλά και η τιμή των οριακών συνθηκών του 2^{ου} είδους είναι αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 21 και στον Πίνακα 8. Να σημειωθεί οι τιμές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους, ώστε να ακολουθούν τις εποχιακές διακυμάνσεις, ενώ το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι πραγματοποιείται εισροή ποσοτήτων ύδατος στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 21: Οριακές συνθήκες 2ου είδους

Πίνακας 8: Οριακές συνθήκες 2ου είδους

Slice	Οκτ. - Μαρ. (χειμερινή περίοδος)			Απρ.- Σεπτ. (θερινή περίοδος)		
	Ανατολική εισροή (m/d)	N.A. εισροή (m/d)	N.Δ. εισροή (m/d)	Ανατολική εισροή (m/d)	N.A. εισροή (m/d)	N.Δ. εισροή (m/d)
1	-0,01	-0,01	-0,01	-0,007	-0,007	-0,007
2	-0,02	-0,02	-0,05	-0,009	-0,009	-0,01
3	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
4	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
5	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
6	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
7	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
8	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
9	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
10	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
11	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5
12	-0,5	-0,2	-0,7	-0,2	-0,09	-0,5

Οριακές συνθήκες 4ου είδους (4th kind)

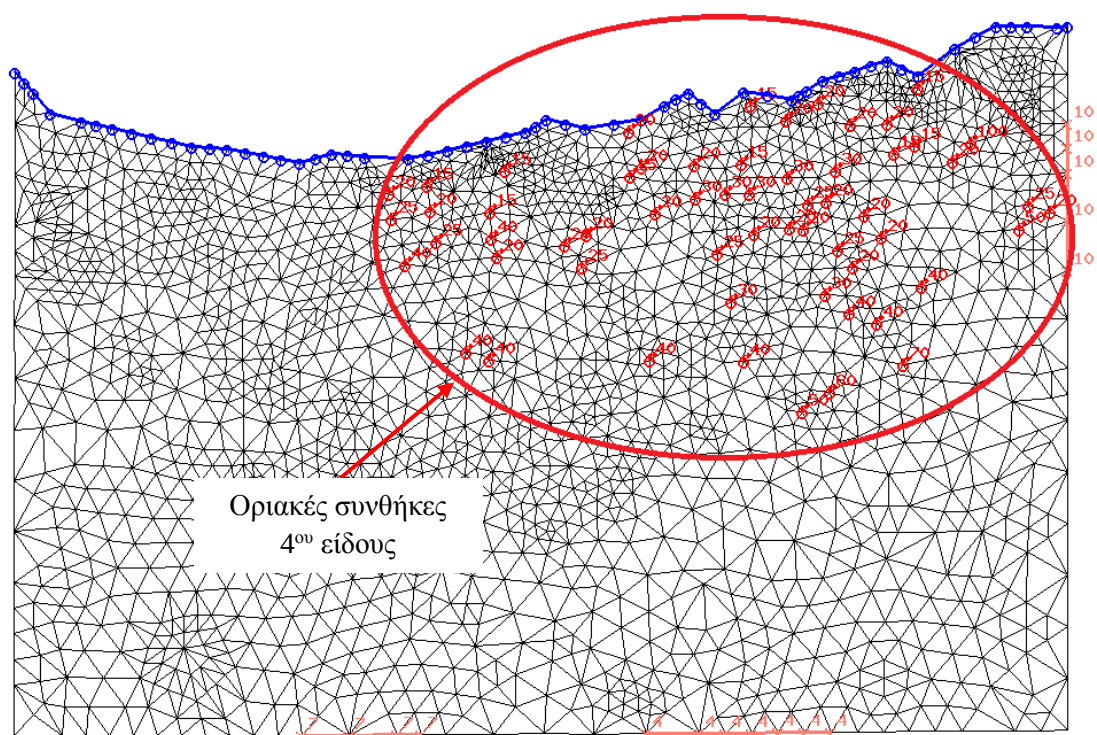
Στις συνθήκες αυτού του είδους ανήκουν οι πηγές, τα πηγάδια και οι γεωτρήσεις. Τα δεδομένα που εισάγονται αφορούν την παροχή άντλησης για τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις και την ποσότητα ύδατος που εκφορτίζουν για τις πηγές. Στο μοντέλο εισάγεται και η εποχιακή διακύμανση των παροχών, καθώς όλα τα πηγάδια και ορισμένες γεωτρήσεις αντλούν μόνο κατά τη θερινή περίοδο (Σχήματα 22 και 23). Οι τιμές των παροχών (Πίνακας 9) αντιστοιχούν σε ένα έτος, όμως με την επιλογή cyclic το μοντέλο επαναλαμβάνει την ίδια διακύμανση για κάθε έτος της προσομοίωσης. Κάθε πηγάδι ή γεώτρηση αναλόγως με το βάθος από το οποίο αντλεί, τοποθετείται και στο κατάλληλο slice. Όσο αφορά τις τιμές των εκφορτίσεων των πηγών (Πίνακας 10), αποτελούν μετρήσεις για την περίοδο 1996-1999, οι οποίες εισάγονται ως χρονοσειρές (Σχήμα 24) και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ξανά η επιλογή cyclic (Σχήμα 24) για την επέκταση των τιμών σε όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης.

Πίνακας 9: Παροχές άντλησης, περίοδος λειτουργίας και θέση των πηγαδιών και των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης

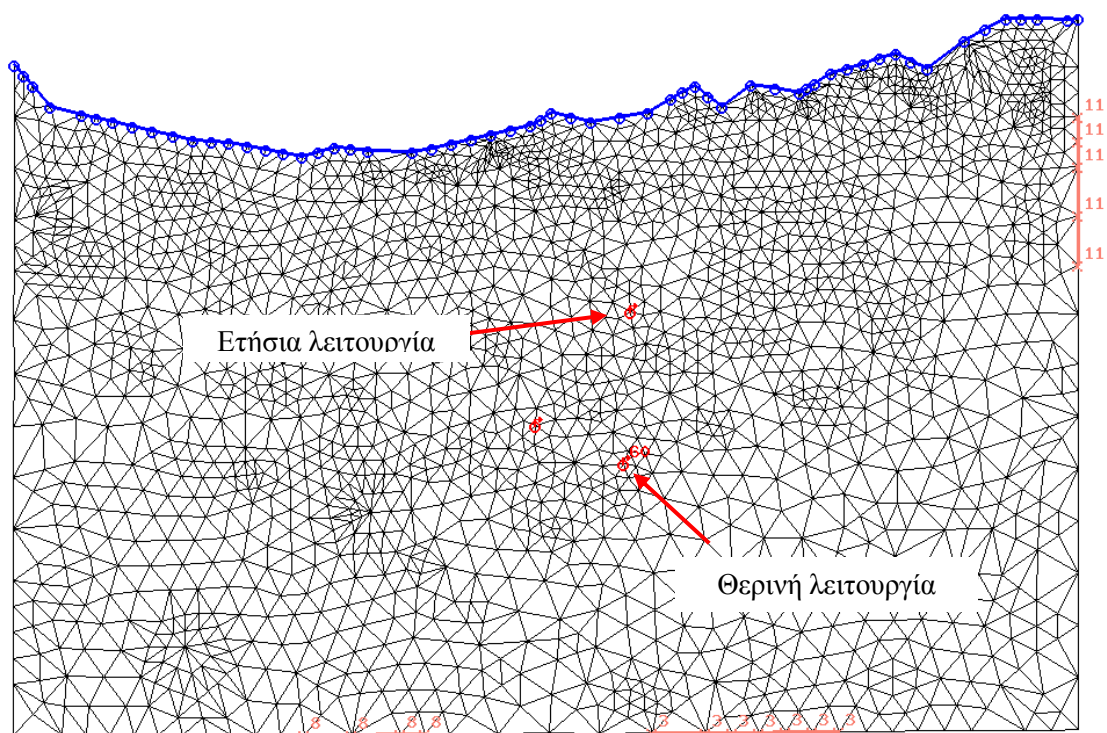
Οκτ. - Μαρ. (χειμερινή περίοδος)		Απρ.- Σεπτ. (θερινή περίοδος)		
Κωδικός γεώτρησης	Παροχή (m ³ /h)	Παροχή (m ³ /d)	Περίοδος λειτουργίας	Slice
W1	40	960	θερινή	1,2
W4	25	600	θερινή	1,2
W5	25	600	θερινή	1,2
W9	20	480	θερινή	1,2
W11	15	360	θερινή	1,2
W12	20	480	θερινή	1,2
W13	15	360	θερινή	1,2
W14	40	960	θερινή	1,2
W16	20	480	θερινή	1,2
W17	15	360	θερινή	1,2
W21	15	360	θερινή	1,2
W26	20	480	θερινή	1,2
W27	25	600	θερινή	1,2
W35	15	360	θερινή	1,2
W36	20	480	θερινή	1,2
W46	20	480	θερινή	1,2
W51	20	480	θερινή	1,2
W53	20	480	θερινή	1,2
W56	20	480	θερινή	1,2
W60	30	720	θερινή	1,2
W67	30	720	θερινή	1,2
W69	15	360	θερινή	1,2
W72	20	480	θερινή	1,2
W79	20	480	θερινή	1,2
W84	30	720	θερινή	1,2
W85	30	720	θερινή	1,2
W91	20	480	θερινή	1,2
W102	15	360	θερινή	1,2
W103	15	360	θερινή	1,2
W108	20	480	θερινή	1,2
W109	15	360	θερινή	1,2
W111	100	2400	θερινή	1,2
W113	20	480	θερινή	1,2
W116	25	600	θερινή	1,2
W115	20	480	θερινή	1,2
W119	30	720	θερινή	1,2
W122	25	600	θερινή	1,2
W123	25	600	θερινή	1,2
W124	25	600	θερινή	1,2
W126	20	480	θερινή	1,2

Κωδικός γεώτρησης	Παροχή (m ³ /h)	Παροχή (m ³ /d)	Περίοδος λειτουργίας	Slice
W127	20	480	θερινή	1,2
W130	20	480	θερινή	1,2
W131	20	480	θερινή	1,2
W133	20	480	θερινή	1,2
W136	20	480	θερινή	1,2
W138	20	480	θερινή	1,2
W140	30	720	θερινή	1,2
W143	30	720	θερινή	1,2
W145	40	960	θερινή	1,2
W146	40	960	θερινή	1,2
B1	50	1200	θερινή	1,2
B5	40	960	θερινή	1,2
B6	40	960	θερινή	1,2
B7	40	960	θερινή	1,2
B9	70	1680	θερινή	1,2
B16	50	1200	θερινή	1,2
B17	60	1440	θερινή	1,2
B18	40	960	θερινή	1,2
Petsalakis	40	960	θερινή	1,2
G.MA.1	65	1560	ετήσια	3,4
G.MA.3	60	1440	θερινή	3,4
D66	50	1200	ετήσια	3,4
G.MA.4	20	480	θερινή	5,6
G.MA.2	100	2400	ετήσια	6,7
G.MA.5	40	960	θερινή	6,7
G.MA.8	30	720	ετήσια	6,7
G.ST.12	32	768	ετήσια	6,7
G.ST.13	13	312	ετήσια	6,7
N1	50	1200	ετήσια	6,7
N2	60	1440	ετήσια	6,7
N3A	60	1440	ετήσια	6,7
N3B	60	1440	ετήσια	6,7
N4	60	1440	ετήσια	6,7
N5	50	1200	ετήσια	6,7
N6	60	1440	ετήσια	6,7
N8	85	2040	ετήσια	6,7
N9	10	240	ετήσια	6,7
Dhmos Xersonhsou	80	1920	θερινή	6,7
Dhmos Xersonhsou 2	40	960	θερινή	6,7
Dhmos Maliwn	82	1968	θερινή	6,7

Κωδικός γεώτρησης	Παροχή (m ³ /h)	Παροχή (m ³ /d)	Περίοδος λειτουργίας	Slice
Stamna	50	1200	ετήσια	6,7
G.ST.9	12	288	ετήσια	8,9
G.MA.7	40	960	ετήσια	8,9
G.ST.11	23	552	ετήσια	9,10
G.ST.8	11	264	ετήσια	10,11
G.MA.6	54	1296	ετήσια	10,11
D42	10	240	ετήσια	11,12



Σχήμα 22: Οριακές συνθήκες 4ου είδους για το slice 2

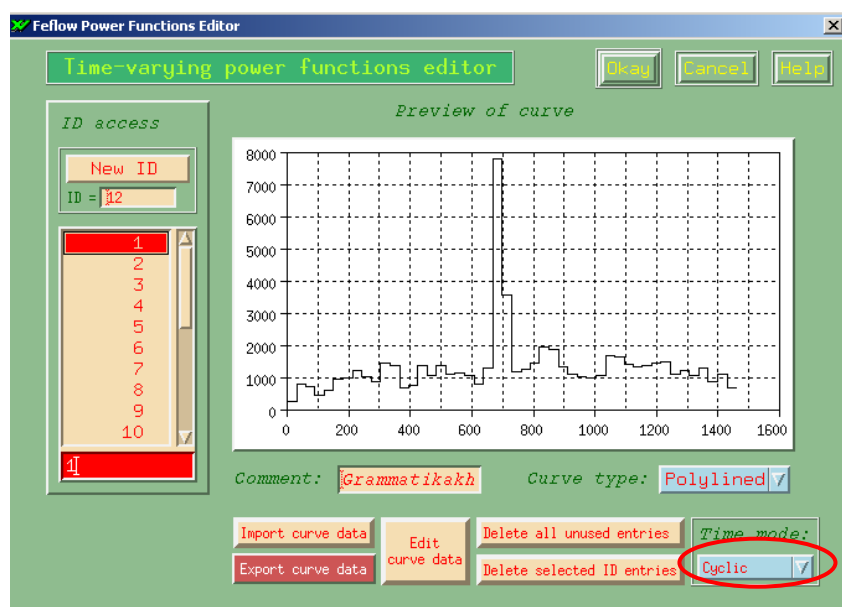


Σχήμα 23: Οριακές συνθήκες 4ου είδους

Πίνακας 10: Ρυθμοί εκφορτίσεων πηγών

Ημερομηνία	Ρυθμοί εκφορτίσεων (m ³ /d)	
	Πηγή Γραμματικάκη	Πηγή Αλμυρού
Ιαν-96	259.2	2072.64
Φεβ-96	794.4	1271.76
Μαρ-96	739.2	432
Απρ-96	468	125.28
Μαϊ-96	602.4	21.6
Ιουν-96	945.6	0
Ιουλ-96	981.6	0
Αυγ-96	1245.6	0
Σεπ-96	1020	0
Οκτ-96	880.8	0
Νοε-96	1452	0
Δεκ-96	1399.2	107.04
Ιαν-97	691.2	299.76
Φεβ-97	777.6	1791.84
Μαρ-97	1372.8	3179.52
Απρ-97	1063.2	1479.12
Μαϊ-97	1372.8	249.6
Ιουν-97	1106.4	39.84
Ιουλ-97	1140	0
Αυγ-97	1070.4	0
Σεπ-97	820.8	0

Ημερομηνία	Ρυθμοί εκφορτίσεων (m ³ /d)	
	Πηγή Γραμματικάκη	Πηγή Αλμυρού
Οκτ-97	1305.6	0
Δεκ-97	3585.6	642.72
Ιαν-98	1209.6	1201.92
Φεβ-98	1269.6	616.8
Μαρ-98	1452	2585.04
Απρ-98	1960.8	2695.68
Μαϊ-98	1874.4	688.56
Ιουν-98	1348.8	59.52
Ιουλ-98	1096.8	4.32
Αυγ-98	1036.8	0
Σεπ-98	1008	0
Οκτ-98	1094.4	220.08
Νοε-98	1684.8	432.24
Δεκ-98	1636.8	495.84
Ιαν-99	1435.2	498.24
Φεβ-99	1353.6	502.32
Μαρ-99	1370.4	323.04
Απρ-99	1449.6	204.72
Μαϊ-99	1488	36.96
Ιουν-99	1132.8	0
Ιουλ-99	1219.2	0
Αυγ-99	1068	0
Σεπ-99	1293.6	0
Οκτ-99	895.2	0
Νοε-99	1101.6	168.48
Δεκ-99	693.6	330.96



Σχήμα 24: Χρονοσειρά που αφορά την πηγή Γραμματικάκη

4.7.3 Υδραυλική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών

Το μενού Flow Materials επιτρέπει τον ορισμό της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}) που αντιστοιχεί σε κάθε είδος εδαφικού σχηματισμού που απαντάται στην περιοχή μελέτης για το ανώτερο στρώμα (Πίνακας 11). Να σημειωθεί ότι για τα layers 2-11, η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας ισούται με 0.0001 m/d, καθώς τα Ανθρακικά Ιουρασσικού-Κρητιδικού αποτελούν το μοναδικό είδος γεωλογικού σχηματισμού στα αντίστοιχα βάθη. Να σημειωθεί ότι θεωρήθηκε πως $K_{xx}=K_{yy}=0.1 \cdot K_{zz}$ βάση εμπειρικών δεδομένων.

Πίνακας 11: Υδραυλική αγωγιμότητα εδαφικών σχηματισμών της περιοχής (για το ανώτερο εδαφικό στρώμα)

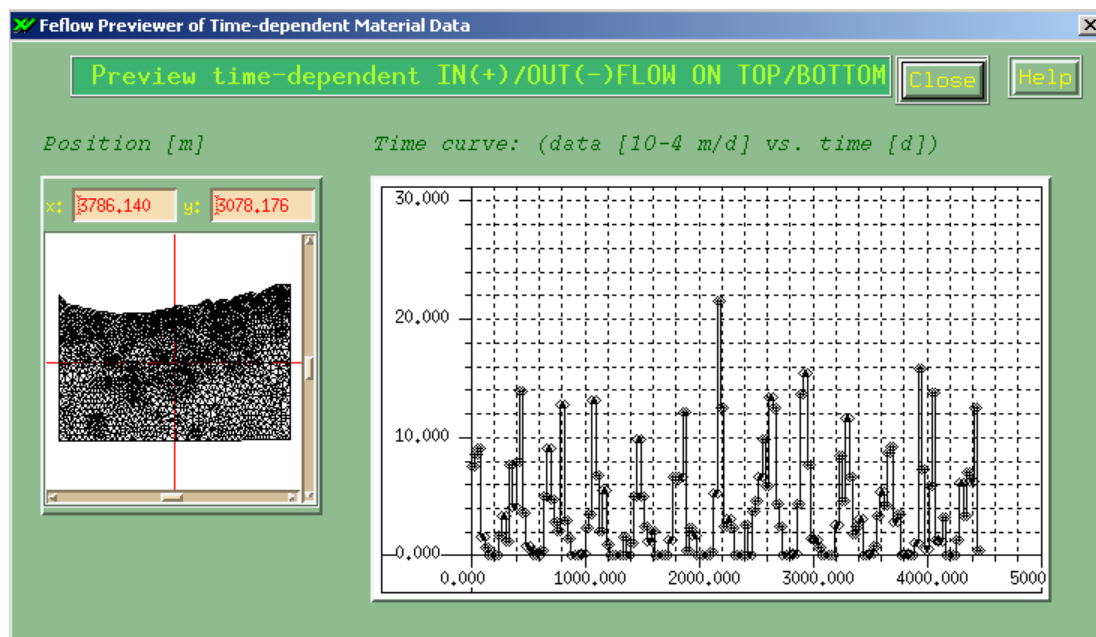
Είδος πετρώματος	K_{xx} (m/s)	K_{yy} (m/s)	K_{zz} (m/s)
Παράκτια ιζήματα (Beach sand)	0.001	0.001	0.0001
Μάργες (Bioclastic Limestones)	0.00001	0.00001	0.000001
Πλευρικά Κορήματα (Talus cones)	0.005	0.005	0.0005
Αλλουβιακές αποθέσεις (Alluvial deposits)	0.001	0.001	0.0001
Ζώνη Τρίπολης - Ανθρακικά Ιουρασσικού - Κρητιδικού (Limestones Jurassic - Critidic)	0.0001	0.0001	0.00001
Ζώνη Τρίπολης - Ανθρακικά Τριαδικού -Ιουρασσικού (Limestones Triassic -Jurassic)	0.00001	0.00001	0.000001
Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά (Phyllites - Quartzites)	0.0000001	0.0000001	0.00000001

4.7.4 Διηθούμενη ποσότητα ύδατος από βροχοπτώσεις

Κάθε είδος εδαφικού σχηματισμού επιτρέπει τη διήθηση διαφορετικού ποσοστού ύδατος από εκείνο που προκύπτει από τις βροχοπτώσεις. Για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης κατασκευάστηκαν χρονοσειρές (Σχήμα 25) οι οποίες περιέχουν τις διακυμάνσεις των διηθούμενων ποσοτήτων σε κάθε σημείο της περιοχής για την περίοδο από 01/1996 έως 03/2008. Οι τιμές προέκυψαν από τον πολλαπλασιασμό των μηνιαίων μέσων όρων βροχόπτωσης (Παράρτημα) με τον αντίστοιχο συντελεστή διήθησης (Πίνακας 12) ανάλογα με τον εδαφικό σχηματισμό στον οποίο ανήκει το κάθε σημείο. Οι συντελεστές διήθησης για κάθε σχηματισμό είναι εκτιμήσεις βασισμένες στη μελέτη των Καλλέργη κ.α. (2000).

Πίνακας 12: Συντελεστές διήθησης των διαφόρων εδαφικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης

Είδος σχηματισμού	Είδος πετρώματος	Συντελεστής διήθησης
Ανθρακικά ενότητας Τρίπολης (Limestones)	Ανθρακικά Τριαδικού -Ιουρασσικού, Ανθρακικά Ιουρασσικού - Κρητιδικού	0.440
Νεογενή (Neogenic)	Παράκτια ιζήματα, Μάργες	0.215
Τεταρτογενή (Quaternary)	Πλευρικά Κορήματα, Αλλουβιακές αποθέσεις	0.150
Φυλλίτες (Phyllites)	Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά	0.050



Σχήμα 25: Χρονοσειρά διηθούμενης ποσότητας ύδατος

4.8 Δεδομένα μεταφοράς μάζας (Mass Transport Data)

4.8.1 Αρχικές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας (Mass Initials)

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής η αρχική συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων (για χρόνο $t=0$ d) σε όλη την έκταση της περιοχής, ορίστηκε να είναι ίση με 0 mg/L .

4.8.2 Οριακές συνθήκες για τη μεταφορά μάζας (Mass Boundaries)

Για τη μεταφορά μάζας έγινε χρήση μόνο οριακών συνθηκών 1^{ου} είδους. Κατά μήκος της ακτογραμμής η συγκέντρωση των χλωριούχων ιόντων ορίστηκε ίση με 18980 mg/L (τιμή συγκέντρωσης χλωριούχων ιόντων στο θαλασσινό νερό), ενώ τέθηκε και ένας αντίστοιχος περιορισμός (constraint) μηδενικής ροής μάζας ($Q_c^{min} = 0$, constraint of zero mass flux) ώστε στα ανώτερα στρώματα του μοντέλου (όπου πραγματοποιείται εκροή γλυκού νερού) η τιμή της συγκέντρωσης των χλωριόντων να υπολογίζεται από το μοντέλο και να μην θεωρείται ίση με αυτή που εισέρχεται στο μοντέλο στα κατώτερα στρώματα (όπου πραγματοποιείται εισροή θαλασσινού νερού).

4.8.3 Πρόσθετες παράμετροι

Για την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων που αφορούν τη μεταφοράς μάζας, το πορώδες ορίστηκε παντού ίσο με 0.3, ο συντελεστής διάχυσης ίσος με 10^{-7} m²/s και τέλος η διαμήκης και η εγκάρσια ικανότητα διασποράς ίσες με 40 m και 4 m αντιστοίχως. Οι τιμές αυτές είναι αποτέλεσμα της βαθμονόμησης του μοντέλου.

4.9 Ρήγματα (Discrete Elements)

Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή διακρίνεται από την ύπαρξη πολλαπλών ρηγμάτων επομένως για την επίτευξη μίας άρτιας προσομοίωσης της υπόγειας ροής καθώς και για τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης, είναι αναγκαία η εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν στα ρήγματα. Ο ορισμός της θέσης των ρηγμάτων έγινε με χρήση δισδιάστατων, τριγωνικών, οριζόντιων στοιχείων (2D triangular horizontal elements). Ο νόμος που εφαρμόστηκε είναι του Haagen – Poiseuille, το πάχος και το άνοιγμα των ρηγμάτων ορίστηκε ίσο με 0.005 m, ο συντελεστής διάχυσης ίσος με 10^{-7} m²/s και τέλος η διαμήκης και η εγκάρσια ικανότητα διασποράς ίσες με 40 m και 4 m αντιστοίχως. Είναι βασική η αναφορά της σύνδεσης ορισμένων ρηγμάτων με τη θάλασσα. Στην περίπτωση αυτών των ρηγμάτων ορίστηκε και ένας ρυθμός πηγής θαλασσινού νερού ο οποίος κυμαινόταν από 6-25 g/m³/d και προέκυψε μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Οι διαφορετικές τιμές του ρυθμού πηγής βασίστηκαν σε χημικές αναλύσεις που είχαν πραγματοποιηθεί σε πηγάδια της ενδοχώρας, στις οποίες εμφανίστηκαν τιμές συγκεντρώσεων άνω των 1000 mg/L. Σε όλα τα υπόλοιπα ρήγματα που δεν συνδέονται με τη θάλασσα, η τιμή του ρυθμού αυτού ορίστηκε μηδενική.

5 Αποτελέσματα – Βαθμονόμηση μοντέλου

Είναι σχεδόν αδύνατη η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων που απαιτούνται για τη μοντελοποίηση και για το λόγο αυτό πριν χρησιμοποιηθεί το κάθε μοντέλο θα πρέπει να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Κατά τη βαθμονόμηση επιλέγεται μία χρονική περίοδος και τα αντίστοιχα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την βελτίωση των αρχικών εκτιμήσεων που αφορούν τις ιδιότητες του υδροφορέα, τις εισροές και τις εκροές, τον καθορισμό ορίων και οριακών συνθηκών μέχρις ότου επιτευχθεί μία ικανοποιητική συμφωνία των πραγματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Το πλήθος των επαναλήψεων ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη συμφωνία, εξαρτάται από τον στόχο της ανάλυσης, την πολυπλοκότητα του συστήματος και τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα (Karanth, 1987).

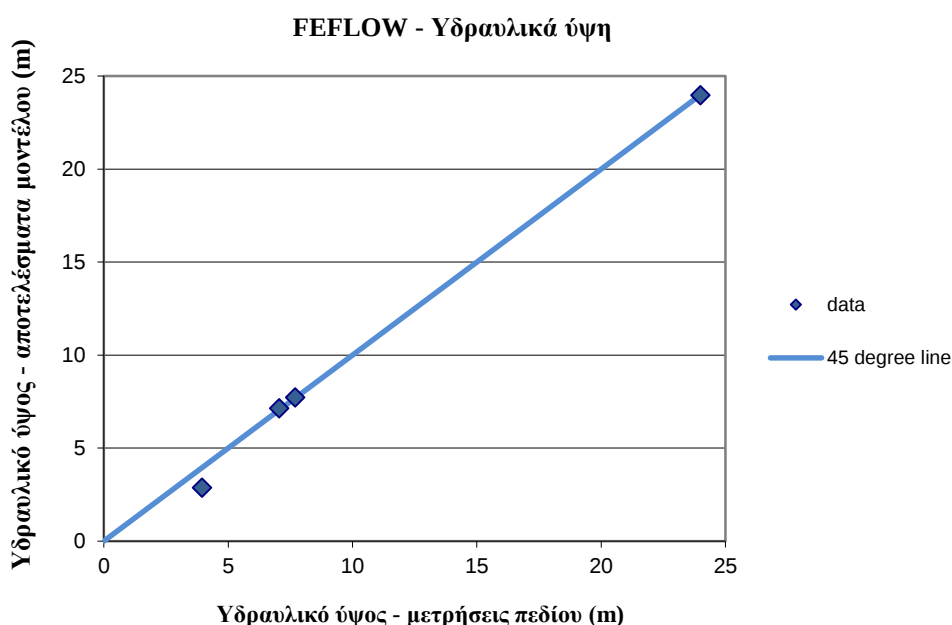
Στη συγκεκριμένη περίπτωση η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για το διάστημα από 01/01/1996 έως 31/3/2008. Τα δεδομένα από την περιοχή μελέτης ήταν ελλιπή σε πολλές περιπτώσεις και οι μετρήσεις δεν πραγματοποιούνταν σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το μεγάλο πλήθος των ιδιωτικών πηγαδιών και γεωτρήσεων στις οποίες η πρόσβαση για συλλογή στοιχείων δεν ήταν δυνατή, δυσχέραινε περαιτέρω την κατάσταση. Τα προαναφερθέντα γεγονότα σε συνδυασμό με τα πολλαπλά ρήγματα αλλά και το μεγάλο αριθμό των παραμέτρων των οποίων οι τιμές προέκυψαν από τη βαθμονόμηση, κατέστησαν αναγκαία την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού επαναλήψεων της διαδικασίας προσομοίωσης, ώστε να επιτευχθεί η συμφωνία των τιμών του μοντέλου με των αντίστοιχων του πεδίου τόσο για τα υδραυλικά ύψη όσο και για τις συγκεντρώσεις των χλωριούχων ιόντων που είναι υπεύθυνα για το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

5.1 Μοντελοποίηση της ροής

Παρά το μεγάλο αριθμό των πηγαδιών και γεωτρήσεων, τα δεδομένα πεδίου τα οποία ήταν διαθέσιμα και κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν στη βαθμονόμηση, ήταν λίγα. Οι μετρήσεις του υδραυλικού ύψους στις περισσότερες περιπτώσεις, είτε ήταν κατά πολύ προγενέστερες από την επιθυμητή ημερομηνία (03/2008), είτε είχαν ληφθεί ενώ η γεώτρηση αντλούσε με αποτέλεσμα να θεωρούνται ακατάλληλες, είτε δεν υπήρχαν καθόλου λόγω βλάβης του οργάνου μέτρησης. Μετά από μία διαδικασία συλλογής και διαλογής των δεδομένων αποφασίστηκε η χρήση των μετρήσεων από τις γεωτρήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13. Μετά το τέλος της βαθμονόμησης, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 26, επιτεύχθηκε συμφωνία των τιμών του πεδίου με τις αντίστοιχες του μοντέλου σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς το R^2 είναι ίσο με 0.997.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τα υδραυλικά ύψη

Ονομασία γεώτρησης	Υδραυλικό ύψος (m)		R ²
	Μέτρηση πεδίου	Αποτέλεσμα μοντέλου	
G.MA.1	7.05	7.14	0.997
G.MA.6	7.70	7.73	
G.MA.4	24.00	23.98	
G.ST.13	3.95	2.87	

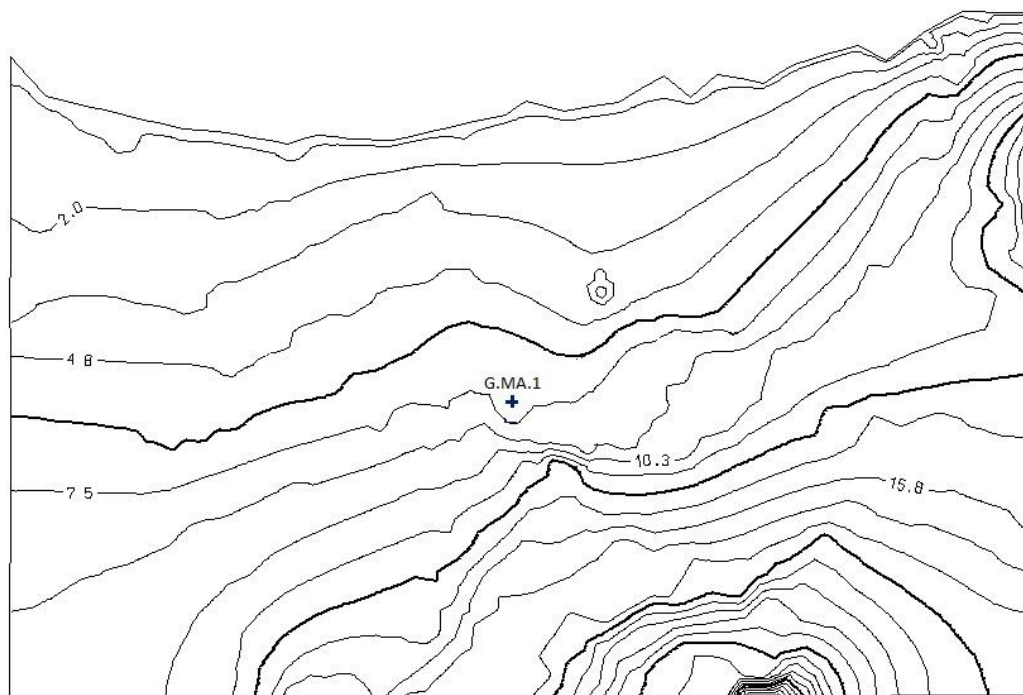


Σχήμα 26: Σύγκριση των τιμών του υδραυλικού ύψους από το πεδίο με τις αντίστοιχες του μοντέλου

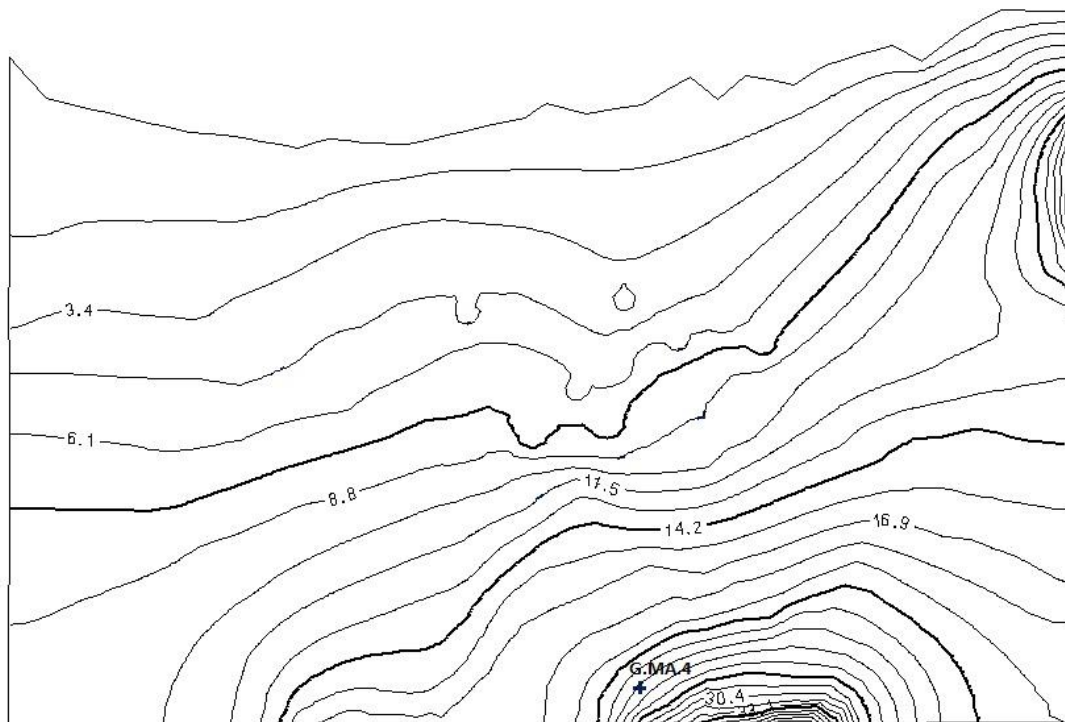
Στη συνέχεια στα Σχήματα 27, 28, 29 και 30 παρουσιάζεται η κατανομή των υδραυλικών υψών για τα slice στα οποία αντιστοιχούν οι γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση. Η επίδραση των εισροών στην κατανομή των υδραυλικών υψών είναι φανερή. Το υδραυλικό ύψος αποκτά τη μέγιστη τιμή του στην περιοχή της νοτιοανατολικής εισροής, ενώ και οι άλλες δύο εισροές προκαλούν τοπικές αυξήσεις στην τιμή του. Στη συνέχεια, τα υδραυλικά ύψη μειώνονται καθώς προσεγγίζουν την ακτογραμμή με κατεύθυνση προς το Βορρά. Επίσης παρατίθενται στα Σχήματα 31 και 32 οι κατανομές του υδραυλικού ύψους για το slice 1 σε περίοδο άντλησης και σε περίοδο μη άντλησης νερού από τα πηγάδια και τις γεωτρήσεις που λειτουργούν μόνο κατά τη θερινή περίοδο. Η εποχιακή διακύμανση της κατανομής οφείλεται κυρίως στη λειτουργία των πρόσθετων πηγαδιών και γεωτρήσεων κατά τη

θερινή περίοδο, καθώς τα σημεία από τα οποία αντλούν τα πηγάδια κατά τη θερινή περίοδο, γίνονται αμέσως εμφανή μέσω του κώνου πτώσης στάθμης που δημιουργείται, ενώ είναι εμφανής και η μείωση που προκαλείται γενικότερα στις τιμές των υδραυλικών υψών.

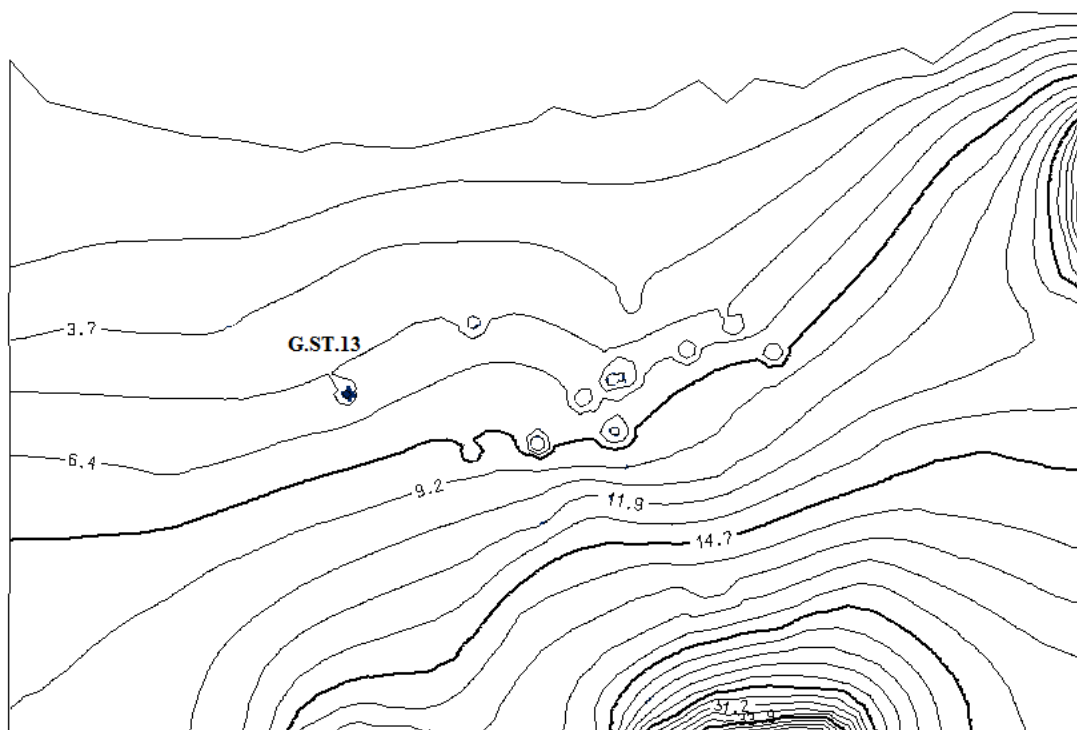
Αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι κατά τις πρώτες προσπάθειες βαθμονόμησης του μοντέλου πριν την εισαγωγή των στοιχείων για τα ρήγματα, οι τιμές του μοντέλου και του πεδίου παρουσίαζαν πολύ μεγάλες διαφορές παρά τις αλλαγές που πραγματοποιούνταν στις παραμέτρους σε κάθε επανάληψη.



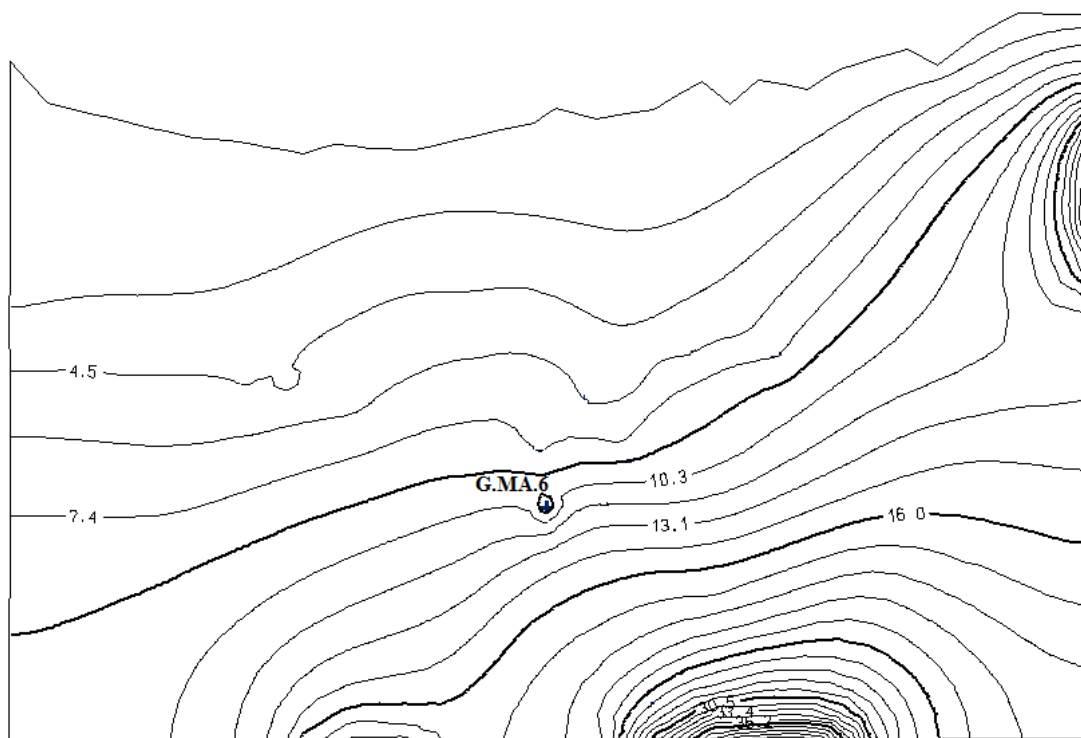
Σχήμα 27: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 3 (03/2008)



Σχήμα 28: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 5 (03/2008)



Σχήμα 29: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 6 (03/2008)



Σχήμα 30: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 10 (03/2008)



Σχήμα 31: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 1 κατά τη χειμερινή περίοδο (03/2008)



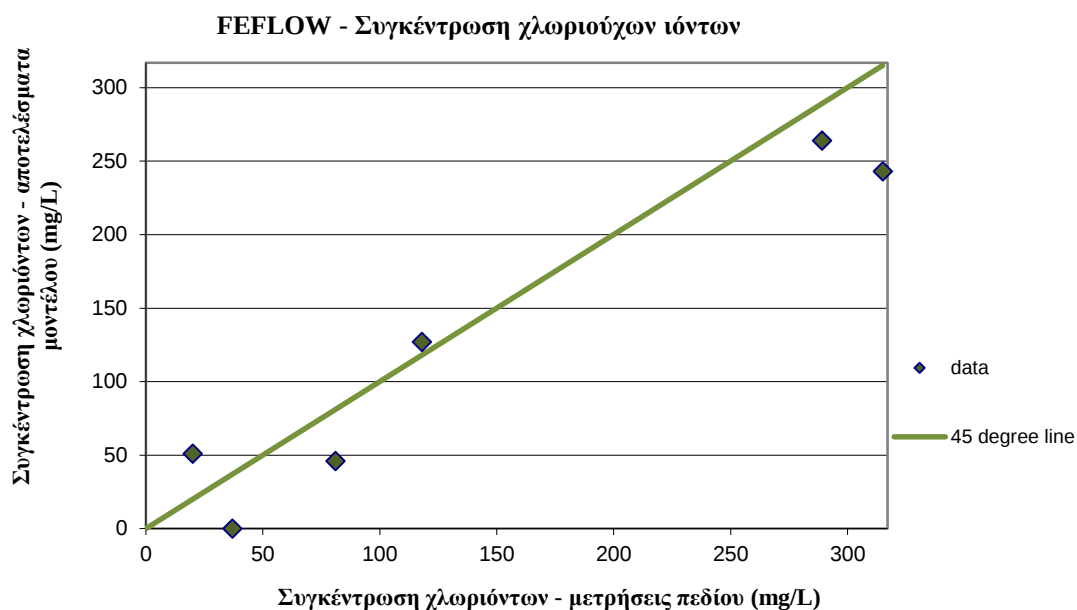
Σχήμα 32: Κατανομή υδραυλικού ύψους για το slice 1 κατά τη θερινή περίοδο (07/2007)

5.2 Εξέταση του φαινομένου της υφαλμύρισης

Αντίστοιχη με την περίπτωση των μετρήσεων του υδραυλικού ύψους, ήταν και εκείνη των μετρήσεων της συγκέντρωσης των χλωριούχων ιόντων. Επομένως, ξανά ήταν αναγκαία η πραγματοποίηση μίας διαδικασίας διαλογής από την οποία επιλέχτηκαν οι τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 14. Ωστόσο, οι τιμές πεδίου που δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση, παρείχαν μία γενική εικόνα για την κατανομή των συγκεντρώσεων, η οποία λήφθηκε υπόψη κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Μετά το τέλος της βαθμονόμησης, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 33, επιτεύχθηκε συμφωνία των τιμών του πεδίου με τις αντίστοιχες του μοντέλου σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς το R^2 είναι ίσο με 0.929.

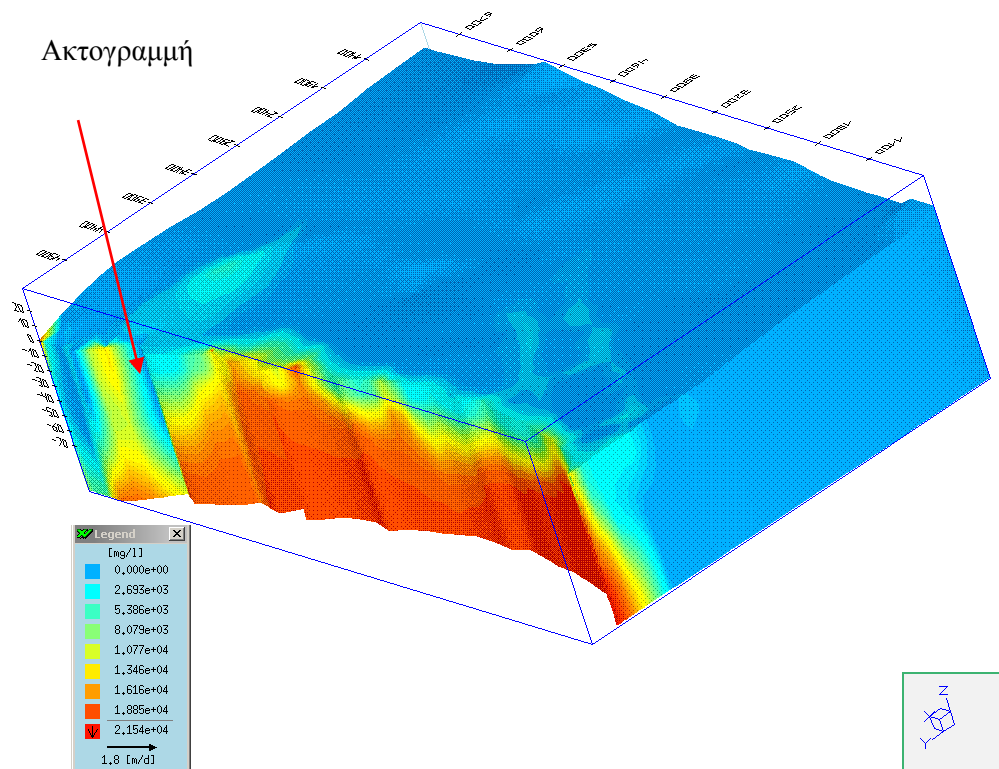
Πίνακας 14: Αποτελέσματα βαθμονόμησης για τις συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων

Ονομασία γεώτρησης	Συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων(mg/L)		R^2
	Μέτρηση πεδίου	Αποτέλεσμα μοντέλου	
G.MA.1	289.00	264.00	0.929
G.MA.3	20.00	51.00	
G.MA.6	37.00	0.00	
G.ST.9	81.00	46.00	
G.ST.12	315.00	243.00	
G.ST.8	118.00	127.00	

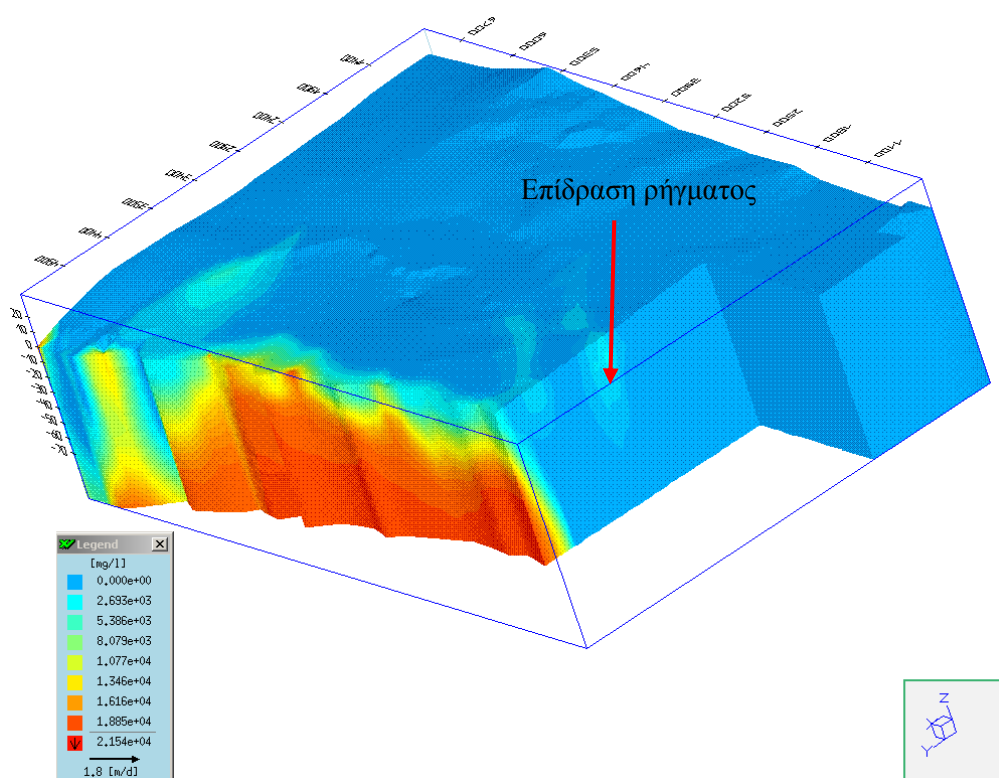


Σχήμα 33: Σύγκριση των τιμών της συγκέντρωσης χλωριούχων ιόντων από το πεδίο με τις αντίστοιχες του μοντέλου

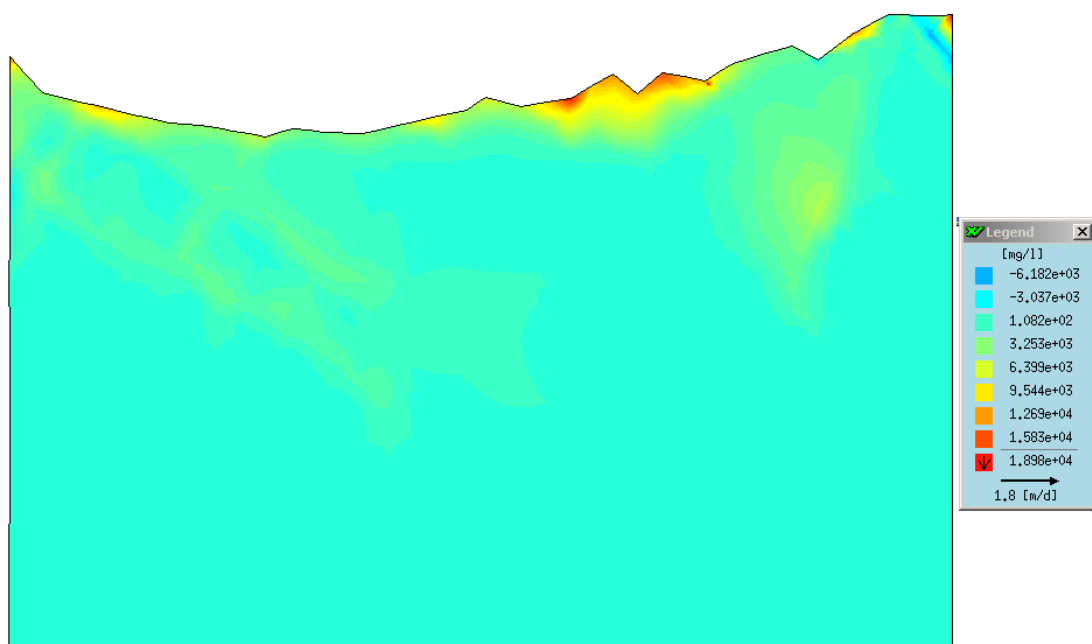
Στη συνέχεια στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται μία τρισδιάστατη κατανομή των συγκεντρώσεων των χλωριούχων ιόντων, ενώ στο Σχήμα 35 εμφανίζεται η ίδια κατανομή έχοντας πραγματοποιήσει όμως μία τομή, ώστε να τονίζεται η επίδραση των ρηγμάτων και σε ποιο βάθος περίπου φτάνει. Τα ρήγματα και στην περίπτωση της συγκέντρωσης των χλωριούχων ιόντων, διαδραμάτισαν πολύ σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωση της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Ειδικότερα, η προσθήκη της παραμέτρου της πηγής στα ρήγματα που συνδέονται με τη θάλασσα ήταν ο μόνος τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκαν οι επιθυμητές συγκεντρώσεις στην ενδοχώρα της περιοχής. Όπως παρατηρείται, το μέτωπο της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει σε όλο το μήκος της ακτογραμμής, εκτός από ένα τμήμα του βορειοανατολικού άκρου κυρίως λόγω της ανατολικής ροής που τροφοδοτεί την περιοχή αυτή. Παράλληλα, η επίδραση του μεγάλου αριθμού των πηγαδιών στο βορειοανατολικό τμήμα της γίνεται εμφανής στο Σχήμα 36, καθώς το μέτωπο της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει σε μεγαλύτερη έκταση, τριπλάσια σχεδόν από την αντίστοιχη του βορειοδυτικού τμήματος. Η εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα έχει πραγματοποιηθεί, όπως είναι εμφανές, μέσω των ρηγμάτων, των οποίων η επίδραση εντοπίζεται σε αρκετά μεγάλο βάθος. Λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των πηγαδιών και γεωτρήσεων που αντλούν στην ευρύτερη περιοχή των ρηγμάτων που συνδέονται με τη θάλασσα, εξάγεται το συμπέρασμα πως αρκετά από αυτά ήδη θα πρέπει να αντλούν νερό με υψηλές συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων, καθιστώντας το ακατάλληλο για την κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών.



Σχήμα 34: Τρισδιάστατη απεικόνιση κατανομή της συγκέντρωσης των χλωριούχων ενώσεων (03/2008)



Σχήμα 35: Τρισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της συγκέντρωσης των χλωριούχων ενώσεων (03/2008)



Σχήμα 36: Δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής της συγκέντρωσης των χλωριούχων ενώσεων για το slice 1 (03/2008)

6 Συμπεράσματα

Η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτέλεσε μία σύνθετη και χρονοβόρα διαδικασία λόγω του ιδιάζοντος χαρακτήρα της περιοχής μελέτης. Η δυσκολία εντοπίζεται σε παράγοντες όπως η έλλειψη δεδομένων με αποτέλεσμα πολλές παράμετροι να προκύπτουν μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης, το μεγάλο πλήθος των γεωτρήσεων και πηγαδιών για τα οποία δεν υπήρχαν στοιχεία και η ύπαρξη πολλαπλών ρηγμάτων τα οποία διέτρεχαν σχεδόν όλη την έκταση της υπό εξέταση περιοχής. Η επιλογή επίσης των απαιτούμενων μετρήσεων του πεδίου που θα αντιπαραβαλλόταν με τις αντίστοιχες τιμές του μοντέλου για την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης, δεν απέδωσε μεγάλο πλήθος δεδομένων τα οποία να πληρούν τα χρονικά κριτήρια. Ωστόσο, μετά από πλήθος επαναλήψεων η συμφωνία που επιτεύχθηκε ανάμεσα στις τιμές του πεδίου και στις τιμές του μοντέλου ήταν ικανοποιητική, καθώς το R^2 που προέκυψε ήταν μεγαλύτερο του 0.8. Για την ακρίβεια το R^2 υπολογίστηκε 0.997 και 0.929 για τα υδραυλικά ύψη και τη συγκέντρωση χλωριούχων ιόντων αντιστοίχως.

Όσο αφορά την κατανομή των υδραυλικών υψών, οι κύριοι παράγοντες διαμόρφωσής της ήταν οι εισροές από τα όρια της περιοχής μελέτης, η θέση των ρηγμάτων και το καθεστώς άντλησης (παροχές άντλησης, περίοδος λειτουργίας). Οι μεγαλύτερες τιμές υδραυλικών υψών εντοπίζονται στο νοτιοανατολικό άκρο ως αποτέλεσμα της εισροής που πραγματοποιείται στην περιοχή αυτή. Οι τιμές στη συνέχεια μειώνονται με βόρεια κατεύθυνση μέχρι την ακτογραμμή. Η ανατολική και η νοτιοδυτική εισροή προκαλούν αντίστοιχα τοπική αύξηση των υδραυλικών υψών με κυριότερη την επίδραση της ανατολικής ροής. Τα ρήγματα στην περιοχή μελέτης αποτέλεσαν βασική παράμετρο, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις η επίτευξη συμφωνίας μεταξύ των τιμών του πεδίου και του μοντέλου δεν ήταν δυνατή παρά τις επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν. Αμέσως μετά την εισαγωγή των ρηγμάτων στο μοντέλο, η κατανομή των υδραυλικών υψών παρουσίασε μικρότερη απόκλιση από τις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο.

Η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης μέσω της βαθμονόμησης του μοντέλου, αποτέλεσε μία σαφώς απλούστερη διαδικασία καθώς είχε προηγηθεί η βαθμονόμηση που αφορούσε τα υδραυλικά ύψη. Μέσω της προαναφερόμενης διαδικασίας είχαν ήδη προσδιοριστεί οι τιμές των εισροών και είχε εισαχθεί η θέση των ρηγμάτων. Η παράμετρος-κλειδί για τον προσδιορισμό του μετώπου της υφαλμύρισης, ήταν ο όρος της πηγής μάζας που προστέθηκε στα ρήγματα που συνδεόταν υδραυλικά με τη θάλασσα. Με την προσθήκη αυτή επιτεύχθηκε η προσομοίωση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα της περιοχής μελέτης, σύμφωνα πάντα με την εικόνα που είχε εξαχθεί μέσω των χημικών αναλύσεων που είχαν πραγματοποιηθεί στο νερό των γεωτρήσεων και των πηγαδιών. Κάτω από την επίδραση των ρηγμάτων και της άντλησης που πραγματοποιείται στην περιοχή μελέτης, το θαλασσινό νερό έχει εισχωρήσει σχεδόν σε όλο το μήκος της ακτογραμμής, αλλά και σε τμήματα της ενδοχώρας.

Εν κατακλείδι, λόγω της προαναφερόμενης πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει την ευρύτερη περιοχή των Μαλίων, κρίνεται σκόπιμη η οργάνωση ενός ολοκληρωμένου προγράμματος, το οποίο να περιλαμβάνει πλήρη απογραφή των πηγαδιών και γεωτρήσεων, διεξαγωγή μετρήσεων και χημικών αναλύσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα και ίσως δημιουργία γεωτρήσεων οι οποίες να πραγματοποιούν μετρήσεις σε τμήματα στα οποία υπάρχει έλλειψη δεδομένων, όπως το νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης. Μία ολοκληρωμένη βάση δεδομένων για την περιοχή μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο για τη δημιουργία ενός σχεδίου άντλησης από τους δημόσιους φορείς, το οποίο να προλάβει την περαιτέρω εισχώρηση του θαλασσινού νερού εξασφαλίζοντας αειφορία στο σύστημα των υπόγειων υδάτων της περιοχής.

7 Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- ❖ Alley W.M., Reilly T.E. and Franke O.L., Sustainability of Groundwater Resources, U.S. Geological Survey Circular 1186, Denver, CO, 1999
- ❖ Anderson M.P. and Woessner W.W., Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, California, 1992
- ❖ Bear J., Dynamics of Fluids in Porous Media, Republication, Dover Publications, New York, 1988
- ❖ Diersch H.J, Finite Element Modeling of Recirculating Density-dependent Saltwater Intrusion Processes in Groundwater, Advances in Water Resources, 11 (1), 25-43, 1988
- ❖ Diersch, H.-J.G., FEFLOW—Physical basis of modeling, Berlin: WASY, Reference Manual, 2002
- ❖ Diersch, H.-J.G., FEFLOW—Physical basis of modeling, Berlin: WASY, Installation Guide and Demonstration Exercise, 2003
- ❖ Dokou Z. and Karatzas G.P., Saltwater Intrusion Estimation in a Karstified Coastal System using Density-dependent Modeling and Comparison with the Sharp-interface Approach, Hydrological Sciences Journal, 57 (5), 1-15, 2012
- ❖ Henry H.R., Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, Sea Water in Coastal Aquifers, US Geological Survey Supply Paper 1613-C, 71-84, 1964
- ❖ Karanth K.R., Ground Water Assessment Development and Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Delhi, 1987
- ❖ Kinzelbach W. and Stauffer F., Density Flow in Groundwater (lecture notes), Institute of Environmental Engineering, ETH Zurich, 2009
- ❖ Reilly T.E. and Goodman A.S., Quantitative Analysis of Saltwater-Freshwater Relationships in Groundwater Systems – a historical-perspective, Journal of Hydrology, 80 (1-2), 125-160, 1985
- ❖ Schincariol R.A. and Schwartz F.W., An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media, Water Resources Research, 26 (10), 2317-2329, 1990

- ❖ Todd D.K. and Mays L.W., Groundwater Hydrology, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2005
- ❖ United States Department of Agriculture, Technical Guide to Managing Groundwater Resources, 2007

Ελληνική Βιβλιογραφία

- ❖ Καλλέργης Γ., Λαμπράκης Ν., Βουδούρης Κ. και Κοκκάλας Σ., Υδρογεωλογική Έρευνα της Περιοχής του Δήμου Μαλίων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Εργαστήριο Υδρογεωλογίας, 2000
- ❖ Καρατζάς Γ., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2000
- ❖ Παρίτσης Σ.Ν., Μελέτη Διαχείρισης Υδατικών Πόρων του Δήμου Μαλίων, Ηράκλειο, 2001

Παράρτημα

- ❖ Βροχομετρικά Δεδομένα