



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνειούπολη, Χανιά 73100

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΑΛΛΙΩΝ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Στέφανος Ι. Καράμπελας**

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ, 2021

"Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης".

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΑΛΛΙΩΝ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ FEFLOW

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Ιωάννης Τριχάκης

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται η προσομοίωση του υδραυλικού ύψους με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων FEFLOW. Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε αφορά την περιοχή του Δήμου Χερσονήσου και ειδικότερα τις περιοχές Χερσονήσου και Μαλίων. Ο Δήμος Χερσονήσου βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του νομού Ηρακλείου.

Για να πραγματοποιηθεί σωστά η προσομοίωση του υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης χρειάστηκε να γίνει επεξεργασία των δεδομένων πριν αυτά εισαχθούν στο FEFLOW. Επίσης έγινε επεξεργασία των δεδομένων των αποτελεσμάτων, που αφορούσαν τα πηγάδια παρατήρησης και τις προσομοιωμένες τιμές, τα οποία ήταν σε μορφή πινάκων και έτσι ήταν πιο εύκολη η επεξεργασία τους. Στο μοντέλο έγινε εισαγωγή 14 πηγαδιών παρατήρησης, τα οποία είχαν τιμές υδραυλικού ύψους για τα έτη 2000 έως 2012. Στη συνέχεια εισήχθησαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για του γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής, τα αρχικά υδραυλικά ύψη καθώς και τα υψόμετρα στην περιοχή. Έπειτα έγινε εισαγωγή των οριακών συνθηκών στα όρια της περιοχής. Στο μοντέλο ορίστηκαν δύο είδη οριακών συνθηκών. Η πρώτη ήταν σταθερού υδραυλικού ύψους η οποία αντικαταστάθηκε με οριακή συνθήκη συνημιτονοειδούς μορφής, που ορίστηκε στα νότια της περιοχής μελέτης. Τέλος πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση και ο έλεγχος του μοντέλου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το FEFLOW και ακολουθεί αναλυτικός σχολιασμός αυτών. Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται οι τελικές τιμές στου σφάλματος της βαθμονόμησης του μοντέλου, το οποίο ανέρχεται στα 13.996 m. Επίσης παρουσιάζονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους και της ταχύτητας Darcy για τις εποχές του χειμώνα και του καλοκαιριού για τα έτη 2001 και 2011, η σύγκριση των παρατηρημένων και των προσομοιωμένων τιμών της περιοχής καθώς και η μεταβολή των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας για τους σχηματισμούς της περιοχής. Τέλος γίνεται καταγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση του υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης.

## Abstract

In the context of the elaboration of this diploma thesis, the simulation of the hydraulic height using the mathematical model of finite elements FEFLOW is examined. The simulation that took place concerns the area of the Municipality of Hersonissos and more specifically the areas of Hersonissos and Malia. The municipality of Hersonissos is located in the northeastern part of the prefecture of Heraklion.

In order to stimulate the hydraulic height in the study area properly, data had to be processed before they were entered into FEFLOW. Much of the data imported into FEFLOW was pre-processed in Microsoft Excel. The data of the results, concerning the observation wells and the stimulated values, were also processed, which were in the form of tables and thus were easier to edit. The model introduced 14 observation wells, which had hydraulic height values for the years 2000 to 2012. Then the values of hydraulic conductivity for the geological formation of the area, the initial hydraulic heights as well as the altitudes in the area, were introduced. The boundary conditions were then introduced at the boundaries of the area. Two types of marginal conditions were defined in the model. The first one was of constant hydraulic height which was replaced by a cosine-shaped boundary condition defined to the south of the study area. Finally, the model was calibrated and tested.

The results extracted from FEFLOW are presented in detail, followed by a detailed commentary on them. The results show the final values in the model calibration error, which amounts to 13.996 m. Also presented are the values of the hydraulic height and Darcy's velocity for the winter and summer seasons for the years 2001 and 2011, the comparison of the observed and simulated values of the area, as well as the change in hydraulic conductivity values for area formations. Finally, the conclusions that emerged from the modeling of the hydraulic height in the study area are recorded.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου για την απόκτηση του διπλώματος της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που με βοήθησαν να επιτύχω το στόχο μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του καθώς και για τις συμβουλές και την καθοδήγηση του για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή Νικολαΐδη Νικόλαο για τη βοήθεια και τα εύστοχα σχόλια του ως προς την βελτίωση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ιωάννη Τριχάκη για την πολύτιμη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας για αυτήν την εργασία αλλά και για οποιαδήποτε άλλη φορά χρειάστηκε.

Ακόμα, να ευχαριστήσω θερμά τον Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε σχετικά με τους χάρτες της περιοχής μελέτης μου.

Θα ήθελα να πω ακόμα ένα ευχαριστώ στα άτομα του εργαστηρίου όπως ο Χρήστος Γκούμας και η Ειρήνη Βοζινάκη, για τη βοήθεια τους.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την συμπαράσταση και στήριξη τους.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην μητέρα μου και στον αδερφό μου για την απεριόριστη στήριξη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	iii
Abstract .....	iv
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Δομή της εργασίας .....	1
1.2 Σκοπός .....	1
1.3 Μοντέλα προσομοίωσης.....	2
1.4 Ρύπανση υπογείων υδάτων .....	3
1.5 Υδρολογικός κύκλος .....	3
1.5.1 Υδροφορείς .....	7
1.5.2 Παράμετροι υδροφορέων.....	9
1.6 Διαχείριση υδάτινων πόρων.....	11
1.7 Περιοχή μελέτης .....	13
1.8 Γεωλογία περιοχής μελέτης .....	14
1.9 Πρόγραμμα ArcGIS .....	3
1.10 Πρόγραμμα EnviroBase.....	5
1.11 Μοντέλο διαδραστικής προσομοίωσης FEFLOW .....	6
1.11.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	6
1.11.2 Βασικές εξισώσεις FEFLOW .....	9
1.11.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες για τη ροή (Initial and Boundary conditions).....	12
1.11.4 Βαθμονόμηση και αξιολόγηση του μοντέλου.....	13
2 Μεθοδολογία .....	15
2.1 Προ επεξεργασία δεδομένων .....	15
2.1.1 Μετατροπή αρχείων xls σε αρχεία csv.....	15
2.1.2 Δημιουργία χρονοσειρών (Time Series) .....	15
2.2 Μεθοδολογία EnviroBase .....	16
2.3 Μεθοδολογία ArcGIS.....	20
2.4 Μεθοδολογία μοντέλου FEFLOW στην περιοχή μελέτης.....	25
2.4.1 Δημιουργία ορίων περιοχής μελέτης.....	25
2.4.2 Δημιουργία του Δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh) .....	27
2.4.3 Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων .....	27
2.4.4 Τάξη του προβλήματος (Problem Class) .....	28
2.4.5 Δεδομένα χρόνου και ελέγχου (Temporal and control Data).....	29
2.4.6 Καθορισμός υψομέτρου στα slices.....	30
2.4.7 Αρχικές συνθήκες ροής (Flow initials).....	31

2.4.8	Οριακές συνθήκες ( Flow Boundaries).....	32
2.4.9	Υδραυλική αγωγιμότητα γεωλογικών πετρωμάτων .....	34
2.4.10	Εισαγωγή των χρονοσειρών πηγαδιών παρατήρησης (time series) .....	35
3	Αποτελέσματα .....	37
4	Συζήτηση .....	48
5	Συμπεράσματα .....	50
6	Βιβλιογραφία .....	52



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Διαγραμματική απεικόνιση του Υδρολογικού Κύκλου. [Καρατζάς, 2020] .....	5
Εικόνα 1-2: Εικονική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου. <a href="https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com">https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com</a> .....	6
Εικόνα 1-3: Ελεύθερος υδροφορέας. [Καρατζάς, 2020] .....	8
Εικόνα 1-4: Περιορισμένος υδροφορέας. [Καρατζάς, 2020] .....	8
Εικόνα 1-5: Κατανομή νερού στη Γη [ <a href="https://abhipedia.abhimanu.com">https://abhipedia.abhimanu.com</a> , 2020] .....	12
Εικόνα 1-6: Ποσότητες και ποσοστά νερού ανά πηγή. <a href="https://www.researchgate.net">https://www.researchgate.net</a> .....	13
Εικόνα 1-7: Υπόγεια υδατικά συστήματα [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013] .....	1
Εικόνα 1-8: Καρστικό υδροφόρο Βορείου Ηρακλείου [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013] .....	1
Εικόνα 1-9: Καρστικό υδροφόρο σύστημα Δίκτης (GR 130011) [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013] .....	2
Εικόνα 1-10: Πορώδη υδροφόρα συστήματα λεκάνης Ηρακλείου [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013] .....	3
Εικόνα 1-11: Οι τρεις διαφορετικές εκδόσεις που παρέχονται για το ArcGIS Desktop <a href="https://eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php">https://eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php</a> .....	4
Εικόνα 1-12: Παράδειγμα περιεχομένου της βάσης δεδομένων του προγράμματος Envirobase ..	6
Εικόνα 1-13: Δισδιάστατα στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992). a) τριγωνικά στοιχεία b) τετράπλευρα στοιχεία (Serendipity family) c) τετράπλευρα στοιχεία (Lagrange family) .....	8
Εικόνα 1-14: Τρισδιάστατα στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992). a) τετράεδρα στοιχεία b) εξαέδρα στοιχεία c) πρίσματα .....	9
Εικόνα 2-1: Επεξεργασία δεδομένων για την δημιουργία αρχείων. ....	15
Εικόνα 2-2: Time series σε μορφή αρχείου row. ....	16
Εικόνα 2-3: Δημιουργία ορίων περιοχής μελέτης. ....	26
Εικόνα 2-4: Εμφάνιση πηγαδιών ως σημεία στην περιοχή μελέτης. ....	27
Εικόνα 2-5: Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων-πλέγμα.....	27
Εικόνα 2-6: Δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης της περιοχής μελέτης. ....	28
Εικόνα 2-7: Καθορισμός παραμέτρων μοντέλου.....	28
Εικόνα 2-8: Καθορισμός παραμέτρων για την κίνηση του νερού στα εκάστοτε slice. ....	29
Εικόνα 2-9: Καθορισμός παραμέτρων χρόνου και ελέγχου. ....	30
Εικόνα 2-10: Υψόμετρα περιοχής σε τρισδιάστατη απεικόνιση. ....	30
Εικόνα 2-11: Υψόμετρο σε κάθε slice. ....	31
Εικόνα 2-12: Αρχικά υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης. ....	31
Εικόνα 2-13: Οριακές συνθήκες για την ακτογραμμή. ....	32
Εικόνα 2-14: Αρχικές οριακές συνθήκες. ....	33
Εικόνα 2-15: Τελικές οριακές συνθήκες.....	34
Εικόνα 2-16: Αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής. ....	35

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης. ....	20
Πίνακας 2-2: Δεδομένα χρονοσειράς GST13. ....	35
Πίνακας 3-1: Μέγιστες ταχύτητες Darcy ανά έτος για χειμώνα και καλοκαίρι. ....	45
Πίνακας 3-2: Αρχικές και τελικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής. ....	47

## Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 1-1: Χάρτης υψομέτρων περιοχής μελέτης. ....	14
Χάρτης 2-1: Περίγραμμα περιοχής μελέτης. ....	21
Χάρτης 2-2: Αποτέλεσμα μετά τη διαλογή των πηγαδιών. ....	22
Χάρτης 2-3: Χάρτης ΙΓΜΕ για την περιοχή του ΜΟΧΟΥ. ....	23
Χάρτης 2-4: Χάρτης υδροπερατότητας της περιοχής μελέτης. ....	24
Χάρτης 2-5: Χάρτης υψομέτρων που εισήχθησαν στην περιοχή μελέτης. ....	25
Χάρτης 3-1: Υδραυλικό ύψος σε δισδιάστατο επίπεδο με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος του χειμώνα του 2001 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2001. ....	37
Χάρτης 3-2: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται η ταχύτητα για την περίοδο του χειμώνα του 2001 και στον κάτω χάρτη η ταχύτητα για το καλοκαίρι του 2001. ....	38
Χάρτης 3-3: Υδραυλικό ύψος σε δισδιάστατο επίπεδο με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος του χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011. ....	40
Χάρτης 3-4: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται η ταχύτητα για την περίοδο του χειμώνα του 2011 και στον κάτω χάρτη η ταχύτητα για το καλοκαίρι του 2011. ....	41
Χάρτης 3-5: Χάρτης υδραυλικής αγωγιμότητας του 1 <sup>ου</sup> slice. Στον πάνω χάρτη εμφανίζονται οι αρχικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και στον κάτω χάρτη οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση. ....	44

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2-1: Διάγραμμα συνημιτονοειδούς συνάρτησης. ....	34
Διάγραμμα 3-1: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά την βαθμονόμηση για το χειμώνα του 2001 ενώ στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα για το καλοκαίρι του 2001. ....	39
Διάγραμμα 3-2: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά την βαθμονόμηση για το χειμώνα του 2011 ενώ στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα για το καλοκαίρι του 2011. ....	42
Διάγραμμα 3-3: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης. .	43
Διάγραμμα 3-4: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά το τέλος της βαθμονόμησης. ....	43
Διάγραμμα 3-5: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 1 της περιοχής μελέτης. ....	45
Διάγραμμα 3-6: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 4 της περιοχής μελέτης. ....	46
Διάγραμμα 3-7: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 10 της περιοχής μελέτης. ....	46

# 1 Εισαγωγή

Η διπλωματική εργασία αυτή εκπονήθηκε από τον προπτυχιακό φοιτητή Καράμπελα Στέφανο της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, ως προαπαιτούμενο για την ολοκλήρωση των προπτυχιακών του σπουδών για την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανικού Περιβάλλοντος.

## 1.1 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζεται αρχικά η δομή της εργασίας. Στη συνέχεια παρατίθεται ο σκοπός της εργασίας και γίνεται μια γενική αναφορά στα μοντέλα προσομοίωσης και παρατίθενται γενικές πληροφορίες για την ρύπανση των υπογείων υδάτων. Έπειτα αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με τον υδρολογικό κύκλο και την διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ακόμα παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με την περιοχή μελέτης και την γεωλογία αυτής. Τέλος γίνεται επεξήγηση των προγραμμάτων ArcGIS, Enviro-Base και FEFLOW.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα αναφέρεται η προεπεξεργασία των δεδομένων που πραγματοποιήθηκε, η εξαγωγή των απαραίτητων τιμών από το πρόγραμμα Enviro-Base, η δημιουργία των απαραίτητων χαρτών και πινάκων στο GIS και τέλος τα στάδια για την δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης.

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει τα αποτελέσματα από τις εφαρμογές της μεθοδολογίας. Σε αυτό παρουσιάζονται σε μορφή χαρτών και διαγραμμάτων όλα τα δεδομένα που εξήχθησαν μετά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται χάρτες υδραυλικού ύψους, ταχύτητας Darcy, διαγράμματα σφαλμάτων, τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και διαγράμματα προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών της περιοχής μελέτης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική συζήτηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο και εξετάζεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και προτείνονται ιδέες για περαιτέρω διεξαγωγή έρευνας για άλλες εργασίες.

## 1.2 Σκοπός

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση και η κατανόηση ενός τρισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης υπογείων υδάτων με χρήση μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEFLOW). Το μοντέλο προσομοίωσης FEFLOW θα χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσει το υδραυλικό ύψος των πηγαδιών παρατήρησης ή/και άντλησης, που υπάρχουν στην περιοχή της Χερσονήσου και των Μαλίων στον νομό Ηρακλείου, με βάση δεδομένα των οποίων η ανάλυση γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο. Ο στόχος του μοντέλου προσομοίωσης FEFLOW είναι να εκτιμήσει το υδραυλικό ύψος των πηγαδιών με το μικρότερο δυνατό σφάλμα έτσι ώστε οι τιμές του μοντέλου να προσεγγίζουν τις πραγματικές. Το κριτήριο που επιλέχθηκε για να γίνει η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Με βάση αυτό το κριτήριο θα φανεί αν τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι ικανοποιητικά ή όχι.

### 1.3 Μοντέλα προσομοίωσης

Τα μοντέλα προσομοίωσης σύμφωνα με τους Anderson και Woessner [1992], ορίζονται ως μηχανισμοί οι οποίοι προσεγγίζουν τις συνθήκες του πεδίου, ενώ οι Alley et al. [1999] ως μια προσπάθεια να αποδοθούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος των υπογείων υδάτων με την βοήθεια μαθηματικών μέσων. Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την εξέταση των διεργασιών που συμβαίνουν σε ένα σύστημα υπογείων υδάτων.

Τα μοντέλα προσομοίωσης σύμφωνα με τους Anderson και Woessner [1992], μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τα φυσικά ή αναλογικά μοντέλα και τα μαθηματικά ή αριθμητικά μοντέλα. Στα φυσικά ή αναλογικά πραγματοποιείται απευθείας προσομοίωση της υπόγειας ροής, ενώ στα μαθηματικά ή αριθμητικά πραγματοποιείται έμμεση προσομοίωση της υπόγειας ροής μέσω μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες λύνονται με την χρήση H/Y.

Στόχος της μελέτης των μοντέλων προσομοίωσης είναι η κατανόηση της λειτουργίας των υπόγειων υδροφορέων, η πρόβλεψη των μεταβολών τους με βάση μελλοντικές συνθήκες και η μελέτη των νόμων που διέπουν την ροή [Karanth, 1987].

Τα φυσικά ή αναλογικά μοντέλα χωρίζονται σε [Karanth, 1987]:

1. Μοντέλα πορώδους μέσου: εφαρμόζονται στις περισσότερες των περιπτώσεων σε απλά συστήματα. Κατασκευάζονται σε στήλες ή πλαίσια. 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 ορίζονται ή του πιεζομετρικού ύψους τοποθετούνται σε κρίσιμα σημεία, πιεζόμετρα τα οποία αποτελούνται από λεπτούς, διαφανείς, πλαστικούς σωλήνες.
2. Μοντέλα παχύρρευστου υγρού: 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: 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: 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.

Τα μαθηματικά ή αριθμητικά μοντέλα χωρίζονται σε:

1. Πεπερασμένων διαφορών
2. Πεπερασμένων στοιχείων
3. Ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
4. Αναλυτικών στοιχείων
5. Μέθοδος συνοριακού ολοκληρώματος

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται συνηθέστερα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. [Anderson και Woessner, 1992]

## 1.4 Ρύπανση υπογείων υδάτων

Η αύξηση του πληθυσμού της γης, η τεχνολογική πρόοδος, η βιομηχανική ανάπτυξη και οι νέες τεχνολογίες γεωργίας έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ρύπανση των υπογείων υδάτων. Ως ρύπανση ορίζεται η δυσμενής μεταβολή των φυσικοχημικών ή βιολογικών συνθηκών ενός συγκεκριμένου περιβάλλοντος, καθώς και η βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη βλάβη στην ποιότητα ζωής και την υγεία των ανθρώπων και άλλων ειδών [Ψυλλάκη, 2021]. Η ρύπανση των υπογείων υδάτων προκαλείται είτε από ανόργανες και οργανικές χημικές ουσίες, είτε από μικροοργανισμούς. Οι χημικές ουσίες οι οποίες ευθύνονται συνήθως για την ρύπανση των υπογείων υδάτων είναι τα νιτρικά, τα χλωριούχα και θειικά ιόντα, τα βαρέα μέταλλα και τα οξέα.

Οι πηγές ρύπανσης των υπογείων υδάτων είναι αρκετές και διακρίνονται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Ρύπανση από βιομηχανικές δραστηριότητες: η ρύπανση από τις βιομηχανίες χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία οργανικών και ανόργανων ενώσεων που δημιουργούν ρύπους οι οποίοι μεταφέρονται στα υπόγεια ύδατα. Μπορεί να προκύψουν από διαρροές, ατυχήματα ή και κατά την διάθεση τους σε πηγάδια και επιφανειακές δεξαμενές.
- Ρύπανση από αγροτικές δραστηριότητες: λόγω της χρήσης ζιζανιοκτόνων και φυτοφαρμάκων, καθώς και τα ζωικά λύματα μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση των υπογείων υδάτων.
- Ρύπανση από αστικές δραστηριότητες: τα αστικά απορρίμματα τα οποία καταλήγουν σε ΧΥΤΑ χωρίς περαιτέρω επεξεργασία συνεισφέρουν σε μεγάλο ποσοστό στην ρύπανση των υπογείων υδάτων. Επίσης τα λύματα από τις αστικές περιοχές μπορούν να προκαλέσουν μόλυνση στα υπόγεια ύδατα στις περιπτώσεις που πραγματοποιείται απευθείας διάθεση τους στο έδαφος.
- Ρύπανση από φυσικές διεργασίες: η ρύπανση των υπογείων υδάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί από την διείσδυση του θαλασσινού νερού σε περιοχές με γλυκό νερό, όπου δημιουργείται το φαινόμενο της υφαλμύρισης, από ρύπους της ατμόσφαιρας που διεισδύουν στο έδαφος, καθώς και από τεχνητό εμπλουτισμό κ.α.

## 1.5 Υδρολογικός κύκλος

Ως υδρολογικός κύκλος ή κύκλος του νερού, νοείται η ύπαρξη καθώς και η κυκλοφορία αυτού στην επιφάνεια, κάτω και πάνω από τη Γη. Σύμφωνα με αυτόν το νερό βρίσκεται σε αέναη κίνηση και αλλάζει συνεχώς από υγρή μορφή σε αέρια ή στερεή και αντίστροφα. Ο υδρολογικός κύκλος συνεχίζεται για δισεκατομμύρια χρόνια και αποτελεί θεμέλιο λίθο για τη ζωή στη Γη. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-1 αποτελείται από διάφορες διαδικασίες που πραγματοποιούνται μεταξύ της ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσα. <https://www.usgs.gov>

Οι διαδικασίες που αποτελούν τον υδρολογικό κύκλο είναι οι:

- Εξατμισοδιαπνοή
- Κατακρημνίσματα-Βροχόπτωση
- Επιφανειακή απορροή
- Διείσδυση στο υπέδαφος

Η εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στην ποσότητα νερού, που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής και της εξάτμισης. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

- a) την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, δηλαδή την απώλεια ύδατος που μπορεί να συμβεί, αν δεν υπάρξει απώλεια ύδατος εντός του εδάφους για χρήση από την βλάστηση, για καμία χρονική στιγμή.
- b) την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, δηλαδή το πραγματικό ποσό της εξατμισοδιαπνοής που λαμβάνει χώρα σε συνθήκες πεδίου. [Καρατζάς, 2020]

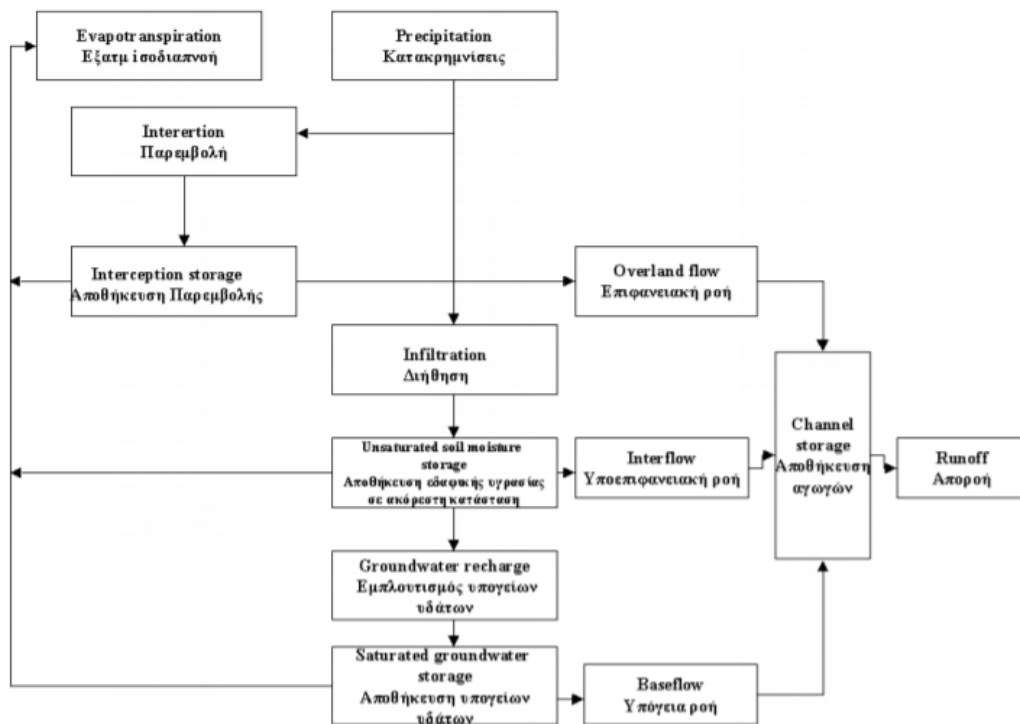
Τα κατακρημνίσματα, αποτελούνται από όλες τις μορφές με τις οποίες μπορεί το νερό να φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους, όπως για παράδειγμα μέσω τις βροχής. Οι μορφές βροχοπτώσεων βάσει του φυσικού μηχανισμού δημιουργίας τους διακρίνονται σε:

- a) Βροχοπτώσεις που οφείλονται σε κινήσεις θερμών και ψυχρών μετώπων (Frontal Precipitation)
- b) Βροχοπτώσεις που οφείλονται σε φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας (Convective Process)
- c) Βροχοπτώσεις που οφείλονται σε ορογραφικές επιδράσεις (Orographic Effects)

Για να υπολογιστεί το ύψος της βροχόπτωσης σε μια περιοχή απαιτείται μεγάλος αριθμός ομοιόμορφα κατανεμημένων βροχόμετρων για να υπολογιστεί με σωστό τρόπο ο μέσος όρος του πραγματικού ύψους. [Καρατζάς, 2020]

Η επιφανειακή απορροή, περιλαμβάνει μέρος της ποσότητας των κατακρημνισμάτων που δεν κατακρατείται από το έδαφος και δημιουργεί ποτάμια τα οποία καταλήγουν σε λίμνες είτε στην θάλασσα.

Τέλος η διείσδυση στο υπέδαφος, περιλαμβάνει την ποσότητα των κατακρημνισμάτων που εισχωρεί στο έδαφος και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς αποτελώντας ένα σημαντικό παράγοντα στην υδρολογία της εκάστοτε περιοχής.



Εικόνα 1-1: Διαγραμματική απεικόνιση του Υδρολογικού Κύκλου. [Καρατζάς, 2020]





Εικόνα 1-2: Εικονική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου. <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com>

Με βάση την Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχουν διακριθεί 16 μέρη του υδρολογικού κύκλου:

- Αποθήκευση νερού στη θάλασσα
- Αποθήκευση υπογείου νερού
- Εξάτμιση
- Πηγές
- Εξάχνωση
- Διήθηση
- Αποθήκευση νερού στην ατμόσφαιρα
- Συμπύκνωση
- Κατακρημνίσματα
- Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια
- Ροή σε υδατορεύματα
- Απορροή από λιώσιμο του χιονιού
- Επιφανειακή απορροή
- Εξατμισοδιαπνοή
- Αποθήκευση γλυκού νερού
- Εκφόρτιση υπογείου νερού

Εκτός από την εικονική αναπαράσταση, ο υδρολογικός κύκλος μπορεί να εκφραστεί μέσω μαθηματικών εξισώσεων. Το ισοζύγιο που περιγράφει τον κύκλο του νερού φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί: [Καρατζάς, 2020]

$$\Delta S = P - \Delta R - \Delta G - E - T$$

Όπου:

$\Delta S$ : Αλλαγή του ρυθμού αποθήκευσης επιφανειακών και υπογείων υδάτων

P: Ο ρυθμός κατακρήμνισης

$\Delta R$ : Ο ρυθμός επιφανειακής ροής

$\Delta G$ : Οι εισροές και εκροές του υδροφορέα

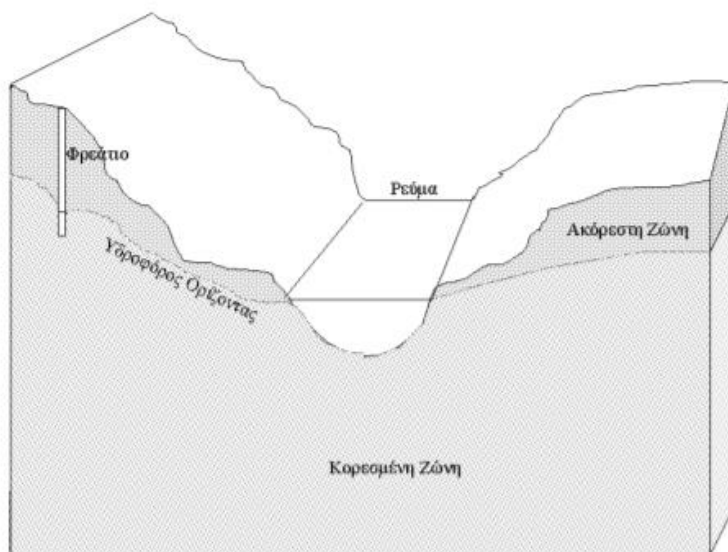
E: Εξάτμιση

T: Αναπνοή

### 1.5.1 Υδροφορείς

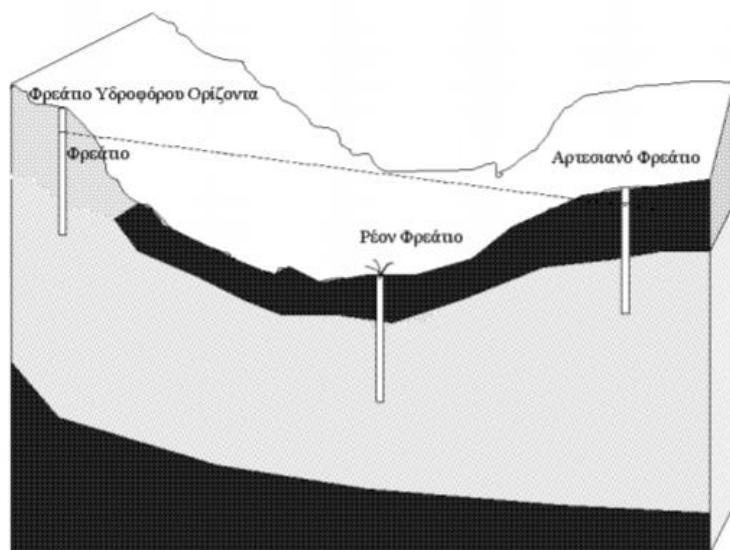
Οι υδροφορείς αποτελούν τον κύριο γεωλογικό σχηματισμό που συναντάται υπόγειο νερό. Εκτείνονται σε μεγάλες εκτάσεις και μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές. Ένας ορισμός που μπορεί να δοθεί είναι ότι αποτελούν υπεδάφιους σχηματισμούς που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία προμηθεύουν πηγάδια και πηγές με ποσότητες νερού. Οι υδροφορείς ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους ελεύθερους και τους περιορισμένους. [Καρατζάς, 2020]

- Ελεύθερος υδροφορέας: 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. Η οποιαδήποτε αυξομείωση του υδροφόρου ορίζοντα, αντιστοιχεί σε αυξομείωση του όγκου του ύδατος το οποίο είναι αποθηκευμένο στον υδροφορέα. [Todd and Mays, 2005]



Εικόνα 1-3: Ελεύθερος υδροφορέας. [Καρατζάς, 2020]

- Περιορισμένος η αρτεσιανός υδροφορέας: είναι ο υδροφορέας στον οποίο το υπόγειο νερό βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής λόγω της ύπαρξης αδιαπέρατου στρώματος. Στα πηγάδια που αντλούν νερό από περιορισμένο υδροφορέα, η στάθμη του νερού βρίσκεται πάνω από την κατώτερη επιφάνεια του αδιαπέρατου στρώματος. Οι αλλαγές στην στάθμη του νερού πραγματοποιούνται εξαιτίας της αλλαγής της πίεσης και της μεταβολής του αποθηκευμένου όγκου νερού. [Todd and Mays, 2005]



Εικόνα 1-4: Περιορισμένος υδροφορέας. [Καρατζάς, 2020]

### 1.5.2 Παράμετροι υδροφορέων

#### Πορώδες (Porosity) [n, ε]

Το πορώδες (Porosity) (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέγεθος που μας δείχνει τα διάκενα που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται από τη μαθηματική σχέση που ακολουθεί [Βουδούρης, 2006]:

$$n = \frac{V_k}{V_{ολ}}$$

Όπου,

$V_k$ : ο όγκος των κενών ( $L^3$ )

$V_{ολ}$ : ο συνολικός όγκος του δείγματος ( $L^3$ )

#### Ενεργό πορώδες (effective porosity, $n_e$ )

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity) αναφέρεται στο ποσοστό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπογείου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δε συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% για την άργιλο και έως 20% για τα χαλίκια. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει το πορώδες είναι [Βουδούρης, 2006]:

$$n_e = \frac{V_Y}{V_{ολ}}$$

Όπου,

$n_e$ : ενεργό πορώδες

$V_Y$ : Ο όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων. ( $L^3$ )

$V_o$ : ο συνολικός όγκος του δείγματος ( $L^3$ )

#### Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity, K)

Η υδραυλική αγωγιμότητα δηλώνει την ικανότητα του υδροφορέα να αφήνει το νερό να περάσει. Αποτελεί συνδυασμό ιδιοτήτων του πορώδους υλικού και του ρευστού [Bear, 1988]. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει την υδραυλική αγωγιμότητα είναι [Todd and Mays, 2005]:

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

Όπου,

k: η διαπερατότητα ( $L^2$ )

K: η υδραυλική αγωγιμότητα ( $\frac{L}{T}$ )

$\rho$ : η πυκνότητα του ρευστού ( $\frac{M}{L^3}$ )

$\mu$ : το ιξώδες του ρευστού ( $\frac{M}{LT}$ )

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\frac{M}{L^2}$ )

### Νόμος Darcy (Darcy's Law)

Ο νόμος Darcy αναφέρει ότι ο ρυθμός ροής διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας που χαρακτηρίζει το υλικό και αντιστρόφως ανάλογο του μήκους της πορείας ροής. Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy είναι:

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

Όπου:

$Q$ : είναι η παροχή ( $\frac{L^3}{T}$ )

$A$ : είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

$K$ : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ( $\frac{L}{T}$ )

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

$L$ : είναι το μήκος της στήλης (L)

$q$ : είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή ( $\frac{L}{T}$ )

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο. Η έκφραση  $\frac{\Delta h}{L}$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική της μορφή ως  $\frac{\Delta h}{dl}$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση. [Καρατζάς, 2020]

### Συντελεστής αποθήκευσης (storativity)

Υποδηλώνει την σχέση μεταξύ των αλλαγών στην ποσότητα του αποθηκευμένου ύδατος σε κάποιον υδροφορέα και των αντίστοιχων αλλαγών στη στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας ή του υδροφόρου ορίζοντα για ελεύθερο υδροφορέα [Bear, 1988]. Ο συντελεστής αποθήκευσης επηρεάζεται από το είδος του υδροφορέα αλλά και από τους υφιστάμενους μηχανισμούς αποθήκευσης [Καββαδάς, 2019]. Ο συντελεστής αποθήκευσης είναι μέγεθος αδιάστατο και η τιμή του κυμαίνεται από 0.0001 έως 0.01 για περιορισμένους υδροφορείς και από 0.15 έως 0.6 για ελεύθερους. [Καρατζάς, 2020]

### Συντελεστής μεταβιβασιμότητας (Transmissivity, T)

Ως μεταβιβασιμότητα, ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση. Η μαθηματική σχέση που εκφράζει τον συντελεστή μεταβιβασιμότητας είναι [Καρατζάς, 2020]:

$$T = Kb$$

Όπου,

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

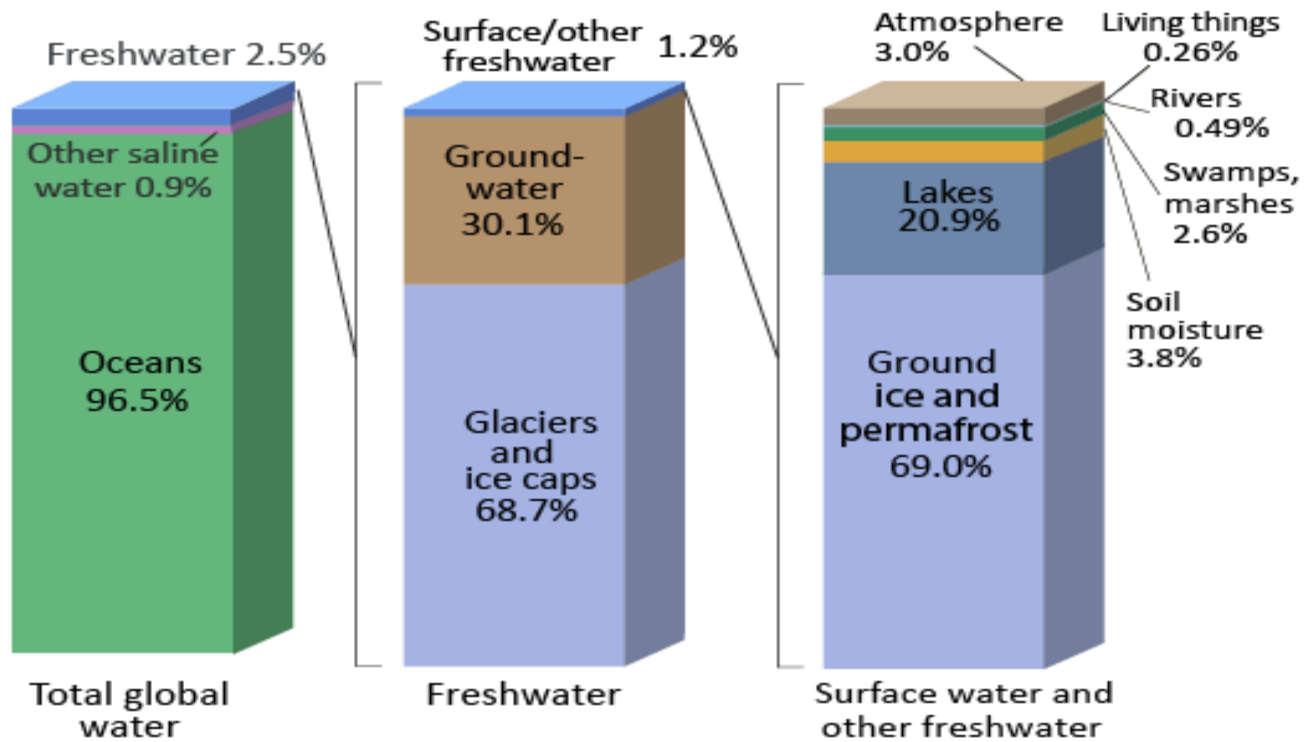
b: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα

## 1.6 Διαχείριση υδάτινων πόρων

Το νερό ανάλογα με την διαχείριση και τα εκάστοτε κριτήρια μπορεί να θεωρηθεί φυσικός πόρος, οικονομικό αγαθό αλλά και στοιχείο του περιβάλλοντος. Αυτό όμως που το καθιστά σημαντικό είναι η αναγκαιότητα του για την ύπαρξη και συνέχιση της ζωής στην Γη. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η αειφόρος (βιώσιμη) διαχείριση των υδάτινων πόρων οι οποίοι είναι περιορισμένοι και εξαντλήσιμοι.

Για να γίνει κατανοητό το πόσο περιορισμένοι είναι οι υδάτινοι πόροι που χρησιμοποιούμε για να καλύψουμε τις ανάγκες σε ύδρευση των ζώντων οργανισμών του πλανήτη, αλλά και σε άρδευση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων αξίζει να αναφέρουμε ότι από τα  $1.34 \cdot 10^9 m^3$  (δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα) νερού που υπάρχουν στην Γη, μόλις το 2.5% αντιστοιχεί σε φρέσκο νερό. Από αυτό, περίπου το 69% βρίσκεται σε μορφή πάγου στους πόλους της Γης Εικόνα 1-5 και μόνο ένα ποσοστό περίπου 0,76% είναι υπόγειο γλυκό νερό που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να καλύψουμε τις ανάγκες μας όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-6.  
<http://www.geo.auth.gr>

# Where is Earth's Water?



Εικόνα 1-5: Κατανομή νερού στη Γη [<https://abhikipedia.abhimanu.com>, 2020]



Water source	Water volume, in cubic miles	Water volume, in cubic kilometers	Percent of freshwater	Percent of total water
Oceans, Seas, & Bays	321,000,000	1,338,000,000	--	96.54
Ice caps, Glaciers, & Permanent Snow	5,773,000	24,064,000	68.7	1.74
Groundwater	5,614,000	23,400,000	--	1.69
Fresh	2,526,000	10,530,000	30.1	0.76
Saline	3,088,000	12,870,000	--	0.93
Soil Moisture	3,959	16,500	0.05	0.001
Ground Ice & Permafrost	71,970	300,000	0.86	0.022
Lakes	42,320	176,400	--	0.013
Fresh	21,830	91,000	0.26	0.007
Saline	20,490	85,400	--	0.006
Atmosphere	3,095	12,900	0.04	0.001
Swamp Water	2,752	11,470	0.03	0.0008
Rivers	509	2,120	0.006	0.0002
Biological Water	269	1,120	0.003	0.0001
Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).				

Εικόνα 1-6: Ποσότητες και ποσοστά νερού ανά πηγή. <https://www.researchgate.net>

Με βάση αποτελέσματα ερευνών είναι δύσκολο να υπολογιστεί ακριβώς η ποσότητα του γλυκού νερού. Είναι φανερό λοιπόν η αναγκαιότητα της αειφόρου διαχείρισης των υδάτινων πόρων καθώς εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, της αύξησης του πληθυσμού και της αυξανόμενης ζήτησης για λόγους ύδρευσης, αναμένεται αύξησης της απαιτούμενης ποσότητας πόσιμου νερού στο μέλλον. [Vörösmarty, 2000]

## 1.7 Περιοχή μελέτης

Ο δήμος Χερσονήσου, είναι δήμος της περιφέρειας Κρήτης που δημιουργήθηκε με την συνένωση των δήμων Χερσονήσου, Γουβών, Μαλίων και Επισκοπής. Ο πληθυσμός του δήμου ανέρχεται σε 26.717 κατοίκους. Βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του νομού Ηρακλείου και η έκταση του ανέρχεται σε 271,58 km<sup>2</sup>. Η περιοχή που μελετάται περιορίζεται από το Κρητικό πέλαγος στα βόρεια, από τη Δημοτική ενότητα Ηρακλείου στα δυτικά και από τα όρια της Περιφερειακής ενότητας Λασιθίου στα ανατολικά. Ο δήμος Χερσονήσου διαθέτει πλούσιο φυσικό περιβάλλον συνδυάζοντας ποτάμια, πεδιάδες, ορεινούς όγκους καθώς και φαράγγια. Μερικοί από τους πιο σημαντικούς φυσικούς πόρους του δήμου Χερσονήσου είναι:

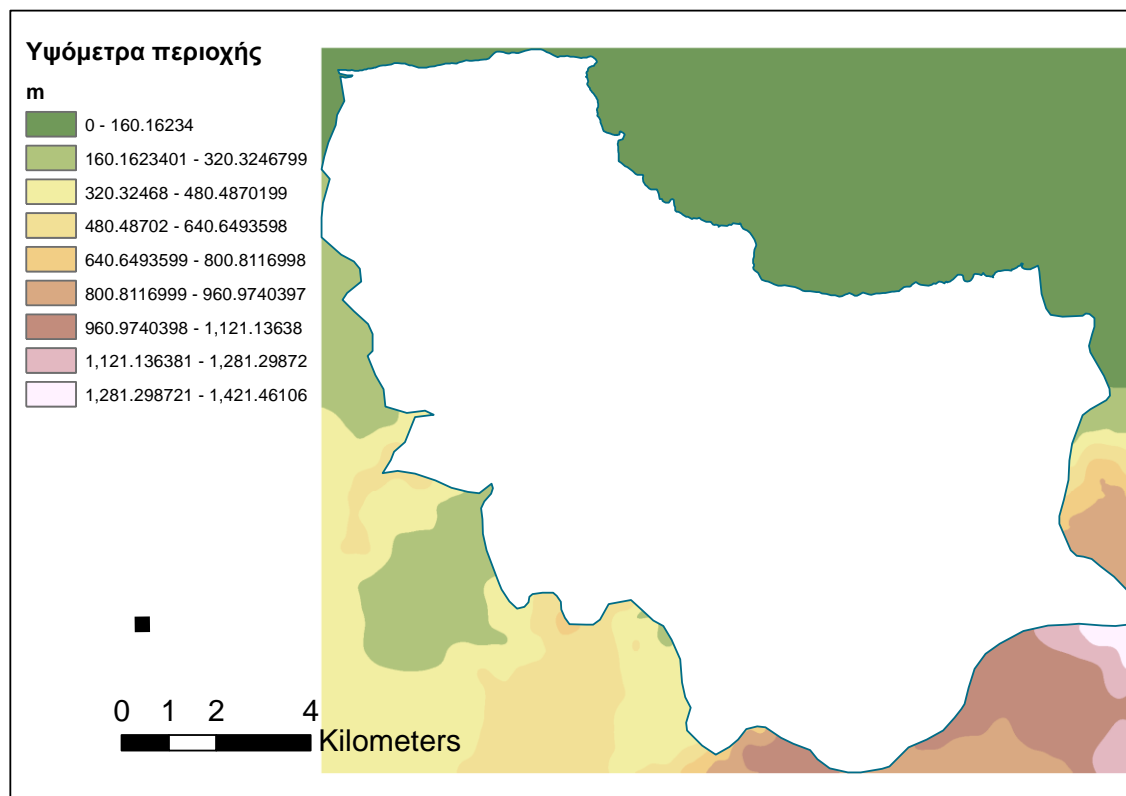
- Ο ποταμός Αποσελέμης, είναι από τους μεγαλύτερους ποταμούς της Κρήτης. Δέχεται υπόγεια ύδατα από τις πηγές στις Φλέγες και τροφοδοτεί με το φράγμα του Αποσελέμη με μεγάλες ποσότητες νερού. Αφού ενωθεί με άλλους μικρότερους ποταμούς διασχίζει το ομώνυμο φαράγγι και εκβάλλει στον υδροβιότοπο του Αποσελέμη κοντά στις βόρειες ακτές του νομού. <https://www.cretanbeaches.com>



- Το φαράγγι του Αποσελέμη, έχει μήκος 4 km και ύψος μέχρι και 200 m. Είναι καταφύγιο για πολλά είδη ζώων και ορνιθοπανίδας και έχει μεγάλη ποικιλία χλωρίδας. <https://www.cretanbeaches.com>
- Ο υγρότοπος του ποταμού των Μαλίων, είναι ένας φυσικός υγρότοπος του δήμου Χερσονήσου που βρίσκεται βορειοανατολικά των Μαλίων. Είναι καλυμμένος με νερό που πηγάζει από την ευρύτερη περιοχή καθώς σε εκείνο το σημείο βρίσκεται διέξοδο ο υδροφόρος ορίζοντας του όρους Σελένα. <http://landofexperiences.gr>
- Το κουμαρόδασος, το οποίο καταλαμβάνει έκταση 3000 στρεμμάτων και έχει μεγάλη ποικιλία δέντρων αλλά και χαμηλής βλάστησης. <https://www.hersonisos.gr>

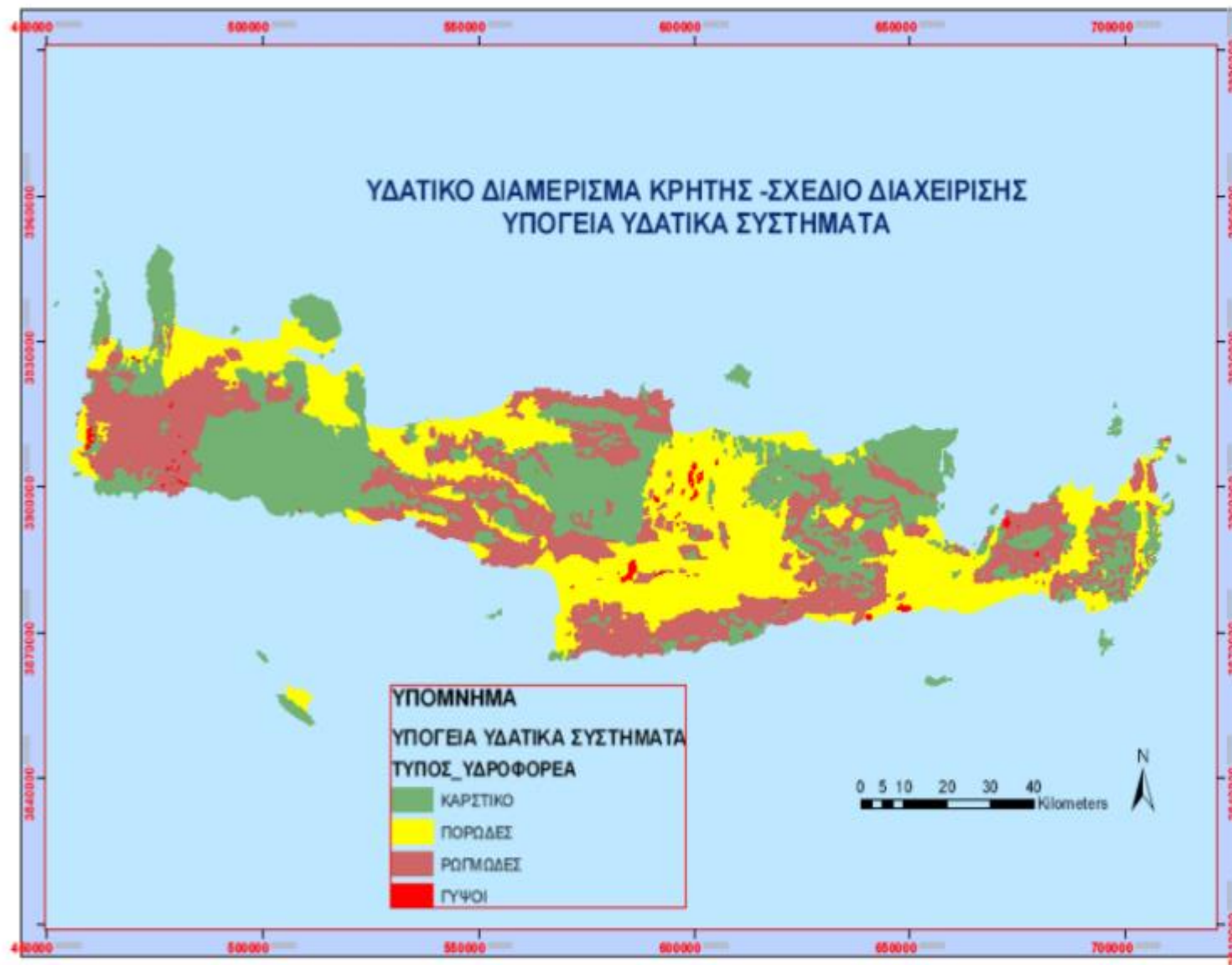
### 1.8 Γεωλογία περιοχής μελέτης

Όπως φαίνεται στο χάρτη 1-1, η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από ήπιες γενικά κλίσεις, με εξαίρεση ίσως στα νότια της περιοχής. Τα υψόμετρα στην περιοχή κυμαίνονται στην παράκτια ζώνη από 0 έως 160 μέτρα, στο μέσο αυτής από 160 έως 640 μέτρα και στα νότια και νοτιοανατολικά κυμαίνονται από 640 έως 1400 μέτρα.



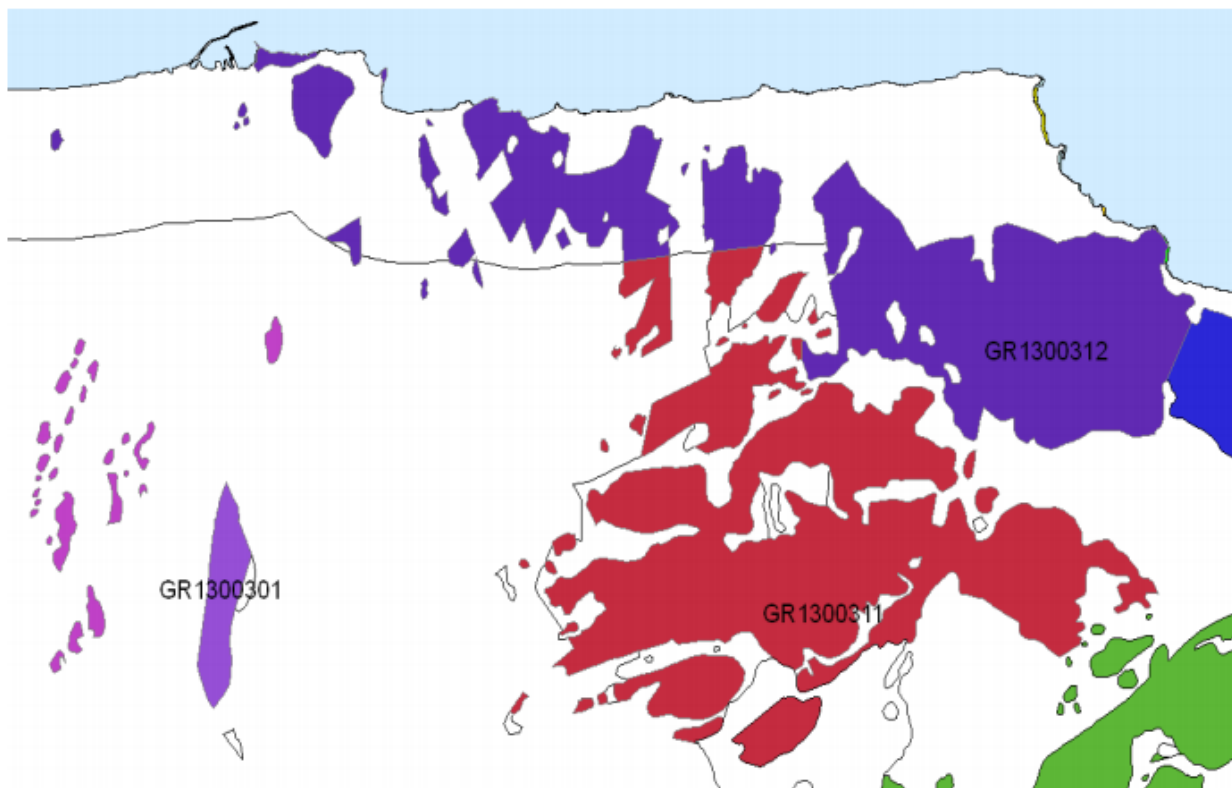
Χάρτης 1-1: Χάρτης υψομέτρων περιοχής μελέτης.

Η ανάπτυξη των υπόγειων υδροφοριών στους εκάστοτε γεωλογικούς σχηματισμούς που δομούν τη νήσο εξαρτώνται άμεσα από τις γεωλογικές, τεκτονικές και μορφολογικές συνθήκες που συναντώνται ανά περιοχή. Τα υδροφόρα συστήματα της Κρήτης , με βάση τις κατευθυντήριες οδηγίες κατάρτισης του διαχειριστικού σχεδίου διακρίνονται σε: Καρστικά, Ρωγμώδη και Πορώδη υδροφόρα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-5. Στην περιοχή μελέτης που έχουμε, δηλαδή στον δήμο Χερσονήσου παρατηρούμε ότι στο μεγαλύτερο μέρος κυριαρχούν τα Πορώδη και Καρστικά υδροφόρα ενώ σε ένα μικρό μόνο μέρος της περιοχής μελέτης εμφανίζονται Ρωγμώδη υδροφόρα. Τα Πορώδη υδροφόρα συστήματα συνήθως αποτελούνται από τεταρτογενή και κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Στα Ρωγμώδη υδροφόρα συστήματα, απαντώνται κατά κύριο λόγο σχηματισμοί φυλλιτών – χαλαζιτών καθώς και σχηματισμούς φλύσχης. Τέλος τα Καρστικά υδροφόρα συστήματα αποτελούνται συνήθως από ανθρακικά πετρώματα όπως ασβεστόλιθοι, δολομίτες, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα. [Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013]



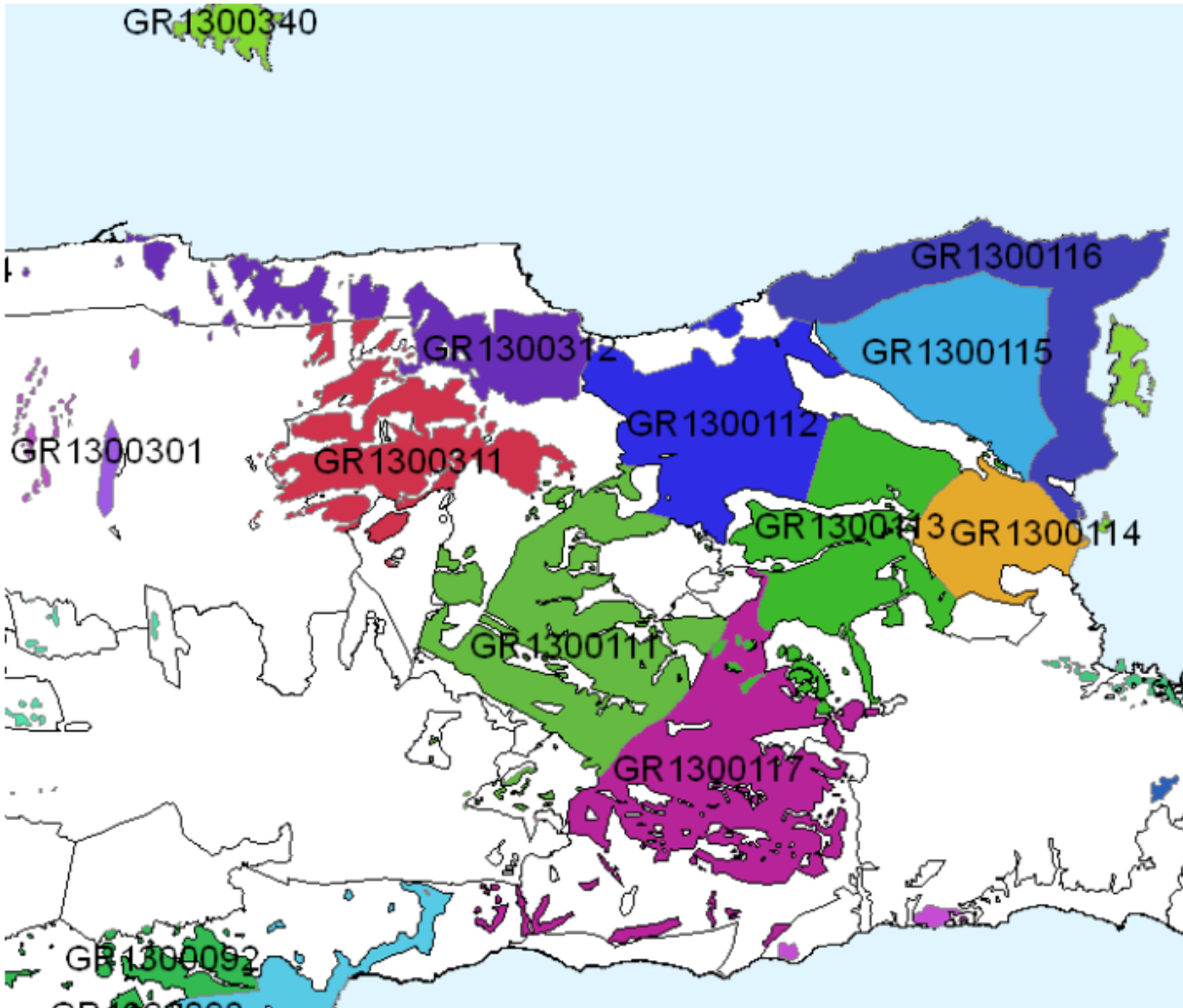
Εικόνα 1-7: Υπόγεια υδατικά συστήματα [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013]

Συγκεκριμένα, για τους Καρστικούς υδροφόρους, στον Καρστικό υδροφόρο Καινούργιου Χωριού – Σμαρίου (GR 1300311) οι κυριότερες εμφανίσεις ανθρακικών κατατάσσονται στη γεωλογική ζώνη Πίνδου οι οποίοι έχουν χαμηλότερη περατότητα σε σχέση με τους ανθρακικούς σχηματισμούς της γεωλογικής ζώνης της Τρίπολης. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι ασβεστόλιθοι της περιοχής επικάθονται του φλύσχη της γεωλογικής ζώνης Τρίπολης. Στο Καρστικό υδροφόρο Ηρακλείου – Γουβών – Χερσονήσου (GR 1300312) οι κυριότερες εμφανίσεις ανθρακικών κατατάσσονται στη γεωλογική ζώνη της Τρίπολης. [Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013]



Εικόνα 1-8: Καρστικό υδροφόρο Βορείου Ηρακλείου [Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013]

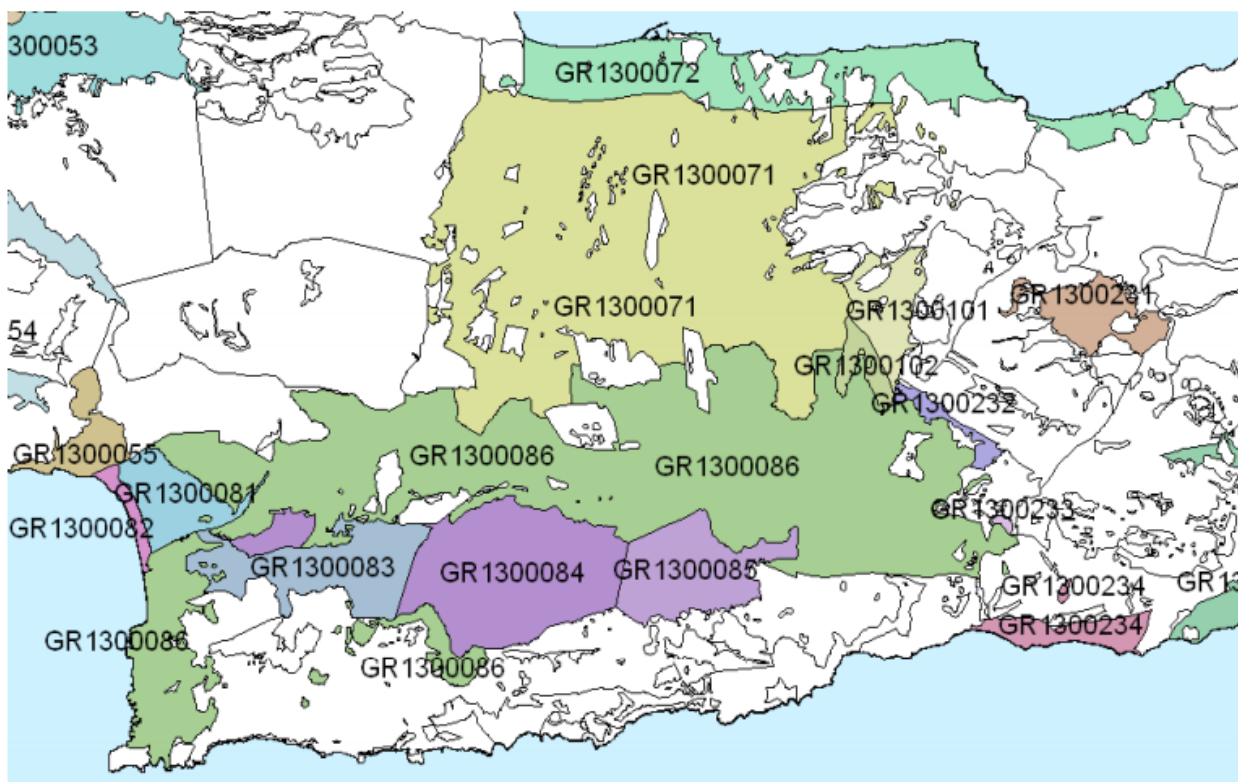
Στο Καρστικό υδροφόρο σύστημα Δίκτης γίνεται διάκριση σε επιμέρους συστήματα. Στο Καρστικό Δυτικής Δίκτης – Νιπιδιός (GR 1300111) απαντώνται πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Στο Καρστικό σύστημα Μαλίων – Σισιού (GR 1300112) απαντώνται ασβεστόλιθοι τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτοι, καθώς και ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες. [Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013]



Εικόνα 1-9: Καρστικό υδροφόρο σύστημα Δίκτης (GR 130011) [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013]

Όσον αφορά τα Πορώδη υδροφόρα συστήματα της περιοχής μελέτης, αυτά συναντώνται κυρίως στη λεκάνη του Κεντρικού και Βορείου Ηρακλείου (GR 130007), τα οποία περιλαμβάνουν τις νεογενείς και τεταρτογενείς υδροφορίες του Βόρειου και Κεντρικού Ηρακλείου και οριοθετείται μεταξύ των Καρστικών υδροσυστημάτων Ψηλορείτη – Ταλέων (δυτικά) και Δίκτης – Σελένας (ανατολικά). Το Πορώδες υδροφόρο σύστημα Βορείου – Κεντρικού Ηρακλείου (GR 1300071), όπως και το πορώδες υδροφόρο σύστημα Βόρειου – Παράκτιου Ηρακλείου (GR 1300072), περιλαμβάνει τα υδροφόρα προσχωματικών και νεογενών σχηματισμών. Οι σημαντικότεροι υδροφόροι που αναπτύσσονται στην περιοχή είναι [Κριτσωτάκης και Παυλίδου, 2013]:

- Σε νεογενείς αποθέσεις
- Σε μαργαίους ασβεστόλιθους
- Σε γύψους
- Στα κροκαλοπαγή βάσης του νεογενούς



*Εικόνα 1-10:Πορώδη υδροφόρα συστήματα λεκάνης Ηρακλείου [Κριτσωτάκης και Παυλίδου,2013]*

## 1.9 Πρόγραμμα ArcGIS

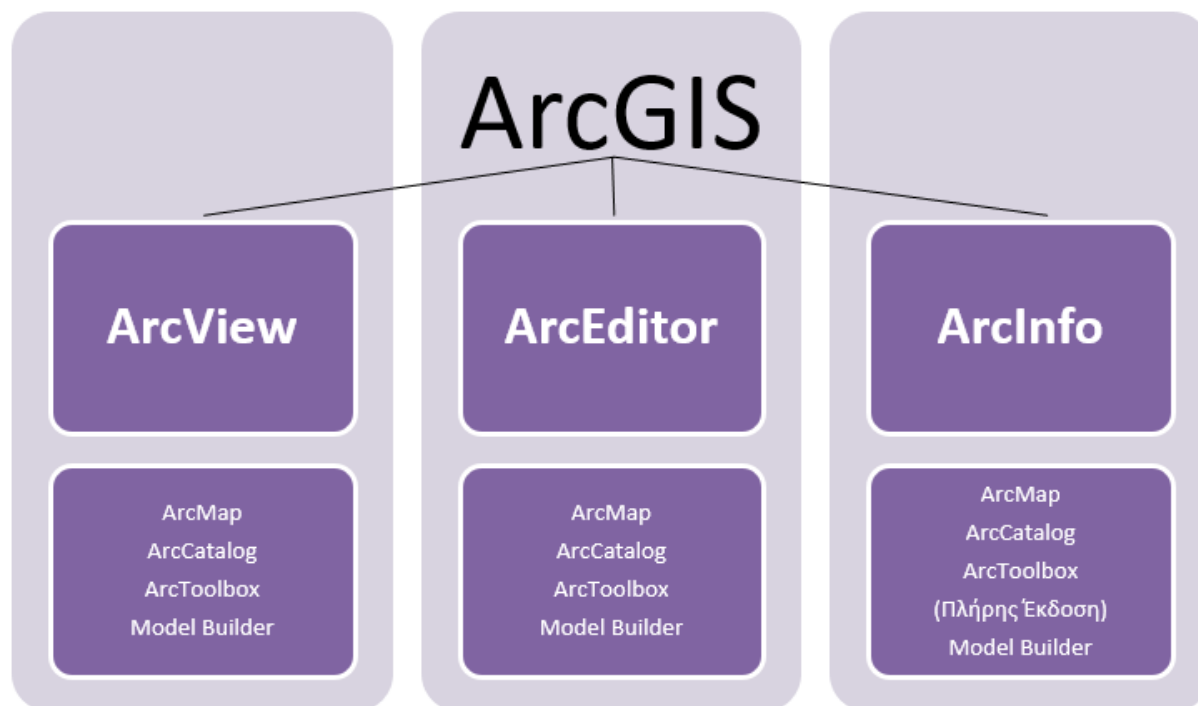
Κατά τις πρώτες δεκαετίες ανάπτυξης των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφόρησης (ΓΣΠ), οι επαγγελματίες ασχολήθηκαν κυρίως με την δημιουργία βάσεων δεδομένων, ξεκινώντας έτσι να χρησιμοποιούν τις γνώσεις του σε μια πληθώρα εφαρμογών των ΓΣΠ. Παράλληλα, η ανάπτυξη των υπολογιστών και για προσωπική χρήση, του διαδικτύου καθώς και η παγκόσμια υιοθέτηση των ΓΣΠ έπαιξαν σημαίνοντα ρόλο στην ανάπτυξη και συνεχή βελτίωση των λογισμικών αυτών.

Στη σημερινή εποχή, το πιο διαδεδομένο λογισμικό ΓΣΠ στον κόσμο είναι το λογισμικό ArcGIS. Το ArcGIS, παρέχει το πλαίσιο για την ενασχόληση με τα ΓΣΠ σε έναν απλό χρήστη, σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα με χρήση προσωπικών υπολογιστών, σε τοπικά δίκτυα στο διαδίκτυο αλλά και στο υπαίθριο πεδίο. Το ArcGIS παρέχει την δυνατότητα για την δημιουργία και χρήση χαρτών, την αξιοποίηση πληροφοριών οπουδήποτε, οποιαδήποτε στιγμή και σε οποιαδήποτε συσκευή.

Το λογισμικό ArcGIS είναι ένα συγκερασμός πολλών επιμέρους λογισμικών για μικρότερες εφαρμογές ώστε να έχουμε ένα πλήρες λογισμικό πακέτο ΓΣΠ και αποτελείται από πολλά πλαίσια εφαρμογής όπως: 1) ArcGIS Desktop, 2) ArcGIS Engine, 3) Server GIS-ArcSDE, ArcIMS, ArcGIS server και 4) Mobile GIS – ArcPad.

Το λογισμικό ArcGIS Desktop είναι η πλέον ολοκληρωμένη λύση στο χώρο των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφόρησης για τη συλλογή, επεξεργασία, διαχείριση, ανάλυση γεωγραφικών

πληροφοριών και δημοσίευση αυτών στο διαδίκτυο. Παρέχεται σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις και κάθε μια προορίζεται για την κάλυψη των αναγκών πολλών διαφορετικών χρηστών.



Εικόνα 1-11: Οι τρεις διαφορετικές εκδόσεις που παρέχονται για το ArcGIS Desktop <https://eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php>

Κάθε μία από τις εκδόσεις του ArcGIS Desktop περιλαμβάνει ένα σύνολο εφαρμογών: ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox και ModelBuilder. Επιπλέον, κάθε έκδοση περιλαμβάνει προαιρετικά συστατικά (προεκτάσεις – extensions), τα οποία εμπλουτίζουν τις δυνατότητες του λογισμικού, όπως: Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analysis, Survey Analyst, ArcPress κλπ.

Με τις δυνατότητες τις οποίες παρέχει το ArcGIS Desktop υλοποιείται οποιαδήποτε εργασία με επίκεντρο το χώρο, από την πιο απλή έως την πιο πολύπλοκη, όπως είναι η χαρτογραφική παραγωγή, η γεωγραφική ανάλυση, η επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων, η μετατροπή μεταξύ διαφορετικής μορφής τύπου δεδομένων, η απεικόνιση και η διαχείριση των δεδομένων. Παράλληλα, το λογισμικό ArcGISforDesktop μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή, τη διαχείριση και τη διαχείριση enterprisegeodatabases πολλών χρηστών, για χωρικές αναλύσεις, για διαχείριση εικόνων, εικόνων video (fullmotionvideo), LIDAR και δορυφορικών, καθώς και για την εκτέλεση εργασιών σε περιβάλλον 3D GIS.

Το περιβάλλον εργασίας των εφαρμογών του ArcGIS Desktop είναι απόλυτα εύχρηστο. Οι χρήστες το χρησιμοποιούν για την διαχείριση των ρών εργασίας και την εκτέλεση των έργων τους, καθώς και για να δημιουργήσουν δεδομένα, χάρτες, μοντέλα και εφαρμογές. Αποτελεί το απαραίτητο μέσο για την ανάπτυξη υποδομής ΓΣΠ σε οργανισμούς αλλά και στο διαδίκτυο, όπου χρησιμοποιείται για την προετοιμασία και τη δημοσίευση των γεωγραφικών πληροφοριών (Marathon Data).

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή ArcMap αποτελεί την κεντρική εφαρμογή του ArcGIS Desktop. Σε αυτό εκτελούνται όλες οι λειτουργίες, οι οποίες βασίζονται σε χάρτες και



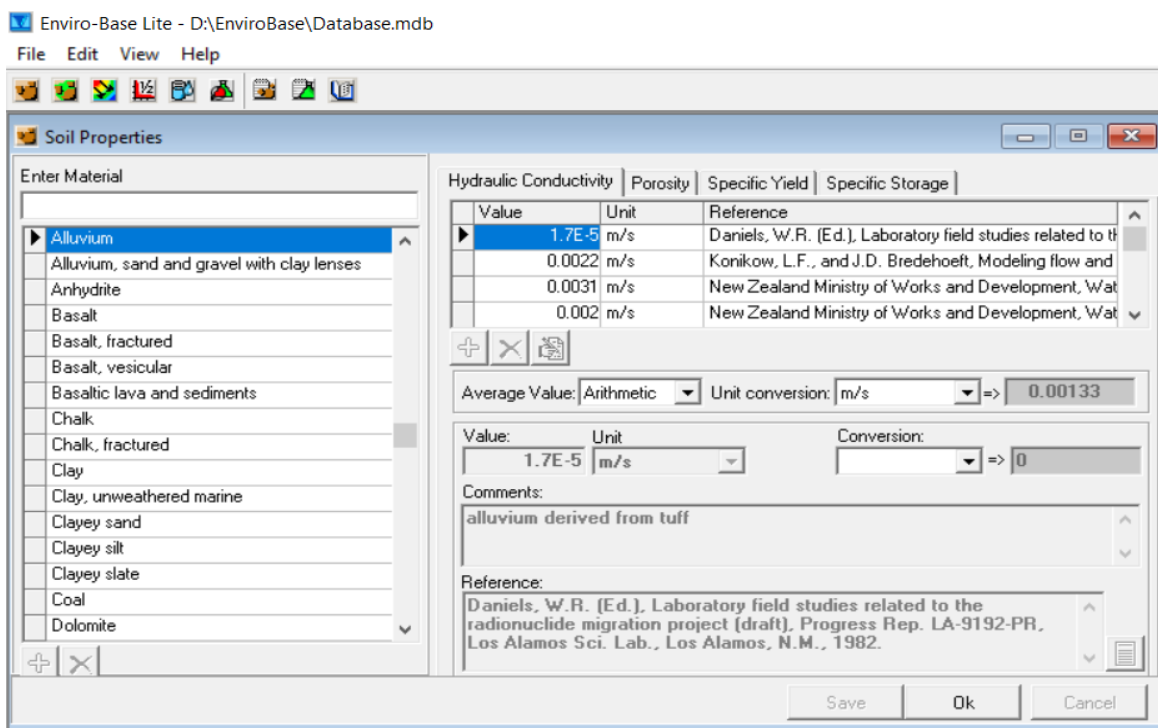
περιλαμβάνουν χαρτογραφία, ανάλυση του χάρτη και επεξεργασία. Τα αρχεία τα οποία δημιουργεί το ArcMap έχουν την προέκταση .mxd. Οι δυνατότητες της εφαρμογής συνοψίζονται ως εξής:

- Δημιουργία χαρτών
- Επεξεργασία χαρτών
- Εμφάνιση, επεξεργασία και ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων
- Αναζήτηση των χωρικών δεδομένων
- Συμβολισμός των δεδομένων με πολυάριθμους τρόπους
- Δημιουργία γραφημάτων
- Διαμόρφωση των αρχείων σε εκτυπώσιμους χάρτες

### 1.10 Πρόγραμμα EnviroBase

Το πρόγραμμα EnviroBase είναι μια βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε από την Waterloo Hydrogeologic Inc., με τιμές αναφοράς του εδάφους και των χημικών ιδιοτήτων που σχετίζονται με τις υδρογεωλογικές πρακτικές. Η βάση δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο γρήγορης αναφοράς για την εκτίμηση των τιμών που απαιτούνται για υδρολογικές μελέτες. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, με αυτές που αναφέρονται στην πρόσφατη βιβλιογραφία. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει έξι διαφορετικές κατηγορίες για εισαγωγή και ανάκτηση δεδομένων. Αυτές είναι, ιδιότητες εδάφους, προσρόφηση, διασπορά, χρόνος ημιζωής, πρότυπα νερού και χημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες του εδάφους περιλαμβάνουν τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, πορώδους, ειδικής απόδοσης και ειδικής αποθήκευσης. Οι χημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν ιξώδες, συντελεστή Henry, πίεση ατμών, Log  $K_{ow}$ , πυκνότητα και διαλυτότητα. Τέλος στο πρόγραμμα υπάρχουν παράθυρα επεξεργασίας στα οποία αναφέρονται ο τόπος του εκάστοτε υλικού, ο χημικός του τύπος και οι βιβλιογραφικές αναφορές.





Εικόνα 1-12: Παράδειγμα περιεχομένου της βάσης δεδομένων του προγράμματος Envirobase

## 1.11 Μοντέλο διαδραστικής προσομοίωσης FEFLOW

Το FEFLOW (Finite Element subsurface Flow System) είναι ένα διαδραστικό σύστημα μοντελοποίησης της υπόγειας ροής υδάτων, καθώς και της μεταφοράς μάζας και θερμότητας σε δισδιάστατη αλλά και τρισδιάστατη μορφή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για γίνει περιγραφή της χωρικής και χρονικής κατανομής των ρύπων στα υπόγεια ύδατα, για τη μοντελοποίηση γεωθερμικών διαδικασιών, για τον προσδιορισμό της διάρκειας και του χρόνου μετακίνησης των ρύπων στους υπόγειους υδροφορείς, έτσι ώστε να οργανωθούν και να σχεδιαστούν στρατηγικές αποκατάστασης, αλλά και για να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός εναλλακτικών και αποτελεσματικών συστημάτων παρακολούθησης (H.-J.G. Diersch, 2003).

Το FEFLOW χρησιμοποιείται ευρέως σαν εργαλείο μοντελοποίησης σε πανεπιστήμια, ερευνητικά ινστιτούτα, κυβερνητικά γραφεία καθώς και επιχειρήσεις. Το λογισμικό είναι συμβατό και μπορεί να αλληλοεπιδράσει με αρκετές εφαρμογές του GIS, όπως το ArcInfo, το ArcView και το ArcGIS. Δημιουργήθηκε το 1979 και έκτοτε αναβαθμίζεται συνεχώς. Ο κώδικας του είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού ANSI C/C++ και διαθέτει παραπάνω από ένα εκατομμύριο γραμμές (H.-J.G. Diersch, 2003).

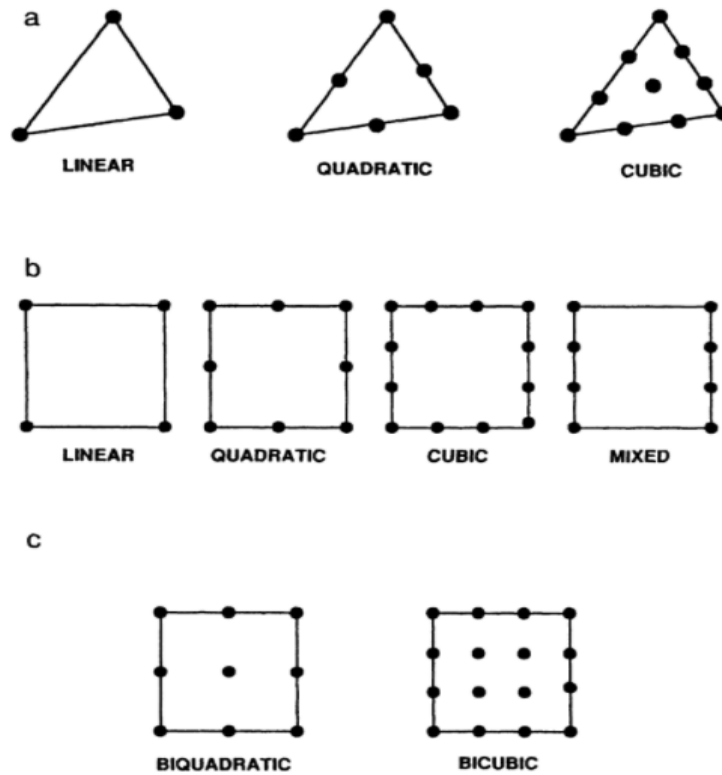
### 1.11.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Το FEFLOW, χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων όπως υποδηλώνει και η ονομασία του. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί μια συναρτησιακή σχέση, όπου σχετίζεται με την μερική διαφορική εξίσωση. Η συναρτησιακή αυτή σχέση προϋποθέτει μια αντιστοιχία, που εκχωρεί ένα συγκεκριμένο αριθμό σε κάθε εξίσωση κάποιας τάξης. Είναι μια ιδιαίτερη εξίσωση στην οποία κάθε εξαρτημένη μεταβλητή της είναι και μία εξίσωση (Bear, 1988). Συνοπτικά η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί την ακόλουθη διαδικασία (Bear, 1988):

- a) Εξαγωγή του παραμετρικού προβλήματος (variational problem) για την μερική διαφορική εξίσωση που διέπει την υπό εξέταση ροή.
- b) Διαχωρισμός του πεδίου σε στοιχεία.
- c) Διαμόρφωση της παραμετρικής συναρτησιακής σχέσης εντός του στοιχείου
- d) Λήψη παραγώγων αναφορικά με τις εξαρτημένες μεταβλητές σε όλους τους κόμβους του στοιχείου.
- e) Συγκέντρωση των εξισώσεων για όλα τα στοιχεία.
- f) Έκφραση των οριακών συνθηκών σε όρους κομβικών τιμών.
- g) Ενσωμάτωση των οριακών συνθηκών στις εξισώσεις και εκκίνηση λύσης του προβλήματος.
- h) Το σχήμα και το μέγεθος των στοιχείων είναι αυθαίρετα.

Διαφορετικά σχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα. Μικρότερα στοιχεία μπορούν να επιλεγούν σε περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις ιδιότητες του υλικού ή στις τιμές των εξαρτώμενων μεταβλητών. Καθώς οι εξαρτώμενες μεταβλητές υποτίθεται ότι μεταβάλλονται γραμμικά κατά μήκος της πλευράς κάθε στοιχείου, είναι συνεχείς από το ένα στοιχείο στο άλλο. Παρ' όλα αυτά τα παράγωγα τους ενδέχεται να έχουν ασυνέχεια.

Η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι αποδοτικότερη όταν απαιτείται να προσεγγιστούν όρια με ανώμαλο σχήμα, εξαιτίας της διευθέτησης ξεχωριστών στοιχείων καθώς και του καθορισμού της θέσης των αρχικών και οριακών συνθηκών. Ακόμα δίνετε η δυνατότητα ορισμού της διακύμανσης του υδραυλικού ύψους εντός ενός στοιχείου με χρήση της μεθόδου παρεμβολής. Επίσης, παρέχει μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό του δικτύου των κόμβων λόγω των διαφορετικών σχημάτων των στοιχείων. Τα σχήματα τα οποία μπορούν να πάρουν τα στοιχεία είναι τρίγωνα ή τετράεδρα αν είναι δισδιάστατα και τετράεδρα, εξάεδρα ή πρίσματα αν αυτά είναι τρισδιάστατα. Ανάλογα με την φύση της παρεμβολής που χρησιμοποιείται για να καθοριστεί το υδραυλικό ύψος εντός του στοιχείου, ορίζεται το κατά πόσο το στοιχείο θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό. Συχνότερα χρησιμοποιούνται τα γραμμικά στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992).

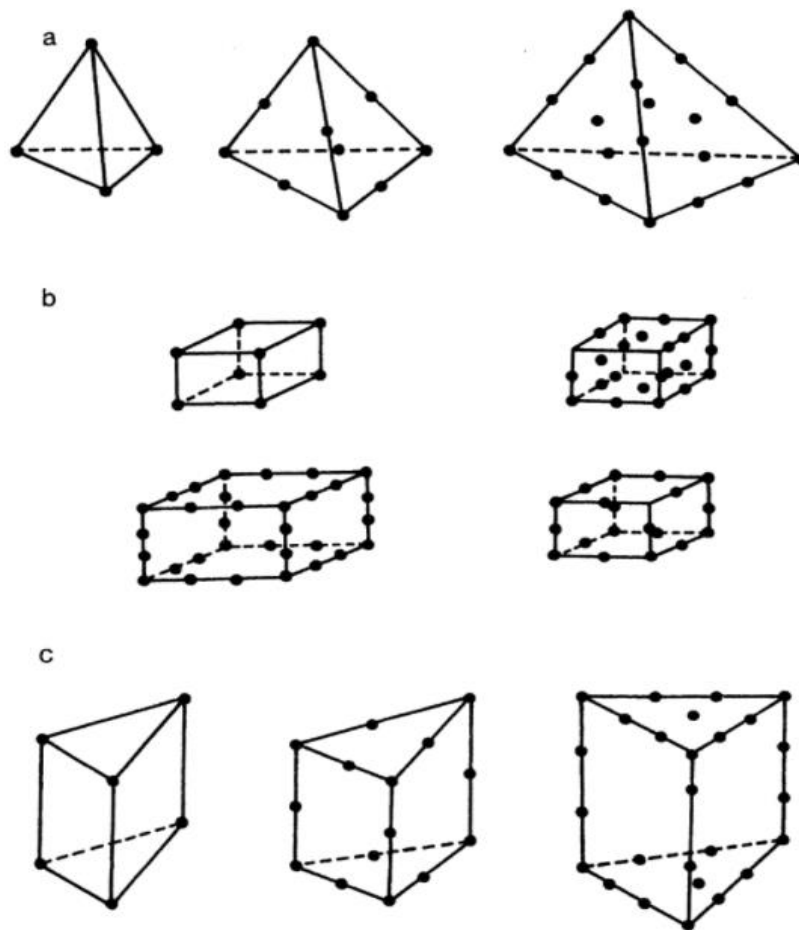


Εικόνα 1-13: Δισδιάστατα στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992).

a) τριγωνικά στοιχεία

b) τετράπλευρα στοιχεία (Serendipity family)

c) τετράπλευρα στοιχεία (Lagrange family)



Εικόνα 1-14: Τρισδιάστατα στοιχεία (Anderson and Woessner, 1992).

α) τετράεδρα στοιχεία

β) εξαέδρα στοιχεία

γ) πρίσματα

### 1.11.2 Βασικές εξισώσεις FEFLOW

**Εξίσωση συνέχειας:**

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

Όπου,

$S_o$ : ο συντελεστής αποθήκευσης

$h$ : το υδραυλικό ύψος

$q_i^f$ : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

$Q_{EB}$ : ο παράγοντας επεκταμένης προσέγγισης Boussinesq

$Q_p$ : η συνάρτηση ροής

**Ταχύτητα Darcy:**

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

Όπου,

$q_i^f$ : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

$K_{ij}$ : η υδραυλική αγωγιμότητα

$f_\mu$ : συνάρτηση σχέσης ιξώδους

$h$ : το υδραυλικό ύψος

$\rho_f$ : η πυκνότητα του ρευστού

$\rho_o^f$ : η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού

$e_j$ : το μοναδιαίο διάνυσμα της βαρύτητας

**Υδραυλικό ύψος:**

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

Όπου,

$h$ : το υδραυλικό ύψος

$p^f$ : η πυκνότητα του ρευστού

$\rho_o^f$ : η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$x_l$ : η κατεύθυνση της βαρυτικής δράσης στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

**Υδραυλική αγωγιμότητα:**

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

Όπου,

$K_{ij}$ : η υδραυλική αγωγιμότητα

$k_{ij}^f$ : ο τανυστής της διαπερατότητας

$\rho_o^f$ : η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$\mu_o^f$ : η τιμή αναφοράς του δυναμικού ιξώδους

### Αρχή διατήρησης μάζας:

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

Όπου,

$\varepsilon$ : 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

$\theta$ : ο ρυθμός διάσπασης

$Q_c$ : η συνάρτηση της συγκέντρωσης των ρύπων

### Υδροδυναμική διασπορά:

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

Όπου,

$D_{ij}$ : η υδροδυναμική διασπορά

$\varepsilon$ : το πορώδες

$D_d$ : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης

$\beta_L$ : η διαμήκης διασπορά των χημικών ειδών

$\beta_T$ : η εγκάρσια διασπορά των χημικών ειδών

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

$q_i^f$ : η ταχύτητα Darcy του ρευστού

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

### 1.11.3 Αρχικές και οριακές συνθήκες για τη ροή (Initial and Boundary conditions)

#### Αρχικές συνθήκες για τη ροή

Είναι οι τιμές των υδραυλικών υψών στην υπό εξέταση περιοχή μελέτης την στιγμή που αρχίζει η προσομοίωση, δηλαδή για χρόνο  $t=0$ .

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

Όπου,

$h_I$ : η χωρικά μεταβαλλόμενη σχέση των αρχικών κατανομών

#### Οριακές συνθήκες για τη ροή

##### 1<sup>ου</sup> είδους (τύπος Dirichlet)

Περιγράφει το σταθερό δυναμικό σε ένα κόμβο.

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

Όπου,

$h_1^R$ : καθορισμένες οριακές τιμές του υδραυλικού ύψους.

##### 2<sup>ου</sup> είδους (τύπος Neumann)

Εκχωρεί τιμή ρυθμού ροής σε κόμβο. Ισχύει μόνο όταν οριστεί κάποια απόσταση επιλέγοντας διαδοχικούς κόμβους.

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

Όπου,

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

$q_h^R$ : καθορισμένη κανονική οριακή ροή του ρευστού

$K_{ij}$ : η υδραυλική αγωγιμότητα

$f_\mu$ : η καταστατική εξίσωση σε συσχέτιση με την πυκνότητα

$p^f$ : η πυκνότητα του ρευστού

$\rho_o^f$ : η πυκνότητα αναφοράς του ρευστού

$e_j$ : το μοναδιαίο διάνυσμα της βαρύτητας

$n_i$ : μοναδιαίο διάνυσμα

Οι εξισώσεις αντλήθηκαν από το reference manual του FEFLOW (Dierckx, 2003).

#### 1.11.4 Βαθμονόμηση και αξιολόγηση του μοντέλου

Ο σκοπός της βαθμονόμησης είναι να αποδείξει ότι το μοντέλο έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει τις πραγματικές ροές αλλά και τις μεταβαλλόμενες καταστάσεις. Κατά τη βαθμονόμηση ερευνάται το σύνολο των παραμέτρων και τάσεων, έτσι ώστε να προσεγγιστούν καλύτερα οι πραγματικές τιμές των υδραυλικών υψών και των διαφορών ροών. Η διαδικασία της βαθμονόμησης μπορεί να επιλεχθεί είτε με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος είτε με τη χρήση πιο πολύπλοκων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης βαθμονόμησης.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης πραγματοποιείται βάσει διαφόρων κριτηρίων, τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών. Το βασικότερο ποσοτικό κριτήριο είναι η γραφική απεικόνιση της συσχέτισης ανάμεσα στις προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου και τις πραγματικές τιμές. Στα ποιοτικά κριτήρια περιέχονται γενικευμένες μορφές και ιδιαιτερότητες του δικτύου ροής καθώς και άλλοι παράμετροι. [Αρχοντέλη, 2016]

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης γίνεται με τον υπολογισμό του σφάλματος του μοντέλου και μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους. [Anderson & Woessner, 1992]

1. **Μέσο σφάλμα** (ME, Mean Error): η μέση διαφορά μεταξύ των πραγματικών (hm) και προσομοιωμένων (hs) τιμών και δίνεται από τη σχέση:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hm - hs)_i$$

Όπου,

n: πλήθος τιμών βαθμονόμησης

2. **Μέσο απόλυτο σφάλμα** (MAE, Mean Absolute Error): ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιωμένων φορτίων και δίνεται από τη σχέση:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(hm - hs)_i|$$

3. **Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος** (RMS, Root Mean Square): ο μέσος όρος των τετραγώνων των διαφορών των πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών φορτίου και δίνεται από τη σχέση:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (hm - hs)^2}{n}}$$



Ανάλογα με το κριτήριο βαθμονόμησης που επιλέγεται επηρεάζονται οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες επιλέχτηκαν για το μοντέλο. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης και αξιοπιστία της προσομοίωσης ορίζεται η ανώτατη τιμή του σφάλματος του μοντέλου. [Anderson & Woessner, 1992]

## 2 Μεθοδολογία

### 2.1 Προ επεξεργασία δεδομένων

Στην ενότητα αυτή, γίνεται ανάλυση της επεξεργασίας δεδομένων με σκοπό την εισαγωγή τους στα προγράμματα GIS και FEFLOW. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε κυρίως στο υπολογιστικό πρόγραμμα του excel αλλά και στο σημειωματάριο (notepad).

#### 2.1.1 Μετατροπή αρχείων xls σε αρχεία csv

Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας που κρίθηκε απαραίτητο να γίνει, ήταν η μετατροπή των αρχείων σε μορφή .xls, που περιείχαν τα δεδομένα για βάθος και στάθμες των πηγαδιών γεωτρήσεων στις περιοχές Μαλίων και Χερσονήσου, σε μορφή .csv. Ο λόγος που ήταν αναγκαία η μετατροπή αυτή ήταν, επειδή το πρόγραμμα GIS στο οποίο έπρεπε να εισαχθούν τα αρχεία αυτά, ώστε να δημιουργηθούν τα απαραίτητα shapefile για να εισαχθούν μετέπειτα στο FEFLOW, δεν δέχεται αρχεία της μορφής xls, σε αντίθεση με τα αρχεία csv.

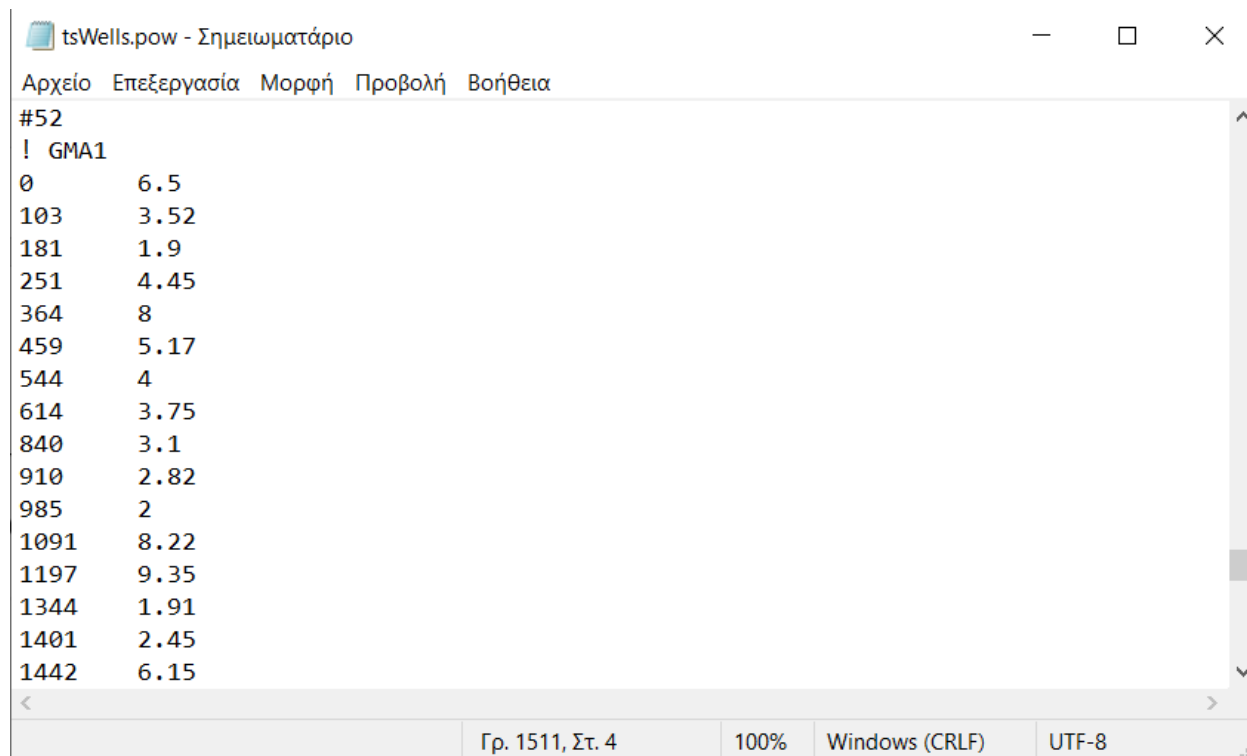
#### 2.1.2 Δημιουργία χρονοσειρών (Time Series)

Το επόμενο στάδιο είναι πως με βάση δεδομένα που ελήφθησαν από την περιφέρεια Κρήτης και αφορούσαν το βάθος των πηγαδιών παρατήρησης, αλλά και την στάθμη του νερού σε συγκεκριμένες ημερομηνίες που είχαν πραγματοποιηθεί δειγματοληπτικοί έλεγχοι δημιουργήθηκαν νέα αρχεία excel τα οποία περιείχαν δεδομένα όπως η ημερομηνία των δειγματοληψιών, η ημερομηνία σε μορφή η οποία να μπορεί να αναγνωρισθεί από το πρόγραμμα FEFLOW, το βάθος της στάθμης του νερού καθώς και το υδραυλικό ύψος κάθε πηγαδιού. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η παλαιότερη ημερομηνία κατά την οποία ξεκινούν οι έλεγχοι είναι η 27 Ιανουαρίου του 2000, η οποία σε μορφή αριθμού η οποία αναγνωρίζεται από το μοντέλο FEFLOW είναι 36552. Για να υπολογιστούν οι μέρες λοιπόν κατά τις οποίες γίνονταν οι έλεγχοι γινόταν μετατροπή της συμβατικής μορφής ημερομηνίας σε αριθμό από την οποία αφαιρούνταν η παλαιότερη ημερομηνία. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τα απαραίτητα αρχεία με τις τιμές των δεδομένων που χρειαζόμασταν για να δημιουργήσουμε τις χρονοσειρές των πηγαδιών αυτών.

=B12									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ΗΜΕΡΟΜ.	ΣΤΑΘΜΗ		ΕΝΔΕΙΞΗ	ΕΝΔΕΙΞΗ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	Date excel	Date Feflow	Depth	Hydraulic Head
28/11/03	74.90			5'063		37953	1401	74.90	2.45
08/01/04	71.20			5'063		37994	1442	71.20	6.15
22/03/04	70.00			5'078		38068	1516	70.00	7.35
24/08/04	76.00			6'341		38223	1671	76.00	1.35
20/09/04	76.25	78.75		6'580		38250	1698	76.25	1.10
27/12/04	74.00			6'650		38348	1796	74.00	3.35
24/05/07		76.90				39226	2674	0.00	
07/12/07	73.80			11'016		39423	2871	73.80	3.55
17/03/08	70.30					39524	2972	70.30	7.05
08/01/10	73.00			14'949		40186	3634	73.00	4.35
15/02/11	71.00			16'302		40589	4037	71.00	6.35
24/02/11	71.00			16'302		40598	4046	71.00	6.35
01/06/11	73.00			16'302		40695	4143	73.00	4.35
10/11/11		74.60		16'774		40857	4305	0.00	
05/01/12				16'865		40913	4361	0.00	

Εικόνα 2-1: Επεξεργασία δεδομένων για την δημιουργία αρχείων.

Για να καταφέρουμε να εισαγάγουμε τα αρχεία αυτά στο μοντέλο μας χρειάστηκε να γίνει περαιτέρω επεξεργασία. Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση του σημειωματάριου (notepad), δημιουργήθηκαν αρχεία της μορφής .pow, τα οποία μπορεί να διαβάσει το πρόγραμμα FEFLOW. Τα αρχεία αυτά περιείχαν το αναγνωριστικό κάθε πηγαδιού παρατήρησης (TSID), το όνομα κάθε πηγαδιού και δύο στήλες από τις οποίες η μία αφορούσε τις ημερομηνίες και η άλλη το υδραυλικό ύψος που είχε μετρηθεί στην εκάστοτε ημερομηνία.



Εικόνα 2-2: Time series σε μορφή αρχείου pow.

## 2.2 Μεθοδολογία EnviroBase

Όπως αναφέρθηκε μέσα από το EnviroBase μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τα τις ιδιότητες του εδάφους σε μία περιοχή. Έτσι με βάση την γνωστή βιβλιογραφία λήφθηκαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους των διάφορων γεωλογικών σχηματισμών που έχουν βρεθεί στην περιοχή μελέτης. Στον πίνακα 2-1 παρουσιάζονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και πορώδους για τον κάθε σχηματισμό που βρέθηκε στην περιοχή μελέτης, η ονομασία κάθε σχηματισμού, ο συμβολισμός της υδροπερατότητας του καθενός καθώς και η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκαν οι πληροφορίες. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία είχαν μονάδα μέτρησης m/s, αλλά για την εισαγωγή τους στο μοντέλο έγινε η μετατροπή τους σε m/d. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατίθενται στον πίνακα 2-1.

Ονομασία σχηματισμού	Σχηματισμός	Υδροπερατότητα	Τιμή Υδραυλικής αγωγιμότητας (m/d)	Πορώδες	Βιβλιογραφία
Ιζήματα της παράκτιας περιοχής: άμμοι ακτών, θαλάσσιες αναβαθμίδες	cd	P1	46.656	0.42	Morris, D.A. and A.I. Johnson, Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analysed by the Hydrologic Laboratories of the U.S. Geological Survey 1948-1960. U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1839-D, 42p, 1967.
Σχηματισμός Βιάννου: καλά στρωμένες άργιλοι, ιλυούχες άργιλοι και καλά διαβαθμισμένες καστανωπές άμμοι	M.m	P3	2.59E-3	0.55	Rehm, B.W., G.H. Groenewold and K.A. Morin, Hydraulic properties of coal and related materials, Northern Great Plains, Ground Water, 18(6), 551-561, 1980. Davis, S.N., Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89, 1969.
Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας: βιοκλαστικοί, λατυποπαγείς ή κροκαλοπαγείς ασβεστόλιθοι και υφαλώδεις ασβεστόλιθοι	M.k	P2	4.06E-1	0.23	Fenske, P.R., Hydrogeology and radionuclide transport, monitoring well HT-2m, Tatum Dome, Mississippi, Proj. Rep. 25, Tech. Rep. NVD-1253-6, Cent. for Water Resour. Res.,

					Desert Res. Inst., Univ. of Nev. Syst., Reno, 1973.
Σχηματισμός Φοινικιάς: ομογενείς μάργες ή μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	PI	P3	3.63E-2	0.18	Davis, S.N., Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89, 1969.
Ασβεστόλιθοι: τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτοι	Ks.k	K1	120.96	0.025	Lambrakis, N., H. Zographos-Nokas and G. Kallergis., Salinization problems of coastal aquifers. Examples from Pelonnesus, Crete and Syros. Proceedings of Third Congress of GCMWR, Syros, 1997.
Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα: λατύπες κυρίως ανθρακικής σύστασης	SC-CS	P1	26.784	0.28	Thierrin, J., G.B. Davis and C. Baber, A ground-water tracer test with deuterated compounds for monitoring in situ biodegradation and retardation of aromatic hydrocarbons, Ground Water, 33(3), 469-475, 1995.
Λατυποπαγή: αποτελούνται από θραύσματα πρωτογενούς ασβεστόλιθου	Pt	P1	9.504	0.123	Kreft, A., A. Lenda, A. Turek, A. Zuber, and K. Czauderna, Determination of effective porosities by the two-well pulse method, Isot. Tech. Groundwater Hydrol., Proc. Symp., 2, 295-312, 1974.

Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες	T-Js.k	K1	457.92	0.33	Claasen, H.C. and E.H. Cordes, Two-well recirculating tracer test in fractured carbonate rock, Nevada, Hydrol. Sci. Bull., 20(3), 367-382, 1975.
Αλλουβιακές αποθέσεις: χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά	al	P1	86.4	0.3	Fried, J.J., Groundwater Pollution, Elsevier, New York, 1975. Konikow, L.F., Modeling solute transport in ground water, in Environmental Sensing and Assessment: Proceedings of the International Conference, article 20-3, Institute for Electrical and Electronic Engineers, Piscataway, N.J., 1976.
Ασβεστόλιθοι: ανακρυσταλλωμένοι, τεφρόμαυροι κατά θέσεις δολοματικοί	P-E.k	K1	120.96	0.28	Davis, S.N., Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89, 1969.
Φλύσσης: εναλλαγές καστανών, ερυθρών αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών	ft	A1	1.21E-6	0.05	Davis, S.N., Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89, 1969.
Ασβεστόλιθοι:	K.k	K2	9.504	0.123	Kreft, A., A. Lenda,

λεπτο-μεσοστρωματώδεις, λευκότεφροι μέχρι ροδότεφροι					A. Turek, A. Zuber, and K. Czauderna, Determination of effective porosities by the two-well pulse method, Isot. Tech. Groundwater Hydrol., Proc. Symp., 2, 295-312, 1974.
Ενότητα πετρωμάτων χαμηλής μεταμόρφωσης: φυλλίτες, χαλαζίτες και σερικιτικοί σχιστόλιθοι	ph	A2	2.51E-5	0.233	Mercado, A., Recharge and mixing tests at Yavne 20 well field, Underground Water Storage Study Tech. Rep. 12, Publ. 611, Tahal-Water Plann. for Isr., Tel Aviv, 1966.
Πλακώδεις ασβεστόλιθοι: κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά θέσεις μάρμαρα	Jm-E.k	K2	28.512	0.01	Rabinowitz, D.D. and G.W. Gross, Environmental tritium as a hydrometeorologic tool in the Roswell Basin, New Mexico, Tech. Completion Rep. OWRR:A-037-NMEX, N. M. Water Resour. Res. Inst., Las Cruces, 1977.

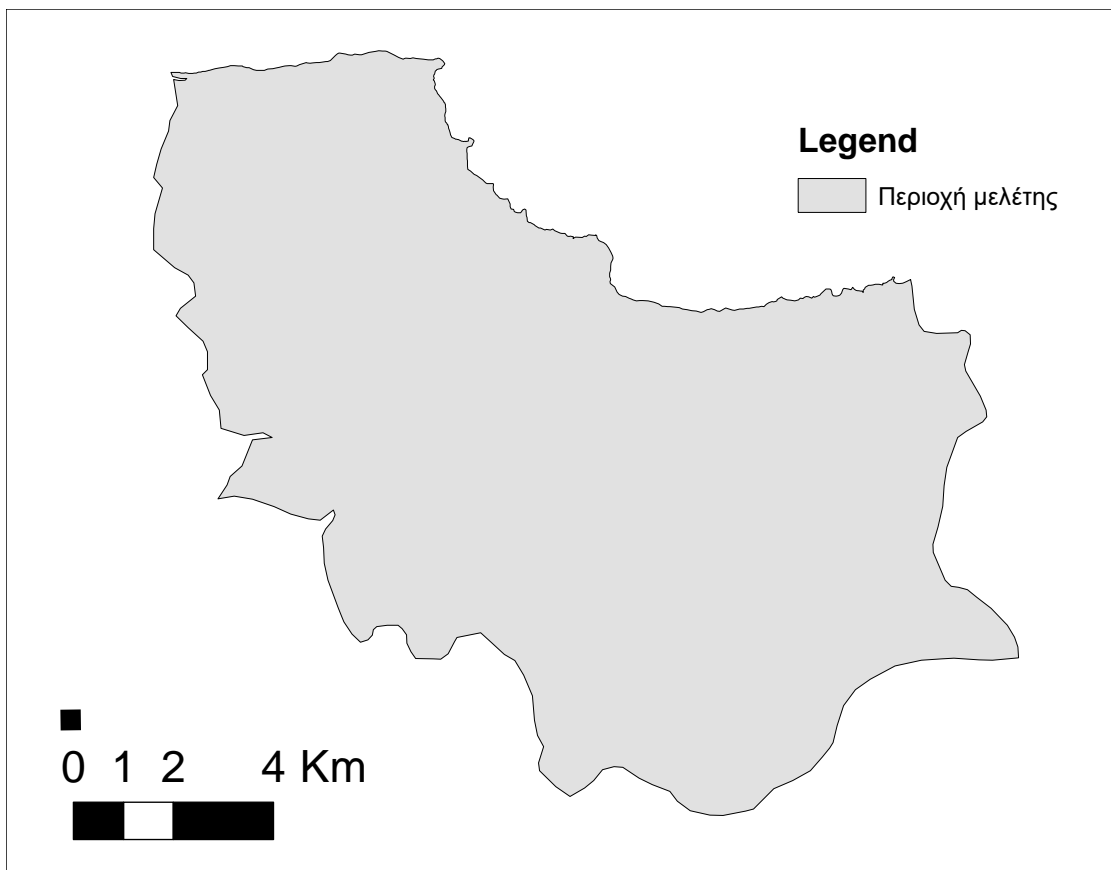
Πίνακας 2-1: Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής μελέτης.

Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική συνθήκη για την υδραυλική αγωγιμότητα και στη συνέχεια τροποποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

### 2.3 Μεθοδολογία ArcGIS

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση του προγράμματος ArcGIS για την επεξεργασία δεδομένων και τη δημιουργία διαφόρων shapefile που έπρεπε να προστεθούν στο μοντέλο προσομοίωσης FEFLOW, έτσι ώστε να γίνει με ακρίβεια η προσομοίωση του υδραυλικού ύψους της περιοχής.

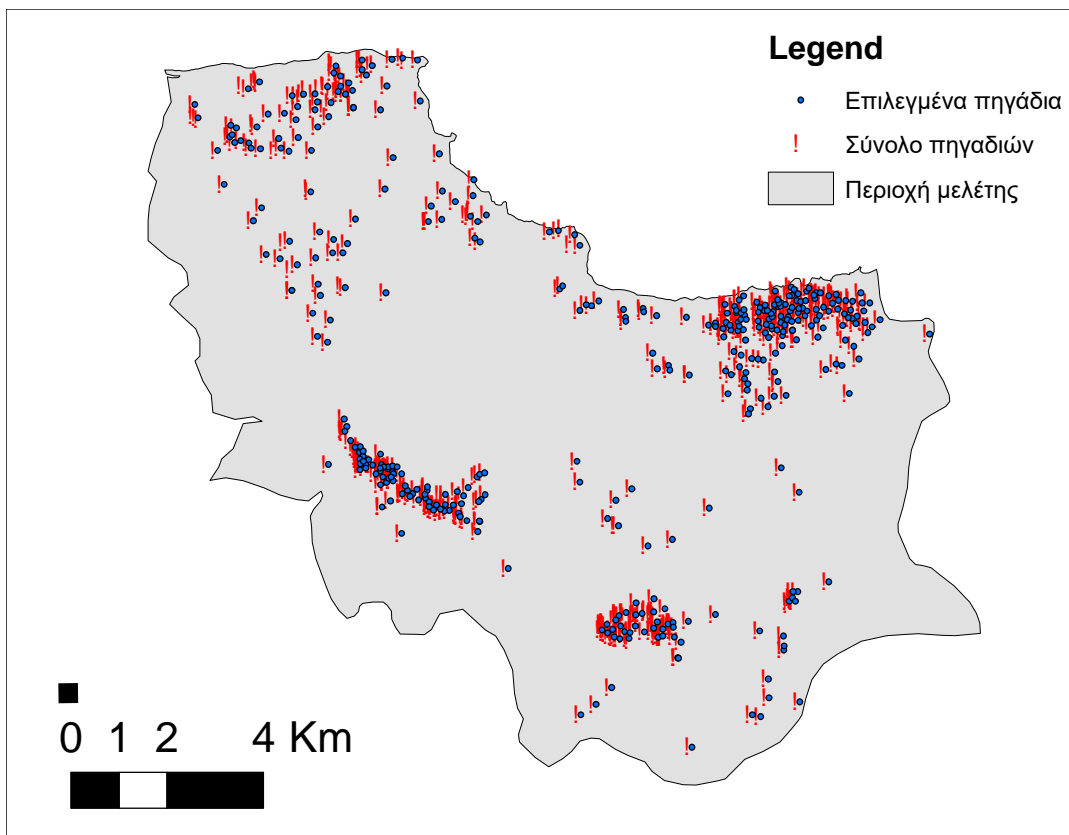
Το πρώτο βήμα που έπρεπε να γίνει ήταν να δημιουργηθεί το περίγραμμα της περιοχής μελέτης (mask). Αυτό έγινε με την βοήθεια της εντολής clip με την οποία κρατήθηκε από ολόκληρο το νομό του Ηρακλείου μόνο το απαραίτητο τμήμα για αυτήν την εργασία. Με βάση το περίγραμμα αυτό δημιουργήθηκε το κατάλληλο shape file που αργότερα εισήχθη στο μοντέλο FEFLOW.



*Χάρτης 2-1: Περίγραμμα περιοχής μελέτης.*

Στη συνέχεια εισήχθησαν στο πρόγραμμα τα αρχεία που μετατράπηκαν σε αρχεία της μορφής csv. Τα αρχεία αυτά περιείχαν δεδομένα για τα πηγάδια γεωτρήσεων στις περιοχές Χερσονήσου και Μαλίων. Τα δεδομένα αυτά αφορούσαν σε συντεταγμένες του κάθε πηγαδιού, βάθος, στάθμη και υδραυλική στάθμη για κάθε ένα από αυτά. Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή των Μαλίων υπήρχαν δεδομένα για 289 πηγάδια, ενώ για την περιοχή της Χερσονήσου υπήρχαν δεδομένα για 387 πηγάδια. Επειδή η κατανομή των πηγαδιών ήταν αρκετά πυκνή σε ορισμένα σημεία της περιοχής μελέτης, κρίθηκε αναγκαίο να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των πηγαδιών, επειδή δεν ήταν εφικτή η δημιουργία δικτύου κόμβων σε μεταγενέστερο στάδιο στο πρόγραμμα FEFLOW. Η μείωση των πηγαδιών έγινε έπειτα από διαλογή με το χέρι, με στόχο την όσο δυνατόν καλύτερη αντιπροσώπευση όλων των πηγαδιών που θα έμεναν εκτός. Ύστερα από την διαλογή αυτή, ο συνολικός αριθμός των πηγαδιών που παρέμειναν στην περιοχή μελέτης ανήλθε στα 404 πηγάδια.



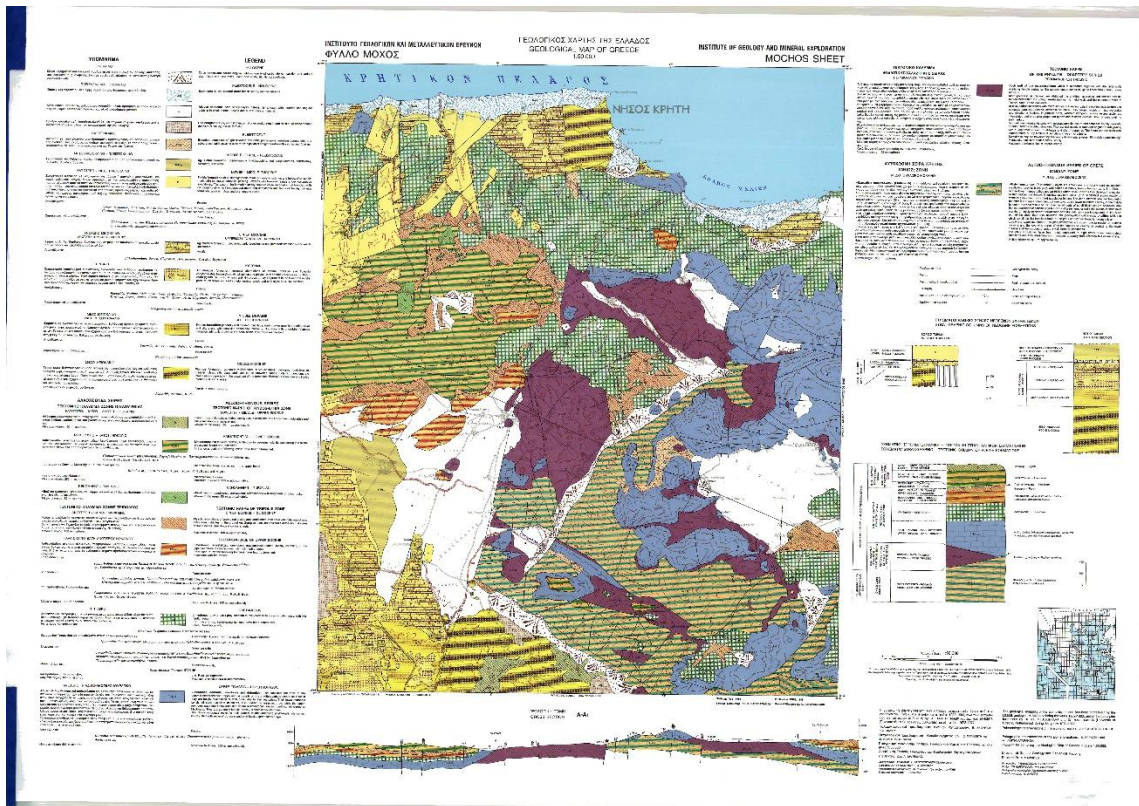


Χάρτης 2-2: Αποτέλεσμα μετά τη διαλογή των πηγαδιών.

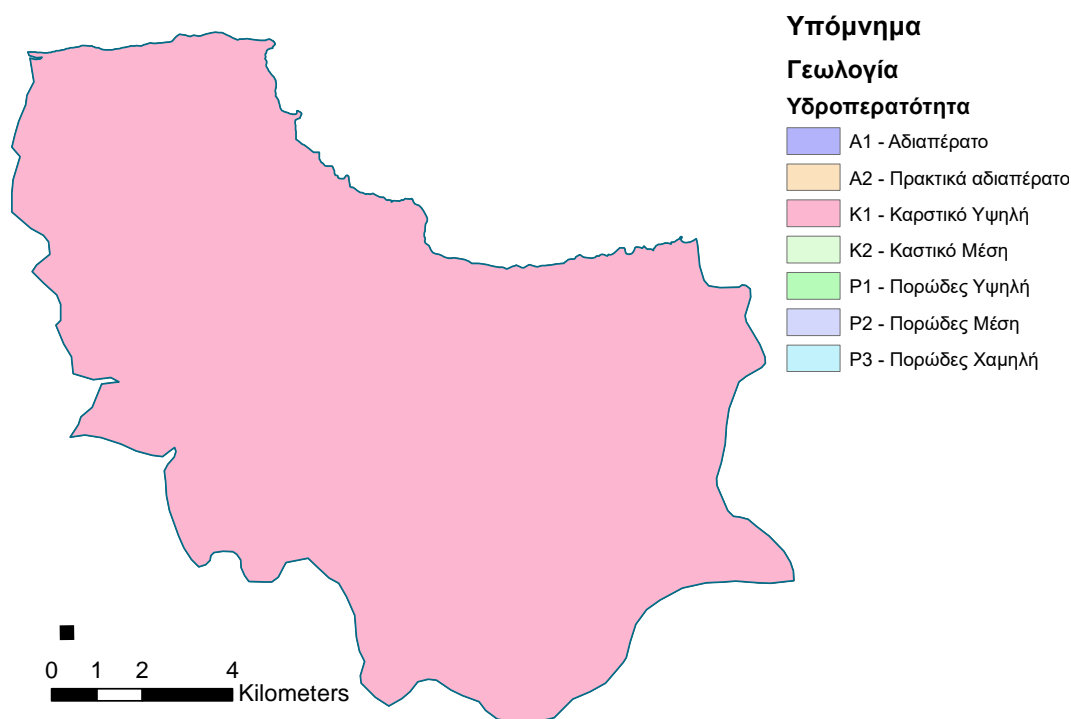
Αφού ολοκληρώθηκε η διαλογή των πηγαδιών, έγινε χρήση της εντολής *near*, έτσι ώστε όλα τα πηγάδια που έμειναν εκτός μετά την διαλογή, να αντιστοιχηθούν με το πλησιέστερο σε απόσταση, από αυτά που επιλέχθηκαν. Αυτό έγινε, γιατί το κάθε ένα από τα πηγάδια που έμειναν εκτός περιείχε δεδομένα τα οποία δεν έπρεπε να παραληφθούν για να ολοκληρωθεί σωστά η εργασία. Με χρήση της εντολής *rinot*, τα δεδομένα αυτών των πηγαδιών συμψηφίστηκαν με αυτά των κοντινών τους και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος για το βάθος, τη στάθμη και την υδραυλική στάθμη σε καθένα από αυτά. Οι νέες αυτές τιμές, αποτέλεσαν τα νέα δεδομένα που λήφθηκαν υπόψιν για κάθε πηγάδι. Τέλος δημιουργήθηκε το απαραίτητο *shape file* με τα επιλεγμένα πηγάδια και στη συνέχεια εισήχθη στο μοντέλο του FEFLOW.

Στη συνέχεια, έγινε εισαγωγή στο πρόγραμμα GIS του αρχείου που περιείχε τα δεδομένα που αφορούσαν την γεωλογία της περιοχής και ειδικότερα τα γεωλογικά πετρώματα που εμφανίζονται στην επιφάνεια του εδάφους. Η γεωλογία της περιοχής ήταν χωρισμένη σε επιμέρους πολύγωνα. Για το κάθε ένα από αυτά, τα δεδομένα που υπήρχαν περιείχαν πληροφορίες σχετικά με τον σχηματισμό (*formation*) των πετρωμάτων και την υδροπερατότητα τους. Ύστερα, με βάση την των γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) της περιοχής Μοχού χωρίστηκε το υπέδαφος της περιοχής μελέτης σε τέσσερα στρώματα (*layers*), ώστε να διευκρινιστούν τα πετρώματα που υπήρχαν σε κάθε στρώμα, και εν συνεχεία να βρεθεί η υδραυλική τους αγωγιμότητα. Με βάση τις τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε γεωλογικό σχηματισμό του Πίνακα 2.1 συμπληρώθηκαν οι υδραυλικές αγωγιμότητες για κάθε πολύγωνο σε όλα τα στρώματα. Το αρχείο με τις τιμές της

υδραυλικής αγωγιμότητας εισήχθη αργότερα στο μοντέλο FEFLOW και αποτέλεσε τις αρχικές συνθήκες για τις υδραυλικές αγωγιμότητες κατά την βαθμονόμηση.

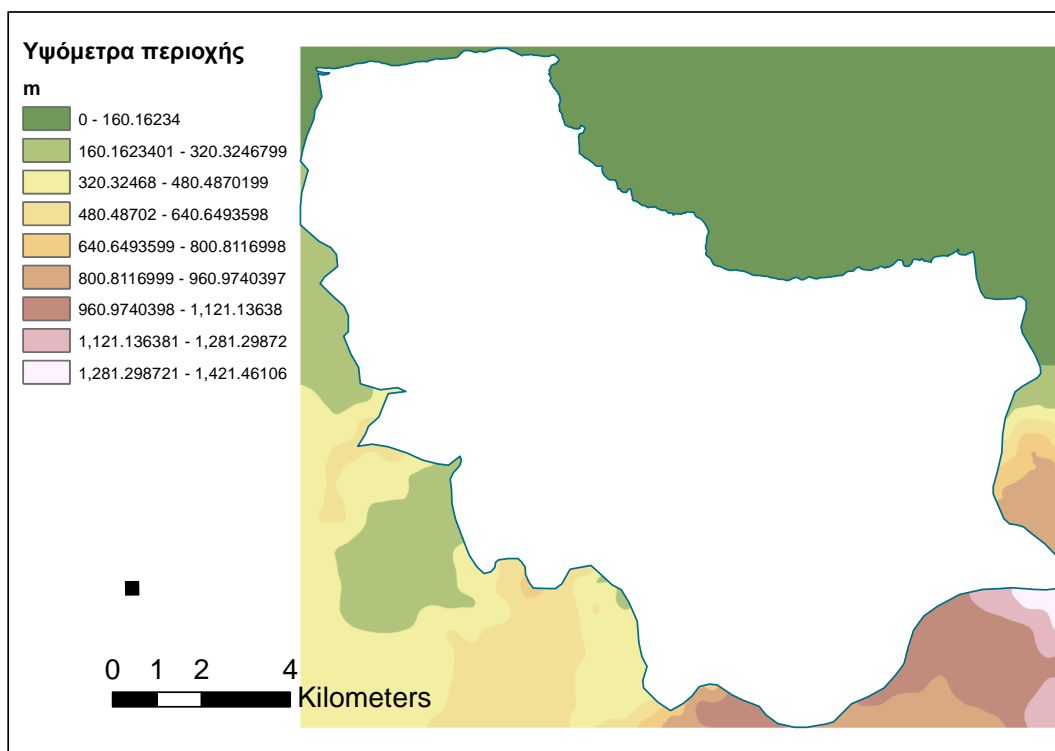


Χάρτης 2-3: Χάρτης ΙΓΜΕ για την περιοχή του ΜΟΧΟΥ.



*Χάρτης 2-4: Χάρτης υδροπερατότητας της περιοχής μελέτης.*

Το επόμενο βήμα που έπρεπε να γίνει, ήταν ο υπολογισμός των υψομέτρων όλων των σημείων σε κάθε στρώμα (layer) της περιοχής μελέτης. Αρχικά υπολογίστηκε το υψόμετρο στο οποίο θα αρχίζει κάθε στρώμα. Στη συνέχεια ορίστηκε ότι το κατώτερο στρώμα θα φτάνει μέχρι τα 83 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η επιλογή αυτή έγινε, γιατί υπήρχαν δεδομένα που έδειχναν ότι υπήρχε πηγάδι γεώτρησης το οποίο έφτανε μέχρι εκείνο το βάθος. Έπειτα ορίστηκε ότι το υψόμετρο όλων των σημείων της ακτής θα είναι ίσο με 0 m αφού βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας. Τέλος με χρήση της εντολής `topo` το raster προσδιορίστηκε το υψόμετρο σε κάθε σημείο, κάθε στρώματος της περιοχής μελέτης. Το shape file που δημιουργήθηκε με τα δεδομένα αυτά εισήχθη μετέπειτα στο FEFLOW και βοήθησε στην τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής μελέτης.



Χάρτης 2-5: Χάρτης υψομέτρων που εισήχθησαν στην περιοχή μελέτης.

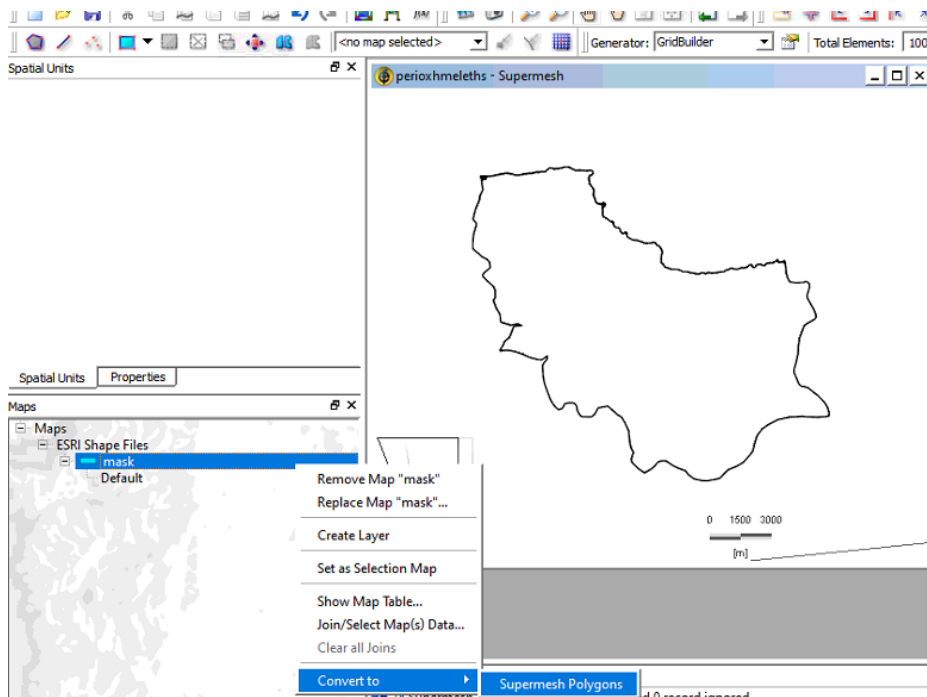
## 2.4 Μεθοδολογία μοντέλου FEFLOW στην περιοχή μελέτης

Από την στιγμή που με βάση τα δεδομένα που υπήρχαν, δημιουργήθηκαν όλα τα απαραίτητα αρχεία είτε αυτά αφορούσαν shapfiles είτε αρχεία .row ξεκίνησε η δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης.

### 2.4.1 Δημιουργία ορίων περιοχής μελέτης

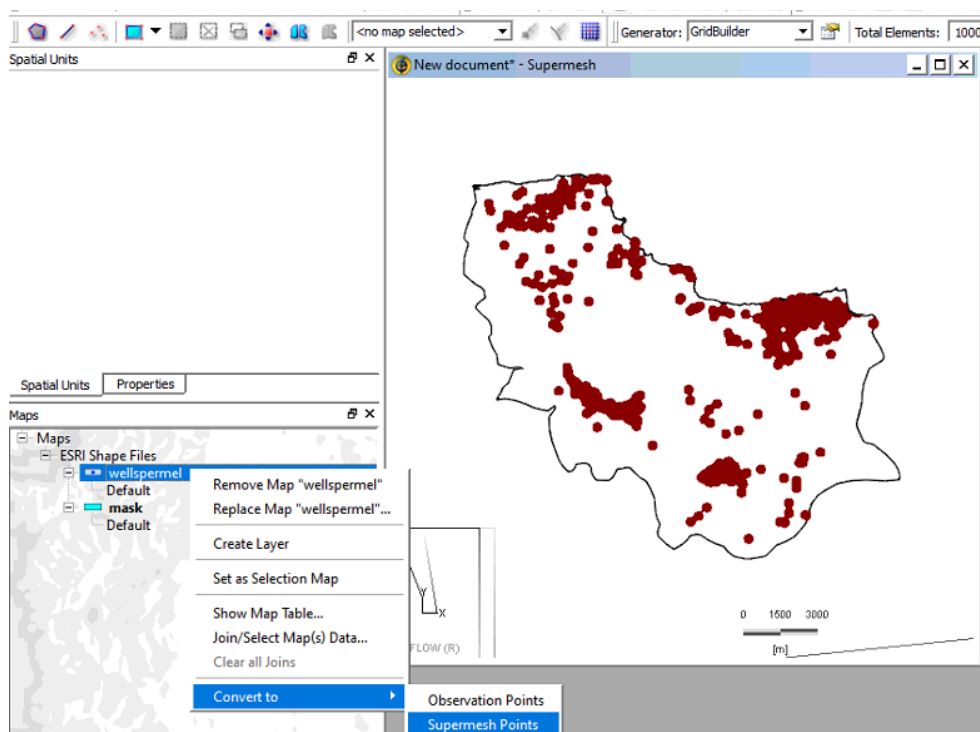
Το βήμα αυτό, έχει σαν σκοπό την εισαγωγή των ορίων της περιοχής μελέτης, καθώς και της θέσης των πηγαδιών γεωτρήσεων και παρατήρησης που βρίσκονται σε αυτή.

Αρχικά εισήχθη το shape file που δημιουργήθηκε στο GIS και περιείχε το περίγραμμα της περιοχής μελέτης και στη συνέχεια μέσω του Maps panel>Convert to> supermesh polygon, εμφανίστηκε το περίγραμμα της υπό εξέτασης περιοχής.



Εικόνα 2-3: Δημιουργία ορίων περιοχής μελέτης.

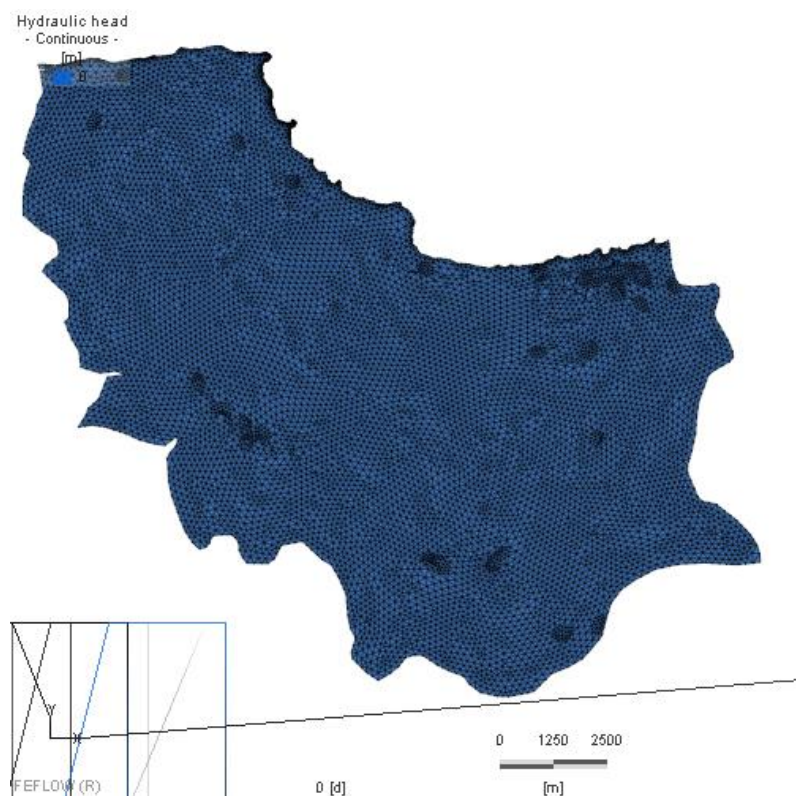
Έπειτα, εισήχθη στο μοντέλο το shape file που περιείχε τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια παρατήρησης. Μέσα από το Maps panel>Convert to>Supermesh points, όλα τα πηγάδια εμφανίστηκαν ως σημεία μέσα στην περιοχή μελέτης, έτσι ώστε κατά την δημιουργία του πλέγματος (Finite element mesh), η θέση κάθε πηγαδιού να αντιστοιχεί σε ένα κόμβο και η πυκνότητα των κόμβων του πλέγματος σε αυτές της περιοχές να είναι αυξημένη.



Εικόνα 2-4: Εμφάνιση πηγαδιών ως σημεία στην περιοχή μελέτης.

#### 2.4.2 Δημιουργία του Δικτύου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Mesh)

Έπειτα από την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης και της θέσης των πηγαδιών δημιουργήθηκε το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του Mesh Generator Grid. Με χρήση της εντολής start mesh generator ξεκίνησε η διαδικασία του πλέγματος, εμφανίζοντας ένα μενού στο οποίο εισήχθησαν τα δεδομένα σχεδιασμού του δικτύου. Τα δεδομένα αυτά αφορούσαν τον αριθμό των κόμβων που θα περιείχε το πλέγμα, καθώς και το πόσο πυκνό θα είναι αυτό γύρω από τα supermesh points που προστέθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η κατασκευή του πλέγματος πραγματοποιήθηκε αυτόματα σε συνδυασμό με τον αριθμό των κόμβων που εισήχθησαν από τον χρήστη. Δεδομένου των πολλών πηγαδιών στην περιοχή μελέτης καθώς και της μικρής απόστασης μεταξύ των περισσότερων από αυτών, το πλέγμα που δημιουργήθηκε ήταν αρκετά πυκνό και περιλάμβανε στο σύνολο του περίπου 11000 κόμβους.

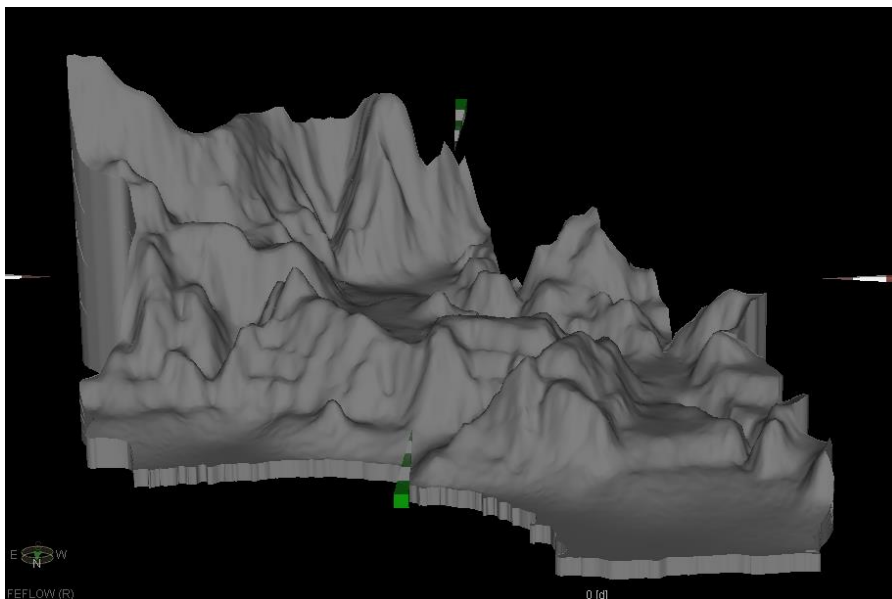


Εικόνα 2-5: Το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων-πλέγμα.

#### 2.4.3 Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Από τα βήματα που προηγήθηκαν το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν η δημιουργία ενός δύο διαστάσεων πλέγματος. Για την διεκπεραίωση της εργασίας ήταν απαραίτητη η τρισδιάστατη απεικόνιση του πλέγματος αυτού. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση η περιοχή μελέτης χωρίστηκε στρώματα (layers) και φέτες (slices), οι οποίες αποτελούσαν το ανώτερο και κατώτερο όριο κάθε στρώματος. Για την περίπτωση αυτή η περιοχή χωρίστηκε σε τέσσερα στρώματα και άρα πέντε φέτες (slices). Η επιλογή έγινε με βάση της πληροφορίες από το υπόμνημα του Χάρτη 2-3.

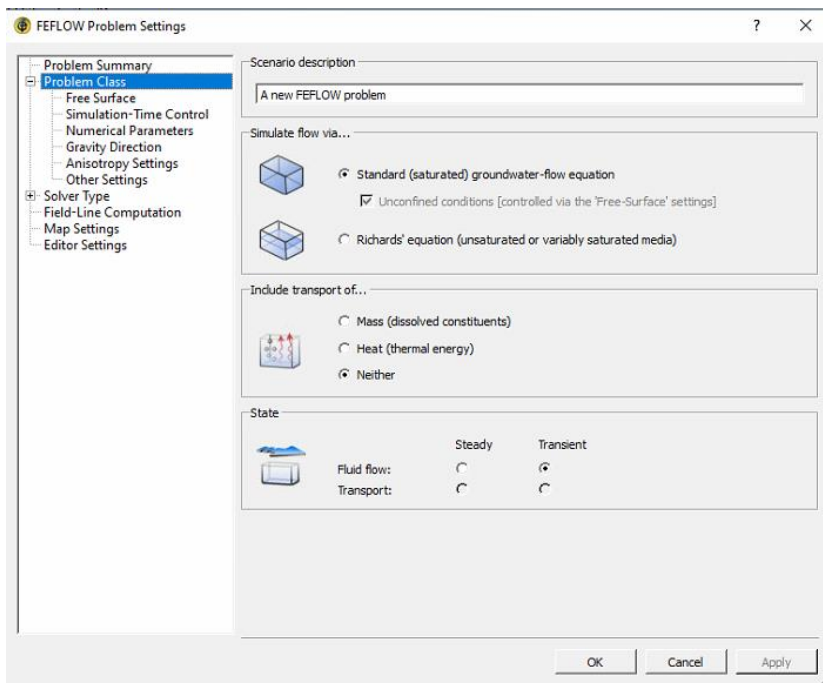




Εικόνα 2-6: Δημιουργία τρισδιάστατης απεικόνισης της περιοχής μελέτης.

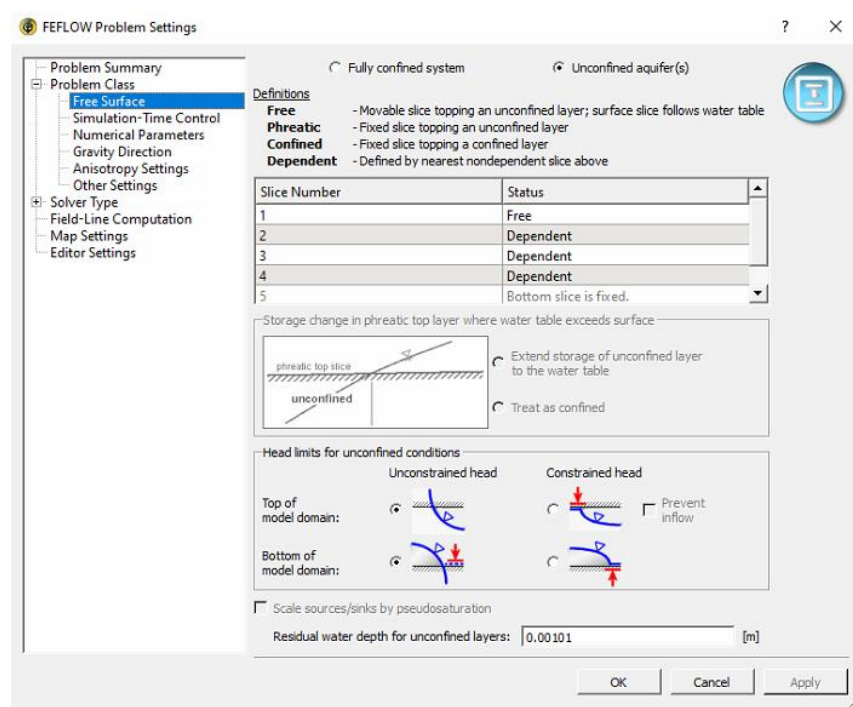
#### 2.4.4 Τάξη του προβλήματος (Problem Class)

Έπειτα από τον καθορισμών των στρωμάτων και των φετών στα οποία χωρίστηκε η περιοχή μελέτης, καθώς και την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, έπρεπε να καθοριστούν οι παράμετροι με βάση τους οποίους θα έτρεχε το μοντέλο. Μέσω του μενού Edit>Problem Settings επιλέχθηκε ότι η ροή θα γινόταν σε μη μόνιμες συνθήκες (transient flow) στην κορεσμένη ζώνη (saturated zone), ενός ελεύθερου υδροφορέα (unconfined aquifer).



Εικόνα 2-7: Καθορισμός παραμέτρων μοντέλου.

Επίσης προσδιορίστηκε ότι η ανώτερη επιφάνεια (slice1) θα είναι ελεύθερη, έτσι ώστε στη συνέχεια να μπορεί να συμπεριλάβει τις διαφορετικές τιμές των υδραυλικών υψών που θα παρουσιαστούν όταν πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου.

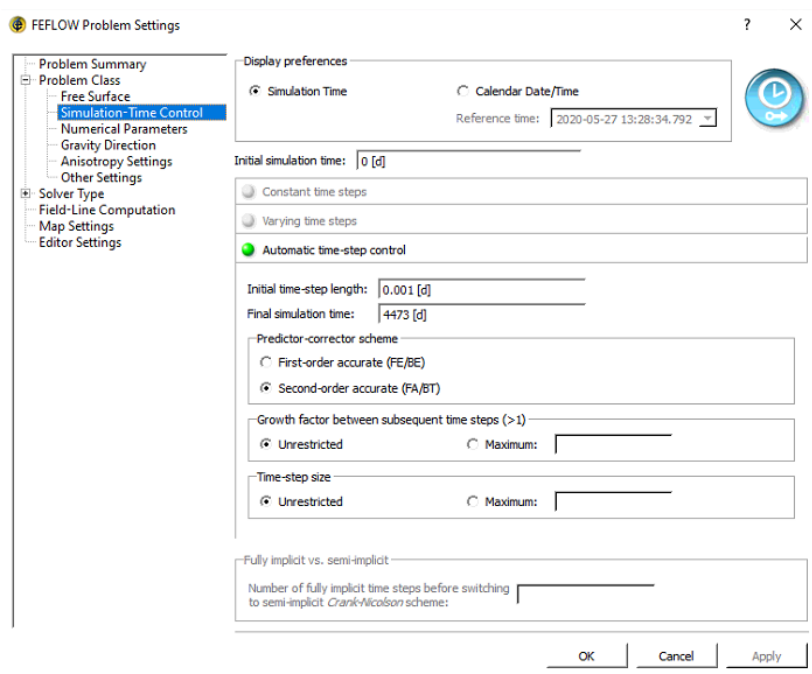


Εικόνα 2-8: Καθορισμός παραμέτρων για την κίνηση του νερού στα εκάστοτε slice.

#### 2.4.5 Δεδομένα χρόνου και ελέγχου (Temporal and control Data)

Κάποιες παράμετροι που έμενε ακόμα να καθοριστούν αφορούσαν το συνολικό χρόνο για τον οποίο θα γινόταν η βαθμονόμηση του μοντέλου, το χρονικό βήμα του μοντέλου καθώς και παράμετροι που αφορούσαν τη μέγιστη τιμή του σφάλματος που θα δεχόταν το μοντέλο κατά την βαθμονόμηση. Για τη συγκεκριμένη εργασία ως αρχικός χρόνος προσομοίωσης επιλέχθηκαν οι 0.001 μέρες και ως τελικός χρόνος επιλέχθηκαν οι 4473 μέρες, αφού αυτές ήταν οι περισσότερες μέρες για τις οποίες είχαμε πληροφορίες υδραυλικού ύψους στα πηγάδια παρατήρησης που πήραμε ως γνώμονα για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Το χρονικό βήμα ρυθμιζόταν αυτόματα με την μέθοδο Forward Adams-Bashford/Backward trapezoid (A/B time integration scheme). Η τιμή του χρονικού βήματος ορίστηκε στη μία μέρα. Τέλος η μέγιστη τιμή του σφάλματος την οποία δέχεται το μοντέλο κατά την βαθμονόμηση ορίστηκε στα 17 m εξαιτίας των μεγάλων υδραυλικών υψών που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης.

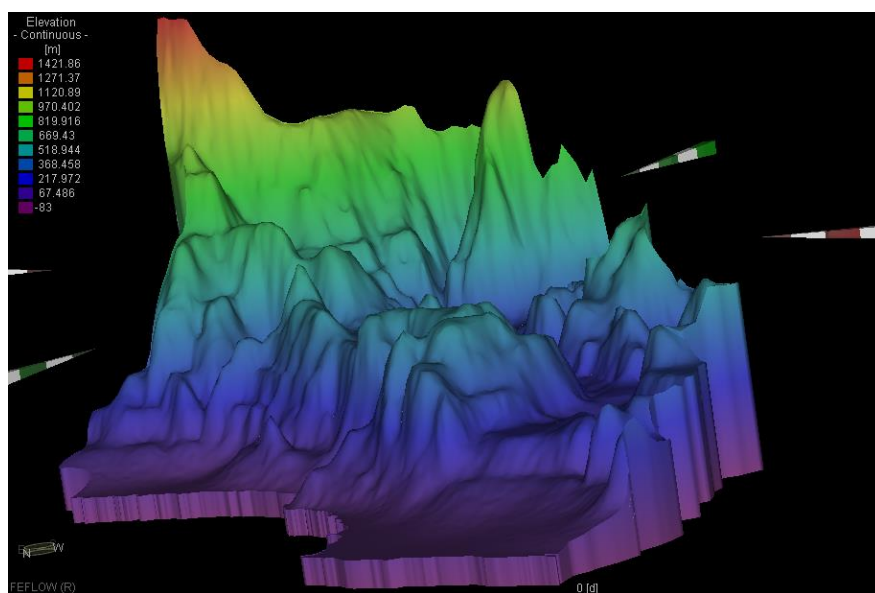




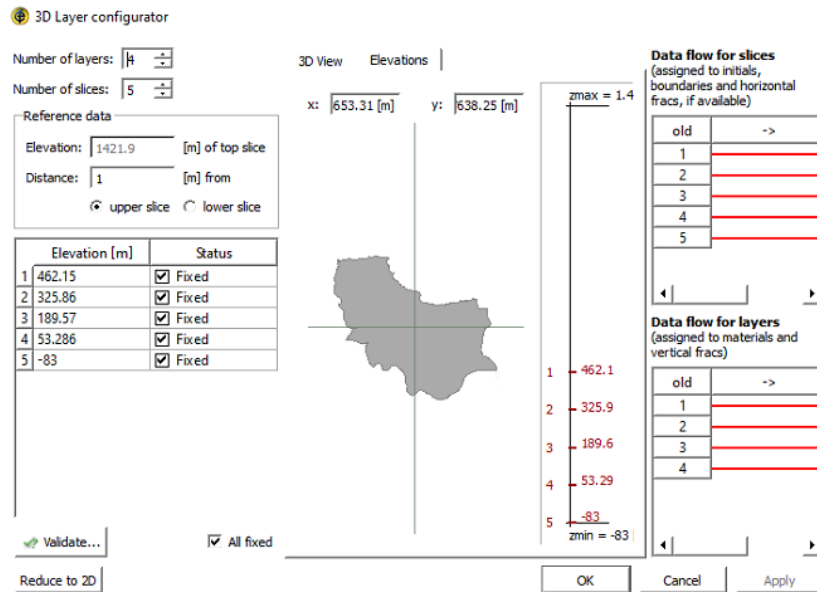
Εικόνα 2-9: Καθορισμός παραμέτρων χρόνου και ελέγχου.

#### 2.4.6 Καθορισμός υψομέτρου στα slices

Το επόμενο βήμα που πραγματοποιήθηκε ήταν η εισαγωγή του υψομέτρου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο. Αρχικά εισήχθη το απαραίτητο αρχείο που περιλάμβανε τα δεδομένα του υψομέτρου, και στη συνέχεια στην τρισδιάστατη απεικόνιση της περιοχής επιλέχθηκαν όλοι οι κόμβοι ώστε να αντιστοιχηθούν τα υψόμετρα. Όπως αναφέρθηκε το κατώτερο σημείο της περιοχής μελέτης ορίστηκε στα 83 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και η ακτογραμμή στα 0 μέτρα.



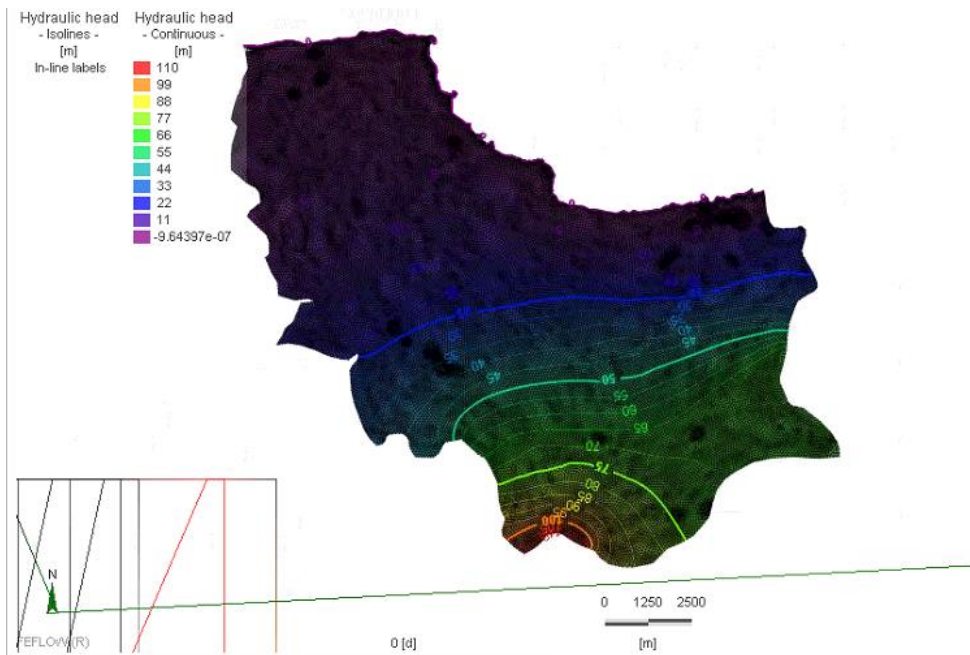
Εικόνα 2-10: Υψόμετρα περιοχής σε τρισδιάστατη απεικόνιση.



Εικόνα 2-11: Υψόμετρο σε κάθε slice.

#### 2.4.7 Αρχικές συνθήκες ροής (Flow initials)

Για να ξεκινήσει η προσομοίωση της ροής και η βαθμονόμηση του μοντέλου έπρεπε να εισαχθούν στο μοντέλο τα υδραυλικά ύψη ολόκληρης της περιοχής μελέτης, τα οποία ήταν σε μορφή χρονοσειρών, για την χρονική στιγμή  $t = 0$  d. Τα δεδομένα αυτά περιείχαν τα αρχικά υδραυλικά ύψη για όλα τα πηγάδια της περιοχής.

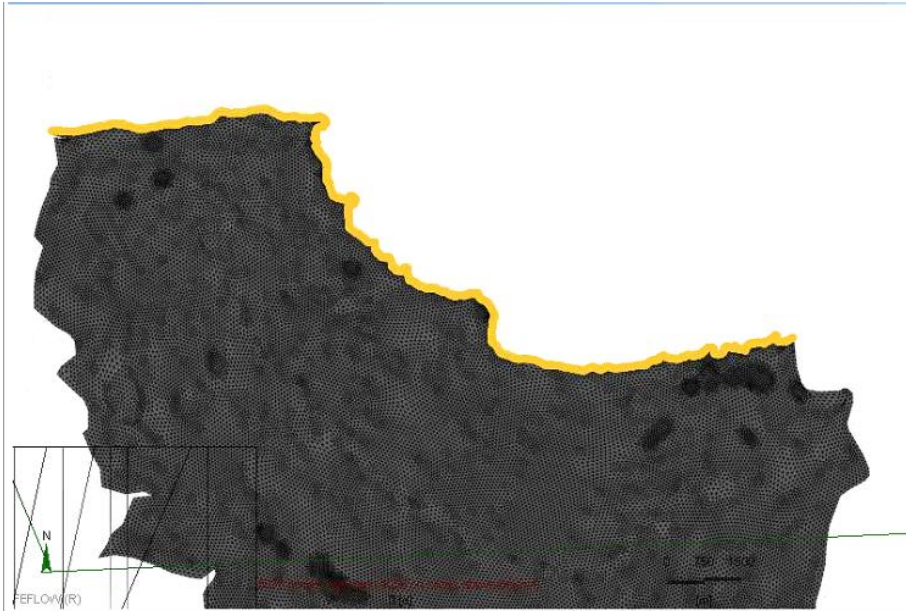


Εικόνα 2-12: Αρχικά υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης.

## 2.4.8 Οριακές συνθήκες ( Flow Boundaries)

### Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους

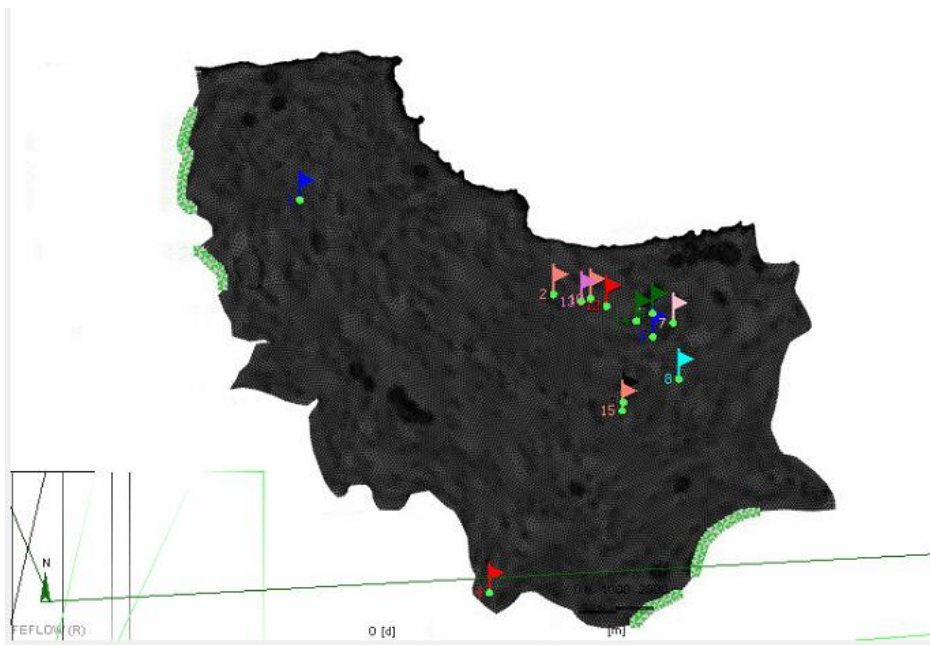
Οι οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους ορίζονται συνήθως κατά μήκος της ακτογραμμής. Για το πρώτο slice το υδραυλικό ύψος ορίστηκε με μηδέν και στη συνέχεια προσδιορίστηκε το υδραυλικό ύψος για τα υπόλοιπα slices.



Εικόνα 2-13: Οριακές συνθήκες για την ακτογραμμή.

### Οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> είδους

Οι οριακές συνθήκες που ορίστηκαν γύρω από τα όρια της περιοχής μελέτης ήταν επίσης 1<sup>ου</sup> είδους και σταθερού υδραυλικού ύψους. Για τον ορισμό τους χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα υδραυλικού ύψους από πηγάδια που βρίσκονταν έξω από την περιοχή μελέτης στα βορειοδυτικά, νοτιοανατολικά και νότια. Στα νότια της περιοχής εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη τα οποία μειώνονται προς τα βόρεια. Με βάση τα δεδομένα αυτά όταν πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του μοντέλου, τα αποτελέσματα δεν ήταν τα αναμενόμενα και έτσι δεν μπορούσε να προσομοιωθεί η φυσική κατάσταση του υδροφορέα. Επίσης το σφάλμα της βαθμονόμησης ήταν αρκετά μεγαλύτερο από το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα που είχε οριστεί.



Εικόνα 2-14: Αρχικές οριακές συνθήκες.

Στη συνέχεια επιλέχθηκε σαν αρχική συνθήκη το σταθερό υδραυλικό ύψος στο βορειοδυτικό και το νοτιοδυτικό άκρο και ακολούθως πραγματοποιήθηκε σύνθετη βαθμονόμηση. Επειδή κοντά στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής υπήρχε πηγάδι παρατήρησης αντλήθηκαν από την αντίστοιχη χρονοσειρά τα δεδομένα υδραυλικού ύψους του και πιο συγκεκριμένα η μέγιστη, η ελάχιστη και μέση τιμή του. Για να έχουμε καλύτερη απεικόνιση της μεταβολής της στάθμης του φυσικού συστήματος επιλέχθηκε η συνημιτονοειδής καμπύλη που παρουσιάζει παροδικότητα. Μετά από δοκιμή και σφάλμα αποφασίστηκαν ποιες τιμές μέγιστου και ελάχιστου υδραυλικού ύψους θα ληφθούν υπόψιν. Αξίζει να αναφερθεί, πως έγινε η παραδοχή ότι η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ύψους απαντάται στα τέλη του χειμώνα και αντίστοιχα η ελάχιστη τιμή στα τέλη του καλοκαιριού.

Η συνημιτονοειδής συνάρτηση βάσει της οποίας εξάχθηκαν τα νέα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως οριακή συνθήκη είναι:

$$Hydr. head BC_{south} = \frac{\Delta h}{2} \cdot \cos\left(\frac{(t - 33) \cdot 2\pi}{365}\right) + \bar{h}$$

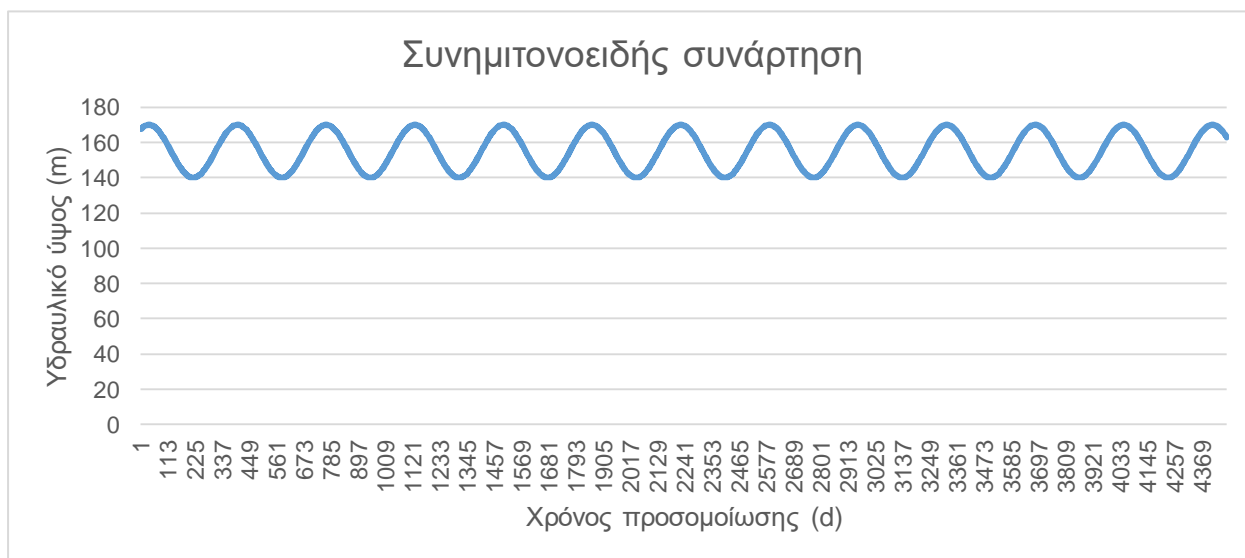
όπου:

$\Delta h$  = η διαφορά μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου υδραυλικού ύψους.

$t$  = αριθμός ημέρας για την οποία εξάγουμε δεδομένα.

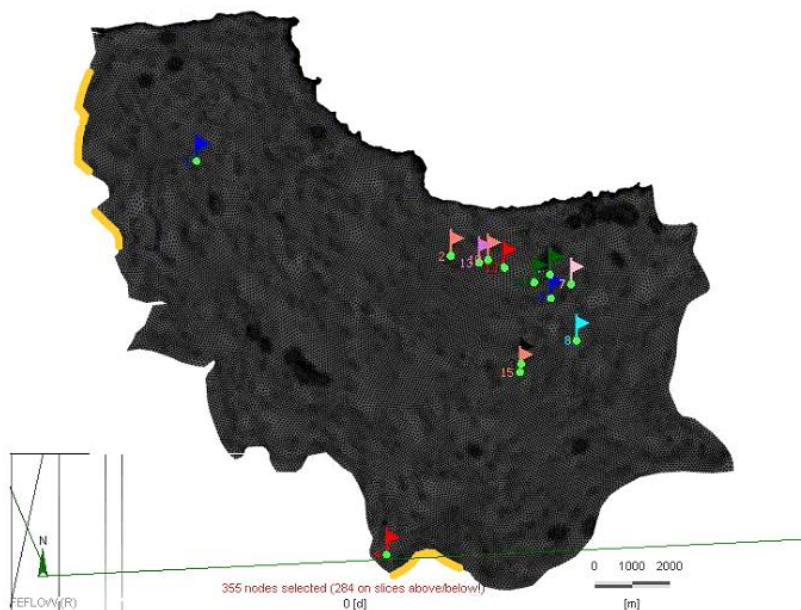
$\bar{h}$  = η μέση τιμή του υδραυλικού ύψους.

Ο λόγος για τον οποίο από την παράμετρο  $t$  αφαιρείται το 33, είναι ότι επειδή η πρώτη μέρα δεδομένων στο πρόγραμμα είναι η 27<sup>η</sup> Ιανουαρίου, με την προσθήκη 33 ημερών οδηγούμαστε στο τέλος Φεβρουαρίου που είναι και το τέλος του χειμώνα.



Διάγραμμα 2-1: Διάγραμμα συνημιτονοειδούς συνάρτησης.

Με τη νέα οριακή συνθήκη αποδείχτηκε ότι κατά την βαθμονόμηση το μοντέλο έπιανε ικανοποιητικά την φυσική κατάσταση του υδροφορέα χωρίς μεγάλα σφάλματα.

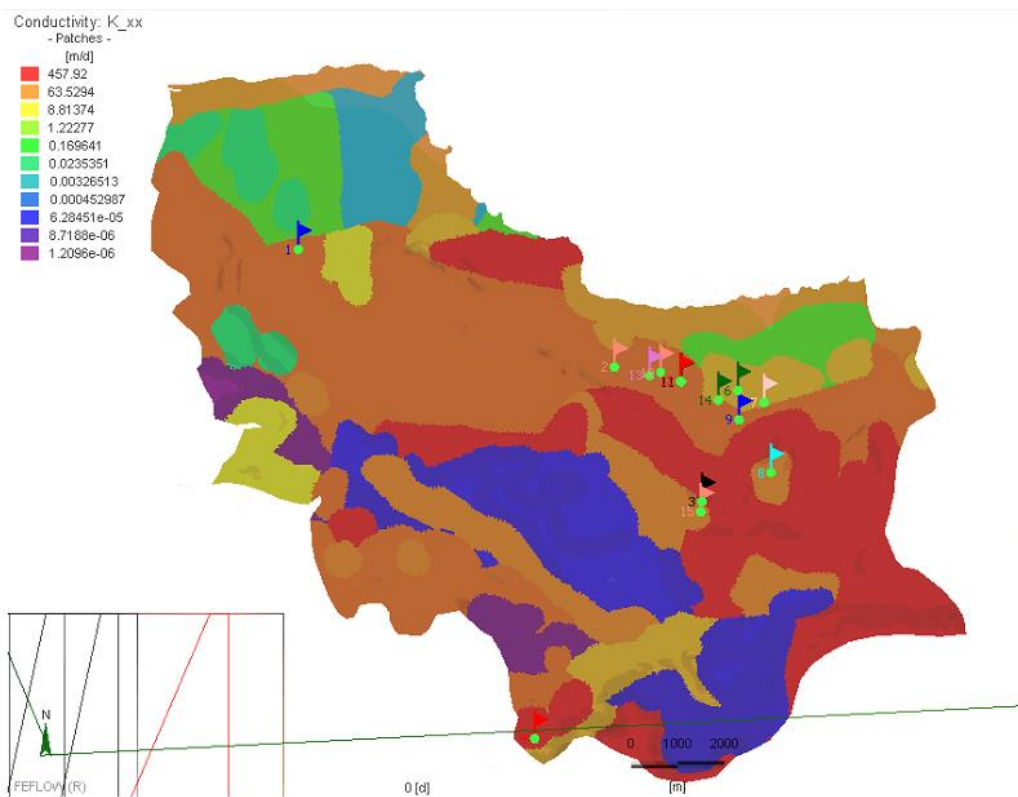


Εικόνα 2-15: Τελικές οριακές συνθήκες.

#### 2.4.9 Υδραυλική αγωγιμότητα γεωλογικών πετρωμάτων

Μέσα από το μενού πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των δεδομένων της υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 που αντιστοιχούν στα γεωλογικά πετρώματα της περιοχής μελέτης. Βάσει βιβλιογραφίας ορίστηκε πως  $K_{xx}=K_{yy}=0.1K_{zz}$ . Οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική συνθήκη κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου.





Εικόνα 2-16: Αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής.

#### 2.4.10 Εισαγωγή των χρονοσειρών πηγαδιών παρατήρησης (time series)

Εισήχθησαν στο μοντέλο οι χρονοσειρές των πηγαδιών παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι χρονοσειρές αυτές περιείχαν δεδομένα υδραυλικού ύψους για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στον πίνακα 2-2 παρατίθενται ένα παράδειγμα με τα δεδομένα που περιέχει μια χρονοσειρά για το πηγάδι παρατήρησης GST13.

Ημερομηνία Feflow	Υδραυλικό ύψος
1161	5.45
2871	3.95
2972	3.95
3634	3.00
4046	3.95
4305	2.95

Πίνακας 2-2: Δεδομένα χρονοσειράς GST13.

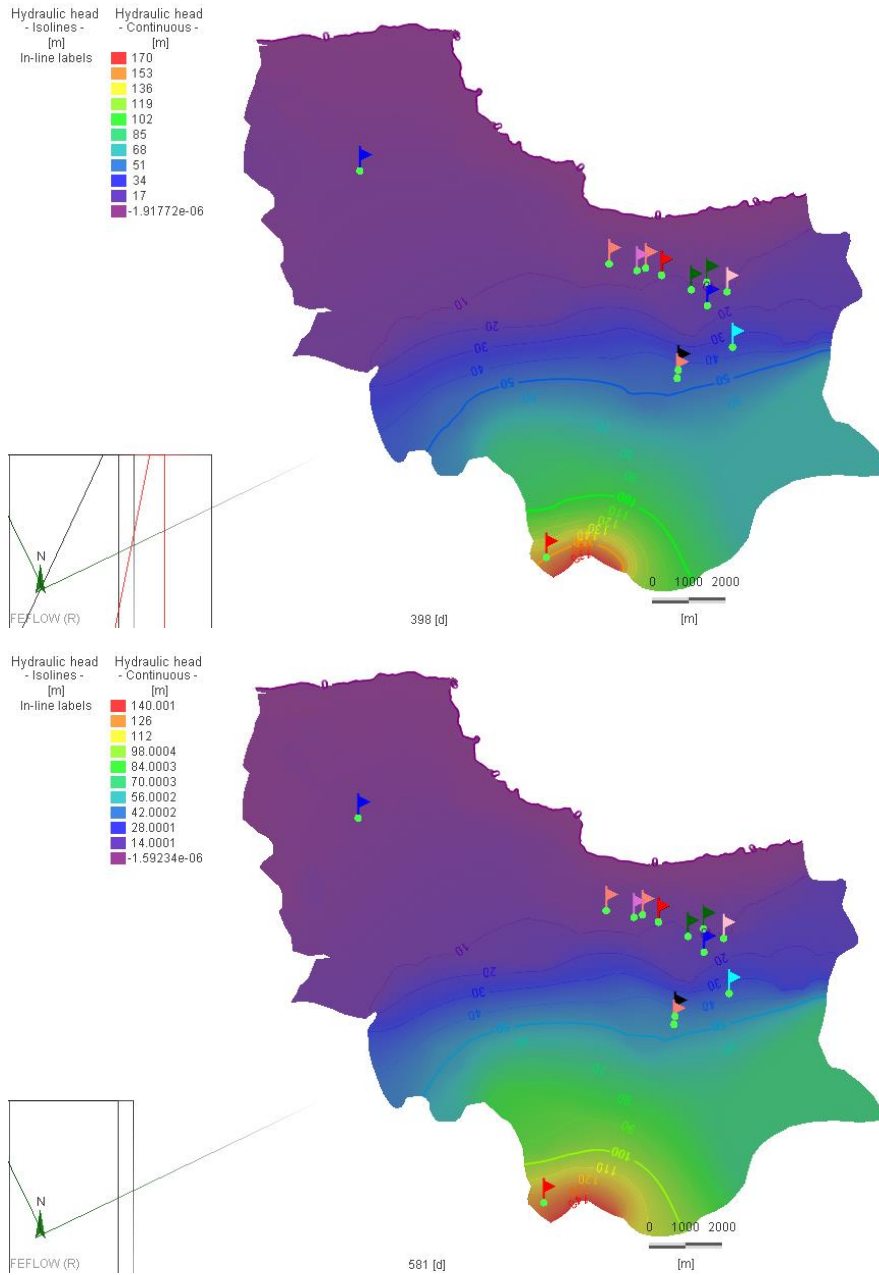
Αφού εισήχθησαν όλα τα απαραίτητα δεδομένα και καθορίστηκαν όλες οι κρίσιμες παράμετροι ξεκίνησε η βαθμονόμηση του μοντέλου έτσι ώστε μέσω της διαδικασίας αυτής να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία του πριν να χρησιμοποιηθεί. Σκοπός είναι να επιτευχθεί μια ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προσομοιωμένων. Κάθε φορά που το σφάλμα δεν ήταν μέσα στα επιτρεπτά όρια πραγματοποιούνταν μεταβολές στην υδραυλική αγωγιμότητα διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών ή/και στις οριακές συνθήκες και η βαθμονόμηση ξανάρχιζε

από την αρχή. Ο τελικός στόχος είναι η προσομοίωση του υδραυλικού ύψους στην περιοχή με το μικρότερο δυνατό σφάλμα. Ο αριθμός των επαναλήψεων έτσι ώστε να υπάρξει η απαιτούμενη συσχέτιση των τιμών, εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του συστήματος, τον στόχο της ανάλυσης και τα χρονικά διαστήματα για τα οποία υπάρχουν δεδομένα (Karanth,1987).

Στην παρούσα εργασία η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε για το χρονικό διάστημα μεταξύ 27/1/2000 έως 26/4/2012. Η έλλειψη δεδομένων στην περιοχή μελέτης καθώς και το πλήθος των πηγαδιών παρατήρησης και γεωτρήσεων δυσκόλεψε αρκετά την κατάσταση και για αυτό το λόγο υπήρξε απαραίτητη η διεξαγωγή μεγάλου πλήθους επαναλήψεων τις διαδικασίας βαθμονόμησης. Όταν ολοκληρώθηκε η διαδικασία έγινε καταγραφή της όλης διαδικασίας με σκοπό την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, τα οποία παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3.

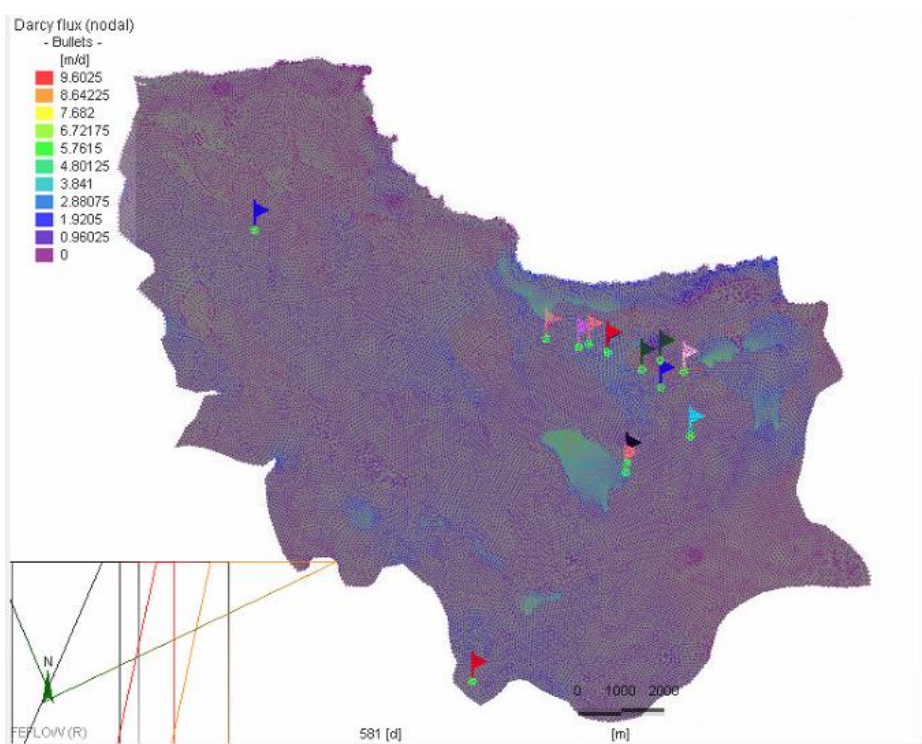
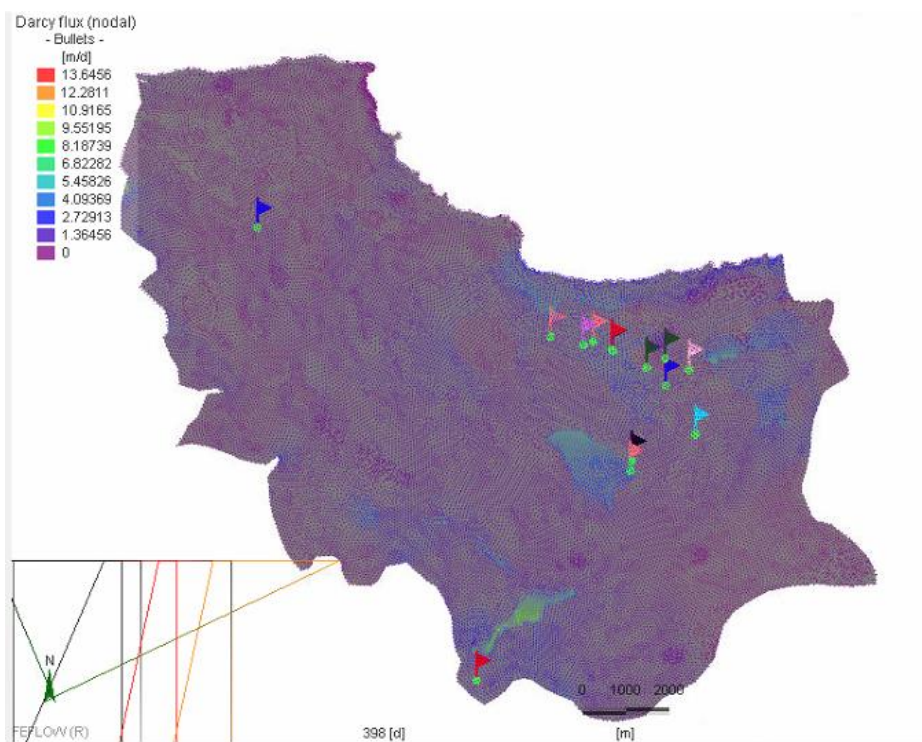
### 3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν στην ενότητα αυτή με τη μορφή χαρτών και διαγραμμάτων για τις πραγματικές μετρήσεις.

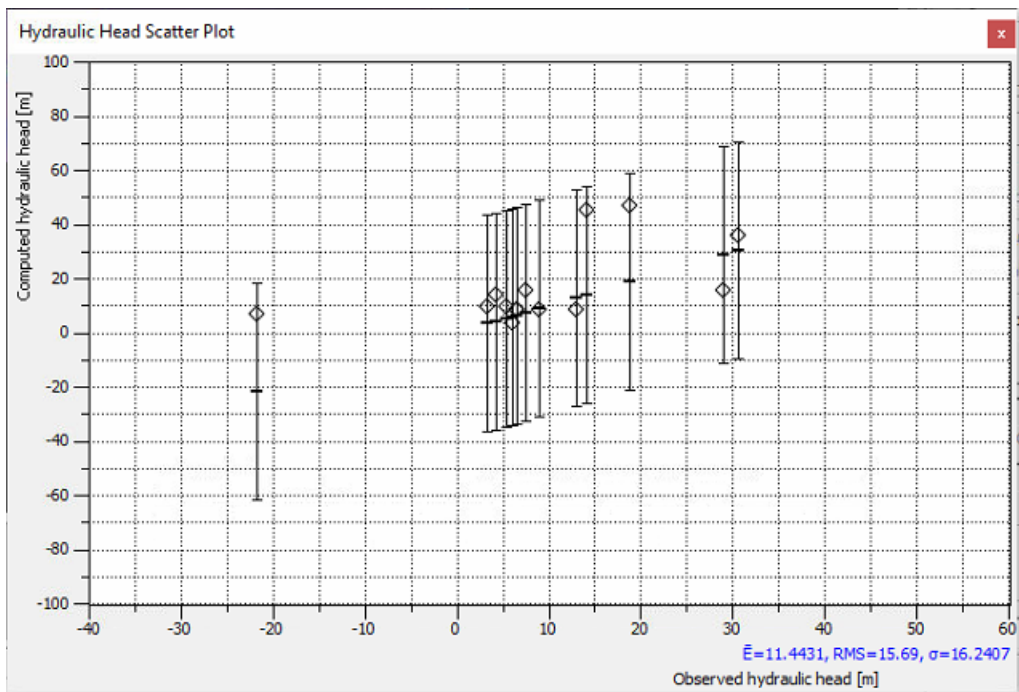
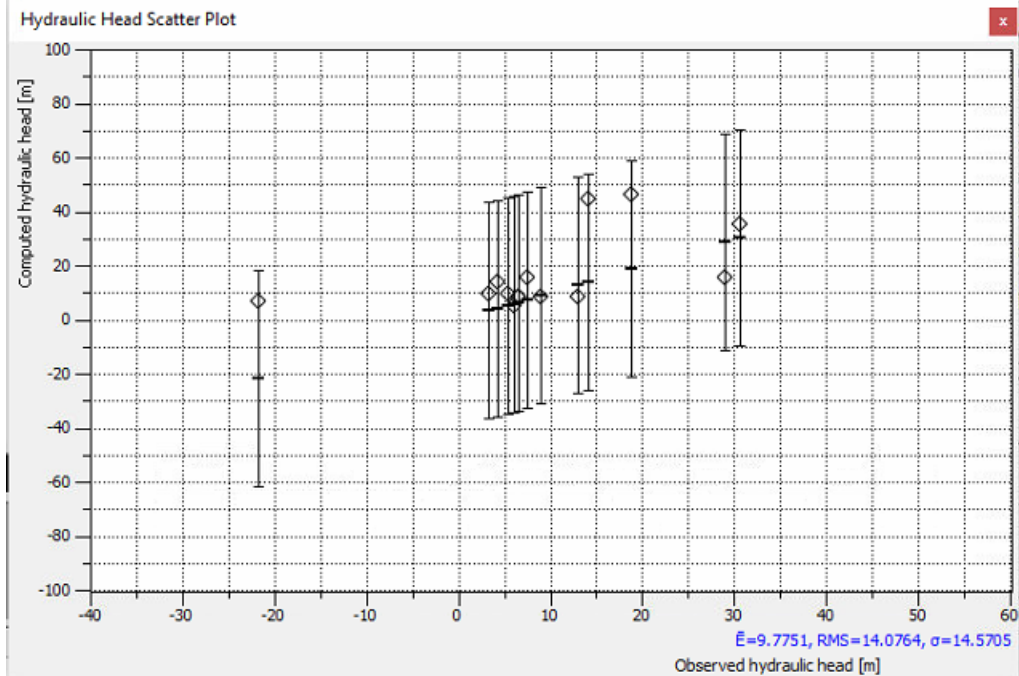


Χάρτης 3-1: Υδραυλικό ύψος σε δισδιάστατο επίπεδο με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος του χειμώνα του 2001 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2001

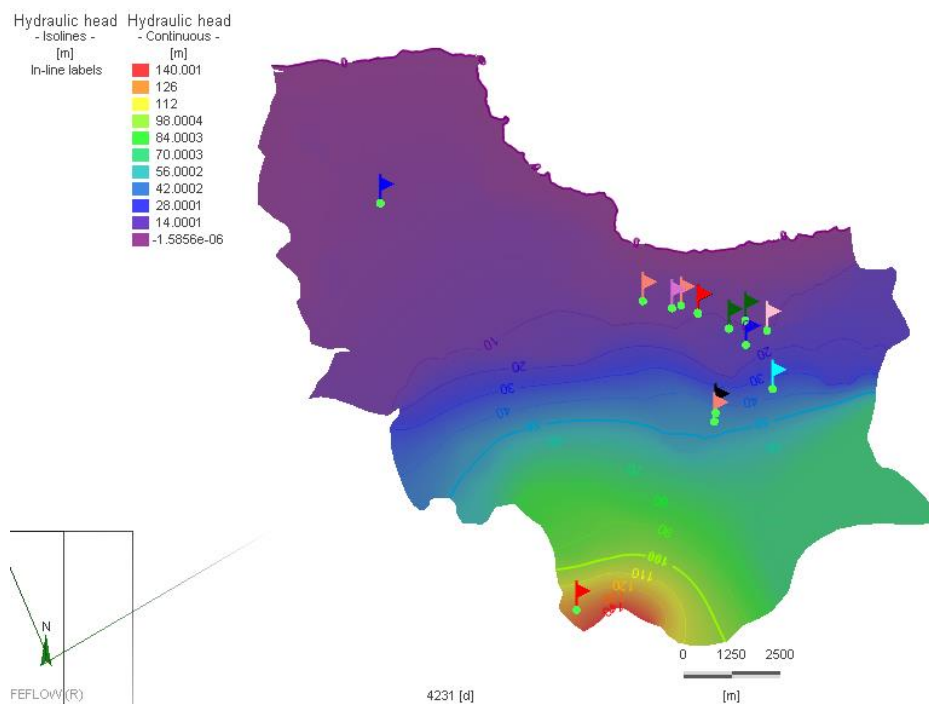
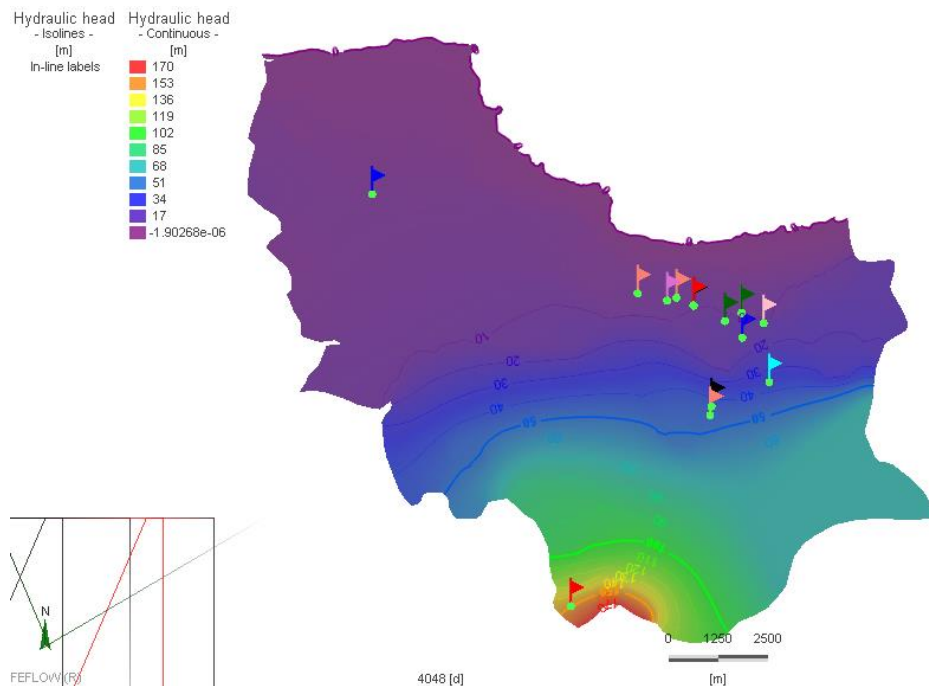




Χάρτης 3-2: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται η ταχύτητα για την περίοδο του χειμώνα του 2001 και στον κάτω χάρτη η ταχύτητα για το καλοκαίρι του 2001.

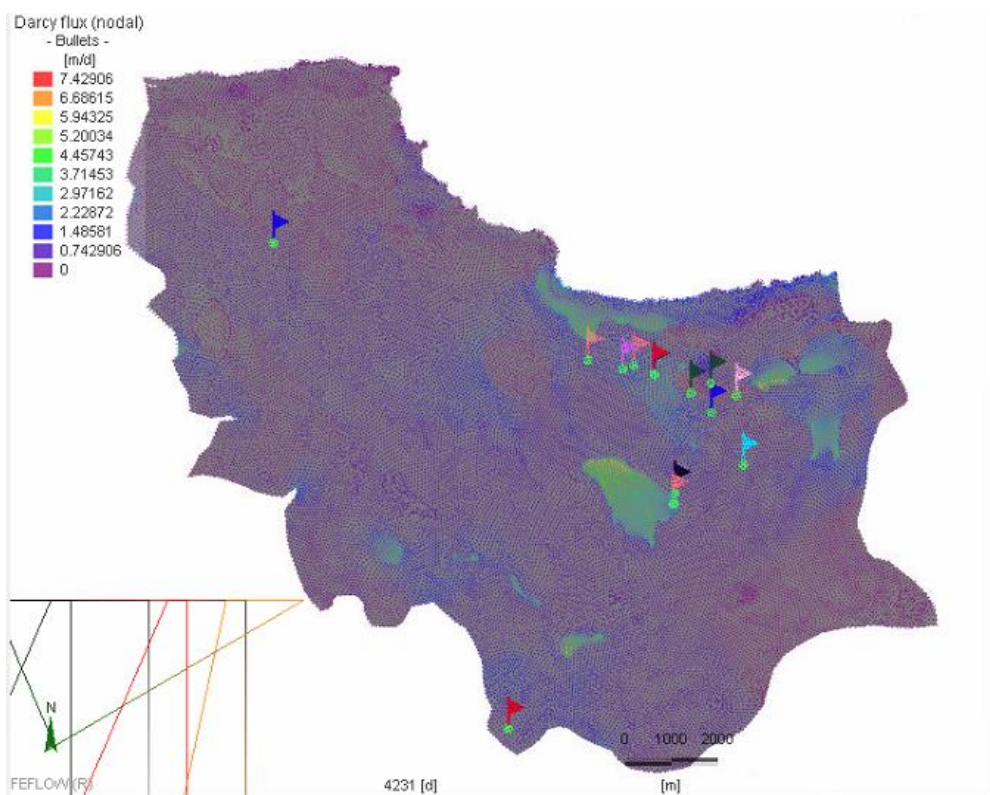
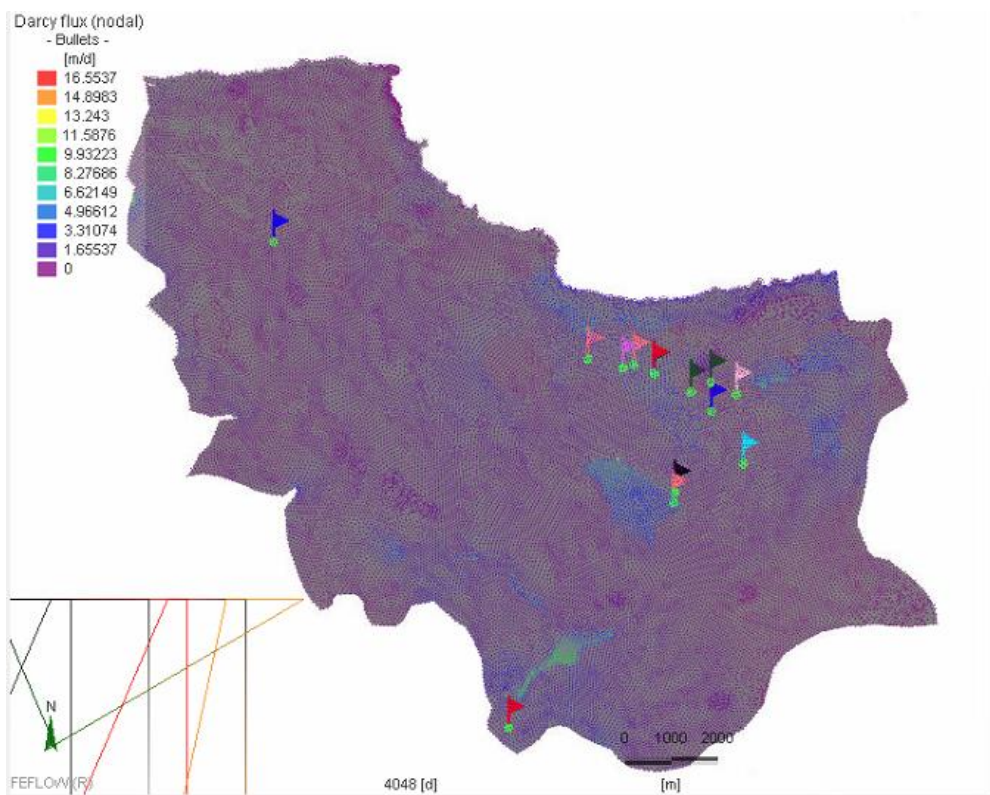


Διάγραμμα 3-1: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά την βαθμονόμηση για το χειμώνα του 2001 ενώ στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα για το καλοκαίρι του 2001.

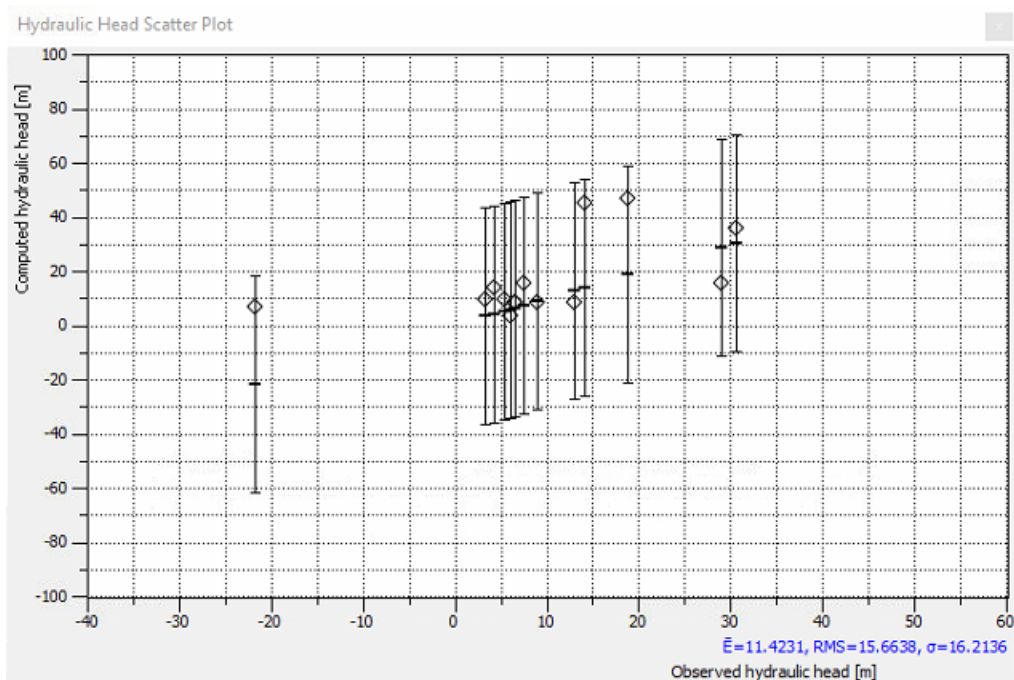
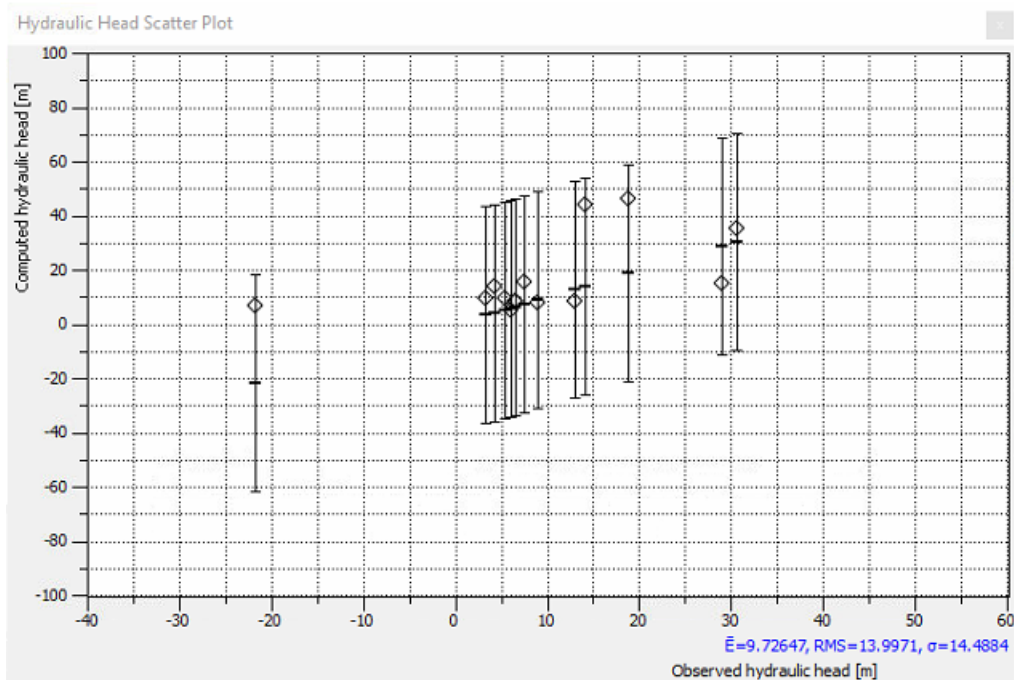


Χάρτης 3-3: Υδραυλικό ύψος σε δισδιάστατο επίπεδο με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος του χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011.

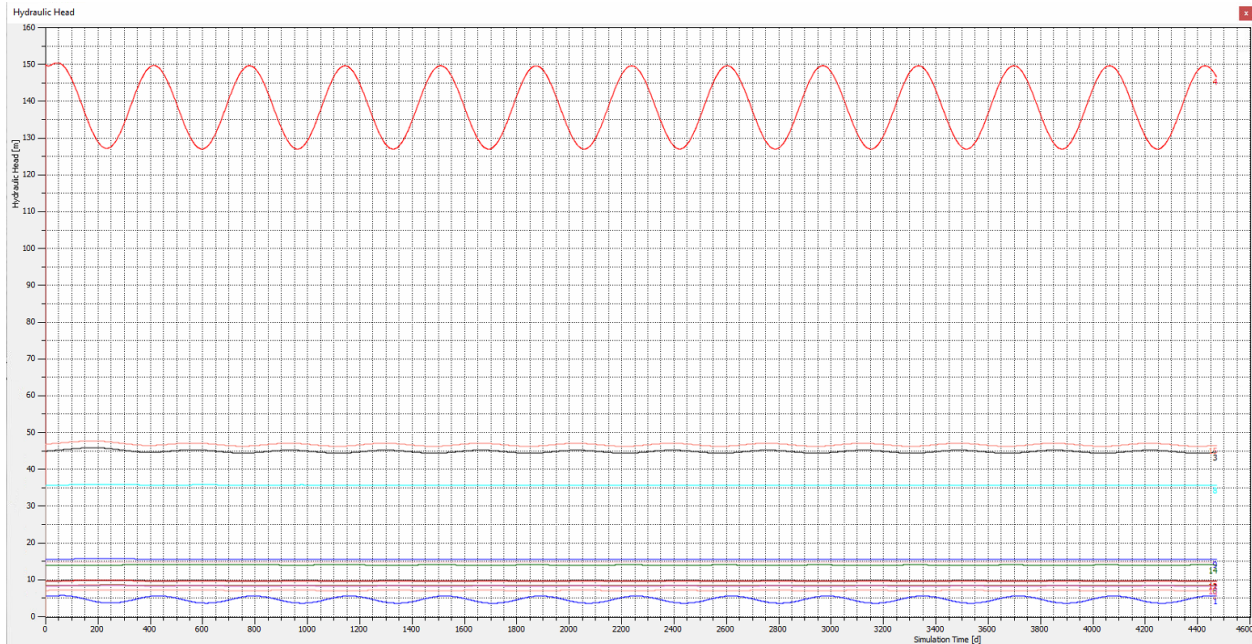




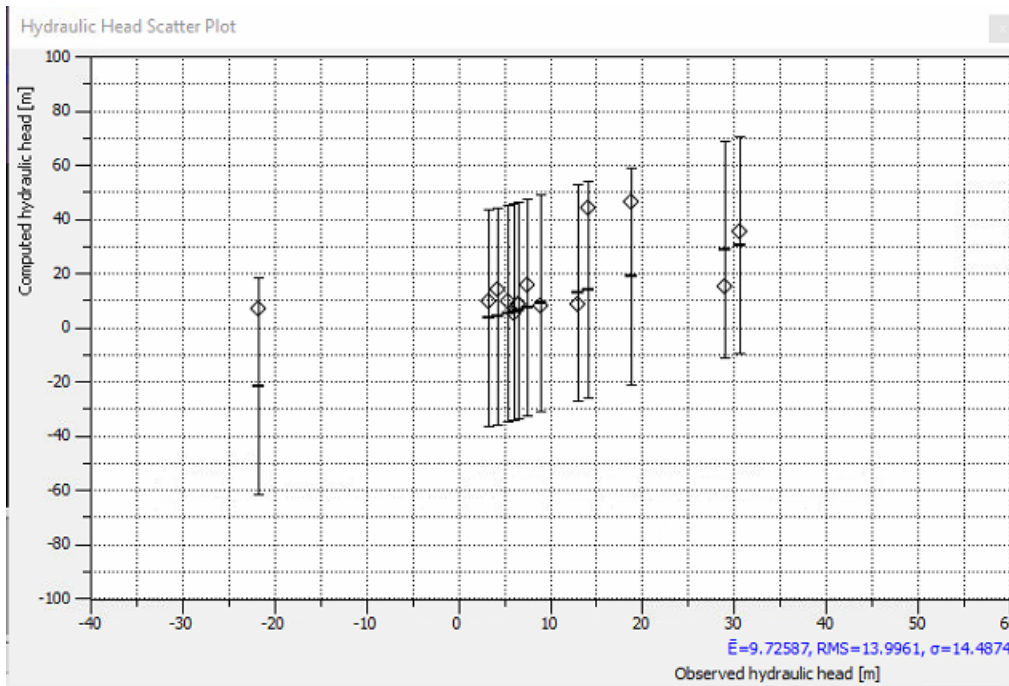
Χάρτης 3-4: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται η ταχύτητα για την περίοδο του χειμώνα του 2011 και στον κάτω χάρτη η ταχύτητα για το καλοκαίρι του 2011.



Διάγραμμα 3-2: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο πάνω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά την βαθμονόμηση για το χειμώνα του 2011 ενώ στο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα για το καλοκαίρι του 2011.

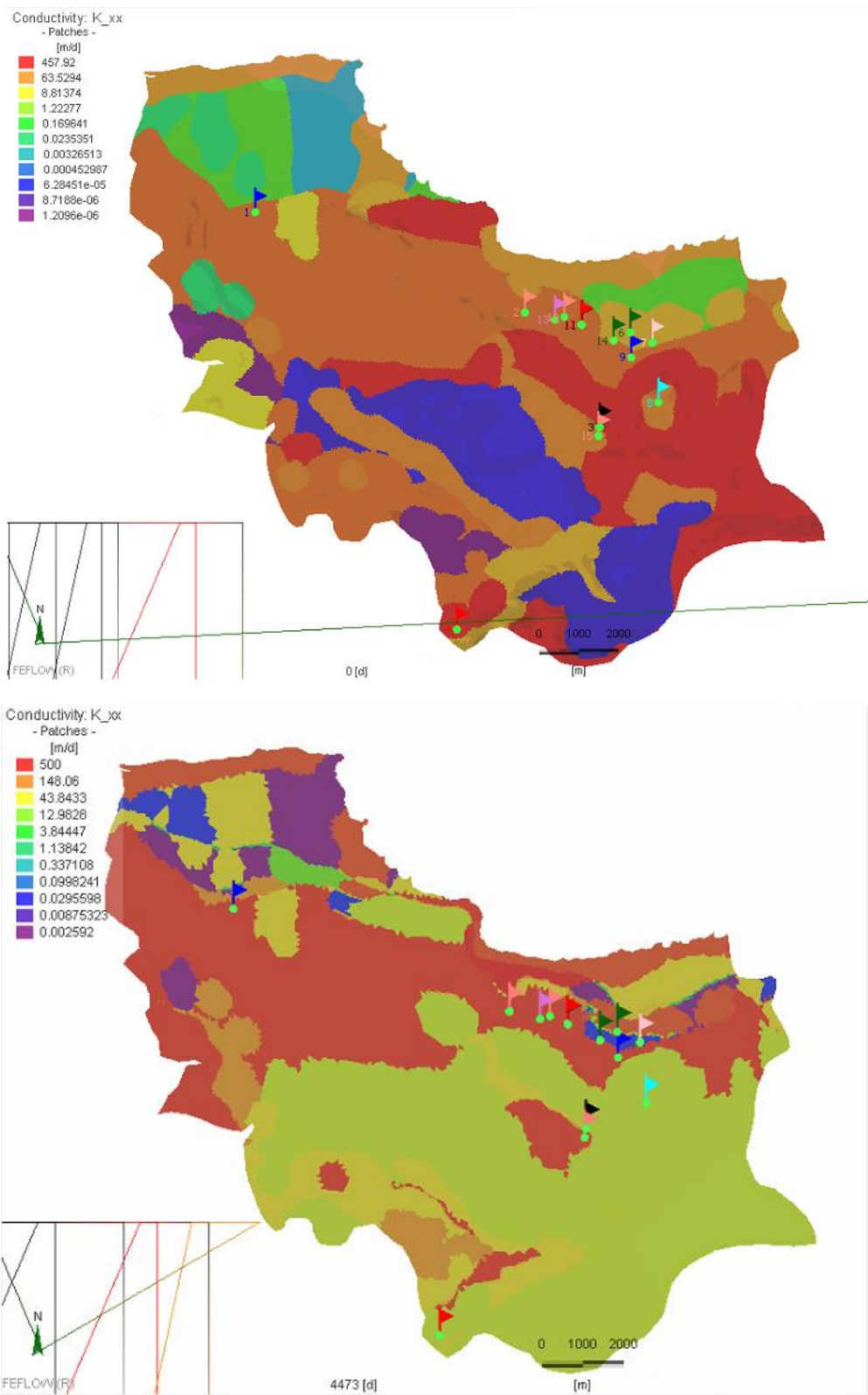


Διάγραμμα 3-3: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.



Διάγραμμα 3-4: Διάγραμμα διασποράς υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται το σφάλμα μετά το τέλος της βαθμονόμησης.

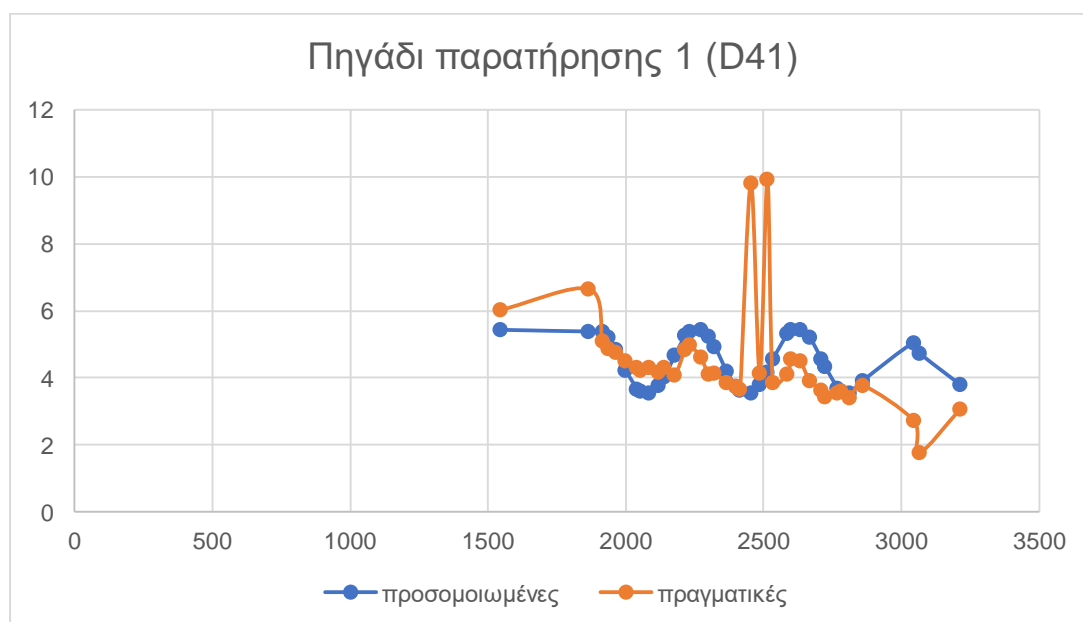




Χάρτης 3-5: Χάρτης υδραυλικής αγωγιμότητας του 1<sup>ου</sup> slice. Στον πάνω χάρτη εμφανίζονται οι αρχικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και στον κάτω χάρτη οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση.

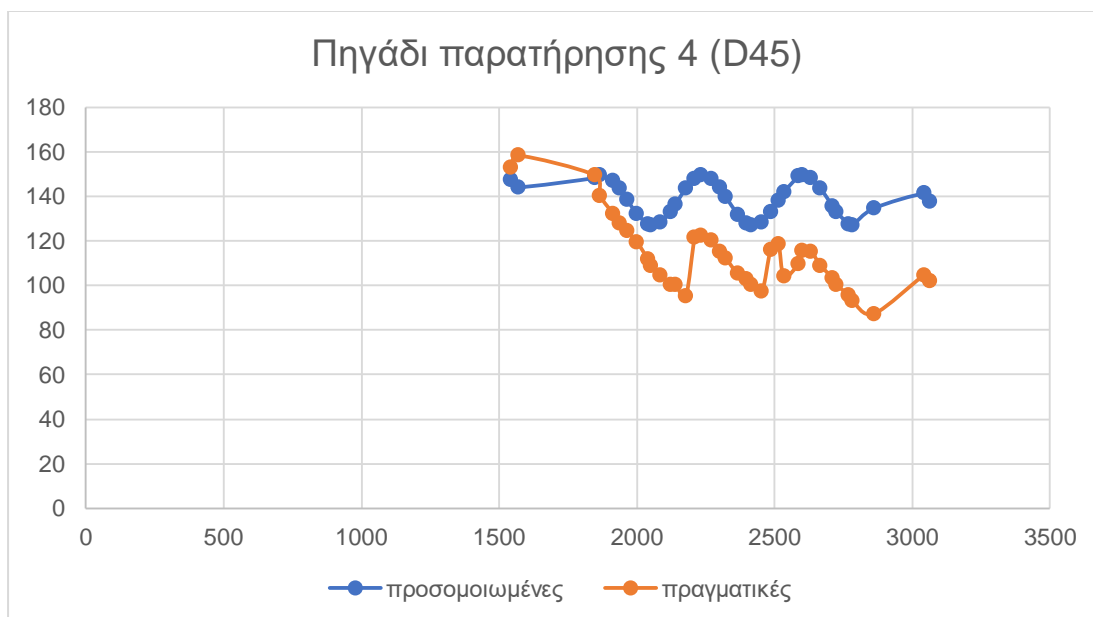
Έτος	Ταχύτητα Darcy χειμώνα (max) (m/d)	Ταχύτητα Darcy καλοκαίρι (max) (m/d)
2000	18.2863	23.5265
2001	13.6456	9.6025
2002	13.6463	7.427
2003	15.4519	7.427
2004	15.5476	7.42828
2005	14.6916	11.6464
2006	13.6468	9.6462
2007	13.6466	7.42842
2008	16.4821	7.42891
2009	13.6467	7.42756
2010	13.6465	7.42849
2011	16.5537	7.42906
2012	13.6467	-

Πίνακας 3-1: Μέγιστες ταχύτητες Darcy ανά έτος για χειμώνα και καλοκαίρι.

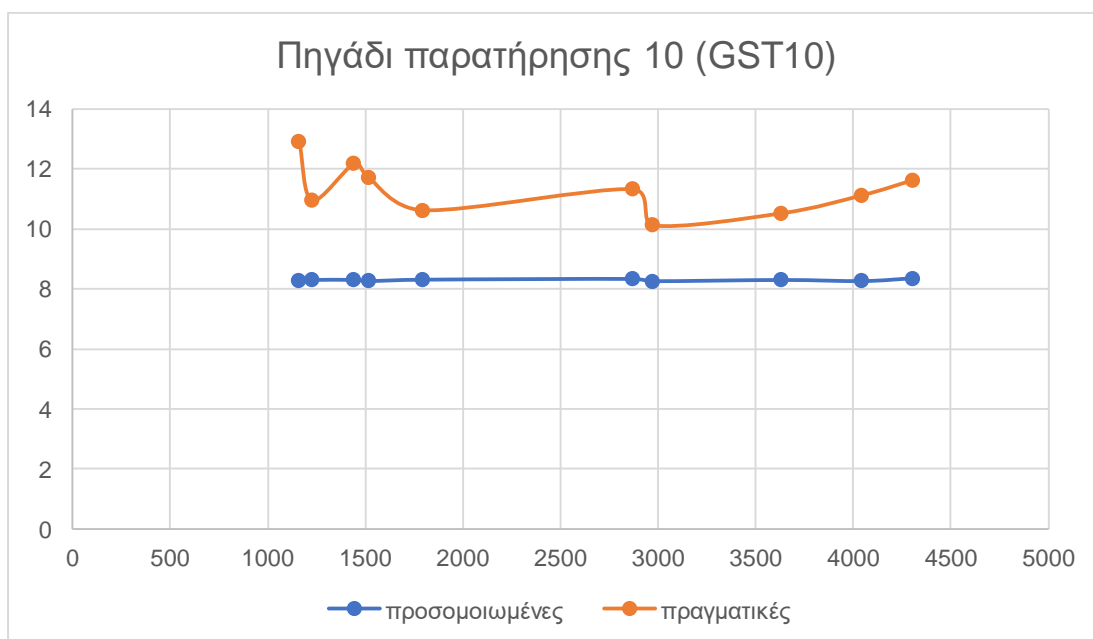


Διάγραμμα 3-5: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 1 της περιοχής μελέτης.





Διάγραμμα 3-6: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 4 της περιοχής μελέτης.



Διάγραμμα 3-7: Διάγραμμα σύγκρισης των πραγματικών τιμών υδραυλικού ύψους με τις προσομοιωμένες στο πηγάδι παρατήρησης 10 της περιοχής μελέτης.

Ονομασία σχηματισμού	Σχηματισμός	Αρχική Τιμή	Τελική τιμή
----------------------	-------------	-------------	-------------

		Υδραυλικής αγωγιμότητας (m/d)	υδραυλικής αγωγιμότητας(m/d)
Ιζήματα της παράκτιας περιοχής: άμμοι ακτών, θαλάσσιες αναβαθμίδες	cd	46.656	300
Σχηματισμός Βιάννου: καλά στρωμένες άργιλοι, ιλυούχες άργιλοι και καλά διαβαθμισμένες καστανωπές άμμοι	M.m	2.59E-3	2.59E-3
Σχηματισμός Αγ. Βαρβάρας: βιοκλαστικοί, λατυποπαγείς ή κροκαλοπαγείς ασβεστόλιθοι και υφαλώδεις ασβεστόλιθοι	M.k	4.06E-1	50
Σχηματισμός Φοινικιάς: ομογενείς μάργες ή μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι	PI	3.63E-2	3.63E-2
Ασβεστόλιθοι: τεφροί μέχρι τεφρόμαυροι, μεσοπαχυστρωματώδεις μέχρι άστρωτοι	Ks.k	120.96	120
Κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα: λατύπες κυρίως ανθρακικής σύστασης	SC-CS	26.784	60
Λατυποπαγή: αποτελούνται από θραύσματα πρωτογενούς ασβεστόλιθου	Pt	9.504	9.504
Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες	T-Js.k	457.92	400
Αλλουβιακές αποθέσεις: χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά	al	86.4	500
Ασβεστόλιθοι: ανακρυσταλλωμένοι, τεφρόμαυροι κατά θέσεις δολοματικοί	P-E.k	120.96	120
Φλύσσης: εναλλαγές καστανών, ερυθρών αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών	ft	1.21E-6	1.21E-3
Ασβεστόλιθοι: λεπτο- μεσοστρωματώδεις, λευκότεφροι μέχρι ροδότεφροι	K.k	9.504	9.504
Ενότητα πετρωμάτων χαμηλής μεταμόρφωσης: φυλλίτες, χαλαζίτες και σερικιτικοί σχιστόλιθοι	ph	2.51E-5	50
Πλακώδεις ασβεστόλιθοι: κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και κατά θέσεις μάρμαρα	Jm-E.k	28.512	60

Πίνακας 3-2: Αρχικές και τελικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής.

## 4 Συζήτηση

Προτού γίνει η αναλυτική συζήτηση, πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα που έχουν εισαχθεί στο κεφάλαιο Αποτελέσματα αφορούν τις χρονιές 2001 έως 2011, παρόλο που η βαθμονόμηση ξεκινάει το έτος 2000 και τελειώνει το 2012. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι ότι το έτος 2000 το σύστημα δεν έχει φτάσει ακόμα σε ισορροπία άρα τα αποτελέσματα δεν είναι ενδεικτικά και δεν πρέπει να ληφθούν υπόψιν και επίσης ότι για το έτος 2012 δεν υπάρχουν αποτελέσματα για τη χρονική περίοδο του καλοκαιριού επομένως δεν υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με τα προηγούμενα έτη για αυτή την περίοδο.

Αρχικά για την βαθμονόμηση του μοντέλου παρατηρείται στα Διάγραμμα 3-1, Διάγραμμα 3-2, Διάγραμμα 3-4, ότι οι τιμές του σφάλματος εμφανίζουν σταδιακή μείωση, γεγονός που φανερώνει ότι η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Η τελική τιμή του σφάλματος ανέρχεται στα 9.73 m χαμηλότερα από το μέγιστο σφάλμα που είχε οριστεί στα 17 m.

Για τις οριακές συνθήκες ορίστηκε ως σημεία εισροής νερού το νότιο και βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Αυτό συνέβη γιατί στα νότια της περιοχής παρουσιάζονταν οι μεγαλύτερες τιμές υδραυλικού ύψους στο γειτονικό πηγάδι παρατήρησης, γεγονός λογικό αφού εκεί παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα στην περιοχή μελέτης. Αρχικά, οι οριακές συνθήκες που εισήχθησαν αφορούσαν πηγάδια παρατήρησης εκτός της περιοχής μελέτης. Έτσι με βάση τα δεδομένα υδραυλικού ύψους που υπήρχαν για τα δεδομένα αυτά ορίσαμε τον όγκο νερού που θα εισρέει στην περιοχή. Επειδή όμως με τον τρόπο αυτό δεν ήταν δυνατό να απεικονιστεί η φυσική κατάσταση του υδροφορέα, καθώς δεν λαμβάνονταν υπόψιν η μεταβολή των υδάτινων πόρων ανάλογα με την εκάστοτε εποχή και τα σφάλματα που εμφανίζονταν ήταν αρκετά μεγαλύτερα από το μέγιστο επιτρεπόμενο, οι οριακές συνθήκες εισήχθησαν στο μοντέλο με τη μορφή συνημιτονοειδούς συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο οι οριακές συνθήκες συσχετίστηκαν με της εποχικές μεταβολές.

Στον Χάρτης 3-1 παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος της περιοχής μελέτης για το έτος 2001. Σε αυτόν παρατηρείται ότι οι τιμές του υδραυλικού ύψους για την περίοδο του χειμώνα είναι μεγαλύτερες από τις τιμές του υδραυλικού ύψους του καλοκαιριού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε ορίσει το μέγιστο υδραυλικό ύψος να εμφανίζεται το χειμώνα. Συναφή αποτελέσματα παρουσιάζονται και στον Χάρτη 3-3 όπου εμφανίζονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους για το χειμώνα και το καλοκαίρι του 2011. Η πτώση στην τιμή του υδραυλικού ύψους το καλοκαίρι είναι αναμενόμενη καθώς μειώνονται αρκετά οι βροχοπτώσεις σε σχέση με το χειμώνα. Η πτώση αυτή στο υδραυλικό ύψος κατά την περίοδο του καλοκαιριού φαίνεται και στις παρατηρημένες τιμές οι οποίες εμφανίζουν πτώση στην περίοδο αυτή. Στο Διάγραμμα 3-3 στο οποίο παρουσιάζονται οι μεταβολές του υδραυλικού ύψους των πηγαδιών παρατήρησης έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι η καμπύλη υδραυλικού ύψους για το πηγάδι παρατήρησης 4 έχει την μορφή της συνημιτονοειδούς καμπύλης που εισήχθη ως οριακή συνθήκη. Αυτό συμβαίνει, διότι το πηγάδι παρατήρησης είναι στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης και πολύ κοντά στο σημείο στο οποίο εισρέει το νερό στην περιοχή μελέτης, γεγονός που το καθιστά απόλυτα εξαρτώμενο με αυτές. Για τον λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο πηγάδι εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υδραυτικά ύψη σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης. Στο ίδιο διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή του υδραυλικού ύψους αυξάνεται αρχικά μέχρι να πιάσει την μέγιστη τιμή του και στην συνέχεια αρχίζει να πέφτει. Η μεταβολή αυτή είναι απόλυτα φυσιολογική καθώς η πρώτη μέρα για την οποία υπάρχουν δεδομένα και κατά συνέπεια η πρώτη μέρα της βαθμονόμησης είναι η 27<sup>η</sup> Απριλίου 2000, ενώ η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ύψους αναμένεται να εμφανιστεί στα τέλη Φλεβάρη δηλαδή στο τέλος του χειμώνα.

Για τις υδραυλικές αγωγιμότητες των γεωλογικών σχηματισμών χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική συνθήκη τιμές οι οποίες προήλθαν από την βάση δεδομένων του Enviro-Base όπως φαίνεται στον Πίνακα 2-1. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που αφορούσαν την περιοχή μελέτης ήταν κυρίως διάφορες μορφές ασβεστόλιθου, αργιλικόι σχηματισμοί, φυλλίτες, χαλαζίτες, ανθρακικοί σχηματισμοί καθώς και άμμος κυρίως στο παραλιακό μέτωπο. Οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των σχηματισμών παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά πολλών τάξεων μεγέθους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέγιστη τιμή ανέρχεται στα  $457.5 \frac{m}{d}$  και η ελάχιστη στα  $1.21 \cdot 10^{-6} \frac{m}{d}$ . Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν αρκετές μεταβολές στις τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών με σκοπό την μείωση του σφάλματος μεταξύ προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών. Οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που προέκυψαν μετά από πολλές δοκιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-2 και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τις αρχικές τιμές που είχαν εισαχθεί στο μοντέλο. Χαρακτηριστικά, οι τιμές έχουν αυξηθεί κατά τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους σε ορισμένους σχηματισμούς. Στον Χάρτη 3-5 διακρίνεται η μεταβολή μεταξύ των αρχικών και τελικών τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας για το πρώτο slice της περιοχής μελέτης.

Για τις ταχύτητες Darcy, όπως φαίνεται και από τον Χάρτη 3-2, Χάρτη 3-4, παρατηρείται ότι η ταχύτητα Darcy τον χειμώνα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το καλοκαίρι, γεγονός αναμενόμενο λόγω των υψηλών τιμών υδραυλικού ύψους και αντίστοιχα υψηλών βροχοπτώσεων τους χειμερινούς μήνες. Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται οι μέγιστες ταχύτητες Darcy για κάθε έτος, για τις περιόδους χειμώνα και καλοκαιριού. Στον πίνακα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ταχύτητα Darcy το χειμώνα είναι μεγαλύτερη σε κάθε έτος και σε πολλές περιπτώσεις σχεδόν διπλάσια αυτής του καλοκαιριού. Μοναδικές εξαιρέσεις αποτελούν το έτος 2000, αυτό όμως οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα δεν έχει φτάσει ακόμα σε ισορροπία όπως έχει ήδη αναφερθεί και το έτος 2012, για το οποίο δεν έχουμε τιμή της ταχύτητας για το καλοκαίρι αφού είχε ήδη τελειώσει η βαθμονόμηση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει σύγκριση. Πρέπει να αναφερθεί ότι η ταχύτητα Darcy στην περιοχή συνδέεται άμεσα με την υδραυλική αγωγιμότητα στην περιοχή μελέτης. Σε γεωλογικούς σχηματισμούς με υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας Darcy σε σχέση με αυτούς που έχουν μικρές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας. Τέλος, στους χάρτες αυτούς διακρίνεται και η κατεύθυνση της ταχύτητας του νερού και δείχνει ότι η εισροή γίνεται στο νότιο τμήμα της περιοχής και στη συνέχεια το νερό κατευθύνεται βόρεια, βορειοδυτικά και βορειοανατολικά προς την θάλασσα. Η πορεία του νερού συμβαδίζει με την μορφολογία του εδάφους όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-10.

Για τη σύγκριση μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 3-4 παρατηρείται η ύπαρξη καλής συσχέτισης μεταξύ των πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών του υδραυλικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα στο Διάγραμμα 3-5, Διάγραμμα 3-6, Διάγραμμα 3-7 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών τιμών για τα πηγάδια παρατήρησης 1, 4, 10. Από αυτά τα διαγράμματα φαίνεται ότι μεταξύ των τιμών υπάρχει καλή συσχέτιση, με εξαίρεση μεμονωμένες ακραίες τιμές, όπως οι δύο τιμές στο Διάγραμμα 3-5, οι οποίες παρ' όλα αυτά δε προβληματίζουν γιατί η πιθανότητα σφάλματος κατά την διαδικασία μέτρησης ή καταγραφής των τιμών αυτών είναι μεγάλη. Οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούν τον γενικό κανόνα των πραγματικών τιμών, δηλαδή όπου υπάρχει πτώση των πραγματικών έχουμε πτώση των παρατηρημένων και αντίστοιχα όπου έχουμε άνοδο των πρώτων έχουμε άνοδο των δεύτερων. Όμως, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο δεν είναι ικανό να πιάσει την καθοδική τάση που υπάρχει στις πραγματικές τιμές του πεδίου.

## 5 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου δύναται να ειπωθεί με ασφάλεια ότι το FEFLOW είναι κατάλληλο για την προσομοίωση του υδραυλικού ύψους ενός υπόγειου υδροφορέα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις μικρές τιμές σφάλματος που προέκυψαν μετά το πέρας της βαθμονόμησης. Η μεγαλύτερη τιμή σφάλματος που εμφανίζεται είναι στα -30.87 m και η μικρότερη 0.623 m, με αποδεκτό όριο σφάλματος (λόγω της φυσικής διακύμανσης στην περιοχή) τα 17 m. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το μοντέλο υπερεκτιμά το προσομοιωμένο υδραυλικό ύψος σε σχέση με το πραγματικό, ενώ αντίθετα το θετικό πρόσημο ότι το υποεκτιμά. Το μέσο σφάλμα του μοντέλου ανέρχεται στα 9.73 m και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ισούται με 13.99 m. Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα, γίνεται κατανοητό ότι οι προσομοιωμένες τιμές του μοντέλου βρίσκονται πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές που έχουν τα πηγάδια παρατήρησης της περιοχής.

Κατά την προσπάθεια δημιουργίας πλέγματος, λόγω της εξαιρετικά μεγάλης πυκνότητας των πηγαδιών σε ορισμένα σημεία της περιοχής μελέτης, ο αλγόριθμος αδυνατούσε να δημιουργήσει το πλέγμα. Για τον λόγο αυτό, προκρίνεται ως καλή λύση, όταν υπάρχουν σε μια περιοχή μελέτης πολλά πηγάδια σε αρκετά κοντινή απόσταση μεταξύ τους να γίνεται ομαδοποίηση αυτών σε λιγότερα που θα περιλαμβάνουν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα.

Για την ασφαλή εξαγωγή των αποτελεσμάτων καθώς και την επιτυχή ολοκλήρωση του μοντέλου χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν διάφορες διαδικασίες. Αρχικά για την εργασία αυτή, υπήρξε αναγκαία η κατασκευή και χρησιμοποίηση διαφόρων χαρτών, για να προσδιοριστούν και απεικονιστούν, η περιοχή μελέτης τα πηγάδια παρατήρησης και οι γεωτρήσεις σε αυτή, τη μορφολογία του εδάφους, τα υψόμετρα της περιοχής και η υδραυλική αγωγιμότητα στην περιοχή. Λόγω της έκτασης της περιοχής και της ύπαρξης μεγάλου αριθμού πηγαδιών, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφόρησης (GIS) για να κατασκευαστούν οι απαραίτητοι χάρτες πριν εισαχθούν στο FEFLOW. Μέσω του GIS έγινε η χωροθέτηση της περιοχής μελέτης και η ακριβής τοποθέτηση των πηγαδιών σε αυτή, αφού μέσω του GIS υπήρχε η δυνατότητα να τοποθετηθούν ανάλογα με τις αντίστοιχες συντεταγμένες τους. Για την εισαγωγή τους στο FEFLOW απαιτείται η μετατροπή τους σε shape file αρχεία.

Για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής, χρησιμοποιήθηκαν τιμές, ως αρχική συνθήκη, οι οποίες προήλθαν από την βάση δεδομένων του προγράμματος Enviro-Base. Παρ' όλα αυτά κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου υπήρξε μεταβολή αυτών, εξαιτίας των μεγάλων σφαλμάτων που παρουσιάζονταν. Με βάση την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων έπειτα από αρκετές δοκιμές, φαίνεται ότι οι τελικές τιμές, οι οποίες στις πλείστες των περιπτώσεων είναι μεγαλύτερες από τις αρχικές, είναι οι καλύτερες που θα μπορούσαν να επιτευχθούν, αφού με αυτές εξασφαλίζεται ότι υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών του υδραυλικού ύψους της περιοχής και των προσομοιωμένων.

Για τις οριακές συνθήκες, στις οποίες εφαρμόστηκε συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους στα νότια της περιοχής, αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την αρχική βαθμονόμηση μια μέση τιμή μετά από αρκετές δοκιμές, έτσι ώστε να εξαγονται τιμές υδραυλικού ύψους με το μικρότερο δυνατό σφάλμα μεταξύ πραγματικών και προσομοιωμένων. Επειδή όμως με αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά αποφασίστηκε η εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο νότιο τμήμα της περιοχής με τη μορφή συνημιτοειδούς συναρτήσεως, έτσι ώστε να υπάρχει παροδικότητα στη διακύμανση των τιμών για να εξαχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα.

Ακόμα ένα δεδομένο που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με επιτυχία είναι η κατεύθυνση της ταχύτητας Darcy στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, η εισροή του νερού γίνεται από το νότιο και δυτικό τμήμα της περιοχής όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-15 όπως ορίστηκε από την οριακή συνθήκη. Στη συνέχεια το νερό κατευθύνεται προς τα βορειοανατολικά και βόρεια της περιοχής προς την θάλασσα ακολουθώντας τη μορφολογία της περιοχής μελέτης.

Συνοψίζοντας, με βάση την έκταση της περιοχής και το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων, κρίνεται ως απαραίτητη η πραγματοποίηση περαιτέρω δειγματοληψιών προτείνεται και η εγκατάσταση σταθμήμετρων για την καταγραφή του υδραυλικού ύψους καθώς και άλλων υδρολογικών δεδομένων που αφορούν την συγκεκριμένη περιοχή για πιο μεγάλα και συνεχόμενα χρονικά διαστήματα και η δημιουργία βάσης δεδομένων στην οποία θα καταγράφονται τα αποτελέσματα. Επίσης σε μελλοντικές διπλωματικές εργασίες που θα αφορούν την περιοχή μελέτης, θα μπορούσε να μελετηθεί η μεταβολή των υδραυλικών υψών της περιοχής για διάφορα κλιματικά σενάρια σε βάθος 30 ή περισσότερων ετών.

## 6 Βιβλιογραφία

### Διεθνής

Morris, D.A. and A.I. Johnson, Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analysed by the Hydrologic Laboratories of the U.S. Geological Survey 1948-1960. U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper, 1839-D, 42p, 1967.

Rehm, B.W., G.H. Groenewold and K.A. Morin, Hydraulic properties of coal and related materials, Northern Great Plains, Ground Water, 18(6), 551-561, 1980.

Davis, S.N., Porosity and permeability of natural materials. Flow through porous media, ed. R.J.M. De Wiest, Academic Press, New York, 54-89, 1969.

Fenske, P.R., Hydrogeology and radionuclide transport, monitoring well HT-2m, Tatum Dome, Mississippi, Proj. Rep. 25, Tech. Rep. NVD-1253-6, Cent. for Water Resour. Res., Desert Res. Inst., Univ. of Nev. Syst., Reno, 1973.

Lambrakis, N., H. Zographos-Nokas and G. Kallergis., Salinization problems of coastal aquifers. Examples from Peloponnese, Crete and Syros. Proceedings of Third Congress of GCMWR, Syros, 1997.

Thierrin, J., G.B. Davis and C. Baber, A ground-water tracer test with deuterated compounds for monitoring in situ biodegradation and retardation of aromatic hydrocarbons, Ground Water, 33(3), 469-475, 1995.

Kreft, A., A. Lenda, A. Turek, A. Zuber, and K. Czauderna, Determination of effective porosities by the two-well pulse method, Isot. Tech. Groundwater Hydrol., Proc. Symp., 2, 295-312, 1974.

Claasen, H.C. and E.H. Cordes, Two-well recirculating tracer test in fractured carbonate rock, Nevada, Hydrol. Sci. Bull., 20(3), 367-382, 1975.

Fried, J.J., Groundwater Pollution, Elsevier, New York, 1975.

Konikow, L.F., Modeling solute transport in ground water, in Environmental Sensing and Assessment: Proceedings of the International Conference, article 20-3, Institute for Electrical and Electronic Engineers, Piscataway, N.J., 1976.

Mercado, A., Recharge and mixing tests at Yavne 20 well field, Underground Water Storage Study Tech. Rep. 12, Publ. 611, Tahal-Water Plann. for Isr., Tel Aviv, 1966.

Rabinowitz, D.D. and G.W. Gross, Environmental tritium as a hydro meteorologic tool in the Roswell Basin, New Mexico, Tech. Completion Rep. OWRR:A-037-NMEX, N. M. Water Resour. Res. Inst., Las Cruces, 1977.

Karanth K.R., Ground Water Assessment Development and Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Delhi, 1987.

Vörösmarty Charles, J., Pamela Green, Joseph Salisbury, Richard B. Lammers, Vulnerability from Climate Change and Population Growth, Global Water Resources, Volume 289 Issue 5477, pages 284-288.

Alley W.M., Reilly T.E. and Franke O.L., Sustainability of Groundwater Resources, U.S. Geological Survey Circular 1186, Denver, CO, 1999

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

### **Ελληνική**

Καρατζάς Π. Γεώργιος, 2020, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορών Ρύπων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, σελίδες 3-18.

Αρχοντέλη Κων. Αριστείδη, 2016. Διαχείριση καρστικών υπογείων υδροφορέων με μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής, το παράδειγμα του αλμυρού Ηρακλείου, Κρήτης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο. Θεσσαλονίκη.

Κριτωτάκης Μ. και Παυλίδου Σ., 2013, Κατάσταση υπογείων υδροφόρων Κρήτης, σελίδες 61, 67-68, 102-104.

Καββαδάς Μιχαήλ (2019). Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

### **Βιβλία**

Anderson M.P. and Woessner W.W., Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Active Transport, Academic Press, California, 1992.

Bear J., Dynamics of Fluids in Porous Media, Republication, Dover Publications, New York, 1988.

### **Ιστοσελίδες**

Πολυτεχνείο Κρήτης, Eclass, <https://www.eclass.tuc.gr> [12/2020]

United States Geological Survey, <https://www.usgs.gov> [11/2020]

United States Geological Survey, <https://prd-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com> [11/2020]

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, <http://www.geo.auth.gr> [12/2020]

Site Research Gate, <https://www.researchgate.net> [11/2020]

Site Cretan Beaches, <https://www.cretanbeaches.com> [11/2020]

Επίσημος ιστότοπος Δήμου Χερσονήσου, <http://landofexperiences.gr> [11/2020]

Επίσημος ιστότοπος Δήμου Χερσονήσου, <https://www.hersonisos.gr> [11/2020]

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Eclass, <https://eclass.chania.hmu.gr> [12/2020]