



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«Προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή Τυμπακίου  
Κρήτης, με χρήση του μοντέλου FEFLOW»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΜΑΡΙΟΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Τριχάκης Ιωάννης

Χανιά, Απρίλιος, 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 τη 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.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η προσομοίωση της υπόγειας ροής με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων FEFLOW. Η προσομοίωση έγινε για την περιοχή του Τυμπακίου και πιο συγκεκριμένα για την κοιλάδα της Μεσσαράς. Η Μεσσαρά βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νομού Ηρακλείου και αποτελεί την μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης, όπου εκεί παράγεται το μεγαλύτερο ποσοστό οπωροκηπευτικών του νησιού. Με βάση τα παραπάνω η περιοχή αυτή έχει μεγάλες απαιτήσεις σε νερό, οι οποίες κυρίως καλύπτονται μέσω άντλησης από τους υπόγειους υδροφορείς.

Για να μπορέσει να γίνει σωστά η προσομοίωση των υπογείων υδάτων ήταν απαραίτητη η επεξεργασία των δεδομένων που είχαμε πριν εισαχθούν στο FEFLOW. Για την επεξεργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν και άλλα προγράμματα με πιο σημαντικά το ArcGIS και το Microsoft Excel, όπου έγινε και μεγάλο μέρος της προεπεξεργασίας των δεδομένων. Στο ArcGIS έγινε κατά κύριο λόγο η επεξεργασία των χαρτών. Όμως χρησιμοποιήθηκε και για την εισαγωγή δεδομένων στο FEFLOW με την μορφή πινάκων. Στο Microsoft Excel έγινε η επεξεργασία των δεδομένων παρατήρησης αλλά και των προσομοιωμένων τιμών που εξήχθησαν από το FEFLOW. Τα αποτελέσματα και τα δεδομένα ήταν σε μορφή πινάκων και για αυτό επιλέχθηκε να γίνει η επεξεργασία τους στο Microsoft Excel. Στο FEFLOW εισήχθησαν 5 πηγάδια παρατήρησης με παρατηρημένες τιμές από το 2004 έως το 2020. Τα πηγάδια αυτά αποτελούν πηγάδια του ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών). Έπειτα εισήχθησαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε έναν από τους γεωλογικούς σχηματισμούς καθώς και το ακριβές υψόμετρο της περιοχής. Επίσης εισήχθησαν οι τιμές της βροχόπτωσης με βάση τους μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής καθώς και τα πηγάδια άντλησης. Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν και οι οριακές συνθήκες περιμετρικά της περιοχής μελέτης. Οι οριακές συνθήκες ήταν δύο ειδών, αυτές του σταθερού υδραυλικού ύψους και αυτές της παροχής. Από τις συνολικά τέσσερις οριακές συνθήκες, οι τρεις αφορούσαν συνθήκες παροχής ενώ η τέταρτη αφορούσε συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους. Οι δύο κύριες συνθήκες παροχής, για την φόρτιση του υδροφορέα, τοποθετήθηκαν, η μία στο βόρειο τμήμα από όπου εισρέει το νερό που έρχεται από τον ορεινό όγκο του Ψηλορείτη, η άλλη στο νότιο όπου βρίσκεται ο ποταμός Γεροπόταμος. Η τρίτη η οποία αφορούσε την εκφόρτιση του, τοποθετήθηκε στο ανατολικό τμήμα ενώ η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετήθηκε στην ακτογραμμή όπου και υπάρχει εκφόρτιση του υδροφορέα προς την θάλασσα.

Στην συνέχεια εξετάστηκαν πέντε σενάρια μεταβολής της παροχής των πηγaziών άντλησης. Το κάθε σενάριο αφορούσε την μείωση της παροχής άντλησης κατά 10% επιπλέον από το προηγούμενο. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο αφορούσε την μείωση της άντλησης κατά 10%, το δεύτερο κατά 20%, το τρίτο κατά 30%, το τέταρτο κατά 40% και τέλος το πέμπτο κατά 50%. Η προσομοίωση των σεναρίων έγινε και αυτή με την χρήση του προγράμματος FEFLOW. Στα πέντε αυτά σενάρια δεν αλλάχθηκε κάποια άλλη παράμετρος εκτός από την παροχή άντλησης. Τα σενάρια αυτά επιλέχθηκαν ώστε να δούμε το μέγεθος της αύξησης του υδραυλικού ύψους του υδροφορέα, σε περίπτωση μείωσης του ρυθμού άντλησης διότι στην περιοχή έχει

κατασκευαστεί ένα νέο φράγμα (φράγμα Φανερωμένης), το νερό από το οποίο μπορεί να καλύψει μέρος των αρδευτικών αναγκών της περιοχής μελέτης.

## Abstract

In the present bachelor thesis, the simulation of the groundwater flow will be examined using the simulation model finite element FEFLOW. The simulation performed for the area of Tympaki and more specifically for the Messara valley. Messara is located in the south part of Heraklion, constitutes the largest plain area of Crete where the vast percentage of fruits and vegetables of the island is produced. Based on the above, this area shows great demands of water supply, fulfilled mainly via pumping from aquifers.

To provide an accurate simulation of the groundwaters, data processing was necessary prior to the utilisation of FEFLOW. The data processing conducted using some other software with the most important being the ArcGIS and Microsoft excel where the bulk processing occurred. ArcGIS was used mainly for the processing of the maps. Moreover, it was implemented to insert data on the FEFLOW under tables format. Microsoft Excel used for processing of observation and simulation data exported from FEFLOW. The results and the data were obtained in a table format and for that reason, the chosen software was the Microsoft Excel. On FEFLOW, 5 observation wells were imported with observed values from 2004 to 2020. These wells constitute wells of IGME (Institute of Geology & Mineral Exploration). Afterwards, the values of hydraulic conductivity were imported for each of the geological formations together with the exact altitude of the area. Moreover, the values of the rainfall obtained from the meteorological stations of the area and the pumping wells were imported too. Following that, the boundary conditions on the perimeter of the area were placed. The boundary conditions were of two kinds, those of steady hydraulic head and those of the supply. From the total of four boundary conditions, three of them concerned the supply conditions while the fourth one concerned the condition of the steady hydraulic head. The two main supply conditions for the inflow of the aquifer were placed the first on the north part where the water coming from Psiloritis mountain inflows and the second one on the south part where the river Geropotamos is located. The third one, concerning the outflow of the aquifer was placed on the east side while the boundary condition of the steady hydraulic head was placed on the shoreline where the emptying of the aquifer to the sea takes place.

Once all the data were in place, the five change of pumping scenarios through the wells of the area were examined. Each scenario, dedicated to the reduction of the pumping level by 10% from the previous one. More specifically, the first scenario referred to a 10% pumping reduction, the second to a 20%, the third to a 30%, the fourth to a 40% and finally the fifth to a 50% reduction. The simulation of the above scenarios was also performed using the FEFLOW software. The only variable between the five scenarios was the level of pumping. Those five cases were chosen to demonstrate the amount of increase of the hydraulic head of the aquifer in the case of pumping reduction as a new dam (Faneromeni dam) has been constructed in this area which can provide water to cover part of the irrigation demands of the study area.

## **Ευχαριστίες**

Έπειτα από την ολοκλήρωση της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με βοήθησαν ώστε να καταφέρω να αποκτήσω το δίπλωμα του Μηχανικού Περιβάλλοντος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καρατζά Γεώργιο για την πολύτιμη καθοδήγηση και την βοήθεια του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Τριχάκη για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση του όσον αφορά στην διπλωματική μου εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Εμμανουήλ Βαρουχάκη και τον Χρίστο Γκούμα για την καθοδήγηση τους και τα βοηθητικά σχόλια.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	2
Abstract .....	3
Κατάλογος Πινάκων .....	6
Κατάλογος Διαγραμμάτων / Εικόνων.....	6
1.Εισαγωγή .....	9
1.1 Περιοχή Μελέτης .....	9
1.1.1 Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά.....	10
1.1.2 Γεωλογία περιοχής .....	12
1.2 Σημασία υδάτινων πόρων .....	14
1.3 Θεμελιώδεις παράμετροι υπόγειας υδρολογίας.....	15
1.3.1 Υδρολογικός κύκλος.....	15
1.3.2 Βασικές έννοιες .....	16
1.3.3 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	18
1.3.4 Ταχύτητα διήθησης .....	19
1.3.5 Ειδική Διαπερατότητα .....	20
1.3.6 Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας.....	20
1.3.7 Συντελεστής Αποθηκευτικότητας.....	20
2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	21
2.1 Κατηγορίες Μαθηματικών Ομοιωμάτων.....	21
2.2 FEFLOW .....	22
2.3 Οριακές συνθήκες .....	22
2.4 Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	23
2.5 Επαλήθευση του μοντέλου.....	23
3.Μεθοδολογία.....	25
3.1 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	26
3.2 Οριακές συνθήκες .....	27
3.2.1 Μορφή οριακών συνθηκών .....	30
3.3 Πηγάδια άντλησης - Γεωτρήσεις.....	35
4.Αποτελέσματα .....	37
5.Συζήτηση.....	65
6.Συμπεράσματα .....	70
7.Βιβλιογραφία.....	72

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας συντελεστών A: Οι συντελεστές πριν (αρχικό) και μετά (τελικό) τη συμπλήρωση με γραμμική παρεμβολή από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς.

Πίνακας 2: Σφάλματα κάθε πηγαδίου για το αρχικό σενάριο.

Πίνακας 3: Διαφορές υδραυλικού ύψους πηγαδιών κάθε σεναρίου σε σχέση με το αρχικό.

Πίνακας 4: Ποσοστά μείωσης μέγιστης ταχύτητας Darcy.

## Κατάλογος Διαγραμμάτων / Εικόνων

Εικόνα 1: Χάρτης Τυμπακίου

Εικόνα 2: Μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων για τον Νομό Τυμπακίου [meteoblue.gr].

Εικόνα 3: Μέγιστες θερμοκρασίες για τον Νομό Τυμπακίου [meteoblue.gr].

Εικόνα 4: Ανεμολόγιο Νομού Τυμπακίου [meteoblue.gr].

Εικόνα 5: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς

Εικόνα 6: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Τυμπακίου κλίμακας 1:50000, βασιζόμενος στη γεωλογική χαρτογράφηση του ΙΓΜΕ [Γιαννάκος, 2013].

Εικόνα 7: Υδρολογικός κύκλος [usgs.gov].

Εικόνα 8: Ελεύθερος υδροφορέας [Καρατζάς, 2021].

Εικόνα 9: Περιορισμένος υδροφορέας [Καρατζάς, 2021].

Εικόνα 10: Το πείραμα του Darcy (Darcy's Law) [Καρατζάς, 2021]

Εικόνα 11: Πηγάδια παρατήρησης (ΙΓΜΕ).

Εικόνα 12 : Υδραυλικές αγωγιμότητες

Εικόνα 13: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 1.

Εικόνα 14: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 2.

Εικόνα 15: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 3.

Εικόνα 16: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 4.

Εικόνα 17: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 5.

Εικόνα 18: Γραμμική παρεμβολή για τους σταθμούς Μοιρών και Λαγολιού.

Εικόνα 19: Γραμμική παρεμβολή για τους σταθμούς Μοιρών και Τυμπακίου.

Εικόνα 20: Απεικόνιση τοποθεσίας οριακών συνθηκών.

Εικόνα 21:Καμπύλη βόρειας οριακής συνθήκης (Ψηλορείτης).

Εικόνα 22:Καμπύλη νότιας οριακής συνθήκης (Γεροπόταμος).

Εικόνα 23:Απεικόνιση πηγαδιών άντλησης

Εικόνα 24:Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για το βασικό σενάριο κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011.

Εικόνα 25:Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το αρχικό σενάριο. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

Εικόνα 26: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του χειμώνα και στην δεύτερη για την περίοδο του καλοκαιριού

Εικόνα 27: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 1 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Εικόνα 28: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 2 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Εικόνα 29: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 3 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Εικόνα 30: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 4 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Εικόνα 31: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 5 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

Εικόνα 32: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

Εικόνα 33: :Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 1. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης

Εικόνα 34: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

Εικόνα 35: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011.

Εικόνα 36: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 2. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.



Εικόνα 37: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα

Εικόνα 38: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

Εικόνα 39: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 3. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

Εικόνα 40: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

Εικόνα 41: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

Εικόνα 42: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

Εικόνα 43: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

Εικόνα 44: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 5. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

Εικόνα 45: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

Εικόνα 46: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 1.

Εικόνα 47: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 2.

Εικόνα 48: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 3.

Εικόνα 49: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 4.

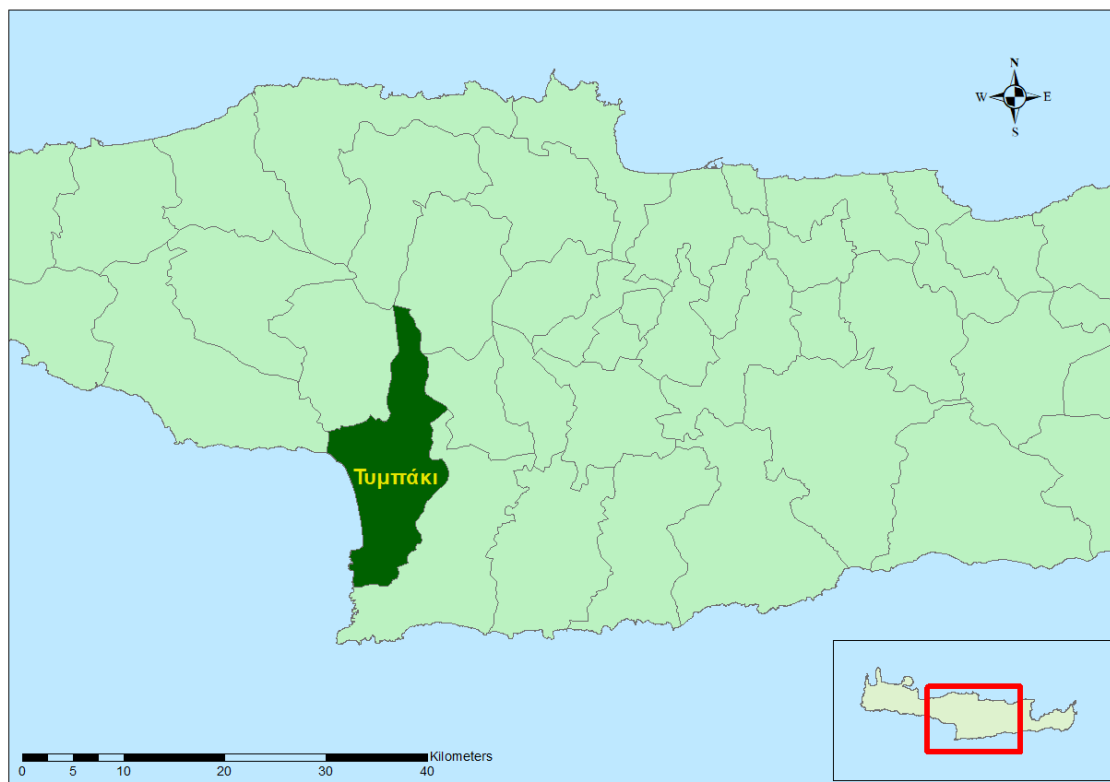
Εικόνα 50: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 5.

Εικόνα 51: 3-D απεικόνιση περιοχής μελέτης

## 1.Εισαγωγή

### 1.1 Περιοχή Μελέτης

Το Τυμπάκι ανήκει στον δήμο Φαιστού της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου που βρίσκεται στην Περιφέρεια Κρήτης, σύμφωνα με την διοικητική διαίρεση της Ελλάδος όπως διαμορφώθηκε με το πρόγραμμα 'Καλλικράτης'. Βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του νομού Ηρακλείου και έχει σαν έδρα του την ομώνυμη κωμόπολη Τυμπάκι. Πρόκειται για πεδινό και παραθαλάσσιο δήμο, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου βρίσκεται στον κάμπο της Μεσσαράς, ενώ βρέχεται από το Λιβυκό πέλαγος. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001 ο δήμος είχε συνολικά 10.001 κατοίκους και έκταση 157.122 στρέμματα. Η πεδιάδα της Μεσσαράς, η μεγαλύτερη πεδιάδα της Κρήτης, βρίσκεται στη νότια μεριά του Νομού Ηρακλείου, σε μια επιμήκη περιοχή που έχει μήκος 50 χλμ. και πλάτος που δεν ξεπερνά τα 7 χλμ. Η πεδιάδα εκτείνεται από ανατολικά προς δυτικά στη νότια ακτή της Κρήτης. Βόρεια συνορεύει με την οροσειρά του Ψηλορείτη, ενώ νότια με την οροσειρά των Αστερουσίων. Δυτικά βρέχεται από τον ομώνυμο κόλπο της Μεσσαράς, που αποτελεί τμήμα του Λιβυκού πελάγους. Ανατολικά εκτείνεται ως τις παρυφές του όρους Δίκη κοντά στη Βιαννο. Ο Γεροπόταμος, διασχίζει την πεδιάδα και εκβάλλει στον κόλπο της Μεσσαράς. Δυο παραπόταμοι του είναι ο Κουτσουλίτης και ο Μάγερας. Τα τελευταία χρόνια στην περιοχή έχει δημιουργηθεί μια τεχνητή λίμνη, το φράγμα της Φανερωμένης, με σκοπό την άρδευση ολόκληρης σχεδόν της πεδιάδας. Μια χαμηλή ανύψωση του εδάφους στο χωριό Ασήμι χωρίζει τη Μεσσαρά σε δυο λεκάνες, την κάτω και την άνω. Η Άνω Μεσσαρά διαρρέεται από τον ποταμό Αναποδάρη στους παραπόταμους του οποίου υπάρχουν τα φράγματα Παρτίρων, Αμουργέλων, Δαμανιών, Αρμανωγείων και Ινίου καθώς και οι λιμνοδεξαμενες Καραβάδο και Σκινιά. [Δεττοράκη, 2012].

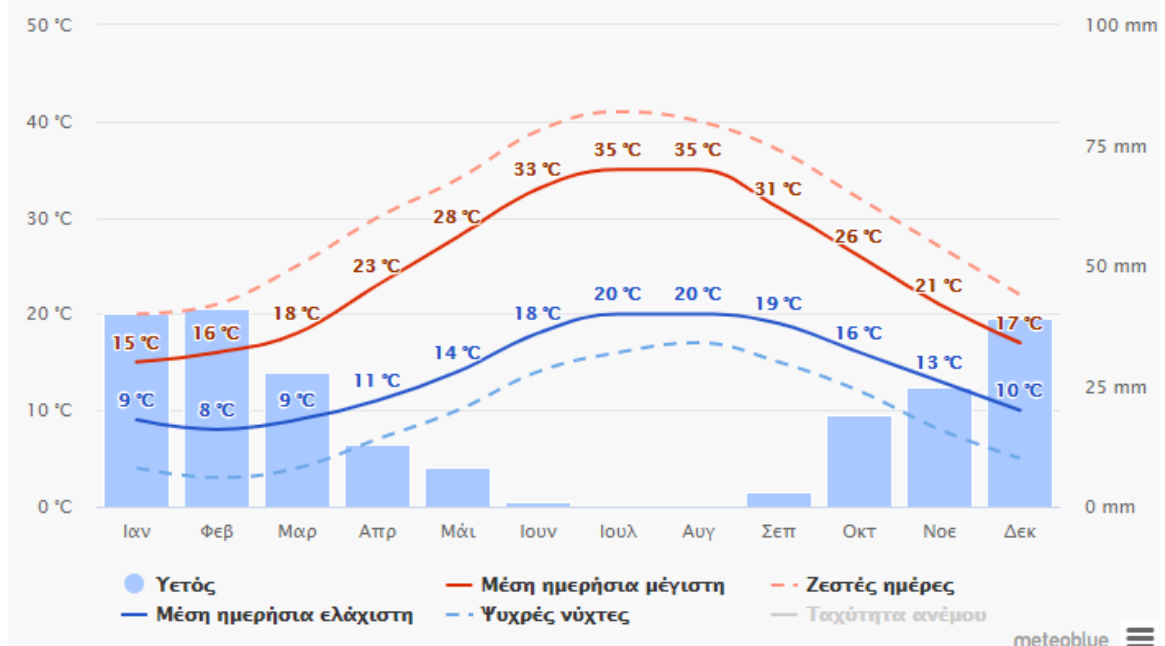


Εικόνα 1: Χάρτης Τυμπακίου

#### 1.1.1 Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά

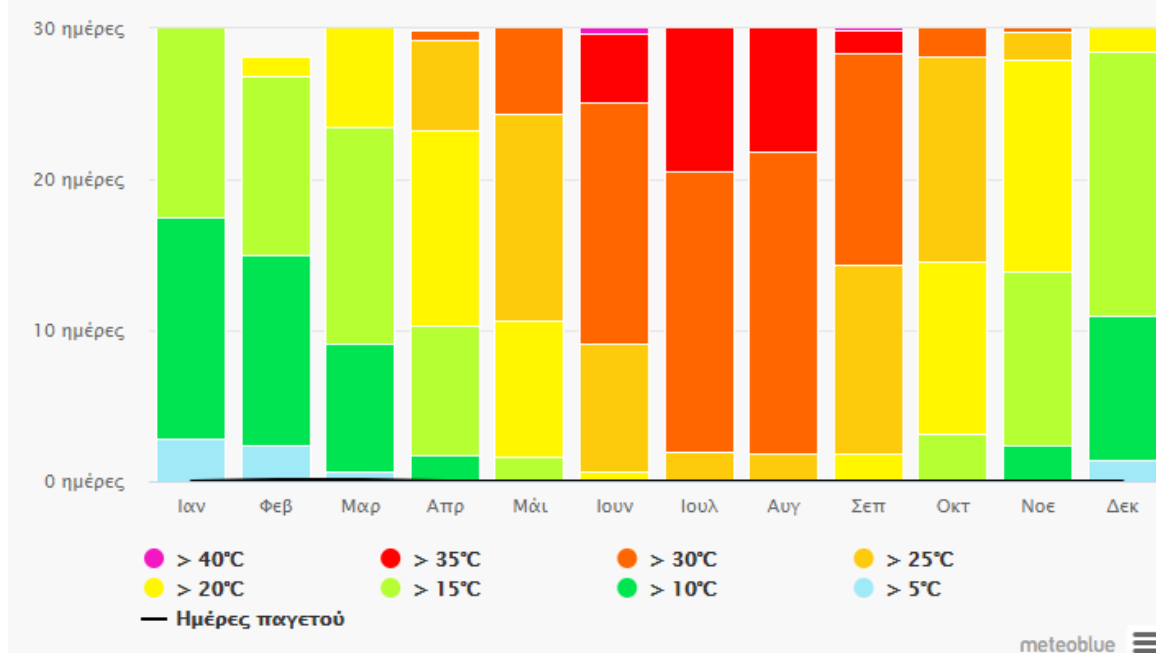
Το κλίμα της Κρήτης είναι εύκρατο και για πολλούς το ηπιότερο της Ευρώπης. Ανήκει σε δύο κλιματολογικές ζώνες, τη Μεσογειακή και τη Βόρεια Αφρικανική. Ο χειμώνας είναι αρκετά ήπιος με πολλές βροχοπτώσεις ιδιαίτερα στα δυτικά τμήματα της νήσου [emy.gr]. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες στα πεδινά τμήματα αλλά στις ορεινές περιοχές η παρουσία του χιονιού είναι συχνή. Οι βροχές την θερινή περίοδο είναι σπάνιες. Επίσης οι διαφορές της θερμοκρασίας του βόρειου τμήματος του νησιού από το νότιο είναι αρκετά μεγάλες και αυτό λόγω των σημαντικών κλιματολογικών διαφοροποιήσεων. Οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με μέση θερμοκρασία  $27,5^{\circ}\text{C}$  ενώ οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με μέση θερμοκρασία  $11,7^{\circ}\text{C}$ . Οι βροχοπτώσεις παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διακύμανση από τους χειμερινούς στους καλοκαιρινούς μήνες. Μέγιστη βροχόπτωση παρουσιάζεται τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο με μέση τιμή 100,75 mm ενώ τον Ιούλιο και τον Αύγουστο παρουσιάζεται η ελάχιστη (σχεδόν μηδενική) τιμή βροχόπτωσης με μέση τιμή 0,4 mm [emy.gr]. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ανέμων.[meteoblue.gr]

## Μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων

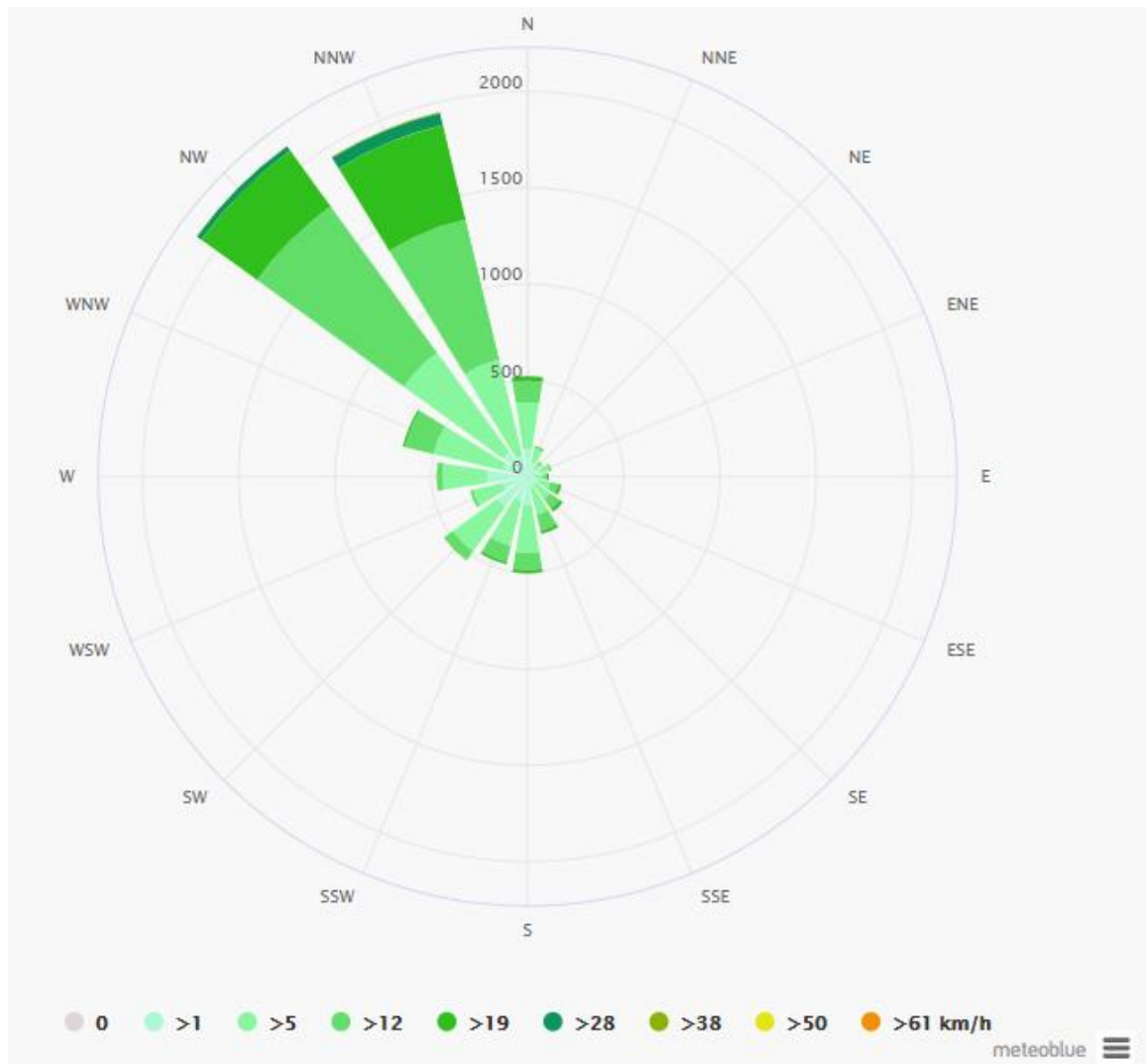


Εικόνα 2: Μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων για τον Νομό Τυμπακίου [meteoblue.gr].

## Μέγιστες θερμοκρασίες



Εικόνα 3: Μέγιστες θερμοκρασίες για τον Νομό Τυμπακίου [meteoblue.gr].

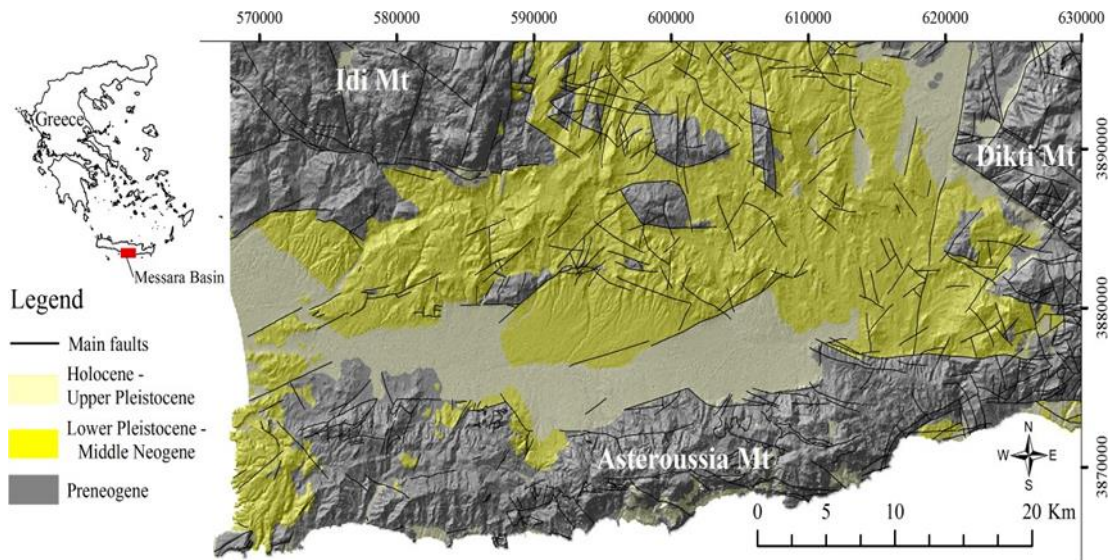


Εικόνα 4:Ανεμολόγιο Νομού Τυμπακίου [meteoblue.gr].

### 1.1.2 Γεωλογία περιοχής

Με βάση παλαιότερη διπλωματική εργασία (Γιαννάκος Εμμανουήλ, 2013) η λεκάνη της Μεσσαράς εκτείνεται κατά την διεύθυνση Α – Δ και αποτελεί το νότιο τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου. Αποτελεί μια τεκτονική τάφρο που ορίζεται από τις ρηξιγενείς ζώνες Μαλεβυζίου, Καμαρών, Γέργερης (δυτικά) από τα ρήγματα Καστελίου, Χερσονήσου, Ξενιάκου (ανατολικά) και των Αστερουσίων όρεων (νότια).

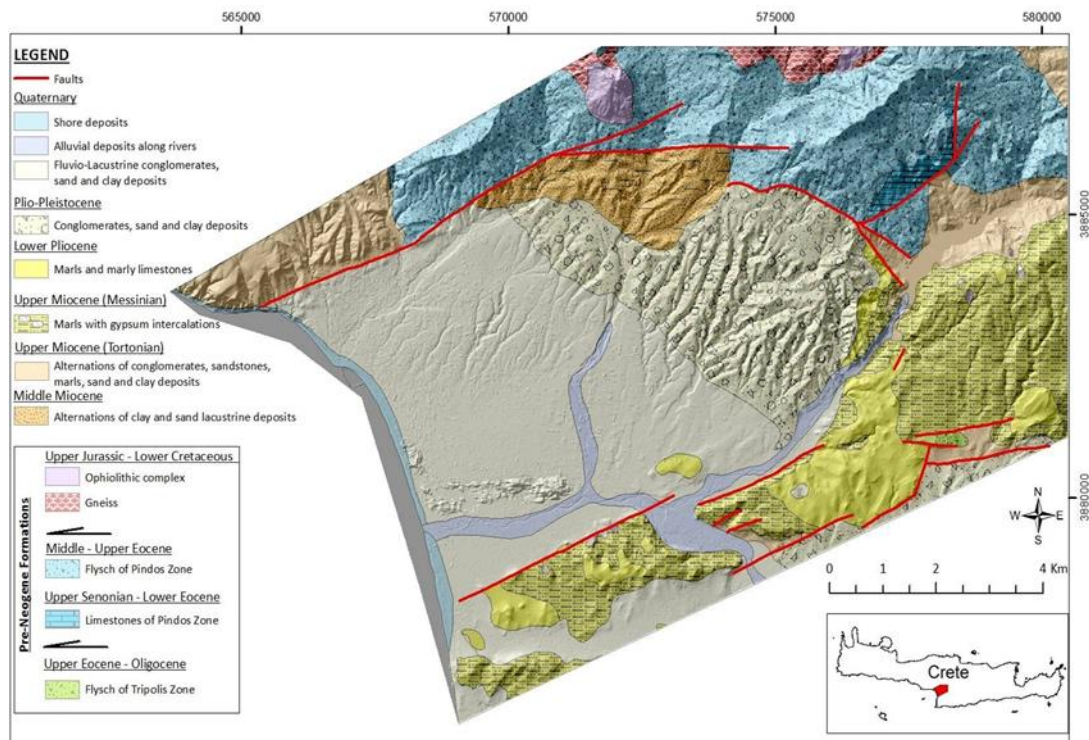
Η λεκάνη διακρίνεται σε δύο (2) επιμέρους τεκτονικές ενότητες: Στην πρώτη περιλαμβάνονται οι τεταρτογενείς και οι νεογενείς σχηματισμοί και στη δεύτερη ανήκουν οι προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων όρεων, οι οποίες καταλαμβάνουν τα όρια της λεκάνης.



Εικόνα 5: Τεκτονοστρωματογραφικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς [Γιαννάκος, 2013]

Στο υπόμνημα: με ανοικτό κίτρινο χρώμα οι αποθέσεις του Ολόκαινου – Ανώτερου Πλειστόκαινου, με κίτρινο οι αποθέσεις του Κατώτερου Πλειστόκαινου – Μέσο Νεογενούς και με γκρι οι προνεογενείς αποθέσεις.

Η λεκάνη του Τυμπακίου οριοθετείται από το ρήγμα Αγ. Τριάδας (ΝΔ), από το ρήγμα Βόρης (ΝΑ), από το ρήγμα Κλίμα (Β), από το ρήγμα Κισσού (Α) και από την ακτογραμμή (Δ).



Εικόνα 6: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Τυμπακίου κλίμακας 1:50000, βασιζόμενος στη γεωλογική χαρτογράφηση του ΙΓΜΕ [Γιαννάκος, 2013].



Στην περιοχή εμφανίζονται οι παρακάτω γεωλογικοί σχηματισμοί από τα ανώτερα προς τα κατώτερα βάθη:

- Παράκτιες αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο), που αποτελούνται από άμμους συγκολλημένες με κροκάλες και ψαμμίτες.
  - Κροκαλοπαγή, άμμοι και άργιλοι του Πλειο - Πλειστόκαινου.
  - Θαλάσσιες αποθέσεις του Κατώτερου Πλειόκαινου, που περιλαμβάνουν λευκές μάργες και λευξούς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, καστανωπές φυλλώδεις μάργες, άμμους, κροκαλοπαγή και στα ανώτερα μέρη κλαστικούς ασβεστόλιθους.
  - Σχηματισμός Αποστόλων του Μεσσηνίου (Ανώτερο Μειόκαινο). Αποτελείται από κυανές, τεφρές και θαλάσσιες μάργες, με βάση συνήθως από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμους πλούσιους σε ασβεστόλιθους.
  - Ακανόνιστες εναλλαγές από αποθέσεις υφάλμυρων και γλυκών νερών, με ενδιαστρώσεις υφαλογενών ασβεστόλιθων. Ειδικότερα εμφανίζονται κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, άργιλοι, λιγνίτες και ασβεστόλιθοι, με μαλάκια γλυκού νερού και υπολείμματα φυτών. Σχηματισμοί που ανήκουν στο Ανώτερο Μειόκαινο (Τορτόνιο).
  - Λατυποπαγή, λιμναίες και θαλάσσιες αποθέσεις του Μέσο και Ανώτερου Μειόκαινου.
- [Γιαννάκος, 2013]

## 1.2 Σημασία υδάτινων πόρων

Το νερό μπορεί να θεωρηθεί ως φυσικός πόρος, ως οικονομικό αγαθό και ως περιβαλλοντικό στοιχείο, ανάλογα με το κύριο κριτήριο και το είδος διαχείρισης του. Σαν φυσικός πόρος και σαν οικονομικό αγαθό αποτελεί αναντικατάστατο στοιχείο για τις ανάγκες που καλύπτει. Επίσης αποτελεί αναπόσπαστη προϋπόθεση για οποιαδήποτε ανάπτυξη ζωής στον πλανήτη μας. Η αειφόρος διαχείριση των υδατικών πόρων είναι βασική παράμετρος της βιώσιμης ανάπτυξης. Αυτό συμβαίνει διότι οι υδάτινοι πόροι όχι μόνο δεν είναι απεριόριστοι αλλά υπάρχουν και περιοχές όπου η έλλειψη τους δημιουργεί τεράστια προβλήματα στην ανάπτυξη αλλά και στην επιβίωση των ζωικών και ανθρώπινων πληθυσμών τους.[Ευταξίας Κώστας, 2014]. Η κατανάλωση των πόρων όπως και η ζήτηση αυξάνεται συνεχώς κάτι που είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί καθώς οι πόροι είναι συγκεκριμένοι και δεν αυξάνονται με τον ίδιο ρυθμό. Κάτι που κάνει την κάλυψη των αναγκών ακόμα πιο δύσκολη είναι η αύξηση της ζήτησης σε περιόδους όπου η ποσότητα των πόρων είναι η ελάχιστη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το καλοκαίρι όπου λόγω των ελάχιστων βροχοπτώσεων οι πόροι λιγοστεύουν και η ζήτηση αυξάνεται κατακόρυφα. Επιπλέον προβλήματα στο θέμα προσφοράς και ζήτησης δημιουργείται από το γεγονός ότι η κατανομή των πόρων δεν είναι πάντα όπως επιθυμούμε και πολλές φορές είναι εκ διαμέτρου αντίθετη με τον πληθυσμό της εκάστοτε περιοχής (πυκνοκατοικημένες περιοχές έχουν περιορισμένους πόρους ενώ περιοχές με μικρό πληθυσμό έχουν μεγάλα αποθέματα υδάτινων πόρων). Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η κατανομή των υδάτινων πόρων δεν είναι κατάλληλη ώστε να ικανοποιεί τη ζήτηση σε όλες τις περιοχές. Αυτό κάνει ακόμα πιο αναγκαία την σωστή διαχείριση τους και ιδιαίτερα των υπόγειων υδάτων τα οποία έχουν και πολλές ιδιαιτερότητες αλλά και μεγάλη σημασία. Η αποφυγή της υποβάθμισης τους ,δηλαδή την αλλοίωση τους σε βαθμό που τα καθιστά μη διαθέσιμα για χρήση, αποτελεί πολύ βασικό στόχο στη

συνολική διαχείριση των υδάτινων πόρων. Κύριο χαρακτηριστικό των υπόγειων υδάτων είναι η δυσκολία που υπάρχει στην μεταβολή της ποιότητας τους. Αυτό καθιστά δύσκολή την υποβάθμιση τους αλλά καθιστά και εξίσου δύσκολη την μετέπειτα παρέμβαση για την επαναφορά τους στην αρχική κατάσταση. Τέλος η ρύπανση ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι πιο βασικοί είναι μέσω λιπασμάτων, από αποπλύσεις λυμάτων από χώρους υγειονομικής ταφής καθώς και από διείσδυση του θαλασσινού νερού στο γλυκό (αυτό συμβαίνει σε παράκτιους υδροφορείς και σε περιοχές που υπάρχει μεγάλη άντληση). Η τελευταία περίπτωση ονομάζεται υφαλμύριση και είναι ικανή να μεταβάλλει την σύσταση του νερού σε τέτοιο βαθμό που το καθιστά πλήρως ακατάλληλο για χρήση.[Ε.Χατζούης, 2005]

### 1.3 Θεμελιώδεις παράμετροι υπόγειας υδρολογίας

#### 1.3.1 Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος απαρτίζεται από μια σειρά διαδικασιών μέσω των οποίων το νερό κυκλοφορεί μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας ξηράς και θάλασσας. Κατά την διάρκεια του κύκλου αυτού το νερό εμφανίζεται σε όλες τις μορφές που μπορεί να έχει (υγρό, αέριο, στερεό). Ο κύκλος αποτελείται από τις παρακάτω διαδικασίες : ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, εξατμισοδιαπνοή, επιφανειακή απορροή, κατείσδυση. Τα κατακρημνίσματα αποτελούνται από όλες τις μορφές με τις οποίες το νερό μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια της γης (βροχή, χιόνι κ.λπ.). Η εξατμισοδιαπνοή αφορά την ποσότητα του νερού η οποία επιστρέφει στην ατμόσφαιρα αφού υποστεί τις διεργασίες την εξάτμισης και της διαπνοής. Όπου εξάτμιση είναι η μετατροπή του νερού από την υγρή φάση στην αέρια με την συμβολή της ηλιακής ενέργειας, ενώ η διαπνοή είναι η μετατροπή του νερού από την υγρή φάση στην αέρια μέσω της δράσης των φυτών. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι ένας δείκτης που εκφράζει την μέγιστη ποσότητα νερού που θα εξατμιζόταν ή θα διαπνεόταν από τα φυτά αν τα αποθέματα ήταν αρκετά για να αναπληρώσουν τις απώλειες. Η επιφανειακή απορροή περιλαμβάνει το μέρος των κατακρημνίσεων το οποίο δεν κατακρατείται από το έδαφος και δημιουργεί χειμάρρους και καταλήγει στις θάλασσες και τις λίμνες. Τέλος η κατείσδυση περιλαμβάνει το μέρος των κατακρημνισμάτων το οποίο εισχωρεί στο έδαφος και ενσωματώνεται στα υπόγειους υδροφορείς και αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα για την υδρολογία της περιοχής. Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στην ένταση και την διάρκεια του κύκλου οι οποίες δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται κυρίως από το κλίμα που επικρατεί στην εκάστοτε περιοχή αλλά και από την γεωγραφική της θέση.[Βουδούρης, 2006]





Εικόνα 7:Υδρολογικός κύκλος [usgs.gov].

### 1.3.2 Βασικές έννοιες

**Πορώδες:** Το πορώδες (Porosity) ( $n$ ) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων ( $V_k$ ) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος /εδάφους ( $V_{ολ}$ ):  $n = V_k / V_{ολ}$ . Το ενεργό πορώδες (Effective porosity) αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια) [Βουδούρης, 2006].

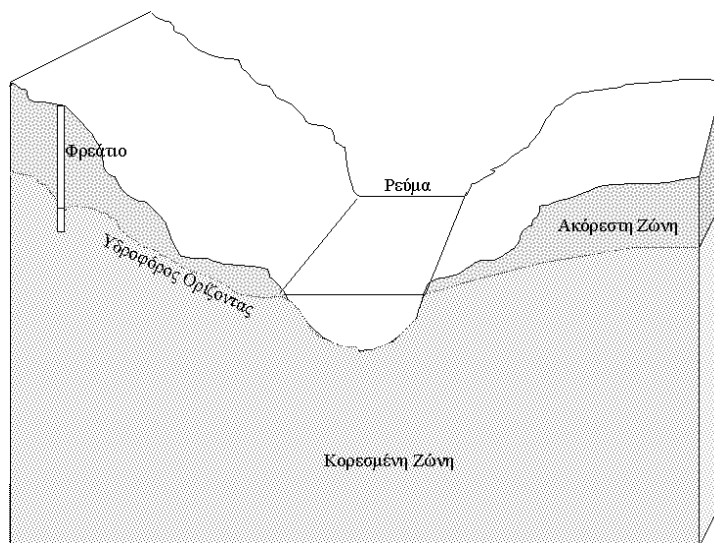
**Υδροφορείς (Aquifers):** είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν αρκετό κορεσμένο με νερό υλικό, ώστε να τροφοδοτήσουν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις ή πηγές. Οι υδροφορείς έχουν αυξημένη ικανότητα να αποθηκεύουν και να μεταβιβάζουν νερό. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι υπόγειων υδροφορέων :

- **Ελεύθεροι υδροφορείς**  
Είναι οι υδροφόροι που έχουν ως δάπεδο στεγανό στρώμα και στην οροφή τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην ελεύθερη επιφάνεια (φρεάτια) των υπόγειων νερών η υδροστατική πίεση να είναι ίση με την ατμοσφαιρική
- **Υπό πίεση υδροφόροι ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί**  
Στα υδροφόρα αυτά στρώματα το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής.

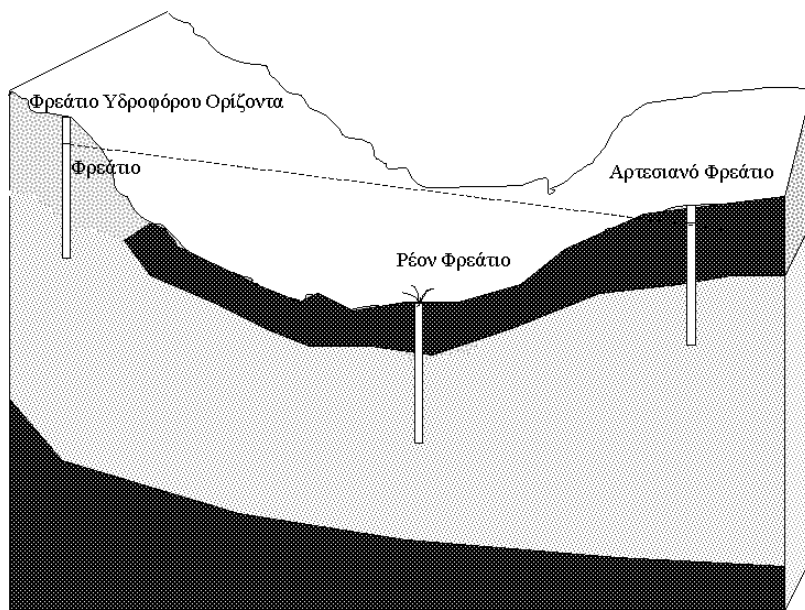
- Ημιαρτεσιανοί (υπό μερική πίεση) υδροφορείς  
Πρόκειται για υπόγειους υδροφορείς ανάλογους με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλ. μικρή υδροπερατότητα

Ακόρεστη ζώνη ή μη κορεσμένη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπεδάφους όπου οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και ύδωρ συγχρόνως (εκτός από περιπτώσεις που προσωρινά καταλαμβάνονται μόνο με ύδωρ - περίπτωση πλημμύρας).

Κορεσμένη ζώνη ή ζώνη του υπόγειου ύδατος χαρακτηρίζεται η ζώνη που οι πόροι της είναι πλήρεις ύδατος και κάτω από υδροστατική πίεση. Η άνω επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας εκεί όπου η υδροστατική πίεση ισούται με τη ατμοσφαιρική.



Εικόνα 8:Ελεύθερος υδροφορέας [Καρατζάς, 2021].



Εικόνα 9:Περιορισμένος υδροφορέας [Καρατζάς, 2021].

### 1.3.3 Υδραυλική αγωγιμότητα

Νόμος του Darcy: ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής.

Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy:

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

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

Όπου:

$Q$ : είναι η παροχή ( $L^3 / T$ )

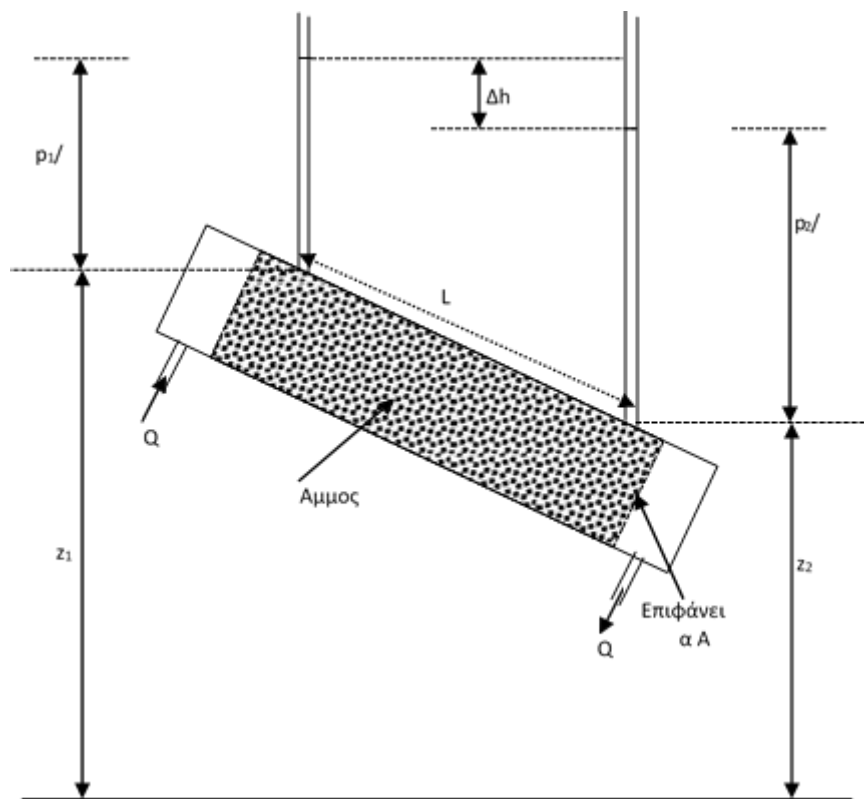
$A$ : είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

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

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

$L$ : είναι το μήκος της στήλης ( $L$ )

$q$ : είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή ( $L/T$ ) Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.[Καρατζάς,2021]



Εικόνα 10: Το πείραμα του Darcy (Darcy's Law) [Καρατζάς, 2021]

#### 1.3.4 Ταχύτητα διήθησης

Η ταχύτητα του Darcy, εξ ορισμού, θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα δια μέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής:  $q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$

Όπου:

$q_p$ : είναι η ταχύτητα διήθησης (seepage velocity) (L/T)

$Q$ : είναι ο ρυθμός παροχής ( $L^3/T$ )

$A$ : είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

$n$ : είναι το πορώδες

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

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

$dh$ : είναι η απώλεια φορτίου (L)

$dl$ : είναι το μήκος της στήλης (L)

Προϋπόθεση για να ισχύει ο νόμος του Darcy είναι ο αριθμός Reynolds να είναι μικρότερος του 1 ( $Re < 1$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει και για αριθμούς Reynolds  $\leq 10$  χωρίς να υπάρχει σημαντικό σφάλμα. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για τα υπόγεια ύδατα ο νόμος του Darcy μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πάρα πολύ μικρό σφάλμα εκτός από περιπτώσεις με πολύ μεγάλη υδραυλική κλίση.[Καρατζάς, 2021]

### *1.3.5 Ειδική Διαπερατότητα*

Διαπερατότητα ορίζεται η ευκολία με την οποία το νερό ρέει ανάμεσα από τους πόρους. Στα λεπτόκοκκα εδάφη η ροή του νερού ανάμεσα από τους πόρους γίνεται με μεγαλύτερη δυσκολία σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Αυτό οφείλεται στα κενά που υπάρχουν ανάμεσα από τους κόκκους. Για να χαρακτηριστεί διαπερατό ένα έδαφος πρέπει οι πόροι να είναι συνεχείς. Για παράδειγμα το πορώδες ενός αργιλικού εδάφους είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό μίας άμμου όμως είναι λιγότερη διαπερατή κατά ένα εκατομμύριο φορές η άργιλος. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαπερατότητα επηρεάζεται από την κοκκομετρία, την πυκνότητα του εδάφους, τα κενά, την ύπαρξη λεπτόκοκκου κλάσματος, τον βαθμό κορεσμού, την θερμοκρασία και τις ασυνέχειες. Για να γίνεται εύκολος ο διαχωρισμός των εδαφών με βάση την διαπερατότητα έχει οριστεί ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$ . Ο Συντελεστής Διαπερατότητας είναι η σταθερά της αναλογίας μεταξύ της φαινόμενης ταχύτητας ροής και της υδραυλικής κλίσης ή η φαινόμενη ταχύτητα ροής μέσω του εδάφους υπό υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα.[Διακοπαρασκευάς, 2020]

### *1.3.6 Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας*

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο, νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους, μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και εκφράζεται με την σχέση: [Καρατζάς, 2019]

$T=kb$  Όπου:

$k$ : η υδραυλική αγωγιμότητα [ $L/T$ ]

$b$ : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [ $L$ ].

### *1.3.7 Συντελεστής Αποθηκευτικότητας*

Ως αποθηκευτικότητα ορίζεται η ικανότητα των εδαφών να αποθηκεύουν νερό.[Διακοπαρασκευάς, 2020]. Η αποθηκευτικότητα επηρεάζεται από το είδος του υδροφορέα (ελεύθερος ή περιορισμένος) αλλά και από τους υφιστάμενους μηχανισμούς αποθήκευσης (συμπιεστότητα ύδατος, συμπιεστότητα υλικού, πλήρωση και εκκένωση πόρων). [Καββαδάς, 2019]



## 2 Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Κατηγορίες Μαθηματικών Ομοιωμάτων

Με τον όρο ομοίωμα εννοούμε μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος που προσομοιώνει τη συμπεριφορά του σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή «τάσεις» [Τάντος 2006]. Σύμφωνα με τα πρότυπα (ASTM 2000) "ομοίωμα θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα και τους μηχανισμούς που το διέπουν".

Πιο συγκεκριμένα με τα φυσικά μοντέλα γίνεται απευθείας προσομοίωση π.χ. της υπόγειας ροής στο εργαστήριο. Τα μοντέλα αυτά θα συνεχίσουν να είναι χρήσιμα στην διερεύνηση της ποιότητας, αλλά οι πρακτικές τους εφαρμογές είναι δύσκολες εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν τα αντίστοιχα φυσικά συστήματα.

Τα αναλογικά μοντέλα χρησιμοποιούσαν τεχνικές που έχασαν τη δημοτικότητα τους, εξ αιτίας της ικανοποιητικής προσαρμοστικότητας, της μεγάλης διάθεσης και των πολύ μεγάλων δυνατοτήτων εφαρμογής των αριθμητικών μοντέλων.

Τέλος τα μαθηματικά μοντέλα είναι κατάλληλα για τα προβλήματα υδροφόρων σχηματισμών με ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, ανισοτροπία, καθώς και χωρικά μεταβαλλόμενες παραμέτρους, όπως ο ρυθμός άντλησης και τροφοδοσίας [Τάντος 2006].

Με βάση τη γεωμετρία του πλέγματος τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε:

- Μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)

Στη μέθοδο αυτή οι γραμμές ροής που υπάρχουν κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα, αντιπροσωπεύουν έναν όγκο νερού που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Ο εμπλουτισμός, μπορεί να προσομοιωθεί μέσω πηγαδιών άντλησης ή να εισαχθεί μέσω χωριστού πίνακα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται με επιτυχία στα προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων. Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή είναι απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη [Τάντος 2006].

- Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method)

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η ευκαιρία που παρέχεται, ώστε οι κατανεμημένες πηγές να ορίζονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενώ οι σημειακές πηγές σε ένα κόμβο. Κατά τη μέθοδο αυτή, το πεδίο εφαρμογής αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υποπεριοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Το πλέγμα μπορεί να είναι τριγωνικής ή ορθογωνικής μορφής. Οι εξισώσεις επιλύονται στην κορυφή του κάθε τριγώνου με τη βοήθεια του λογισμού των διαφορών ή με τη μέθοδο των σταθμισμένων υπολοίπων. Στη συνέχεια, η σύνθεση των επιμέρους στοιχείων οδηγεί στο αλγεβρικό πρόβλημα [Αρχοντέλη, 2014].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο αποδοτική για την προσέγγιση ορίων με ανώμαλο σχήμα, διότι ο καθορισμός των διαφορετικών στοιχείων και των

διαφορετικών συνθηκών είναι ευκολότερη. Ακόμα έχει την ιδιότητα να ορίζει επακριβώς τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους εντός ενός στοιχείου με χρήση της μεθόδου παρεμβολής [Περάκη, 2014].

## 2.2 FEFLOW

Το FEFLOW (finite element subsurface FLOW simulation system) αποτελεί ένα λογισμικό προσομοίωσης των διαδικασιών της ροής, της μεταφοράς μάζας και θερμότητας στα υπόγεια νερά και είναι βασισμένο στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιεί τα πεπερασμένα στοιχεία ως τεχνικές λύσεων για να χειριστεί ένα ευρύ φάσμα φυσικών διεργασιών για την προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς. Έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης προβλημάτων δύο ή τριών διαστάσεων, κορεσμένης ή ακόρεστης ζώνης, μόνιμης ή ημιμόνιμης ροής, μεταβλητής πυκνότητας ρευστού, ροής και μεταφοράς μάζας, ροής και μεταφοράς θερμότητας, συστημάτων υπογείων υδάτων με ή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια. Επίσης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείτε για την προσομοίωση σύνθετων γεωλογικών περιοχών όπου τα ορθογώνια πλέγματα δεν παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, για μεταλλεία και σήραγγες τα οποία σπάνια ακολουθούν τα ορθογώνια σχέδια, για τις χρήσεις γης και τις κλιματικές αλλαγές, τη διαχείριση των αποθεμάτων υπόγειων νερών και την αποκατάσταση των υδροφόρων οριζόντων, τη διήθηση νερού μέσω τεχνικών έργων, όπως φραγμάτων ή αναχωμάτων, τη μεταφορά θερμότητας και τη γεωθερμική ενέργεια αλλά και τη διείδυση αλμυρού νερού.

## 2.3 Οριακές συνθήκες

Οριακή συνθήκη είναι μια μαθηματική έκφραση που περιορίζει τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου στο χώρο [Τάντος 2006].

Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατανομή του υδραυλικού φορτίου κατά την χρονική στιγμή της έναρξης της προσομοίωσης. Η χρονική στιγμή της έναρξης της προσομοίωσης αντιστοιχεί στο χρόνο μηδέν του μοντέλου.

Οι οριακές συνθήκες στην εξίσωση ροής διακρίνονται σε καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet, καθορισμένης ροής ή Neumann και συνδυασμού μεταβλητού φορτίου και ροής ή Cauchy [Παναγόπουλος 1996].

Στην οριακή συνθήκη *Dirichlet* ή *καθορισμένου φορτίου* ή *πρώτου είδους* το υδραυλικό φορτίο ορίζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης. Σε γενικές γραμμές στο όριο αυτό, το υδραυλικό φορτίο μπορεί είτε να μεταβάλλεται με το χρόνο ή να παραμένει σταθερό.

Η συνθήκη *καθορισμένης ροής* ή *Neumann* ή *δεύτερου είδους* επιλέγεται κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας, όπου η ροή είναι συνάρτηση του χρόνου και της θέσης. Στην περίπτωση που θέλουμε να προσομοιώσουμε ένα αδιαπέρατο υδραυλικό όριο (π.χ αδιαπέρατος σχηματισμός, γραμμή ροής, υπόγειος υδροκρίτης κ.λπ.) η ροή ισούται με μηδέν.

Η συνθήκη μεταβλητού φορτίου και ροής ή *Cauchy* ή τρίτου είδους χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η ροή διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας εξαρτάται τόσο από τις μεταβολές της ροής όσο και από τις μεταβολές του υδραυλικού φορτίου που επικρατεί εγκάρσια στην επιφάνεια. Η εκτίμηση των κατάλληλων οριακών συνθηκών στη σύνθεση ενός μαθηματικού ομοιώματος είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς λανθασμένη επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε πρόκληση σημαντικών σφαλμάτων [Παναγόπουλος 1996].

## 2.4 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Στόχος της βαθμονόμησης είναι να καταδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις πραγματικές ροές (fluxes) και τις μεταβλητές κατάστασης (state variables). Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, αναζητείται ένα σύνολο παραμέτρων (parameters) και τάσεων (stresses) που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά υδραυλικά φορτία και τις διάφορες ροές. Η βαθμονόμηση γίνεται είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error), είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης βαθμονόμησης (inverse modeling).

## 2.5 Επαλήθευση του μοντέλου

Η αξιολόγηση της επίτευξης των στόχων της ρύθμισης μπορεί να επιτευχθεί με διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια. Βασικότερα ποσοτικά κριτήρια αποτελούν η γραφική απεικόνιση της διαφοράς ή της συσχέτισης των αποτελεσμάτων του μοντέλου από τις αντίστοιχες μετρήσεις υπαίθρου. Επίσης στα ποσοτικά κριτήρια περιλαμβάνονται και μεγέθη που αφορούν συνιστώσες ροής, όπως το υδατικό ισοζύγιο, οι υδραυλικές κλίσεις και οι γραμμές ροής. Τα ποιοτικά κριτήρια περιλαμβάνουν γενικευμένες μορφές και ιδιαιτερότητες του δικτύου ροής, καθώς και άλλα κριτήρια που σχετίζονται με το εύρος των αποδεκτών τιμών των παραμέτρων ρύθμισης [Αρχοντέλη, 2016].

Τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση του ομοιώματος είναι (Παναγόπουλος 2002):

- ✓ Έλεγχος διακύμανσης στάθμης - συγκέντρωσης σε επιλεγμένα σημεία
- ✓ Έλεγχος μορφής πιεζομετρίας - κατανομής συγκέντρωσης ιόντων
- ✓ Αξιολόγηση στατιστικών δεικτών
- ✓ Έλεγχος υδατικού ισοζυγίου και ισοζυγίου συγκεντρώσεων

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης γίνεται με τον υπολογισμό του σφάλματος του μοντέλου. Η ποσοτική έκφραση του σφάλματος μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους (Anderson & Woessner 1992):

**Μέσο σφάλμα** (ME, Mean Error). Υπολογίζεται ως η μέση διαφορά μεταξύ των μετρούμενων (hm) και των προσομοιωμένων (hs) φορτίων και εκφράζεται από την εξίσωση 5.1:



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

όπου n, το πλήθος των τιμών βαθμονόμησης

**Μέσο απόλυτο σφάλμα** (MAE, Mean Absolute Error). Είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιωμένων φορτίων και δίνεται από την εξίσωση 5.2:

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

**Τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος** (RMS, Root Mean Square) ή σταθερή απόκλιση (SD, Standard Deviation). Είναι ο μέσος όρος των τετραγώνων των διαφορών των μετρούμενων και προσομοιωμένων τιμών φορτίου και εκφράζεται από την εξίσωση 5.3:

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

Η επιλογή του κριτηρίου βαθμονόμησης επηρεάζει τις τιμές των παραμέτρων που επιλέχτηκαν για το μοντέλο. Το ME συμπεριλαμβάνει τόσο τις αρνητικές, όσο και τις θετικές διαφορές μεταξύ των πραγματικών και εκτιμώμενων τιμών, οι οποίες είναι δυνατόν έτσι να αλληλοεξουδετερώνονται και για τον λόγο αυτό πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του ως δείκτη της ορθότητας του μοντέλου [Anderson & Woessner 1992].

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης και την ορθότητα της προσομοίωσης τίθεται ο στόχος της βαθμονόμησης, δηλαδή το επιθυμητό ή ανεκτό μέγεθος σφάλματος του μοντέλου [Anderson & Woessner 1992].

### 3.Μεθοδολογία

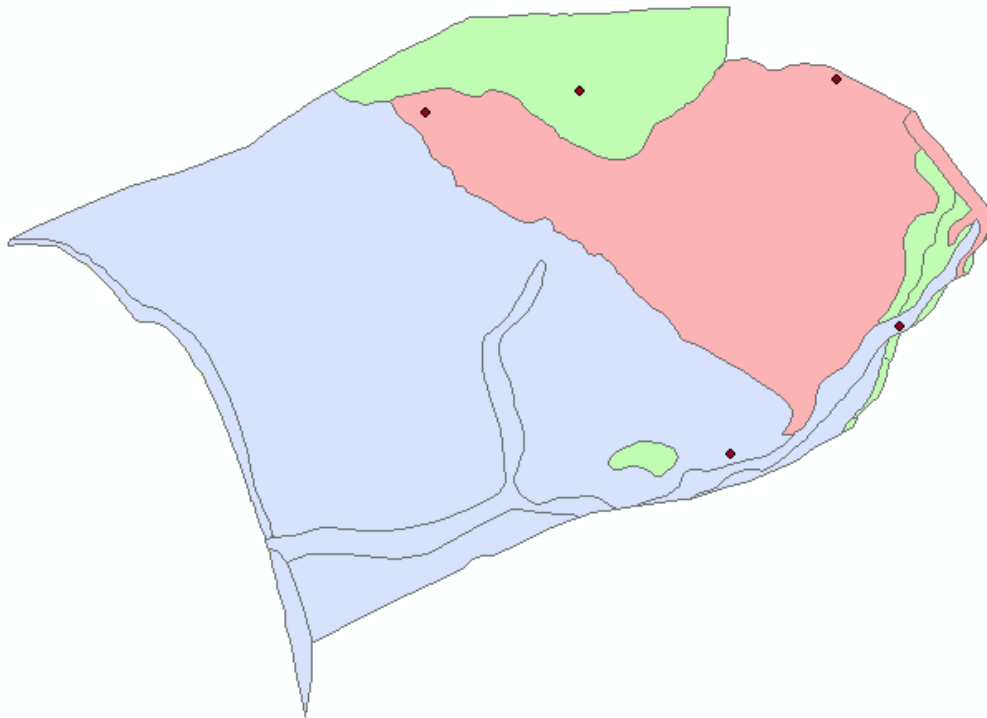
Η περιοχή μελέτης μας βρίσκεται στο Τυμπάκι Κρήτης το οποίο υπάγεται στην ευρύτερη περιοχή της κοιλάδας της Μεσσαράς. Για την μελέτη της ροής των υπογείων υδάτων στην περιοχή μελέτης μας, έγινε χρήση του λογισμικού προσομοίωσης της υπόγειας ροής FEFLOW και του λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS). Το GIS χρησιμοποιήθηκε για την ακριβή απεικόνιση της περιοχής μελέτης ενώ το FEFLOW για την ακριβή προσομοίωση της υπόγειας ροής της με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Το ArcGIS Desktop αποτελεί μια σουίτα εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα ArcMap, ArcCatalog και ArcToolbox. Με συνδυαστική χρήση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια χρειαστεί όσον αφορά τη δημιουργία και την επεξεργασία χαρτών GIS, είτε απλή είτε πολυσύνθετη, όπως χαρτογράφηση, γεωγραφική ανάλυση, επεξεργασία και σύνθεση δεδομένων, διαχείριση δεδομένων, απεικόνιση και γεωανάλυση.

Από τη σουίτα ArcGIS, έγινε χρήση κυρίως του προγράμματος ArcMap, καθώς οι κυριότερες εργασίες που χρειάστηκαν ήταν δημιουργία κι επεξεργασία αρχείων shape file. Το ArcMap είναι το κεντρικό πρόγραμμα της σουίτας ArcGIS Desktop, και χρησιμοποιείται για όλες τις εργασίες που έχουν να κάνουν με χάρτες, όπως χαρτογράφηση, ανάλυση χαρτών και επεξεργασία. Οι χάρτες απεικονίζονται σε μορφή σελίδας συμπεριλαμβάνοντας ένα γεωγραφικό παράθυρο (data frame) ως βάση, με μια σειρά επιπέδων, λεζαντών, κλιμάκων και άλλων στοιχείων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αρχεία shape file για την ομαδοποίηση των δεδομένων και την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Τα αρχεία shape file είναι ένα ευρέως διαδεδομένο πρότυπο και ομαδοποιούνται σε 3 ή και περισσότερα αρχεία, τα οποία και είναι αλληλεξαρτώμενα. (ArcGIS Handbook, Univ. of Maryland, 2012).[Γκούμας, 2016].

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το ArcGIS ώστε να γίνει ακριβής εισαγωγή του τοπογραφικού χάρτη της Κρήτης και έπειτα έγινε ο κατάλληλος προσδιορισμός της περιοχής μελέτης βάσει των ρηγμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών. Πιο συγκεκριμένα ως βόρειο όριο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το ρήγμα Κλίμα το οποίο ξεκινά από την θάλασσα και φτάνει ως τους πρόποδες του Ψηλορείτη. Στην συνέχεια σαν οριακό σημείο στην ανατολική πλευρά χρησιμοποιήθηκε το ρήγμα Κισσού. Στην δυτική πλευρά χρησιμοποιήθηκαν δύο ρήγματα. Αυτό της Αγίας Τριάδας που βρίσκεται στο νότιο-δυτικό σημείο και αυτό της Βόρης που βρίσκεται νότιο-ανατολικά. Τέλος ως δυτικό όριο χρησιμοποιήθηκε η ακτογραμμή. Ακολουθώντας έγινε η εισαγωγή των πηγαδιών παρατήρησης τα οποία είναι πηγάδια του Ινστιτούτου Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Χρησιμοποιήθηκαν πέντε πηγάδια παρατήρησης διότι τα υπόλοιπα πηγάδια για τα οποία είχαμε μετρήσεις ήταν εκτός των ορίων της περιοχής μελέτης. Το αρχείο αυτό αποθηκεύτηκε ως shapefile ώστε να μπορεί να διαβαστεί και από το FEFLOW.



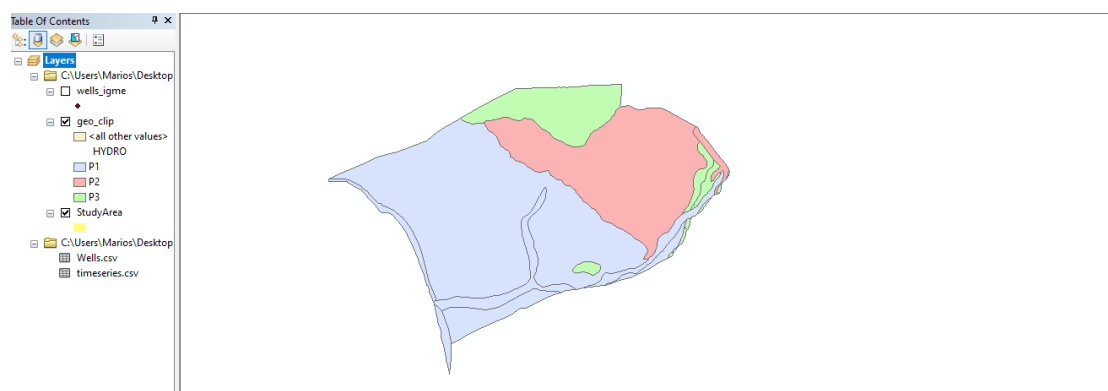
Εικόνα 11: Πηγάδια παρατήρησης (ΙΓΜΕ).

Για να έχει το μοντέλο πληροφορίες για το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης έγινε η εισαγωγή του υψομέτρου της περιοχής μέσω ισούψων καμπυλών. Στο GIS με την εντολή `contour` μετατρέπεται το αρχείο `raster`, το οποίο περιέχει τις ισούψεις της περιοχής με απόσταση ενός μέτρου, σε αρχείο `shapefile`. Αυτό είναι απαραίτητο να γίνει διότι το FEFLOW δεν μπορεί να διαβάσει αρχείο `raster` αλλά μόνο `shapefile`. Για να γίνει όμως η σωστή μεταφορά των παραμέτρων στο FEFLOW χρησιμοποιήθηκε η εντολή `Link to Parameter`. Μόλις ενεργοποιήσουμε την συγκεκριμένη εντολή ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο όπου εμφανίζεται στα δεξιά τα ονόματα των μεταβλητών του FEFLOW και στα αριστερά τα ονόματα των μεταβλητών που έχουμε εισάγει στο GIS. Η σωστή αντιστοίχιση τους είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του μοντέλου.

### 3.1 Υδραυλική αγωγιμότητα

Για τον ορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης της Κρήτης στον οποίο αποτυπώνονται τα διάφορα είδη γεωλογικών σχηματισμών και εδαφών, τα οποία υπάρχουν στην περιοχή μελέτης μας. Θα χρησιμοποιήσουμε τρεις διαφορετικές τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα διότι υπάρχουν και τρεις διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί. Οι αρχικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που εισήχθησαν στο μοντέλο ελήφθησαν από την βάση δεδομένων `Enviro-Base`. Το `Enviro-Base` περιέχει τιμές από δημοσιευμένα άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά με κριτές. Για την τιμή του  $K_1$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $9 \cdot 10^{-4}$  m/d [Lau, 1957] η οποία αντιστοιχεί σε έδαφος από άμμο και χαλίκι με φακούς αργίλου, για την τιμή του  $K_2$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $3,3 \cdot 10^{-4}$  m/d [Rabinowitz, 1972] η οποία αντιστοιχεί σε έδαφος από ασβεστόλιθο και για την τιμή του  $K_3$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $10^{-7}$  m/d [Masch, 1966] η οποία αντιστοιχεί σε έδαφος αργιλικό. Όμως, επειδή οι προσομοιωμένες τιμές του υδραυλικού ύψους παρουσίαζαν πολύ μεγάλες μεταβολές σε σχέση με τις παρατηρημένες, οι τιμές αυτές άλλαξαν και πήραν τιμές με μεγάλη

διαφορά στις τάξεις μεγέθους. Πιο συγκεκριμένα η παράμετρος K1 πήρε τιμή 10 m/d η παράμετρος K2 3 m/d και η παράμετρος K3 70 m/d. Οι τιμές αυτές προέκυψαν μετά από πολλές δοκιμές. Ο λόγος που οι τιμές είχαν τόσο μεγάλη απόκλιση είναι ότι οι αρχικές τιμές ήταν πάρα πολύ μικρές και δεν επέτρεπαν στο νερό να κινηθεί μέσα στην περιοχή και κατά συνέπεια υπήρχε πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ των προσομοιωμένων με των παρατηρημένων τιμών. Για να γίνει η σωστή μεταφορά των δεδομένων στο FEFLOW έπρεπε πρώτα να γίνει σωστή ψηφιοποίηση των ορίων του κάθε εδαφικού υλικού. Έπειτα έγινε εισαγωγή των παραπάνω τιμών με την εξής διαδικασία. Πατώντας δεξί κλικ πάνω στην ονομασία του αρχείου και επιλέγοντας το Open Attribute Table, ανοίγει ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά του αρχείου και πατώντας την εντολή Add Field δημιουργείται καινούργια στήλη στον πίνακα αυτόν. Στη συνέχεια πατώντας Start Editing εισάγονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στο αντίστοιχο πεδίο του εδαφικού υλικού. Τέλος πατώντας Save Edits και Stop Editing ολοκληρώνεται η διαδικασία. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι για τις παραμέτρους Kxx και Kyy χρησιμοποιήθηκαν τιμές ίδιας τάξης μεγέθους ενώ για την παράμετρο Kzz χρησιμοποιήθηκαν τιμές μίας τάξης μεγέθους μικρότερης. Αυτό το κάναμε διότι το νερό κινείται με πολύ μικρότερο ρυθμό στην κατακόρυφη κατεύθυνση και επίσης αποτελεί πάγια τακτική στην μοντελοποίηση υπογείων υδάτων [McGraw-Hill, 1979]. Τέλος είναι απαραίτητη η σωστή αντιστοίχιση των μεταβλητών που θέσαμε εμείς με τις μεταβλητές του FEFLOW το οποίο επιτυγχάνεται πάλι από την εντολή link to parameter.

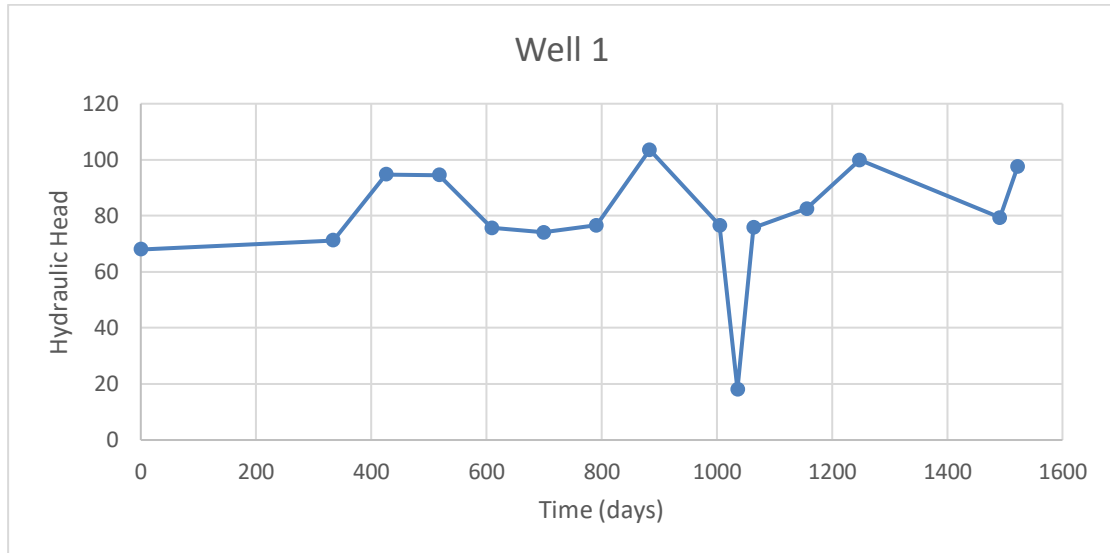


Εικόνα 12 :Υδραυλικές αγωγιμότητες.

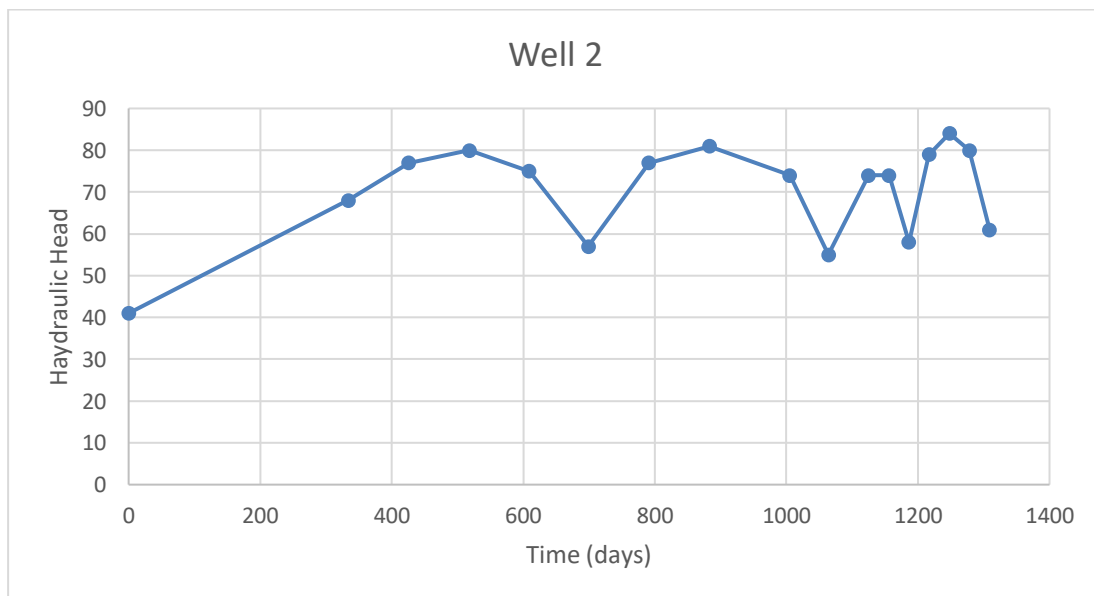
### 3.2 Οριακές συνθήκες

Η εισαγωγή των οριακών συνθηκών (Boundary Conditions) έγινε με βάση την γεωλογία της περιοχής και των δεδομένων των υδραυλικών υψών που είχαμε. Οι παρατηρημένες τιμές παρουσιάζονται στην Εικόνα 13, Εικόνα 14, Εικόνα 15, Εικόνα 16 και Εικόνα 17. Η μεγαλύτερη εισροή νερού φαίνεται να γίνεται από το βόρειο τμήμα της περιοχής μας, όπου βρίσκεται ο Ψηλορείτης το οποίο είναι το ψηλότερο βουνό της Κρήτης. Σε αυτό συνηγορούν οι παρατηρημένες μετρήσεις κατά κύριο λόγο στο πηγάδι 4 αλλά και στο πηγάδι 1 οι οποίες ήταν οι μεγαλύτερες παρατηρημένες τιμές υδραυλικού ύψους στην περιοχή. Σημαντική εισαγωγή νερού έχουμε και από το νότιο τμήμα στο οποίο εισέρχεται στην περιοχή ο ποταμός Γεροπόταμος ο οποίος εμπλουτίζει με την σειρά του τον υδροφόρα μας. Τέλος έχουμε μία μικρή απώλεια νερού από την ανατολική πλευρά της περιοχής μας, η

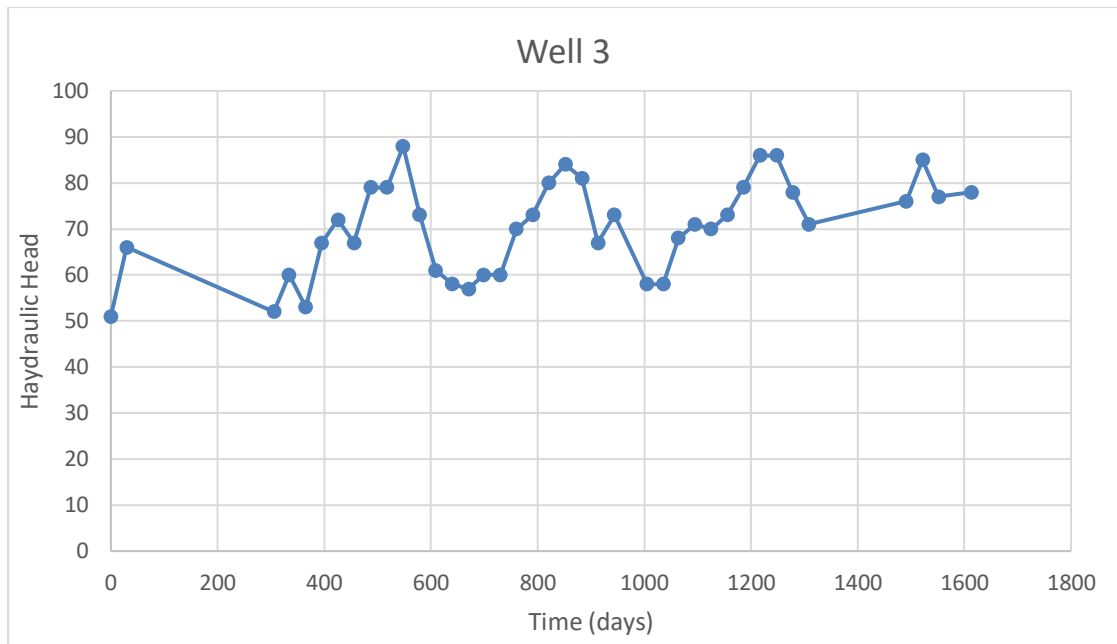
οποία έγινε εμφανής κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, καθώς το πραγματικό υδραυλικό ύψος από μετρήσεις στο πηγάδι 5 δείχνει ότι υπάρχει εκφόρτιση από εκείνο το σημείο προς την λεκάνη των Μοιρών γεγονός που συμφωνεί και με την γεωλογία της περιοχής όπου εμφανίζονται υδροπερατά πετρώματα ανατολικά της περιοχής μελέτης.



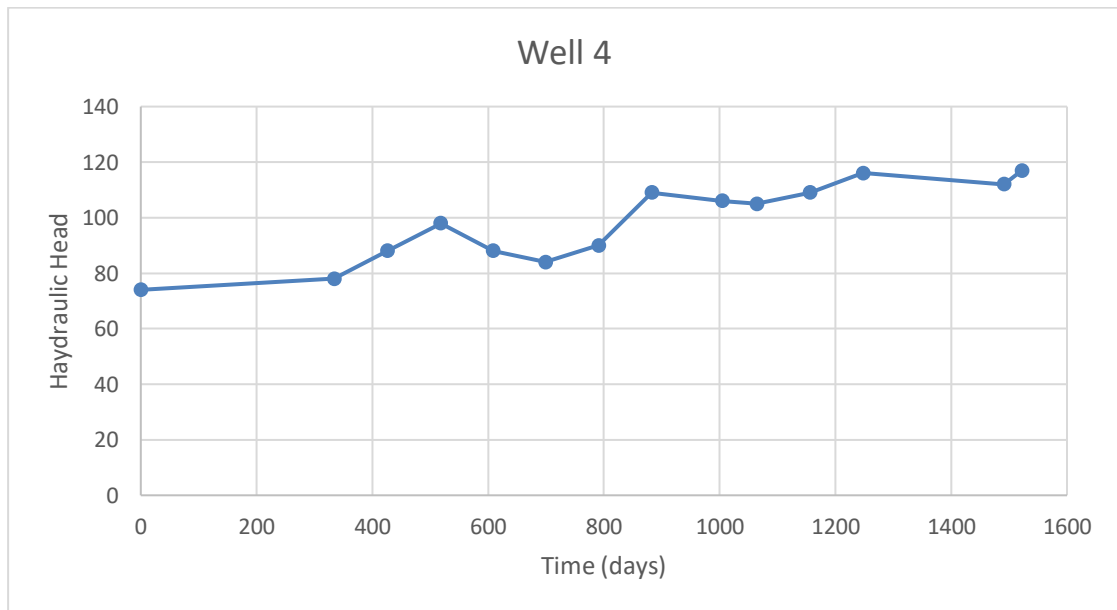
Εικόνα 13: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 1.



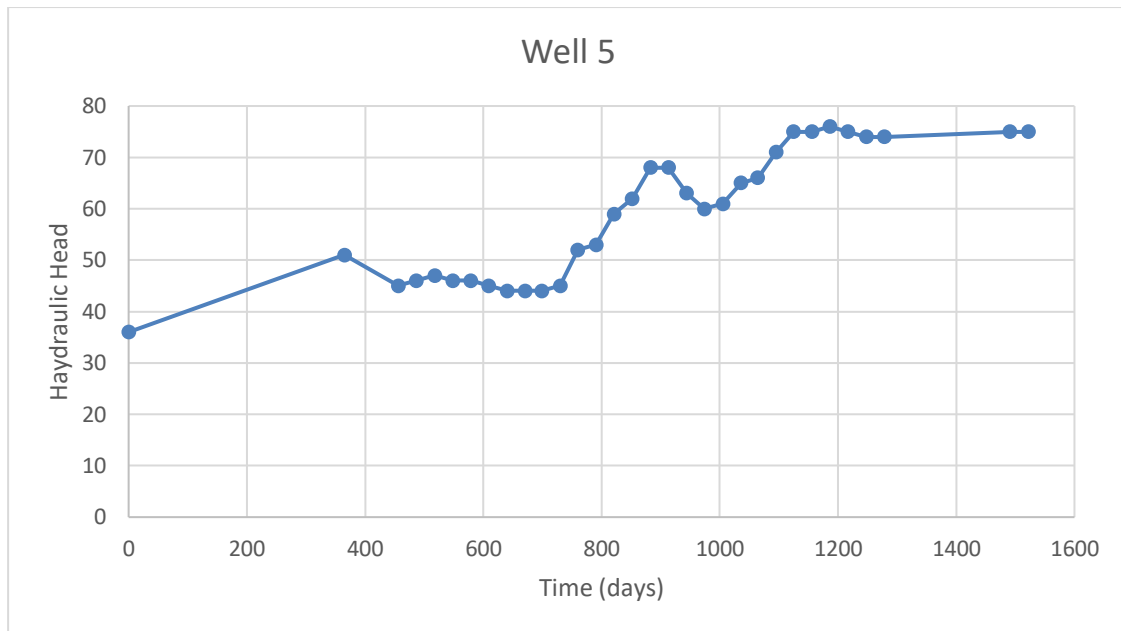
Εικόνα 14: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 2.



Εικόνα 15: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 3.



Εικόνα 16: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 4.



Εικόνα 17: Διάγραμμα παρατηρημένων τιμών για το πηγάδι 5.

### 3.2.1 Μορφή οριακών συνθηκών

#### 3.2.1.1 Σταθερές οριακές συνθήκες

Κατά την αρχική διαδικασία κατασκευής του μοντέλου, οι οριακές συνθήκες εισήχθησαν με την μορφή μίας ενιαίας τιμής παροχής ανεξαρτήτως των μεταβλητών κλιματικών συνθηκών που υπάρχουν μέσα σε ένα έτος. Οι τιμές αυτές μετά από αρκετές δοκιμές κατέληξαν σε ένα σημείο όπου δεν μπορούσαν να βελτιώσουν περαιτέρω το σφάλμα του μοντέλου, ώστε αυτό να βρίσκεται σε αποδεκτές τιμές. Η τιμή για το βόρειο τμήμα ήταν ίση με  $-0.35 \text{ m/d}$  ενώ για το νότιο ήταν ίση με  $-0.14 \text{ m/d}$ . Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε η εισαγωγή τους με διαφορετική μορφή και πιο συγκεκριμένα με την μορφή συνημιτονοειδών συναρτήσεων.

#### 3.2.1.2 Συνημιτονοειδείς οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες για να έχουν σωστή ανταπόκριση με τις διακυμάνσεις που υπάρχουν στις εισροές ανάλογα με την εποχή, οι οποίες ακολουθούν την χρονική μεταβολή των βροχοπτώσεων, περάστηκαν ως χρονοσειρές οι οποίες σχεδιάστηκαν να απεικονίζουν τις διακυμάνσεις αυτές. Να σημειωθεί ότι η οριακή συνθήκη που βρίσκεται στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής δεν περάστηκε ως χρονοσειρά. Αυτό επιλέχθηκε διότι η τιμή της ήταν πολύ μικρή και η διακύμανση ανάμεσα στους καλοκαιρινούς και τους χειμερινούς μήνες δε βελτίωνε το σφάλμα κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Η συνάρτηση την οποία χρησιμοποιήσαμε είναι συνημιτονοειδής διότι αυτό μας παρέχει μια συνεχή, ομαλά μεταβαλλόμενη μορφή μεταβολής όπως αναμένεται να είναι η μεταβολή στην πλευρική εισροή νερού. Δεδομένου του ότι η πρώτη μέρα για την οποία έχουμε μέτρηση είναι η 22/4/2004, η οποία βρίσκεται στο τέλος της χειμερινής περιόδου αναμένεται να έχουμε μια αρκετά μεγάλη τιμή πλευρικής εισροής, κοντά στο μέγιστο του έτους. Η συνημιτονοειδής συνάρτηση ξεκινάει από τη μέγιστη τιμή γεγονός που την προέκρινε στην προτίμησή μας σε σχέση με άλλες περιοδικές συναρτήσεις (π.χ. την ημιτονοειδή). Για την

εύρεση των παραμέτρων της συνημιτονοειδούς, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 2 μετεωρολογικούς σταθμούς: αυτόν του Τυμπακίου και αυτόν των Μοιρών. Η επιλογή αυτή έγινε διότι αυτοί οι δύο σταθμοί βρίσκονται πιο κοντά στα σημεία όπου έχουν τοποθετηθεί οι οριακές συνθήκες. Για να έχουμε ακριβή δεδομένα για όλο το εύρος των χρονολογιών (2004-2020) χρησιμοποιήσαμε και δεδομένα από τον μετεωρολογικό σταθμό του Λαγολιού. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για το διάστημα από το 2004 έως το 2011. Αυτό επιλέχθηκε διότι για εκείνο το χρονικό διάστημα δεν είχαμε μετρήσεις για τον μετεωρολογικό σταθμό των Μοιρών. Επίσης η συμπλήρωση των δεδομένων για τον σταθμό του Τυμπακίου έγινε από αυτόν των Μοιρών. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν αυτή της γραμμικής παρεμβολής όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν οι βροχοπτώσεις αλλά συντελεστές οι οποίοι προέκυψαν έπειτα από επεξεργασία των αρχικών δεδομένων. Αρχικά χωρίσαμε τις ημερήσιες μετρήσεις που είχαμε για διάφορες χρονολογίες (2004-2019) σε τέσσερα τρίμηνα και στη συνέχεια θεωρήσαμε τα δύο τρίμηνα που είχαν υψηλές τιμές βροχόπτωσης ως την βροχερή περίοδο ενώ τα δύο εναπομείναντα τρίμηνα τα θεωρήσαμε την ξηρή περίοδο. Από την τιμή του κάθε εξαμήνου διαιρέσαμε το άθροισμα της βροχόπτωσης του εκάστοτε έτους και έτσι προέκυψαν οι συντελεστές για κάθε εξάμηνο του χρονικού εύρους. Ακολουθώντας για να βρούμε τις τιμές που θέλουμε συναρτήσει των αρχικών οριακών συνθηκών που θέσαμε αφαιρέσαμε τους συντελεστές διόρθωσης κάθε εξαμήνου του εκάστοτε έτους και πολλαπλασιάσαμε την τιμή που προκύπτει με την τιμή της αρχικής οριακής συνθήκης και τέλος το πηλίκο αυτό το διαιρέσαμε με το 2. Τελικά θέλαμε να καταλήξουμε σε μία εξίσωση της μορφής:

$$BC_{new} = A \cdot \cos\left(\frac{x \cdot 2\pi}{365}\right) + BC_{αρχικό}$$

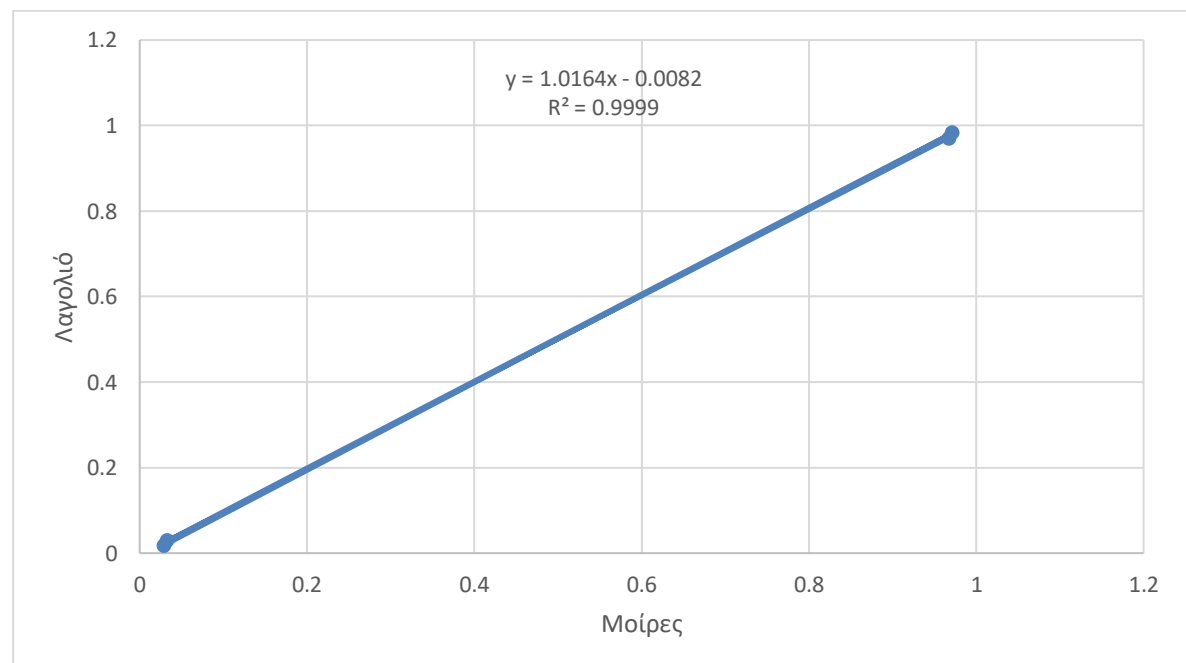
Όπου  $x$  είναι η ημέρα του χρόνου από 1 έως 365 και  $A$  είναι ένας πίνακας ο οποίος έχει δύο στήλες, μία για κάθε οριακή συνθήκη και οι γραμμές του αποτελούνται από τις τιμές των συντελεστών που συνδέονται με τη βροχόπτωση και υπολογίζονται με τον τρόπο που αναφέρθηκε ακριβώς πιο πριν για κάθε μία από τις βροχερές ( $X$ ) και ξηρές ( $K$ ) περιόδους για όλες τις χρονολογίες των βροχοπτώσεων (2004-2019).

Έτος	Τυμπάκι αρχικό	Μοίρες αρχικό	Τυμπάκι τελικό	Μοίρες τελικό
2004 K			0,14381502	0,043352589
2004 X			0,85618498	0,956647411
2005 K			0,180289159	0,090114306
2005 X			0,819710841	0,909885694
2006 K			0,261447052	0,194162887
2006 X			0,738552948	0,805837113
2007 K			0,223350513	0,145321171
2007 X			0,776649487	0,854678829
2008 K			0,19848899	0,113447423
2008 X			0,80151101	0,886552577
2009 K		0	0,235706267	0,161161881
2009 X		1	0,876815898	0,983097305
2010 K		0,016902695	0,016902695	0,016902695
2010 X		0,983097305	0,983097305	0,983097305

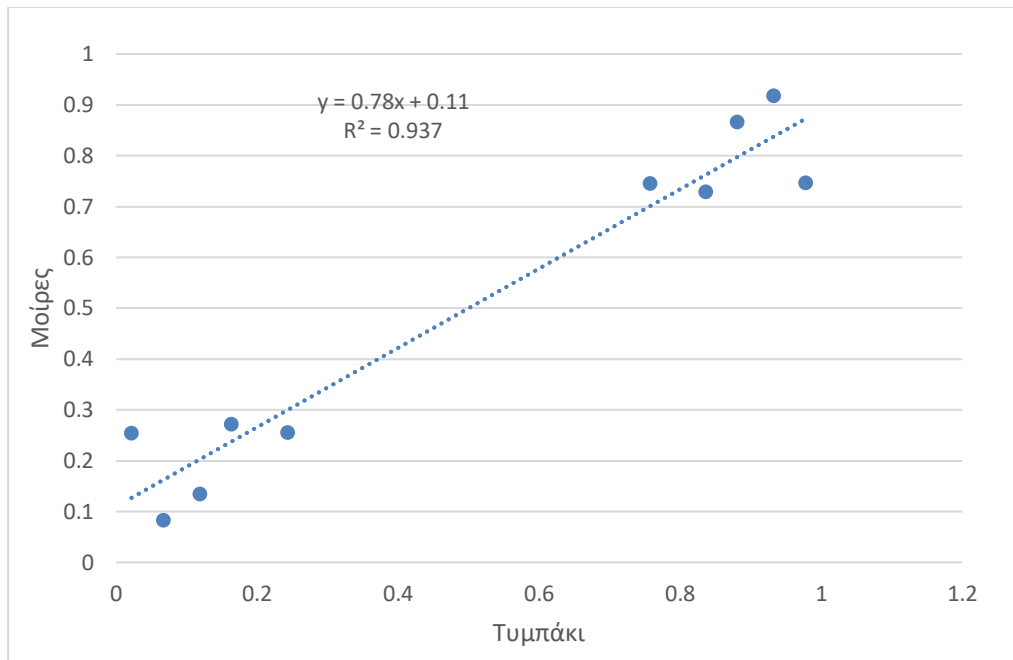


2011 K		0,029552369	0,029552369	0,029552369
2011 X		0,970447631	0,970447631	0,970447631
2012 K		0,154809334	0,154809334	0,057447864
2012 X		0,845190666	0,845190666	0,942552136
2013 K		0,096523093	0,096523093	0,096523093
2013 X		0,903476907	0,903476907	0,903476907
2014 K		0,052738928	0,052738928	0,052738928
2014 X		0,947261072	0,947261072	0,947261072
2015 K	0,021614749	0,253687316	0,253687316	0,021614749
2015 X	0,978385251	0,746312684	0,746312684	0,978385251
2016 K	0,118845501	0,134011874	0,134011874	0,118845501
2016 X	0,881154499	0,865988126	0,865988126	0,881154499
2017 K	0,242911877	0,254890679	0,254890679	0,242911877
2017 X	0,757088123	0,745109321	0,745109321	0,757088123
2018 K	0,067098093	0,082620145	0,082620145	0,067098093
2018 X	0,932901907	0,917379855	0,917379855	0,932901907
2019 K	0,163310467	0,271416455	0,271416455	0,163310467
2019 X	0,836689533	0,728583545	0,728583545	0,836689533
2020 K	1	1	1	1

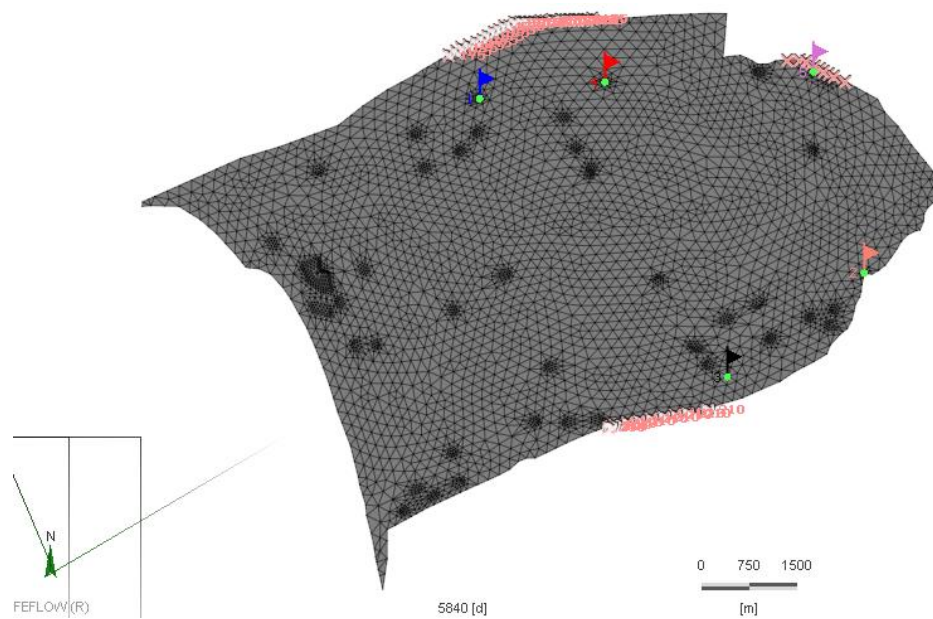
Πίνακας 1: Πίνακας συντελεστών A: Οι συντελεστές πριν (αρχικό) και μετά (τελικό) τη συμπλήρωση με γραμμική παρεμβολή από γειτονικούς μετεωρολογικούς σταθμούς.



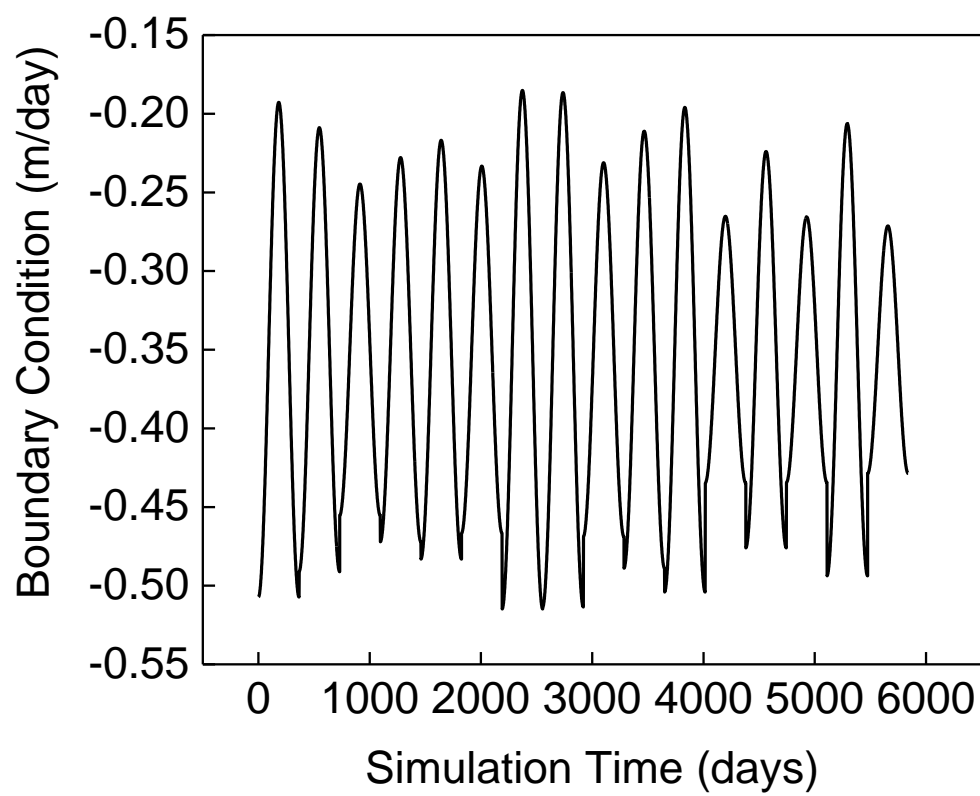
Εικόνα 18: Γραμμική παρεμβολή για τους σταθμούς Μοιρών και Λαγολιού.



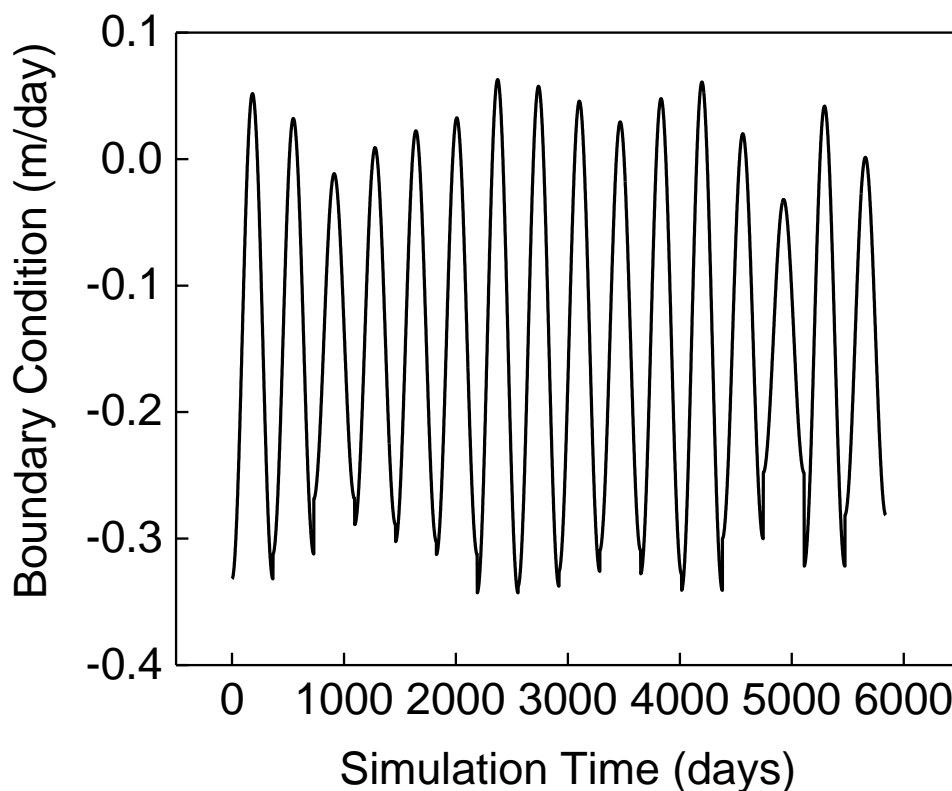
Εικόνα 19: Γραμμική παρεμβολή για τους σταθμούς Μοιρών και Τυμπακίου.



Εικόνα 20: Απεικόνιση τοποθεσίας οριακών συνθηκών.



Εικόνα 21: Καμπύλη βόρειας οριακής συνθήκης (Ψηλορείτης).



Εικόνα 22: Καμπύλη νότιας οριακής συνθήκης (Γεροπόταμος).

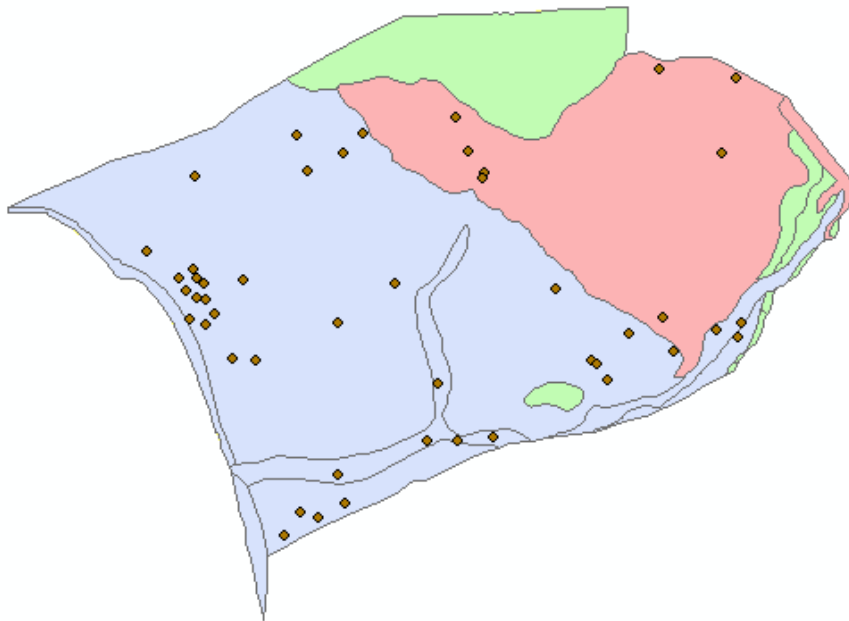
### 3.3 Πηγάδια άντλησης - Γεωτρήσεις

Τέλος έγινε η εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης τα οποία διαδραματίζουν και πολύ σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά του υδροφορέα στην περιοχή, αφού λόγω των καλλιεργειών υπάρχει μεγάλη άντληση ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες. Αρχικά έγινε η εισαγωγή των συντεταγμένων του κάθε πηγαδιού, ώστε να γίνει και η σωστή χωρική τοποθέτηση τους στην περιοχή μελέτης, αλλά και της τιμής της παροχής του σε  $\text{m}^3/\text{year}$ . Έπειτα ορίσαμε το μέγιστο και το ελάχιστο βάθος των πηγαδιών τα οποία είναι ίδια για όλα τα πηγάδια και αντιστοιχούν στις τιμές 0 m και 200 m, καθώς αυτό είναι και το αξιοποιήσιμο πάχος του υδροφορέα στην περιοχή. Ακόμα μέσα από το περιβάλλον του GIS, βρέθηκε ο αριθμός του κόμβου του πλέγματος (node number) που βρίσκεται πιο κοντά σε κάθε πηγάδι άντλησης. Ο αριθμός αυτός καταχωρήθηκε σε ένα νέο πεδίο, ούτως ώστε να τοποθετήσει το FEFLOW το κάθε πηγάδι στον κοντινότερο κόμβο τους πλέγματός του, για να μπορεί να αξιοποιήσει και τα δεδομένα των ρυθμών άντλησης. Για τη διαδικασία αυτή, αρχικά εξήχθη το shapefile με τους κόμβους του πλέγματος από το FEFLOW και εισήχθη στο GIS μαζί με τους κόμβους των πηγαδιών άντλησης. Μετά την εύρεση του κοντινότερου κόμβου και την εισαγωγή των δεδομένων στην μεταβλητή του GIS (near fid) αποθηκεύτηκε ως ένα νέο αρχείο shapefile και εισήχθη στο FEFLOW. Κατόπιν, από την εντολή link to parameter αντιστοιχήσαμε στη μεταβλητή rate του FEFLOW την μεταβλητή q του αρχείου μας η οποία περιέχει τις παροχές των πηγαδιών σε

m<sup>3</sup>/year, την μεταβλητή depth to top με την μεταβλητή top και την μεταβλητή depth to bottom με την μεταβλητή bottom.

Πρέπει να αναφερθούμε επίσης και σε κάποιες βασικές παραμέτρους που επιλέξαμε στο FEFLOW. Αρχικά επιλέξαμε τον τύπο του υδροφορέα της περιοχής μας, ο οποίος και είναι πλήρως περιορισμένος καθώς και μη σταθερή συνθήκη ροής του νερού. Επίσης επιλέξαμε ένα διάστημα 16 χρόνων διότι οι μετρήσεις μας ξεκινάνε από το έτος 2004 και τελειώνουν στο έτος 2020. Αυτό μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε την συμπεριφορά του υδροφορέα για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα.

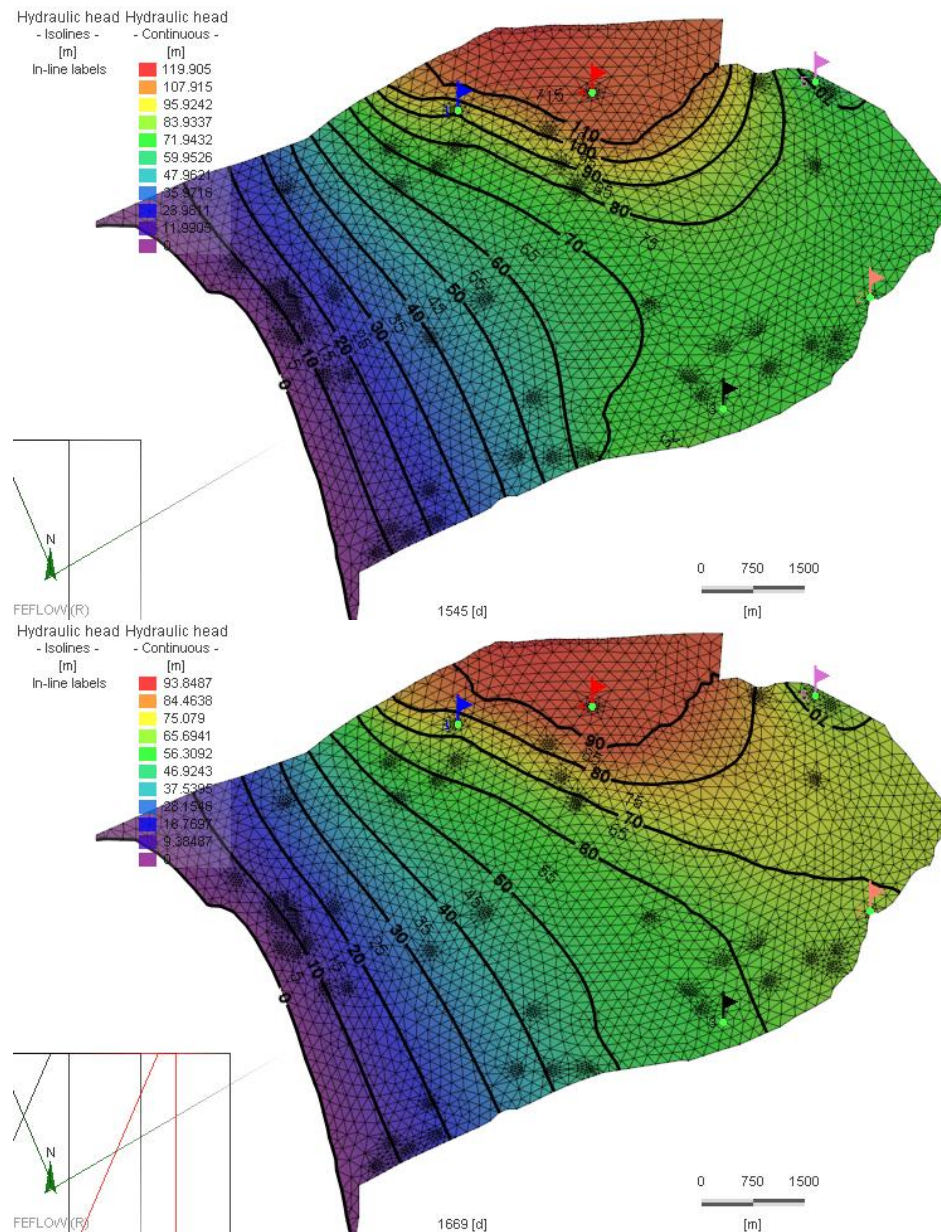
Τέλος τρέξαμε πέντε σενάρια άντλησης για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του υδροφορέα σε συνθήκες μείωσης της παροχής των πηγαδιών άντλησης. Το πρώτο σενάριο αφορούσε την μείωση κατά 10% του ρυθμού άντλησης το δεύτερο σε μείωση 20% το τρίτο σε μείωση 30% το τέταρτο σε μείωση 40% και το πέμπτο σε μείωση 50%.



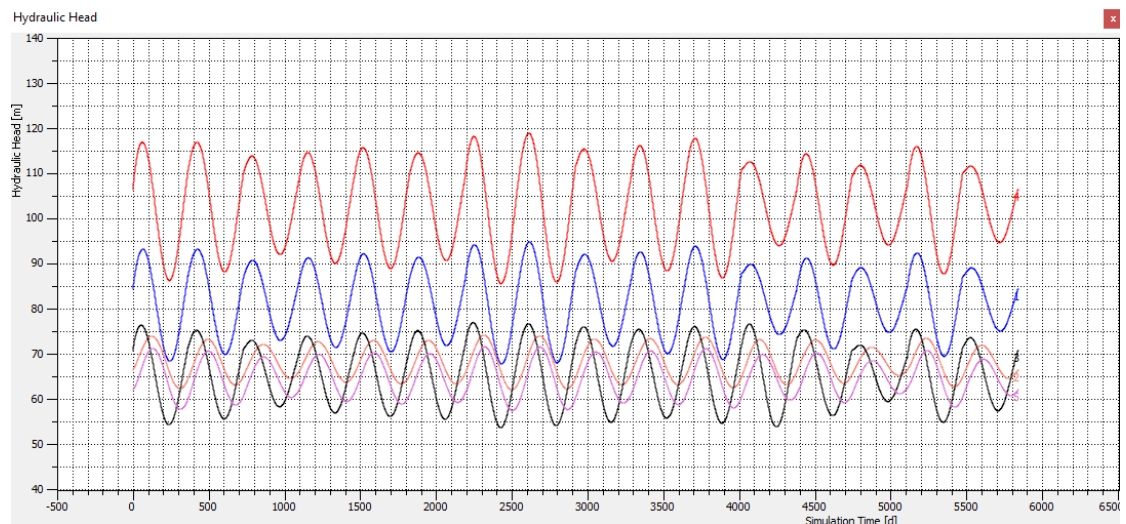
Εικόνα 23:Απεικόνιση πηγαδιών άντλησης

#### 4.Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν σε αυτή εδώ την ενότητα με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων για τις πραγματικές μετρήσεις καθώς και για κάθε ένα από τα σενάρια.

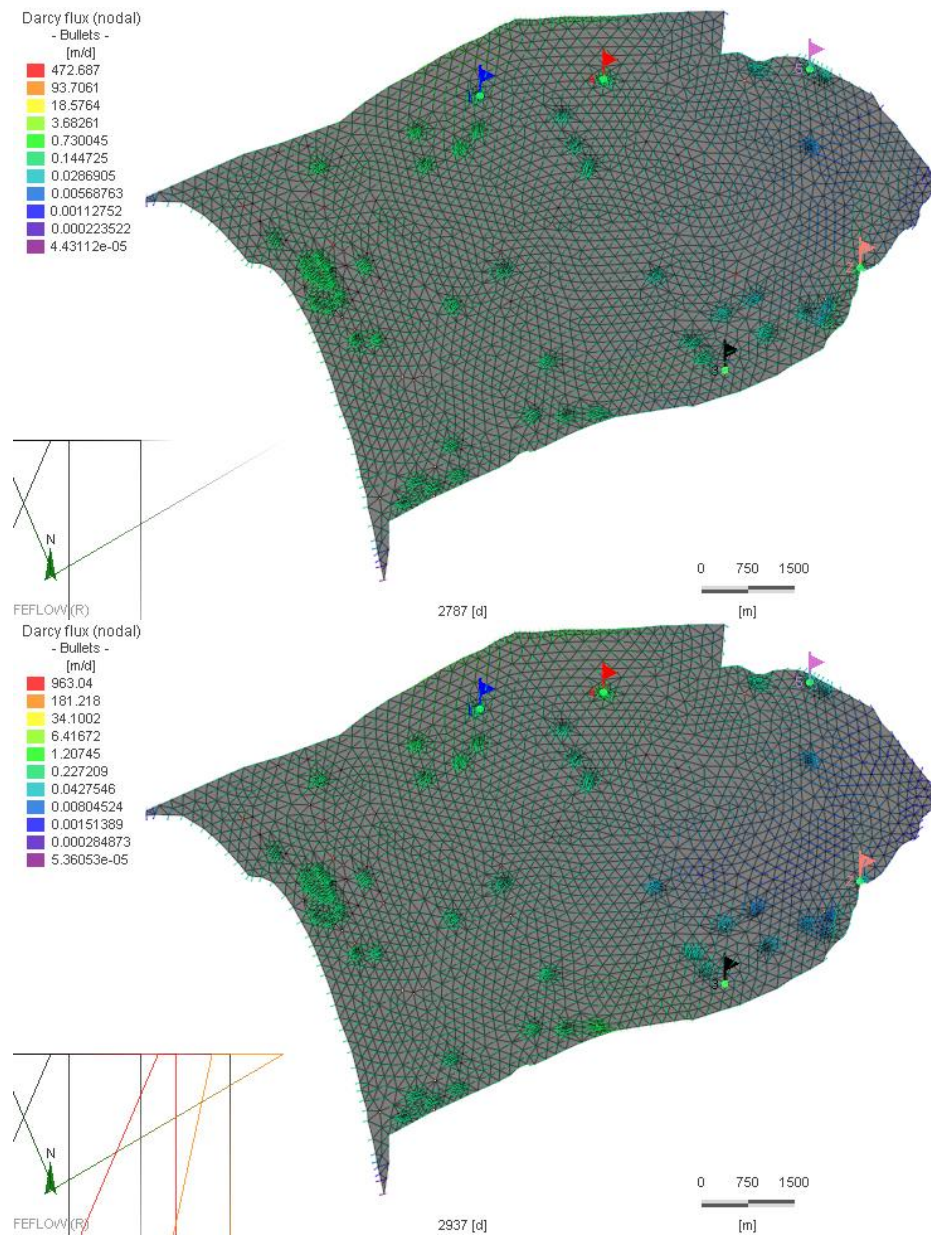


Εικόνα 24:Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για το βασικό σενάριο κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011.



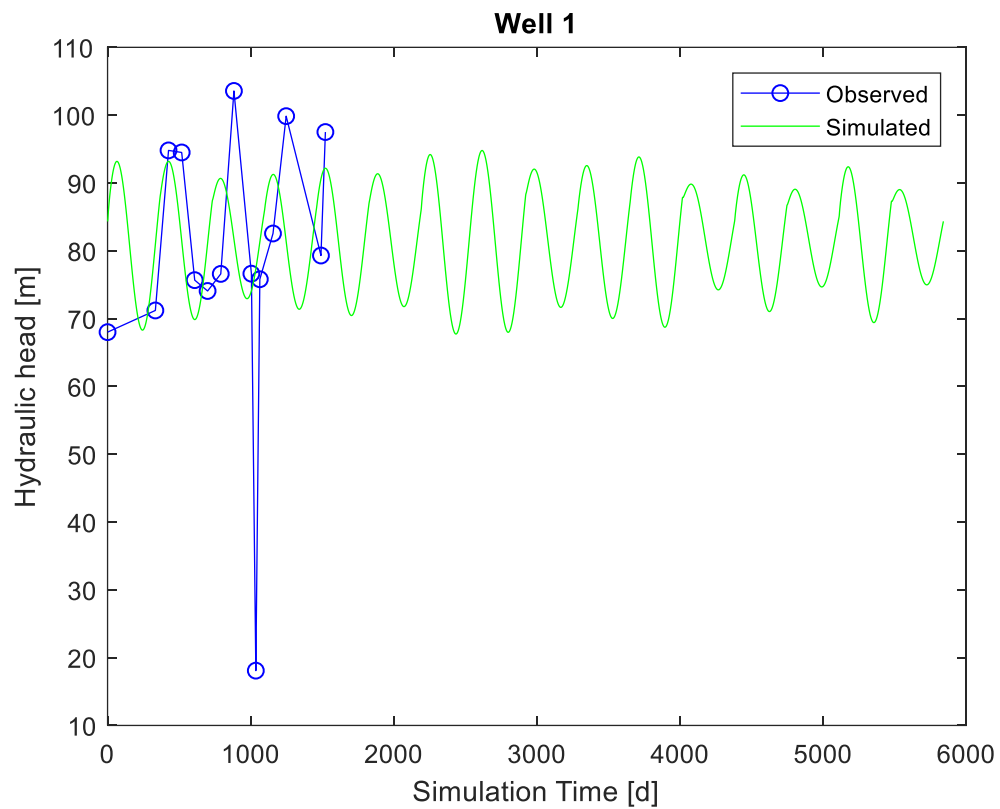
Εικόνα 25: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το αρχικό σενάριο. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.



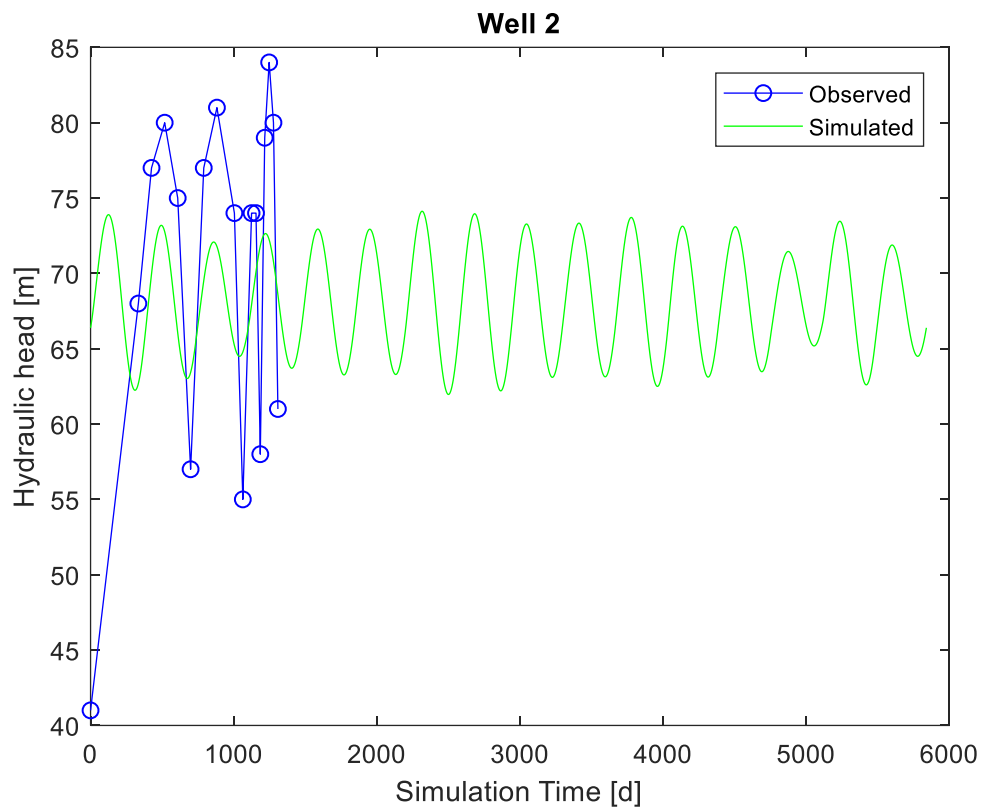


Εικόνα 26: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του χειμώνα και στην δεύτερη για την περίοδο του καλοκαιριού

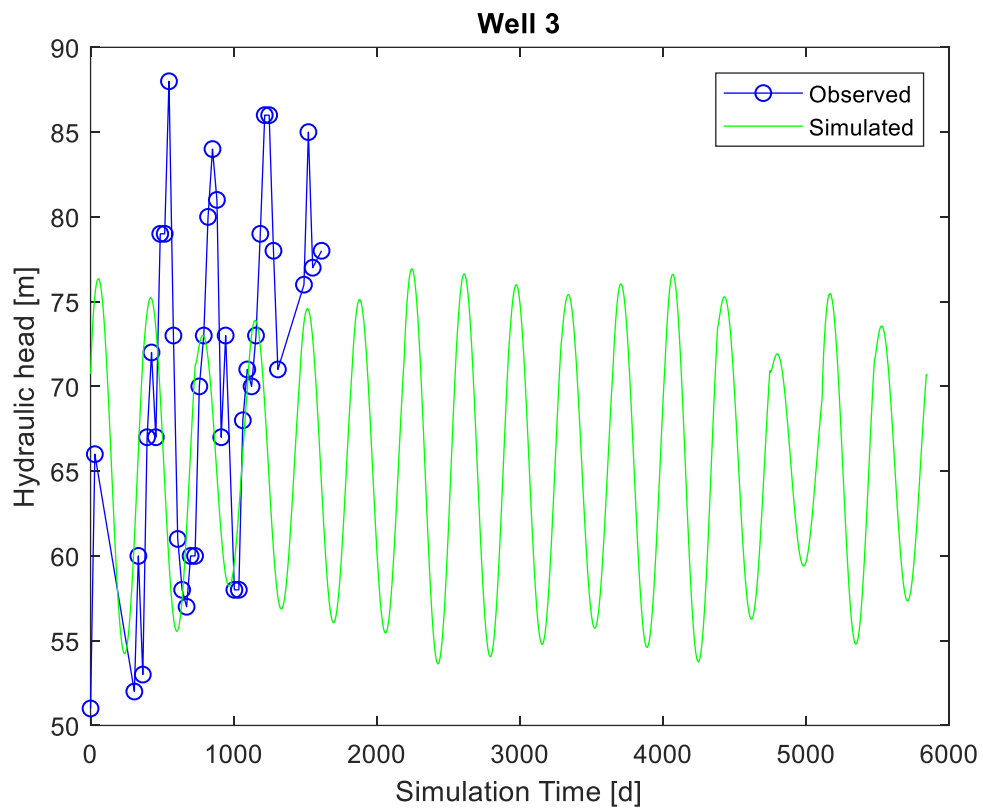




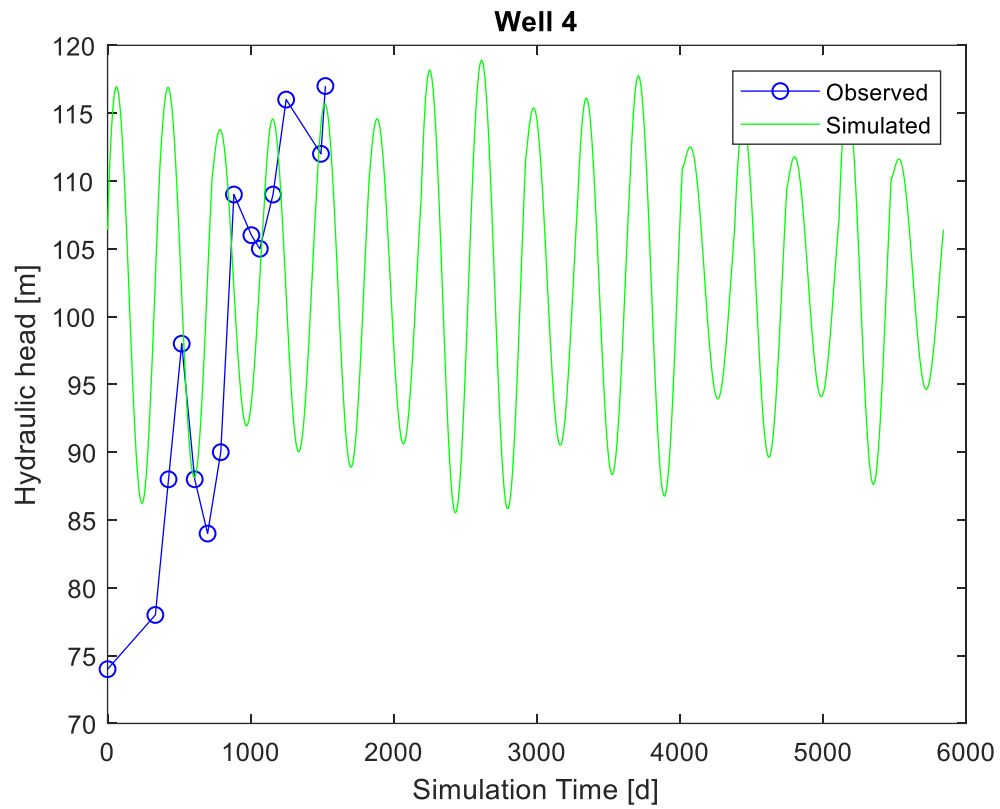
Εικόνα 27: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 1 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.



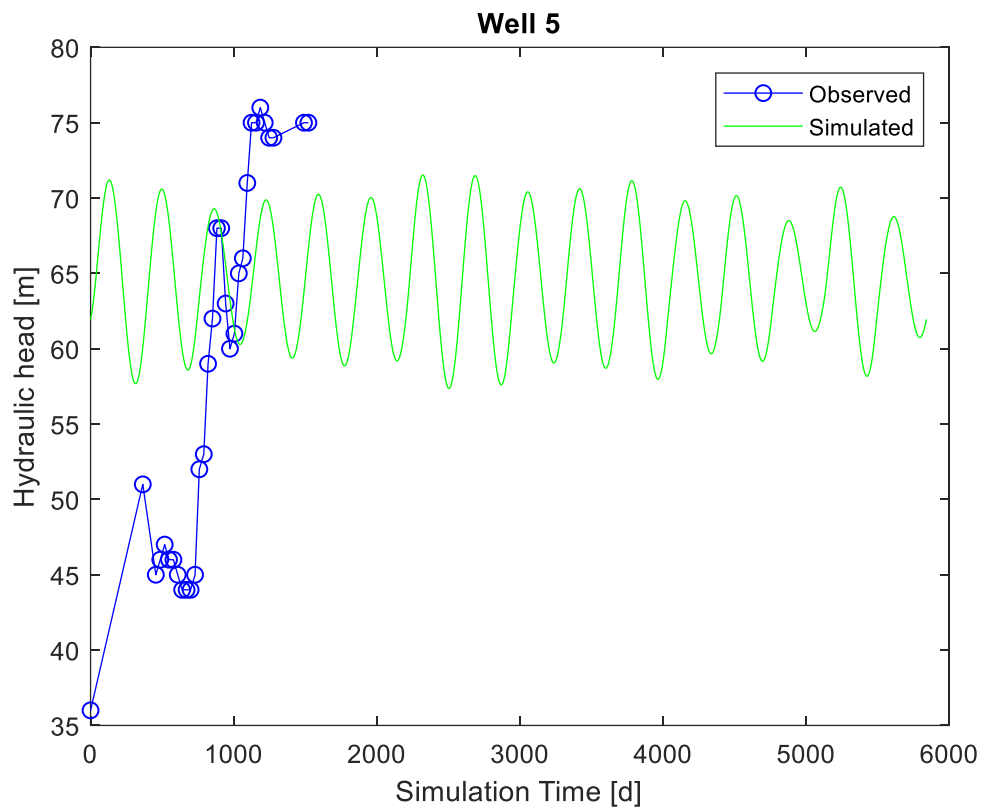
Εικόνα 28: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 2 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.



Εικόνα 29: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 3 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.



Εικόνα 30: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 4 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.



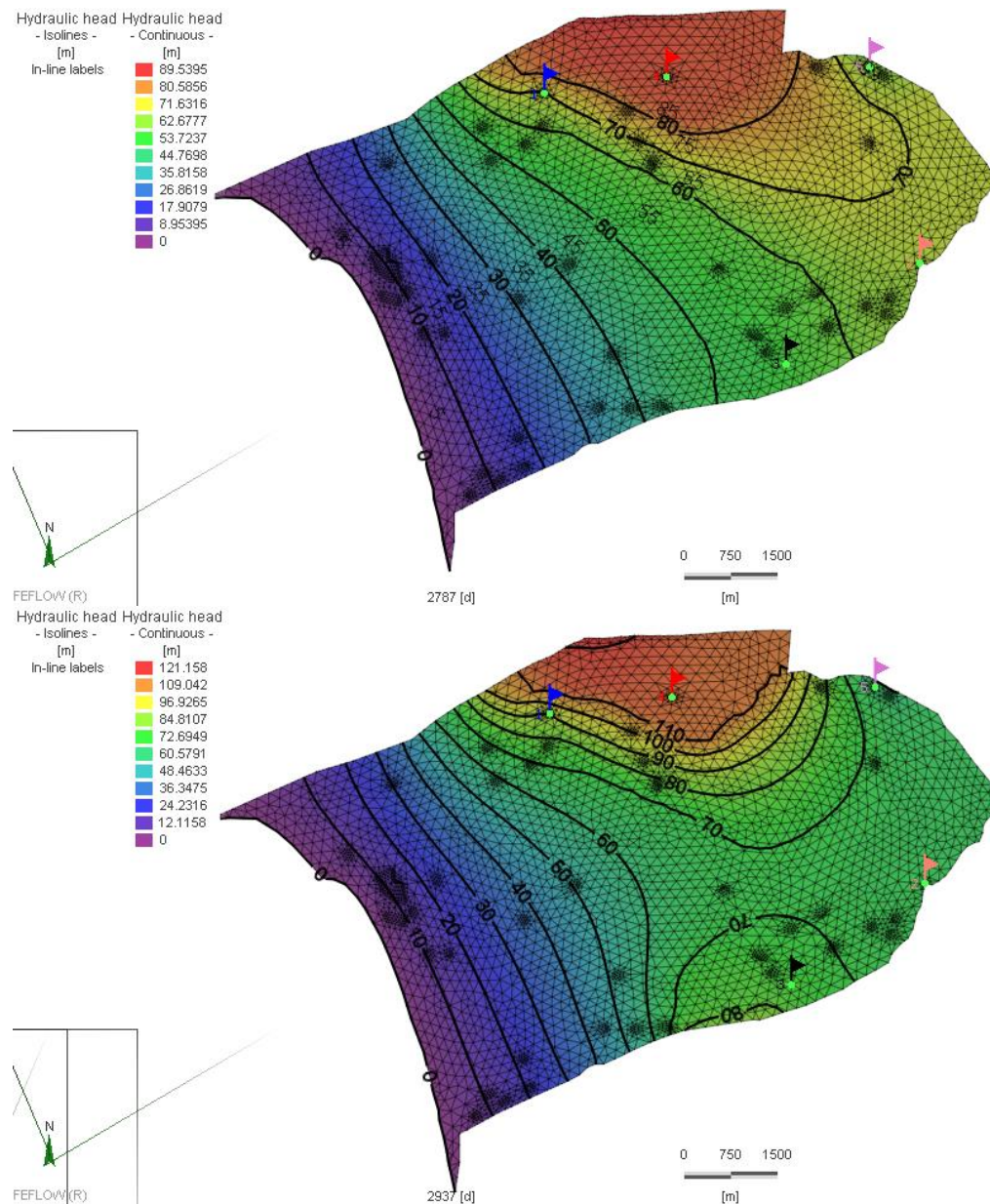
Εικόνα 31: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με το χρόνο για το πηγάδι 5 για τις παρατηρημένες και τις προσομοιωμένες τιμές.

	Σφάλμα	Απόλυτο σφάλμα	Μέσο απόλυτο σφάλμα	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα
Πηγάδι 1	-2.98m	2.98 m	11.97 m	9.95 m
Πηγάδι 2	3.44 m	3.44 m	8.10 m	8.43 m
Πηγάδι 3	3.96 m	3.96 m	8.94 m	11.15 m
Πηγάδι 4	-5.45 m	5.45 m	11.14 m	14.22 m
Πηγάδι 5	-5.41 m	5.41 m	10.68 m	12.76 m

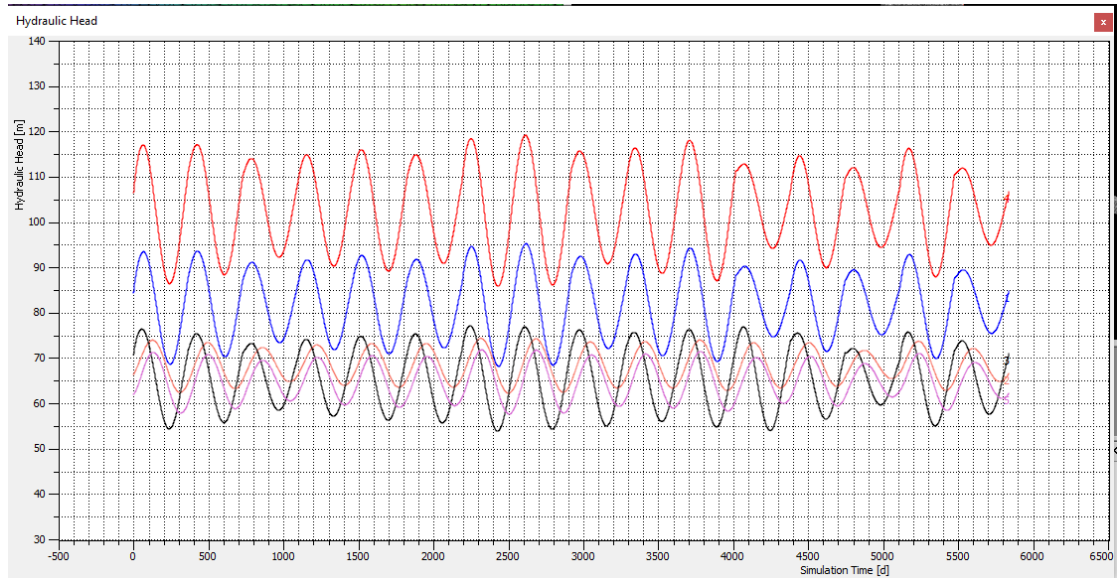
Πίνακας 2: Σφάλματα κάθε πηγαδιού για το αρχικό σενάριο.

## Σενάριο 1

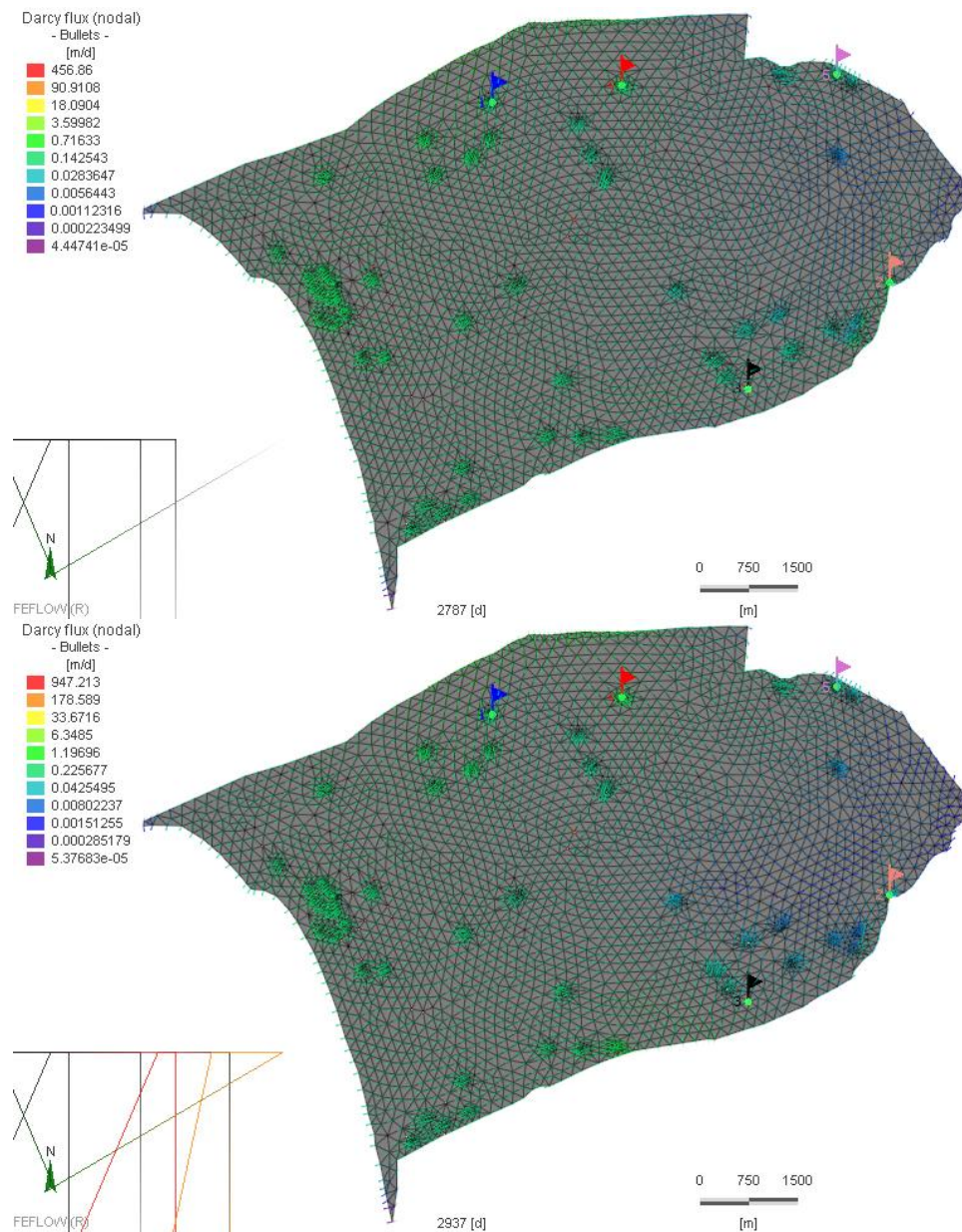
Το σενάριο 1 αναφέρεται στην μείωση της άντλησης κατά 10%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων.



Εικόνα 32: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.



Εικόνα 33: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 1. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

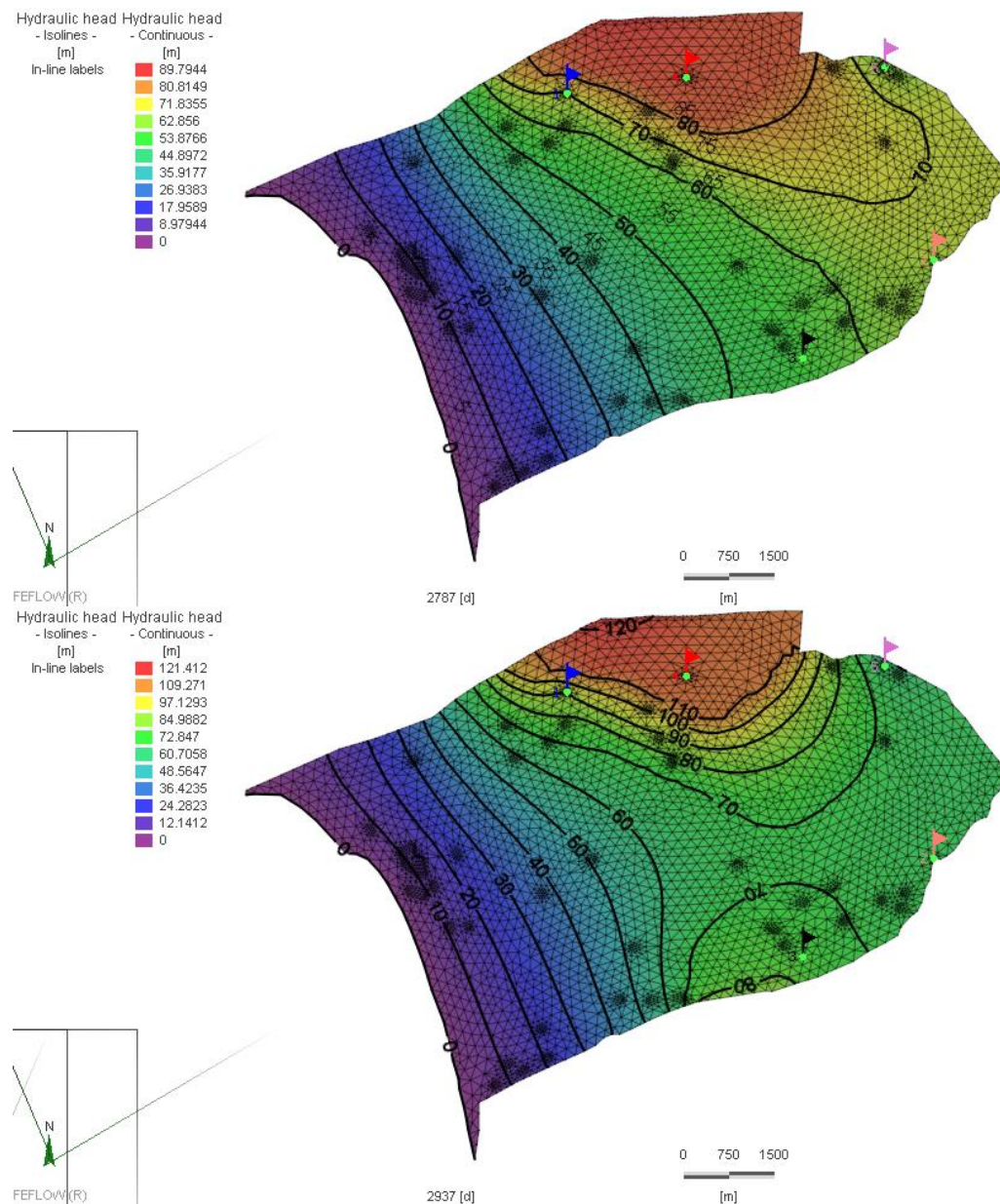


Εικόνα 34: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

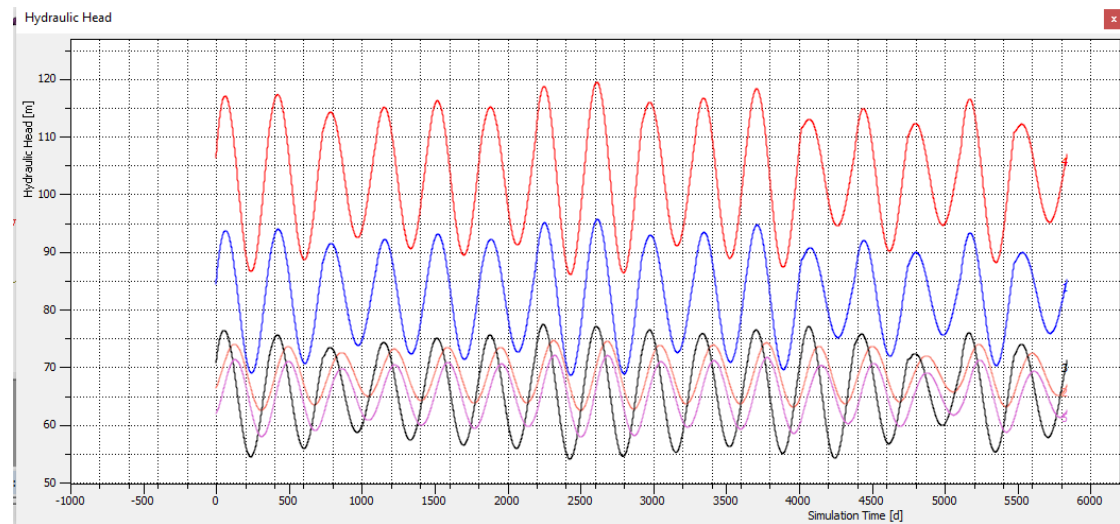


## Σενάριο 2

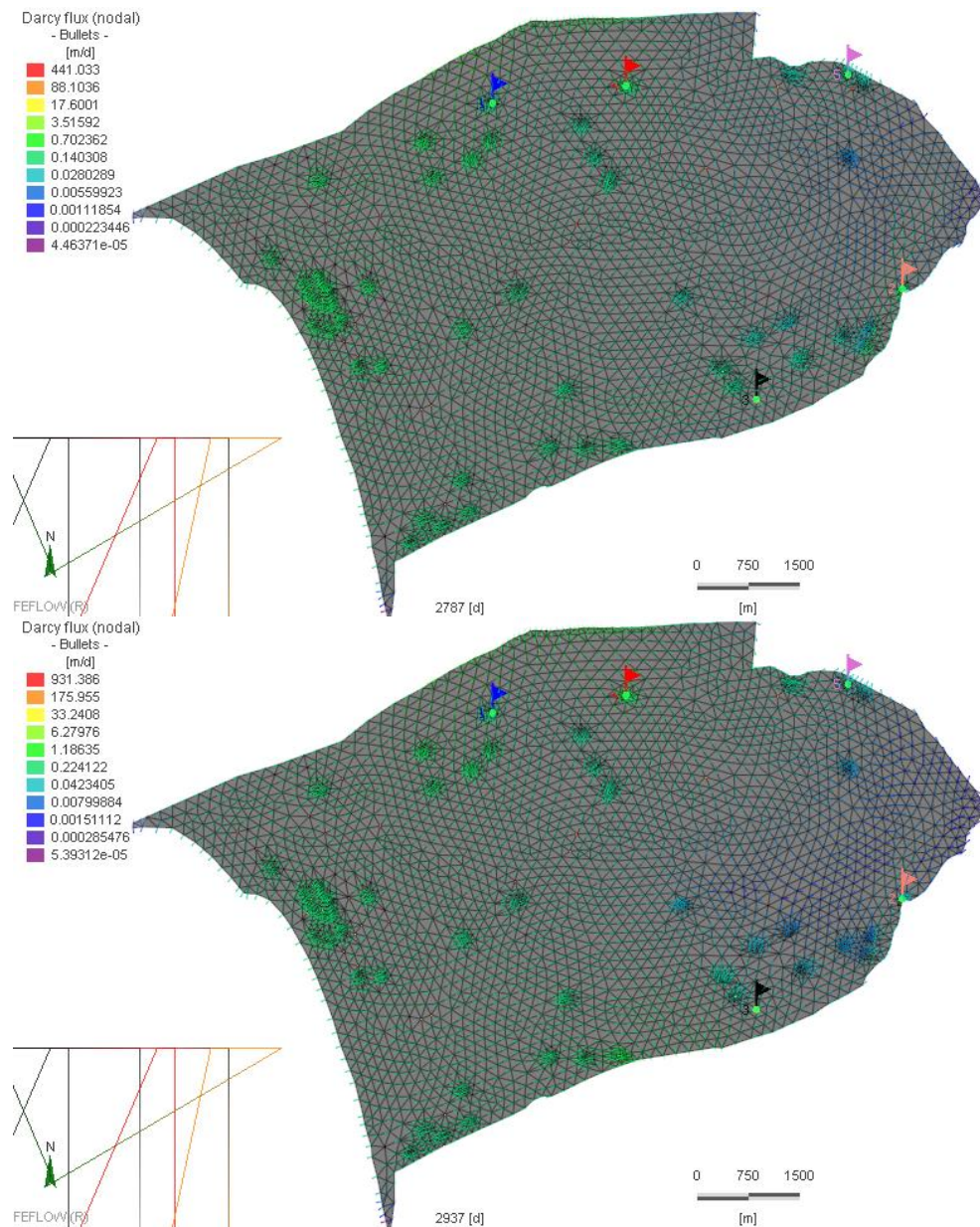
Το σενάριο 2 αναφέρεται στην μείωση της άντλησης κατά 20%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων.



Εικόνα 35: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2011 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2011.



Εικόνα 36: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 2. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

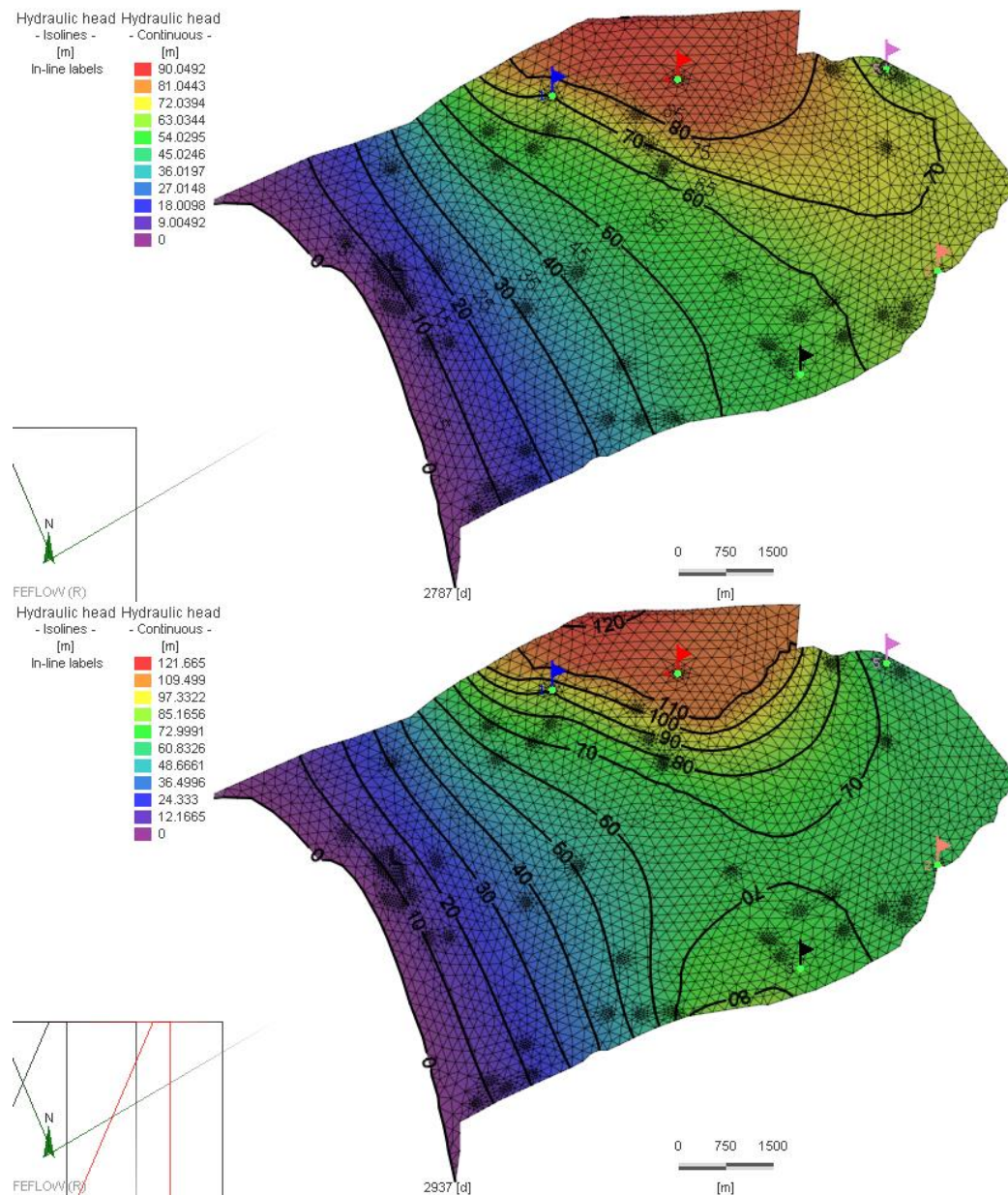


Εικόνα 37: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα

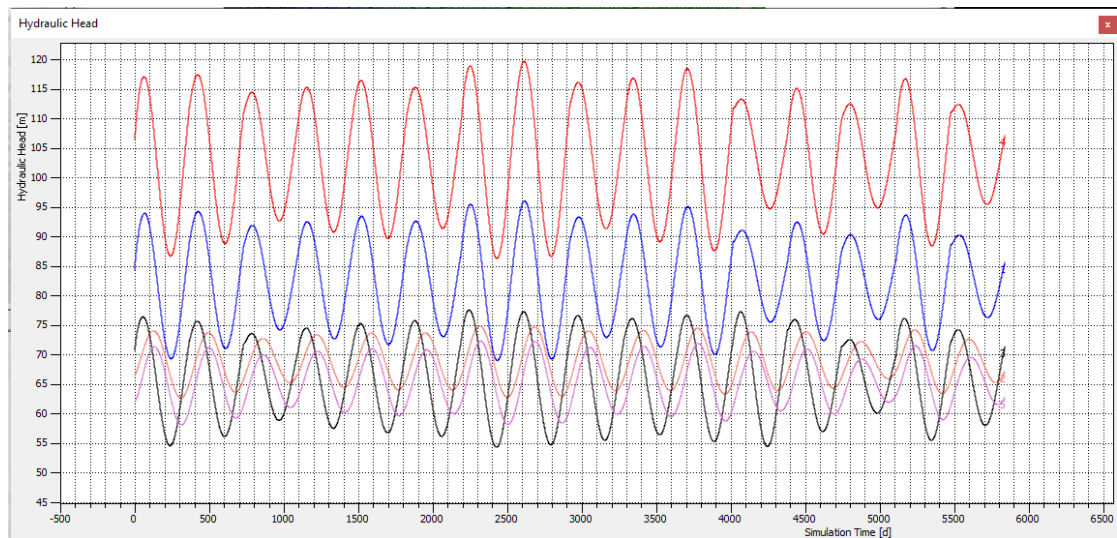


### Σενάριο 3

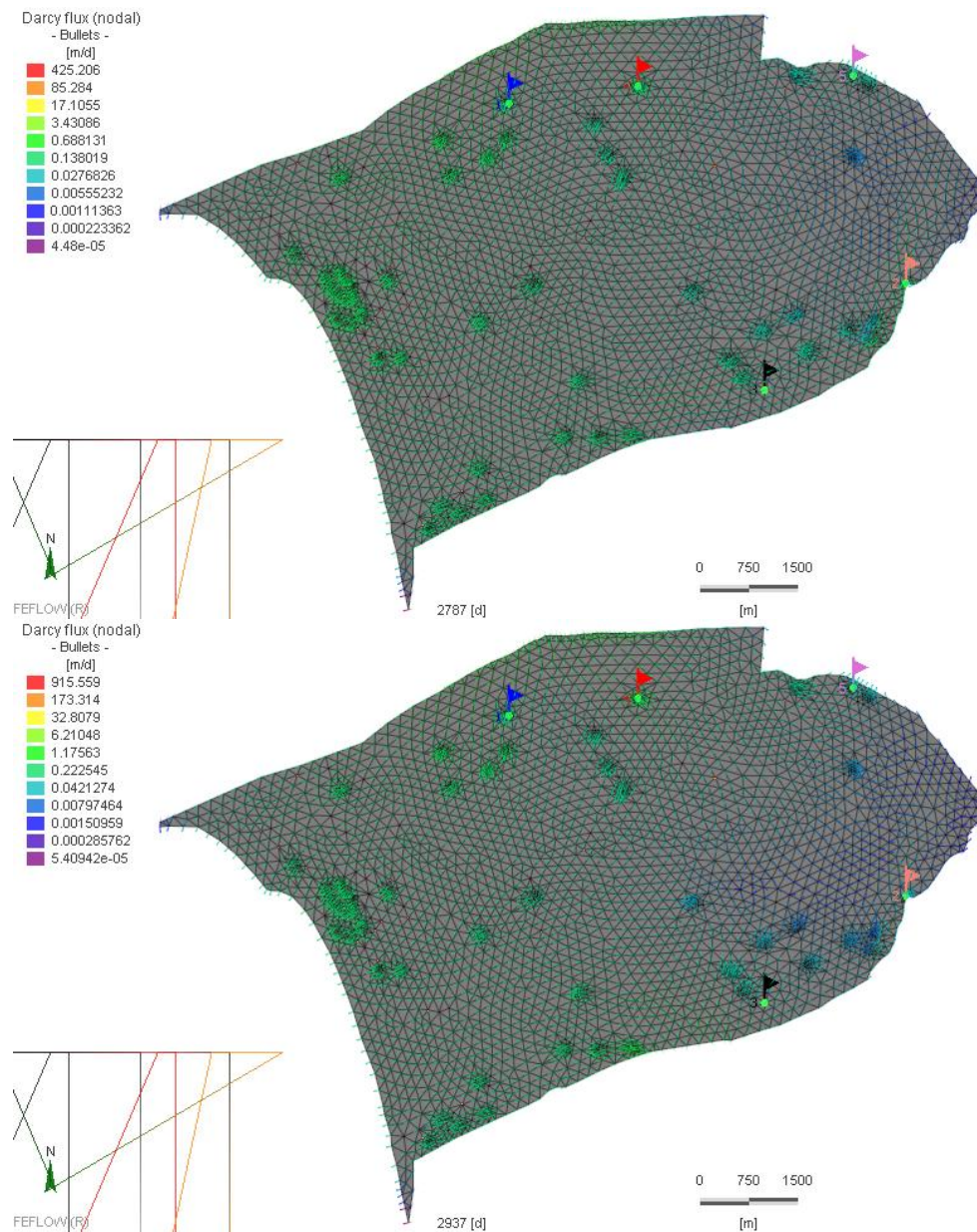
Το σενάριο 3 αναφέρεται στην μείωση της άντλησης κατά 30%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων.



Εικόνα 38: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.



Εικόνα 39: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 3. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

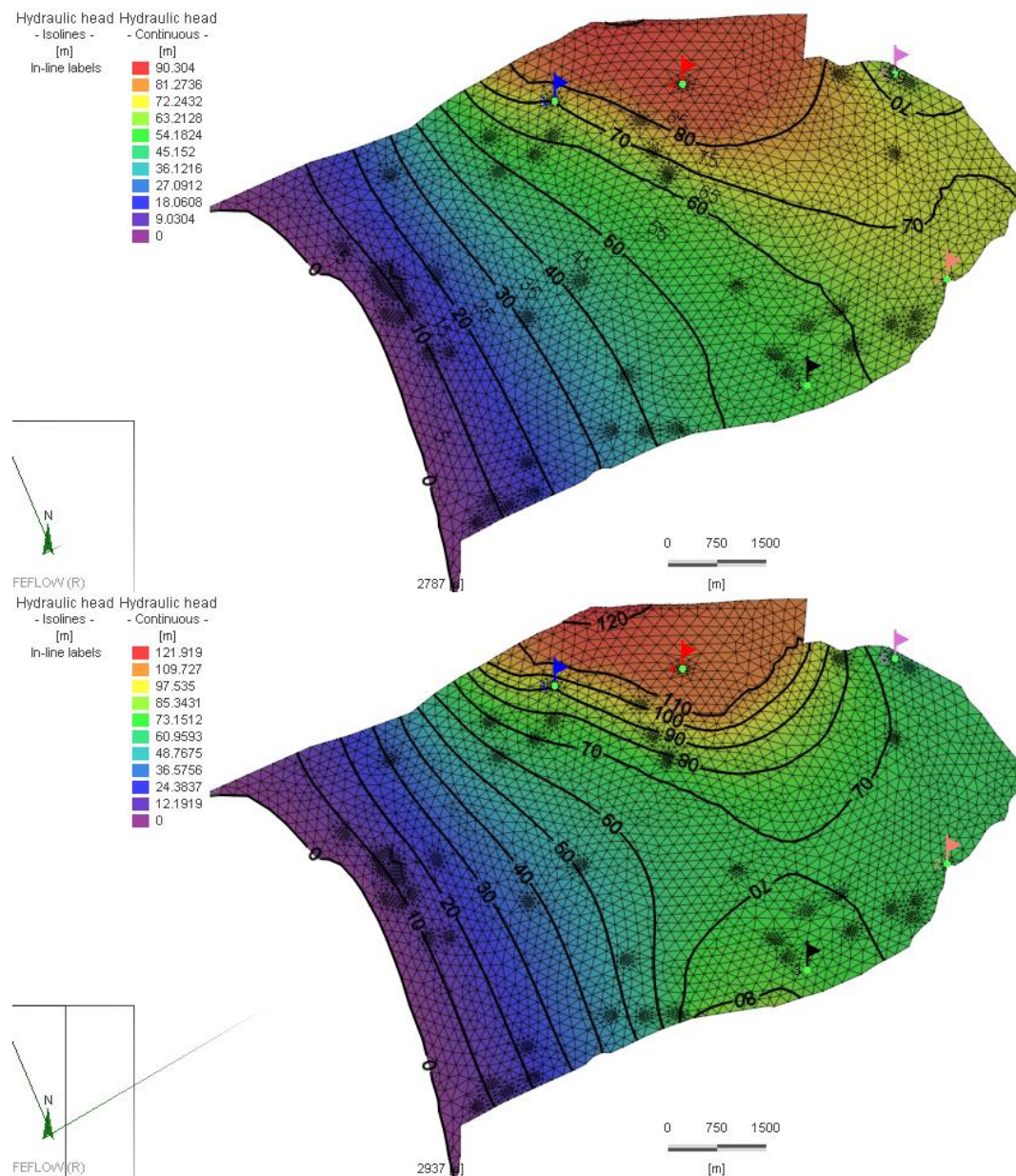


Εικόνα 40: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.



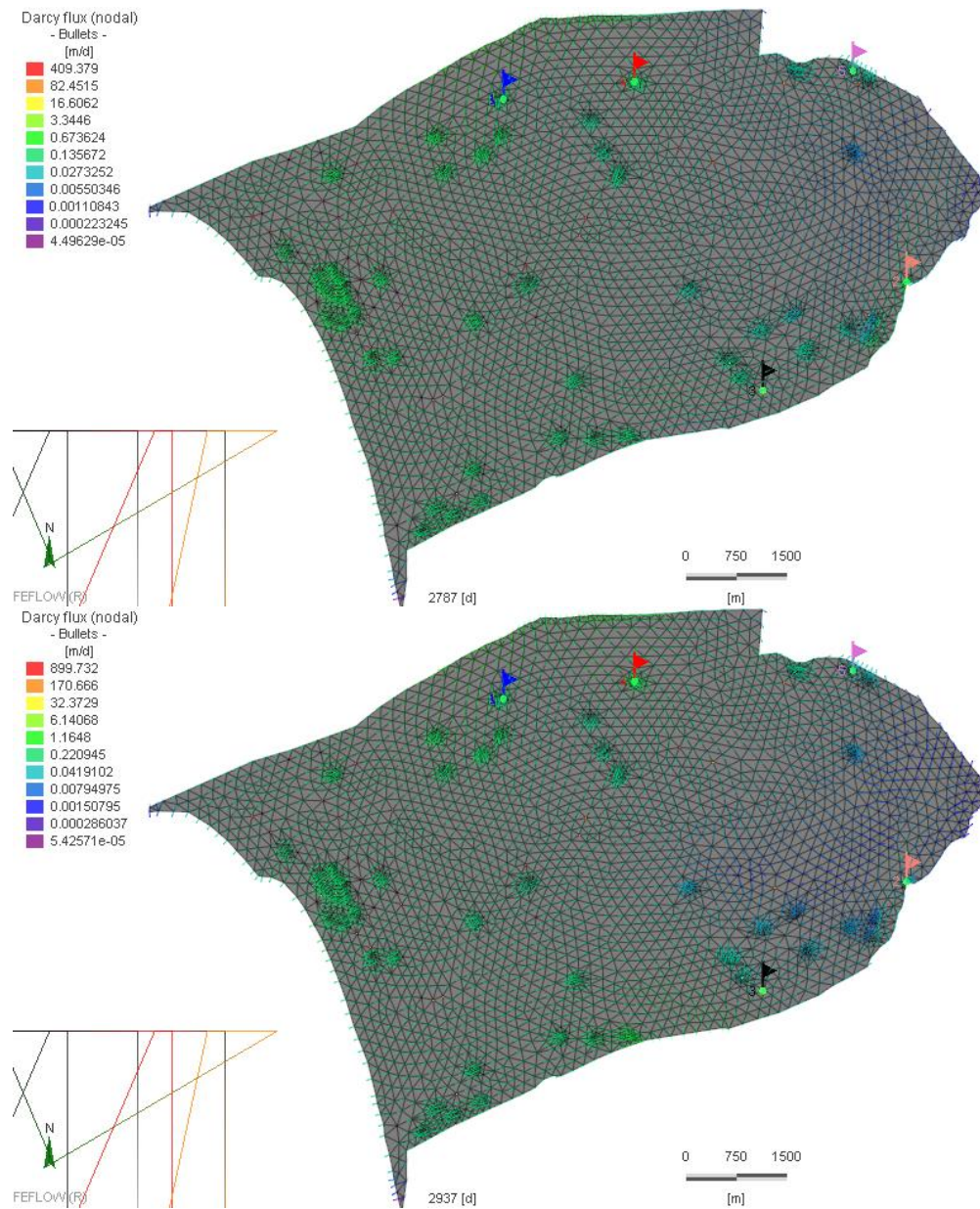
#### Σενάριο 4

Το σενάριο 4 αναφέρεται στην μείωση της άντλησης κατά 40%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων.



Εικόνα 41: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

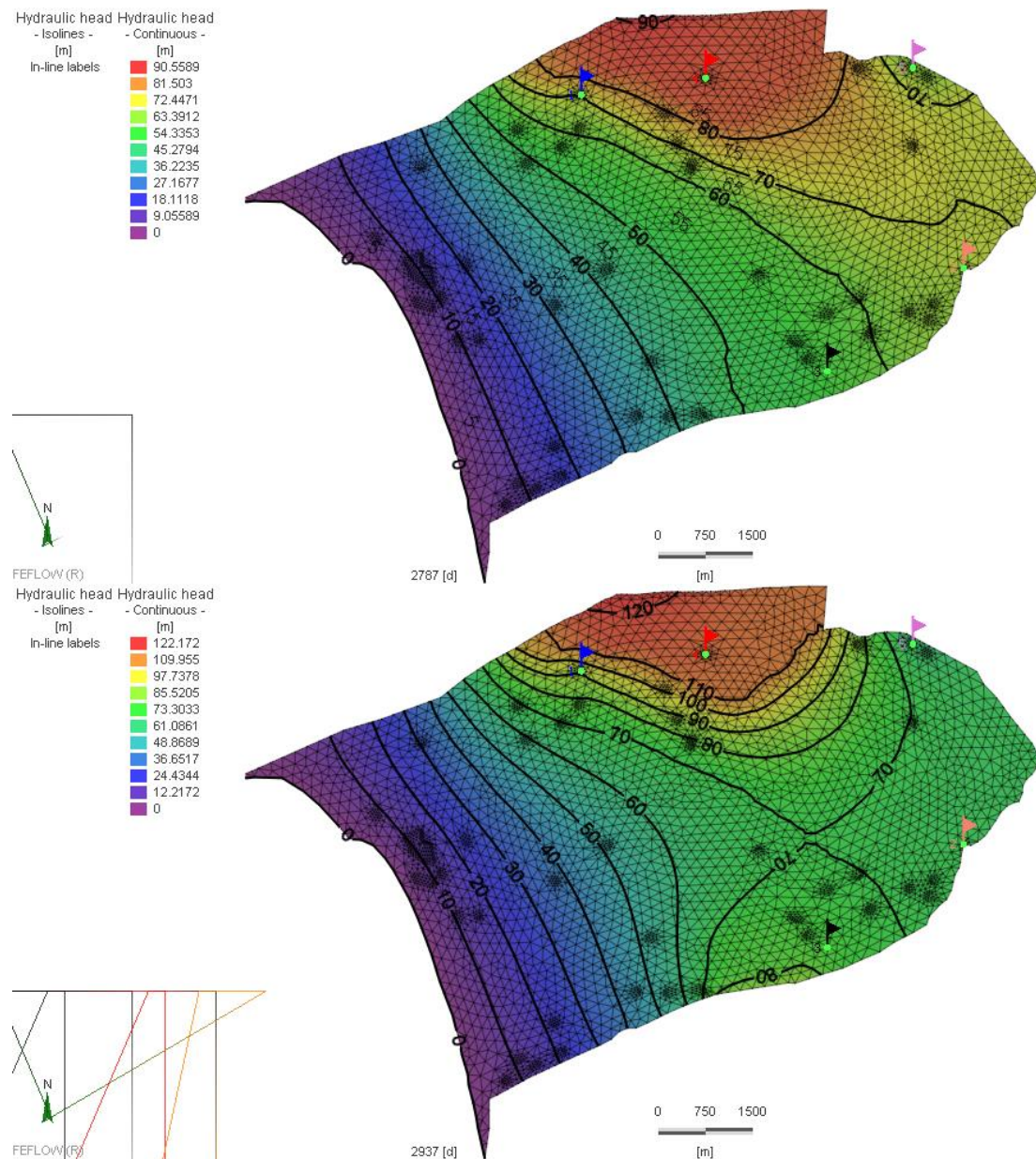




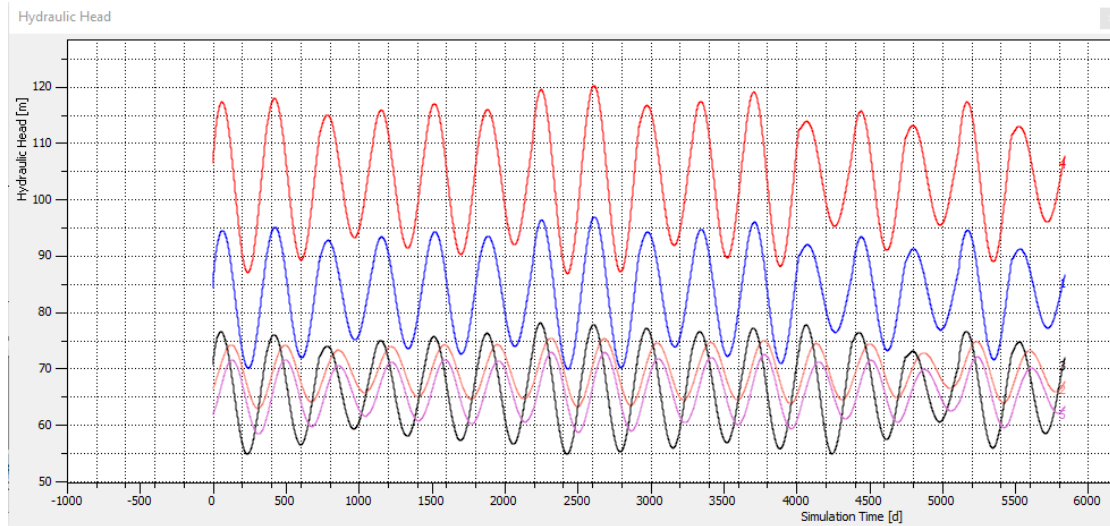
Εικόνα 42: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.

## Σενάριο 5

Το σενάριο 5 αναφέρεται στην μείωση της άντλησης κατά 50%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων.

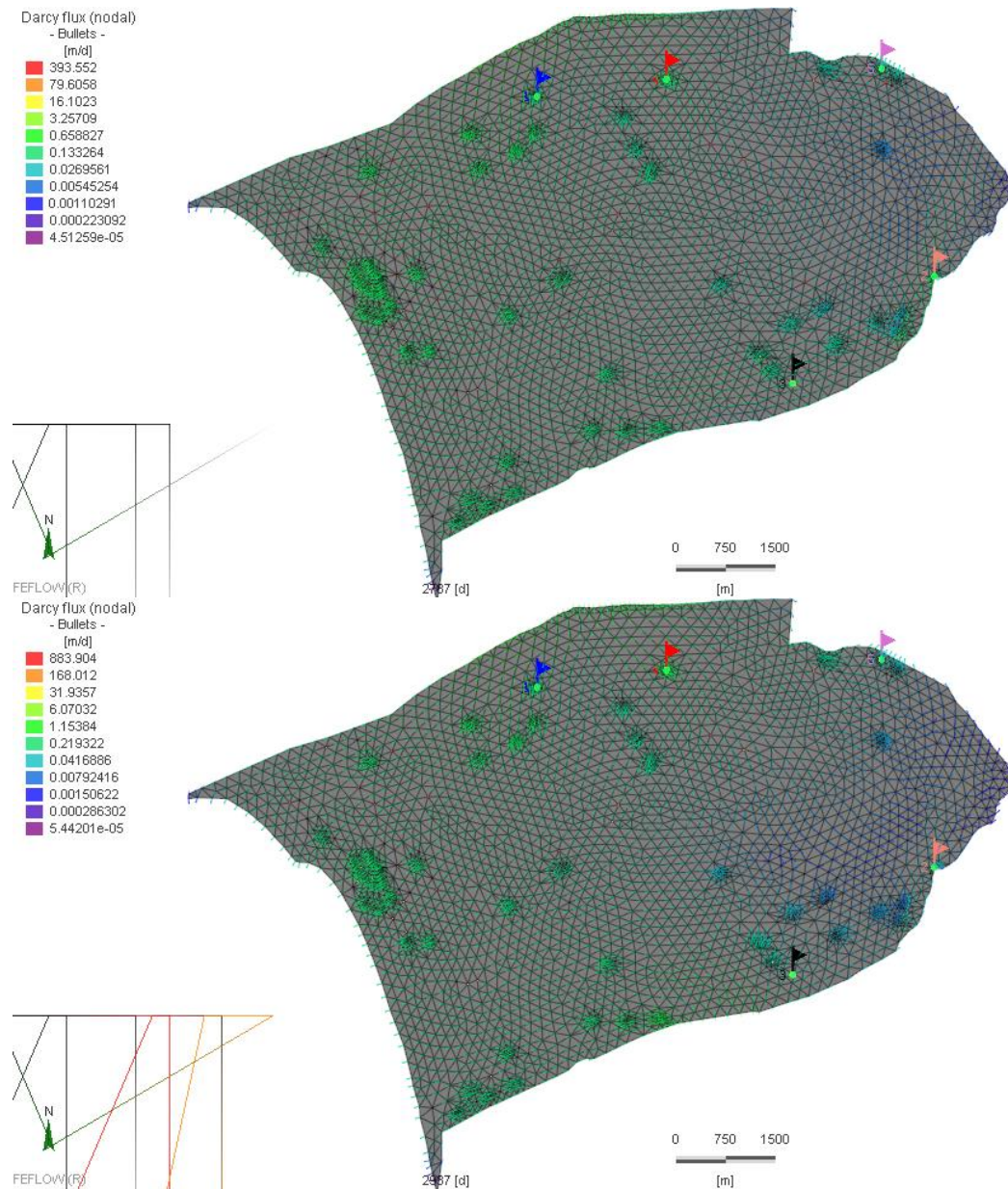


Εικόνα 43: Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το έτος 2011. Στον πάνω χάρτη παρουσιάζεται το υδραυλικό ύψος για το καλοκαίρι του 2011 και στον κάτω για τον χειμώνα του 2011.

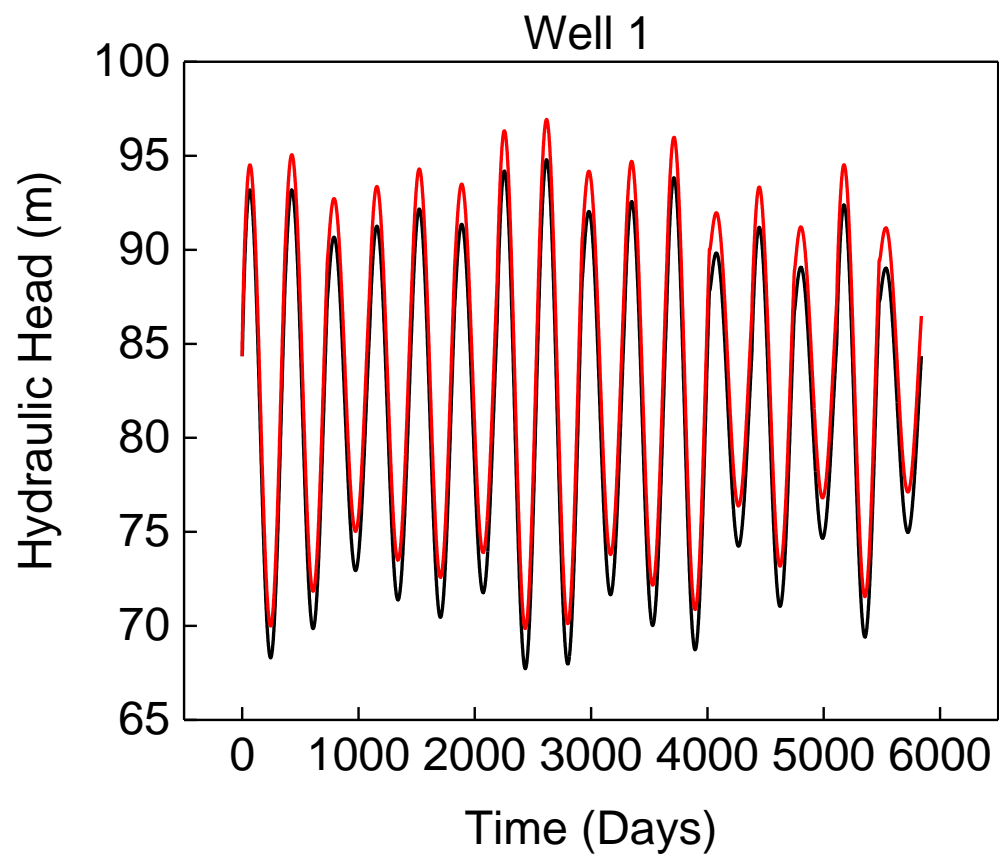


Εικόνα 44: Διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το σενάριο 5. Η κάθε καμπύλη απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το κάθε πηγάδι παρατήρησης.

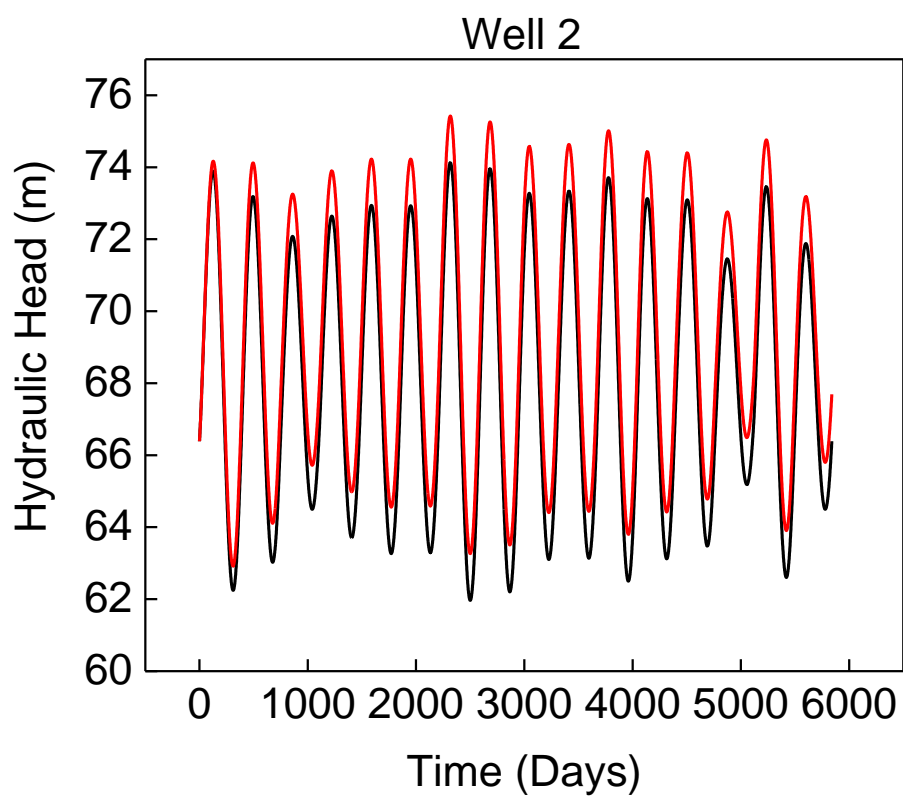




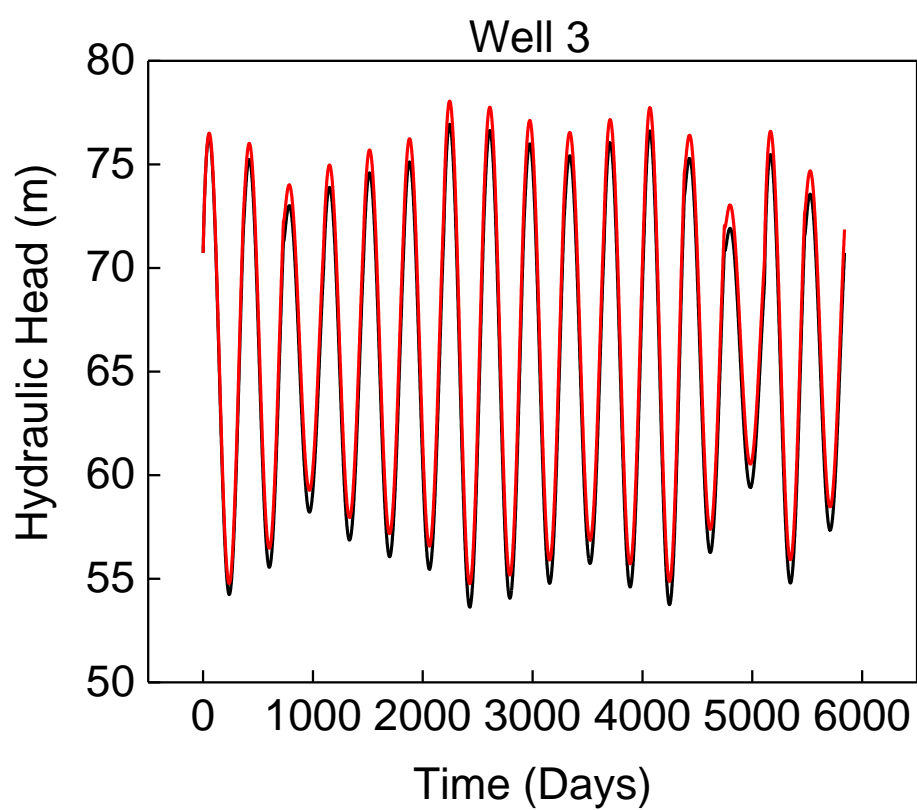
Εικόνα 45: Χάρτης ταχύτητας Darcy. Στην πρώτη εικόνα παρουσιάζεται η ταχύτητα την περίοδο του καλοκαιριού και στην δεύτερη για την περίοδο του χειμώνα.



Εικόνα 46: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 1. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει το υδραυλικό ύψος για το σενάριο 5 ενώ η μαύρη για το αρχικό σενάριο.

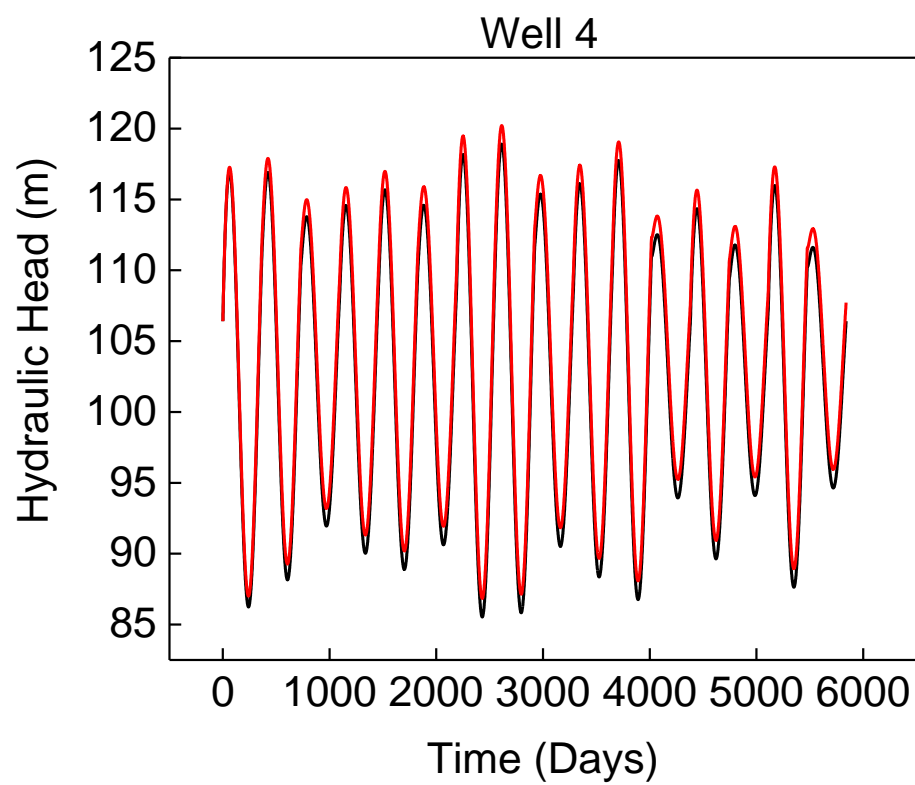


*Εικόνα 47: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 2. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει το υδραυλικό ύψος για το σενάριο 5 ενώ η μαύρη για το αρχικό σενάριο.*

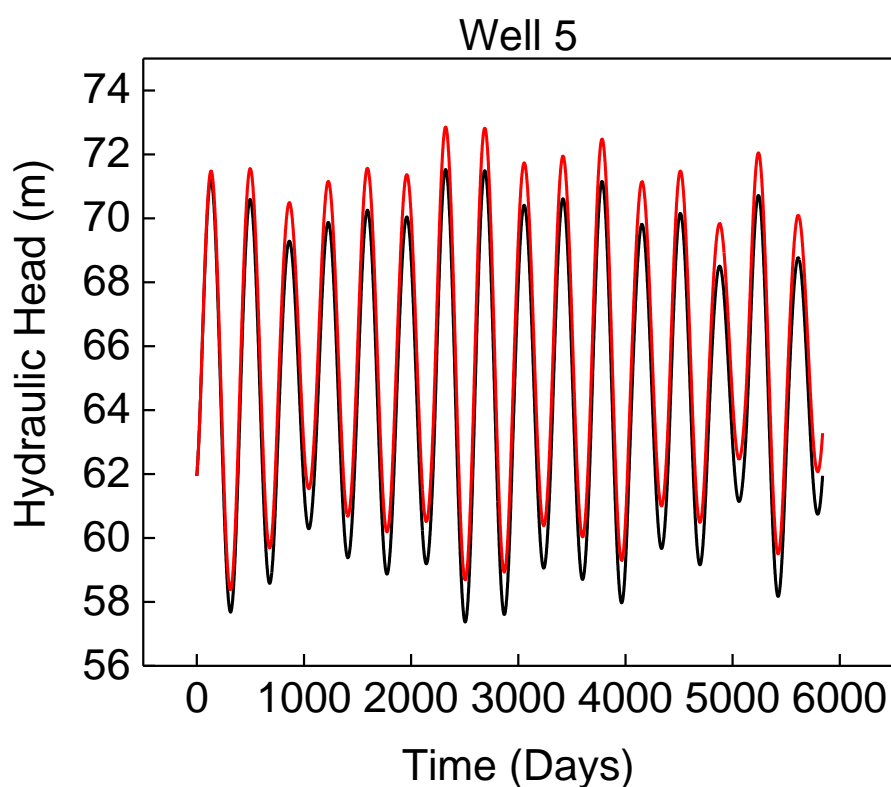


Εικόνα 48: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 3. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει το υδραυλικό ύψος για το σενάριο 5 ενώ η μαύρη για το αρχικό σενάριο.





Εικόνα 49: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 4. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει το υδραυλικό ύψος για το σενάριο 5 ενώ η μαύρη για το αρχικό σενάριο.



*Εικόνα 50: Σύγκριση υδραυλικού ύψους αρχικού σεναρίου με σενάριο 5 για το πηγάδι 5. Η κόκκινη καμπύλη παρουσιάζει το υδραυλικό ύψος για το σενάριο 5 ενώ η μαύρη για το αρχικό σενάριο.*

	Πηγάδι 1	Πηγάδι 2	Πηγάδι 3	Πηγάδι 4	Πηγάδι 5
Σενάριο 1	0.4 m	0.3 m	0.2 m	0.3 m	0 m
Σενάριο 2	0.8 m	0.5 m	0.4 m	0.5 m	0.5 m
Σενάριο 3	1.2 m	0.8 m	0.7 m	0.8 m	0.8 m
Σενάριο 4	1.7 m	1.1 m	0.9 m	1.1 m	1.1 m
Σενάριο 5	2.1 m	1.3 m	1.1 m	1.3 m	1.3 m

*Πίνακας 3: Διαφορές υδραυλικού ύψους πηγαδιών κάθε σεναρίου σε σχέση με το αρχικό.*

	Καλοκαίρι	Χειμώνας
Σενάριο 1	3.35%	1.6%
Σενάριο 2	6.69%	3.29%
Σενάριο 3	10.04%	4.93%

Σενάριο 4	13.39%	6.57%
Σενάριο 5	16.74%	8.22%

*Πίνακας 4: Ποσοστά μείωσης μέγιστης ταχύτητας Darcy.*

## 5.Συζήτηση

Αρχικά τοποθετήσαμε την κύρια εισροή νερού στο Βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης διότι εκεί είχαμε τις μεγαλύτερες παρατηρημένες τιμές υδραυλικού ύψους. Αυτό συμβαίνει διότι εκεί βρίσκεται το μεγαλύτερο βουνό της Κρήτης (Ψηλορείτης). Την δεύτερη κύρια εισροή την τοποθετήσαμε στο νότιο τμήμα εκεί όπου εισέρχεται στην περιοχή μελέτης ο ποταμός Γεροπόταμος. Επίσης, με βάση τις παρατηρημένες τιμές υδραυλικού ύψους που είχαμε για το πηγάδι 5 τοποθετήσαμε μία ακόμη οριακή συνθήκη ακριβώς από πάνω του. Η συνθήκη αυτή αφορά την εκφόρτιση του υδροφορέα με κατεύθυνση βόρειο-ανατολική προς το γειτονικό υδροφορέα των Μοιρών. Αρχικά, οι οριακές συνθήκες είχαν εισαχθεί με την μορφή μίας μέσης τιμής. Όμως αυτό δεν θα απεικόνιζε την πραγματικότητα, αφού είναι εύκολα κατανοητό ότι ανάλογα με την εποχή αλλάζει και η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων. Για τον λόγο αυτόν οι οριακές συνθήκες εισήχθησαν με την μορφή συνημιτονοειδών συναρτήσεων ώστε να έχουν άμεση συσχέτιση με τις βροχοπτώσεις. Η μέση τιμή της συνάρτησης για την οριακή συνθήκη που έχει τοποθετηθεί στο βόρειο τμήμα είναι ίση με  $-0.35 \text{ m/d}$ , ενώ για την οριακή συνθήκη που τοποθετήθηκε στο νότιο τμήμα είναι ίση με  $-0.14 \text{ m/d}$ . Οι τιμές αυτές εισήχθησαν ως αρνητικές ώστε το πρόγραμμα να τις δεχτεί ως εισροές. Για τον λόγο αυτόν η εκροή στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής εισήχθη με θετικό πρόσημο. Η τιμή της είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τις δύο κύριες εισροές και ισούται με  $0.05 \text{ m/d}$ .

Στην Εικόνα 24 παρατηρείται πτώση του υδραυλικού ύψους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό συμβαίνει διότι τους καλοκαιρινούς μήνες οι βροχοπτώσεις είναι πολύ μειωμένες. Αντίθετα, οι αντλήσεις είναι σημαντικά αυξημένες λόγω των μεγάλων αναγκών, αφού εκεί παράγεται η μεγαλύτερη ποσότητα οπωροκηπευτικών του νησιού. Η πτώση αυτή του υδραυλικού ύψους είναι εμφανής και από τις παρατηρημένες τιμές του, όπου παρουσιάζουν σημαντική πτώση τους καλοκαιρινούς μήνες. Στην Εικόνα 25 παρατηρείται ότι το διάγραμμα του υδραυλικού ύψους με τον χρόνο έχει την συνημιτονοειδή μορφή την οποία προαναφέραμε το οποίο είναι αναμενόμενο γιατί εξαρτάται απόλυτα από τις εισροές που έχουμε βάλει. Επίσης, στην ίδια εικόνα βλέπουμε ότι το υδραυλικό ύψος ξεκινά από μία αρκετά υψηλή τιμή και σχεδόν αμέσως ξεκινάει να πέφτει. Αυτό επιλέχθηκε διότι η πρώτη μέρα για την οποία είχαμε μετρήσεις ήταν η εικοστή δεύτερη μέρα του Απριλίου άρα και η μέρα από όπου ξεκινάει να τρέχει το μοντέλο μας. Η μέρα αυτή βρίσκεται προς το τέλος την χειμερινής περιόδου και για αυτό η τιμή της είναι από τις υψηλότερες του έτους. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι το υδραυλικό ύψος του πηγαδιού 4 είναι με διαφορά το μεγαλύτερο και αυτό εξηγείται από την θέση του, η οποία είναι στο σημείο από το οποίο έχουμε την μεγαλύτερη εισροή νερού από το βόρειο τμήμα της περιοχής όπου βρίσκεται και ο Ψηλορείτης. Η μέση τιμή του υδραυλικού ύψους είναι ίση με  $102.4 \text{ m}$ . Επίσης, δεν βρίσκεται πολύ κοντά με μεγάλο αριθμό πηγαδιών άντλησης. Το πιο κοντινό πηγάδι άντλησης έχει μηδενική παροχή, που σημαίνει ότι είναι ανενεργό και με την σειρά του συμβάλλει ώστε να μην πέφτει η στάθμη στο πηγάδι 4. Αμέσως μικρότερο υδραυλικό ύψος έχει το πηγάδι 1 με μέση τιμή υδραυλικού ύψους ίση με  $81.5 \text{ m}$ , το οποίο βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το πηγάδι 4 αλλά βρίσκεται και σε κοντινή απόσταση από τα γύρω πηγάδια άντλησης. Επόμενο είναι το πηγάδι 2, το οποίο βρίσκεται βόρεια του πηγαδιού 3 και κατά συνέπεια βόρεια από την εισροή του

ποταμού. Αυτό επίσης σημαίνει ότι βρίσκεται και σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που κινείται το νερό. Η μέση τιμή του υδραυλικού του ύψους είναι ίση με 68.2 m και είναι κατά 3 m μεγαλύτερη από αυτή του πηγαδιού 3. Αυτό συμβαίνει διότι το πηγάδι 3 παρόλο που βρίσκεται πάρα πολύ κοντά στην νότια εισροή, η οποία έχει μέση τιμή ίση με -0.14 m/d, της περιοχής βρίσκεται και πολύ κοντά με πηγάδια άντλησης με μεγάλες τιμές παροχής. Ακολουθεί το πηγάδι νούμερο 3 το οποίο βρίσκεται στο σημείο από όπου εισέρχεται νερό από τον Γεροπόταμο. Παρόλο που γύρω του και σε μικρή απόσταση υπάρχουν πηγάδια που αντλούν σημαντικές ποσότητες, λόγω της σημαντικής εισροής διατηρεί το υδραυλικό του ύψος σε υψηλές τιμές. Η μέση τιμή του υδραυλικού ύψους του πηγαδιού 3 είναι 65.4 m. Τέλος, το μικρότερο υδραυλικό ύψος έχει το πηγάδι 5 με μέση τιμή ίση με 64.7 m. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι δεν βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με τα σημεία από όπου εισέρχεται νερό στην περιοχή αντιθέτως λόγω της χαμηλής παρατηρημένης τιμής του βρίσκεται ακριβώς στο σημείο από το οποίο υπάρχει εκφόρτιση του υδροφορέα με κατεύθυνση προς τον υδροφορέα των Μοιρών. Ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλλει στην τιμή του υδραυλικού του ύψους είναι η χαμηλή τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας του γεωλογικού σχηματισμού που βρίσκεται.

Από την Εικόνα 26, βλέπουμε ότι η ταχύτητα Darcy είναι μεγαλύτερη το χειμώνα κάτι που είναι απολύτως αναμενόμενο μιας και έχουμε και μεγαλύτερο υδραυλικό ύψος αλλά και μεγαλύτερες βροχοπτώσεις. Αντίθετα το καλοκαίρι έχουμε αρκετά μικρότερες ταχύτητες και στο βόρειο τμήμα της περιοχής αλλά κυρίως στο νότιο όπου η εισροή εξαρτάται από τις ποσότητες νερού που μεταφέρει ο ποταμός. Οι ποσότητες νερού του ποταμού εξαρτώνται από τις βροχοπτώσεις οι οποίες το καλοκαίρι είναι πολύ μικρές. Η εικόνα αυτή παρουσιάζει επίσης και την διεύθυνση της ταχύτητας η οποία μας δείχνει ότι το νερό εισρέει από το βόρειο και νότιο τμήμα (Ψηλορείτης, Γεροπόταμος) κατευθύνεται προς το κέντρο της περιοχής και έπειτα προς το ανατολικό τμήμα όπου βρίσκεται η θάλασσα. Η πορεία αυτή του νερού συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με την μορφολογία του εδάφους όπως αυτή φαίνεται από την Εικόνα 51. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο πλησιάζουμε στην θάλασσα τόσο μεγαλώνει και η ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει διότι το έδαφος έχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα που ευνοεί τις υψηλές ταχύτητες. Ένας ακόμα λόγος είναι και η ύπαρξη πολλών πηγαδιών άντλησης σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό ευνοεί την αύξηση της ταχύτητας διότι λόγω του κώνου πτώσης στάθμης αυξάνεται η διαφορά υδραυλικού ύψους και συνεκδοχικά αυξάνεται και η ταχύτητά σύμφωνα με τον νόμο του Darcy. Ακόμα, υπάρχει στο βόρειο-ανατολικό τμήμα ένα μικρό κομμάτι ακριβώς πάνω από το πηγάδι 5 όπου τα διανύσματα της ταχύτητας έχουν κατεύθυνση προς τα ανατολικά δηλαδή έξω από την περιοχή μας διότι εκεί υπάρχει μικρή εκφόρτιση του υδροφορέα. Λίγο πάνω από το πηγάδι 3 παρατηρούμε ότι παρόλο που είναι πολύ κοντά στην είσοδο του ποταμού, οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, κάτι που εξηγείται από την γεωλογία της περιοχής αφού σε εκείνο το σημείο έχουμε πέτρωμα με μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Στο πηγάδι 4 έχουμε σχετικά μεγάλες ταχύτητες παρόλο που βρίσκεται σε έδαφος με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, διότι στο σημείο εκείνο η εισροή είναι πολύ μεγάλη. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν την ταχύτητα Darcy έχει χρησιμοποιηθεί λογαριθμική κλίμακα ώστε να αποτυπωθούν καλύτερα οι μικρές τιμές της ταχύτητας, καθώς υπάρχει μεγάλη διαφορά στις τάξεις μεγέθους του εύρους των τιμών. Αυτό συμβαίνει διότι, λόγω του κώνου πτώσης στάθμης, έχουμε εξαιρετικά

μεγαλύτερες ταχύτητες στα πηγάδια άντλησης σε σχέση με την μέση ταχύτητα της ροής στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Για το πρώτο σενάριο άντλησης, το οποίο αναφέρεται στη μείωση της κατά 10%, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 32, Εικόνα 33 και Εικόνα 34. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά στο υδραυλικό ύψος καταγράφεται στο πηγάδι 1, όπου η μέγιστη τιμή της φτάνει τα 0.43 m. Το πηγάδι αυτό βρίσκεται σε μία περιοχή όπου υπάρχει εισροή νερού σε μικρή απόσταση από αυτό, και αρκετά πηγάδια άντλησης σε σχετικά μικρή απόσταση που σημαίνει ότι θα είναι αυτό που θα επηρεαστεί σε μεγαλύτερο βαθμό από την μείωση της άντλησης. Σημαντική παράμετρο, επίσης, αποτελεί και το γεγονός ότι παρόλο που βρίσκεται στο όριο του γεωλογικού στρώματος 2, το οποίο έχει μικρή υδραυλική αγωγιμότητα (3 m/d), βρίσκεται και πολύ κοντά με το γεωλογικό στρώμα 3, που έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με 70 m/d. Το πηγάδι 5 δεν παρουσιάζει μεταβολή στο υδραυλικό ύψος διότι βρίσκεται μακριά από οποιαδήποτε εισροή και επίσης το κοντινότερο πηγάδι άντλησης είναι ανενεργό. Τα πηγάδια 2 και 4 θα επηρεαστούν με παρόμοιο τρόπο μεταξύ τους και το υδραυλικό τους ύψους θα αυξηθεί κατά 0.26 m. Το πηγάδι 4, παρόλο που βρίσκεται πολύ κοντά στην κύρια εισροή, δεν βρίσκεται κοντά σε πηγάδια άντλησης και το κοντινότερο από αυτά είναι ανενεργό, καθώς η παροχή άντλησης του είναι ίση με 0 m<sup>3</sup>/year. Επίσης, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της εισροής κατευθύνεται προς τα δυτικά και όχι προς το πηγάδι 4. Το πηγάδι 2, παρόλο που βρίσκεται κοντά με πηγάδια που έχουν μεγάλες τιμές παροχής άντλησης, βρίσκεται σε σημείο αντίθετο από την κίνηση του νερού από την είσοδο του ποταμού Γεροπόταμου στη περιοχή μας. Το πηγάδι 3 παρουσιάζει λίγο μικρότερη μεταβολή από τα παραπάνω πηγάδια, η οποία ισούται με 0.22 m. Αυτό συμβαίνει διότι ενώ βρίσκεται κοντά σε πηγάδια άντλησης τα οποία έχουν σημαντικές τιμές παροχής, βρίσκεται και σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του νερού από την εισροή του Γεροπόταμου. Επιπλέον, παρατηρούμε και μια μικρή μείωση στις τιμές της ταχύτητας και αυτό συμβαίνει διότι μειώνεται ο ρυθμός άντλησης από τον οποίο εξαρτάται η ταχύτητα Darcy. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη ταχύτητα τους καλοκαιρινούς μήνες μειώθηκε κατά 3.4%, ενώ για του χειμερινούς παρουσίασε μικρότερη πτώση η οποία ισούται με 1.6%. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό τους καλοκαιρινούς μήνες είναι σχεδόν διπλάσιο από αυτό για τους χειμερινούς μήνες. Η διεύθυνση της ταχύτητας παραμένει η ίδια καθώς και η μορφή της καμπύλης της μεταβολής του υδραυλικού ύψους.

Για το δεύτερο σενάριο μείωσης της άντλησης, το οποίο αναφέρεται στην μείωση κατά 20%, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 35, Εικόνα 36 και Εικόνα 37. Παρατηρούμε ότι και σε αυτό το σενάριο η μεγαλύτερη διαφορά στο υδραυλικό ύψος καταγράφεται στο πηγάδι 1 και έχει μέγιστη τιμή ίση με 0.86m. Την αμέσως μεγαλύτερη αύξηση την παρατηρούμε στα πηγάδια 2, 4, 5 τα οποία έχουν περίπου την ίδια μεταβολή στο υδραυλικό ύψος, η οποία ισούται με 0.53m. Τέλος, την μικρότερη μεταβολή την έχει το πηγάδι 3, το οποίο έχει μεταβολή ίση με 0.44m. Σε αυτό το σενάριο παρατηρούμε ότι η μεταβολή του υδραυλικού ύψους του πηγαδιού 5 δέχεται σημαντική αύξηση σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο. Αυτό συμβαίνει διότι το πηγάδι, παρόλο που βρίσκεται στην γεωλογική περιοχή 2 που έχει μικρή υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές, επηρεάζεται από την συνολική αύξηση του υδραυλικού ύψους στην περιοχή. Επιπροσθέτως,

παρατηρούμε επιπλέον μείωση στην μέγιστη τιμή της ταχύτητας Darcy, πράγμα αναμενόμενο αφού η παροχή άντλησης μειώθηκε. Το χειμώνα, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας έπεσε κατά 3.3%, ενώ το καλοκαίρι το ποσοστό της μείωσης είναι ίσο με 6.7%.

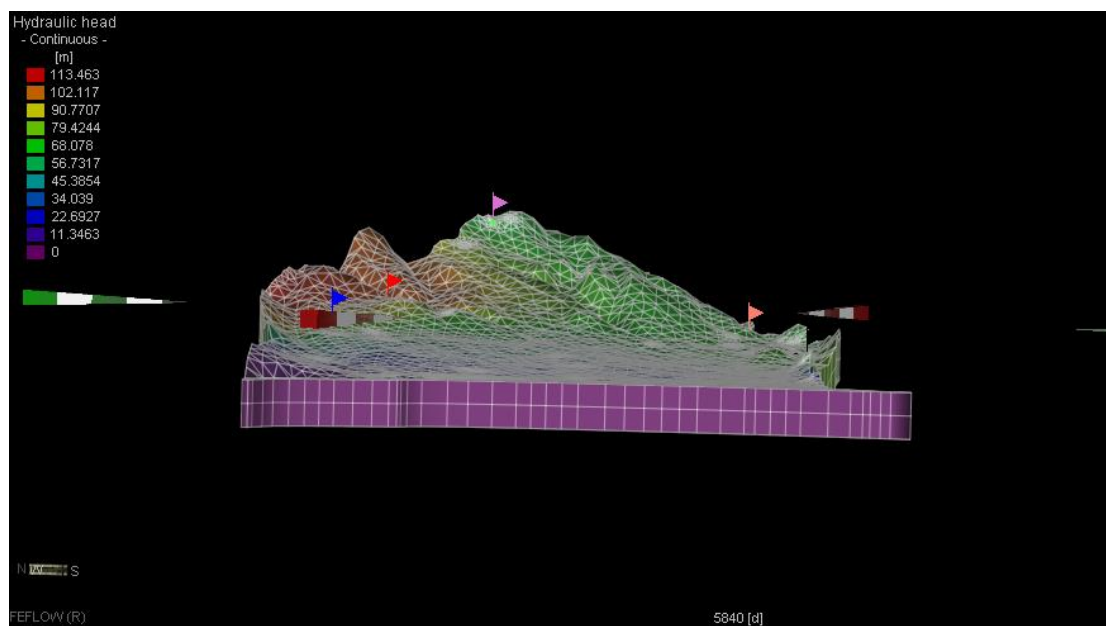
Για το τρίτο σενάριο μείωσης της άντλησης, το οποίο αναφέρεται στην μείωση κατά 30%, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 38, Εικόνα 39 και Εικόνα 40. Και στο σενάριο αυτό την μεγαλύτερη μεταβολή στο υδραυλικό ύψος την παρουσιάζει το πηγάδι 1 και είναι ίση με 1.29m. Τα πηγάδια 2,4 και 5 παρουσιάζουν ίση μεταβολή της τάξης των 0.79m, ενώ την μικρότερη μεταβολή την παρουσιάζει το πηγάδι 3 και είναι ίση με 0.67m. Η ταχύτητα Darcy μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό όπως και στα προηγούμενα σενάρια. Δηλαδή τον χειμώνα η μέγιστη ταχύτητα μειώθηκε κατά 4.9%, ενώ το καλοκαίρι κατά 10.4%.

Για το τέταρτο και πέμπτο σενάριο που αφορούν μείωση της άντλησης κατά 40% και 50%, αντίστοιχα τα αποτελέσματα καταγράφονται στην Εικόνα 41, Εικόνα 42, Εικόνα 43, Εικόνα 44, Εικόνα 45 παρατηρούμε ανάλογες μεταβολές στο υδραυλικό ύψος. Πιο συγκεκριμένα, το πηγάδι 1 παρουσιάζει την μεγαλύτερη μεταβολή και στις δύο περιπτώσεις, το πηγάδι 3 παρουσιάζει την μικρότερη μεταβολή ενώ τα πηγάδια 2,4,5 έχουν ίσες μεταβολές. Η ταχύτητα Darcy μειώνεται με ανάλογο τρόπο όπως στα 3 προηγούμενα σενάρια. Για το σενάριο 4 είχαμε πτώση 6.6% για τον χειμώνα και 13.4% για το καλοκαίρι, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το πέμπτο σενάριο είναι ίσες με 8.2% και 16.7%.

Τέλος, είναι εύκολα κατανοητό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της παροχής άντλησης, ανάλογη θα είναι και η μεταβολή του υδραυλικού ύψους αλλά και η μείωση της ταχύτητας Darcy. Επίσης, αν συγκρίνουμε το αρχικό σενάριο με το σενάριο 5 όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 46, Εικόνα 47, Εικόνα 48, Εικόνα 49 και Εικόνα 50 βλέπουμε σημαντικές διαφορές για τις δύο παραμέτρους που προαναφέραμε. Στο υδραυλικό ύψος βλέπουμε την μέση αύξηση να ισούται με 1.27m και την μέση μείωση της ταχύτητας να ισούται με 12.5%. Οι δύο παραπάνω τιμές μας υποδεικνύουν μία σημαντική μεταβολή στα χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα.

Από την Εικόνα 27, Εικόνα 28, Εικόνα 29, Εικόνα 30 και Εικόνα 31, παρατηρούμε ότι έχει γίνει μία πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των παρατηρημένων τιμών του υδραυλικού ύψους και των προσομοιωμένων τιμών του. Η προσέγγιση αυτή φαίνεται από την παρόμοια μεταβολή που έχουν οι δύο καμπύλες (μπλε και πράσινη). Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, όπως άλλωστε φαίνεται και από τα παραπάνω διαγράμματα, αγνοήθηκαν σκόπιμα λίγες παρατηρημένες τιμές οι οποίες είχαν μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες και για τις οποίες υπήρχαν σημαντικές υποψίες αναξιοπιστίας. Αυτό μπορεί να συνέβη είτε από κάποιο ακραίο καιρικό φαινόμενο, είτε από μία λανθασμένη μέτρηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μία πολύ χαμηλή τιμή που υπάρχει στις παρατηρημένες τιμές του πηγαδιού 1, η οποία έχει τιμή 18.1 και μάλιστα αφορά μέτρηση η οποία έγινε Φεβρουάριο, όπου λόγω της εποχής έχουμε τιμές μεγαλύτερες από το μέσο όρο, ο οποίος στην περίπτωση μας είναι ίσος με 80 m. Η καμπύλη των προσομοιωμένων τιμών έχει αυτή τη μορφή διότι όπως έχει προαναφερθεί οι τιμές των εισροών εισήχθησαν με συνημιτονοειδή μορφή και τα δύο αυτά μεγέθη είναι άρρηκτα συνδεδεμένα.





Εικόνα 51:3-D απεικόνιση περιοχής μελέτης.

## 6. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας και έπειτα από την ολοκλήρωση του μοντέλου είμαστε σε θέση να πούμε ότι το FEFLOW είναι κατάλληλο για προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα. Αυτό αιτιολογείται από τις τιμές του σφάλματος που προέκυψαν. Η μικρότερη τιμή είναι ίση με  $-2.98\text{ m}$  και αντιστοιχεί στο πηγάδι 1. Η μεγαλύτερη τιμή είναι ίση με  $-5.45\text{ m}$  και αντιστοιχεί στο πηγάδι 4. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει υπερεκτίμηση του πραγματικού υδραυλικού ύψους. Το μέσο σφάλμα του μοντέλου είναι ίσο με  $-6.44\text{ m}$  και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ίσο με  $12.94\text{ m}$ . Με βάση τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι πραγματικές τιμές που είχαμε για τα πέντε πηγάδια παρατήρησης βρίσκονται πολύ κοντά με τις προσομοιωμένες τιμές που βρήκαμε από το μοντέλο. Για να μπορούμε να έχουμε αυτά τα αποτελέσματα έπρεπε να ακολουθήσουμε κάποια συγκεκριμένα βήματα και διαδικασίες.

Στην παρούσα εργασία υπήρξε ανάγκη χρήσης ψηφιοποιημένων χαρτών για την καταγραφή και τον προσδιορισμό των γεωτρήσεων, της μορφολογίας του εδάφους και των χαρακτηριστικών του υπεδάφους, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα. Σε μικρότερα πεδία μελέτης δεν είναι απαραίτητη η εκτεταμένη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), όμως στην παρούσα μελέτη, επειδή πρόκειται για μια μεγάλη περιοχή και υπάρχουν πολυάριθμες γεωτρήσεις, καθίσταται απαραίτητη η χρήση GIS για την προετοιμασία των δεδομένων πριν την εισαγωγή τους στο FEFLOW. Η εισαγωγή τους είναι εφικτή μόνο αν βρίσκονται στην μορφή *shapefile* αρχείων. Στο GIS έγινε η ακριβής χωροθέτηση της περιοχής που μελετήθηκε βάση των γεωλογικών σχηματισμών και κυρίως ορισμένων αδιαπέρατων στρωμάτων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και ως σύνορα. Επίσης, έγινε και η ακριβής τοποθέτηση των πηγαδιών παρατήρησης και άντλησης. Η εισαγωγή των πηγαδιών έγινε πρώτα με την χρήση του GIS διότι εκεί έχουμε την δυνατότητα να τα εισάγουμε με τις συντεταγμένες που τους αντιστοιχούν. Στα πηγάδια άντλησης προστέθηκαν και πληροφορίες για τις τιμές παροχής τους.

Για τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, αν υπάρχει έλλειψη δεδομένων. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη δεδομένων για δύο σταθμούς. Για να είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος και να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ των τιμών των δύο σταθμών πρέπει μέσα στα διαθέσιμα δεδομένα να υπάρχουν και κοινές χρονικές περίοδοι για τους δύο γειτονικούς σταθμούς. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή δημιουργείται μια νέα εξίσωση με δύο μεταβλητές που αντιστοιχούν στην παράμετρο του πίνακα A του κάθε σταθμού. Αντικαθιστώντας την παράμετρο του Πίνακα A του ενός σταθμού στην μία μεταβλητή προκύπτει η τιμή της δεύτερης, δηλαδή η παράμετρος του Πίνακα A για τον δεύτερο σταθμό.

Για τις οριακές συνθήκες αρχικά χρησιμοποιήθηκε μία μέση τιμή. Η τιμή αυτή προέκυψε μετά από δοκιμές ώστε να έχει το μικρότερο δυνατό σφάλμα (αρχική βαθμονόμηση). Αυτό έγινε για να μπορέσει να απεικονίζει το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές τιμές του υδραυλικού ύψους. Έπειτα και με βάση τις παραπάνω τιμές αλλά και τις τιμές των βροχοπτώσεων των μετεωρολογικών σταθμών του Τυμπακίου και των Μοιρών από δύο σταθερές τιμές, οι οριακές συνθήκες μετατράπηκαν σε συνημιτονοειδείς συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις αυτές εισήχθησαν με την μορφή αυτή

ώστε να υπάρχει διακύμανση ανάλογα με την εποχή και το μοντέλο να προσεγγίζει πιο πολύ την πραγματικότητα.

Για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας αρχικά χρησιμοποιήθηκαν κάποιες τιμές που αντλήθηκαν από την βάση δεδομένων Enviro-Base. Όμως, λόγω της μεγάλης τιμής του σφάλματος οι τιμές αυτές τροποποιήθηκαν κατά τη διάρκεια βαθμονόμησης του μοντέλου. Οι τελικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είχαν σημαντικές διαφορές, δηλαδή ήταν αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες. Το τελικό αποτέλεσμα μας καταδεικνύει ότι οι τελικές τιμές που προέκυψαν, μέσω αρκετών δοκιμών ήταν οι βέλτιστες δυνατές, αφού με αυτές, οι προσομοιωμένες τιμές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα πλησίασαν τις πραγματικές.

Ένα ακόμη στοιχείο το οποίο μας δείχνει ότι έχει γίνει σωστή βαθμονόμηση είναι η κατεύθυνση της ταχύτητας Darcy. Η κατεύθυνση της συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με την μορφολογία του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, το νερό εισέρχεται από το νότιο και από το βόρειο τμήμα, όπου και έχουν τοποθετηθεί οι δύο οριακές συνθήκες όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20. Έπειτα, ένα μέρος του κατευθύνεται προς το κέντρο της περιοχής και το υπόλοιπο κατευθύνεται νότιο-δυτικά προς την θάλασσα. Το τμήμα του νερού που αρχικά κατευθύνεται προς το κέντρο παίρνει με την σειρά του κατεύθυνση νότιο-δυτική. Τέλος, τοποθετήθηκε και μία επιπλέον οριακή συνθήκη στα ανατολικά της περιοχής ακριβώς πάνω από το πηγάδι 5. Αυτή είναι και η μοναδική οριακή συνθήκη από την οποία το νερό εξέρχεται, δηλαδή έχει κατεύθυνση βόρειο-ανατολική και όχι νότιο-δυτική. Αυτό έγινε ώστε οι προσομοιωμένες τιμές για το πηγάδι αυτό να προσεγγίσουν περισσότερο της πραγματικές τιμές του, και συμφωνεί με παλαιότερες μελέτες, που δείχνουν εισροή νερού προς τον υδροφορέα των Μοιρών από εκείνη την περιοχή.

Αφού έγινε η αρχική βαθμονόμηση, έπειτα εξετάστηκαν ορισμένα σενάρια μείωσης της παροχής άντλησης ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του υδροφορέα σε διαφορετικές συνθήκες. Αυτό έγινε διότι τα τελευταία χρόνια και λόγω της δημιουργίας του φράγματος της Φανερωμένης το οποίο θα καλύψει μέρος των αρδευτικών αναγκών της περιοχής, η ανάγκη για άντληση έχει μειωθεί. Τα σενάρια αυτά ήταν πέντε και κάθε ένα αφορούσε μείωση κατά 10% έως η παροχή άντλησης να πέσει στο μισό της αρχικής. Τα αποτελέσματα των σεναρίων μας δείχνουν ότι με την μείωση της παροχής άντλησης μπορεί να επέλθει σημαντική αύξηση του υδραυλικού ύψους. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στο σενάριο πέντε στο οποίο η άντληση έχει μειωθεί στο μισό της αρχικής. Στο σενάριο αυτό το υδραυλικό ύψος και των πέντε πηγαδιών παρατήρησης δέχεται αύξηση μεγαλύτερη του ενός μέτρου. Μάλιστα το πηγάδι 1 που παρουσιάζει και την μεγαλύτερη μεταβολή δέχεται αύξηση 2.14m. Επίσης, παρατηρείται ότι για το σενάριο ένα (10% μείωση της παροχής άντλησης) το πηγάδι 5 δεν παρουσιάζει μεταβολή στο υδραυλικό ύψος. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι βρίσκεται μακριά από οποιαδήποτε εισροή και επίσης το κοντινότερο πηγάδι άντλησης είναι ανενεργό. Επίσης, η διεύθυνση της ροής είναι αντίθετη από την τοποθεσία του πηγαδιού.

Τα σενάρια αυτά μείωσης της παροχής άντλησης, εξετάστηκαν λόγω της δημιουργίας τα τελευταία χρόνια του φράγματος της Φανερωμένης, το οποίο θα καλύψει μέρος των αρδευτικών αναγκών της περιοχής

## 7.Βιβλιογραφία

- Δεττοράκη Μαρία (2012). Συνδυασμός του μοντέλου προσομοίωσης ροής υπογείων υδάτων Visual MODFLOW με το μοντέλο βελτιστοποίησης GWM για την βέλτιστη διαχείριση του παράκτιου υδροφορέα Τυμπακίου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γιαννάκος Εμμανουήλ (2013). Τρισδιάστατη γεωλογική μοντελοποίηση της λεκάνης του Τυμπακίου με υποστήριξη γεωτρητικών και γεωφυσικών δεδομένων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Ευταξίας Κώστας (2014). Μαθηματική προσομοίωση παράκτιων υδροφορέων με το λογισμικό FEFLOW, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Ε.Χατζούλης.(2005) υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων, διερεύνηση παράκτιου υδροφορέα στην περιοχή ΙΡΙΑ Αργολίδας, Αθήνα.
- Καρατζάς Γεώργιος (2021). Σημειώσεις Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς ρύπων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Διακοπαρασκευάς Παρασκευάς (2020). Προσομοίωση του υπόγειου συστήματος της Μεσσαράς, με χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και εξέταση σεναρίων κλιματικής αλλαγής σύμφωνα με την διακυβερνητική επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος (IPCC), Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Καββαδάς Μιχαήλ (2019). Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τάντος,Β., (2006). Περιβαλλοντική υδρογεωλογική έρευνα του προσχωματισμού υδροφόρου της περιοχής Κιάτου – Κορίνθου, Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής, Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- Παναγόπουλος, Α, (1996). Μαθηματικά ομοιώματα: πανάκεια για τη διερεύνηση και διαχείριση υδατικών πόρων ή απλά ένας ηλεκτρονικός λαβύρινθος, Διεθνές Συνέδριο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΤΕΕ, Λάρισα.
- Αρχοντέλη Κων.Αριστείδη, (2016). Διαχείριση καρστικών υπογείων υδροφορέων με μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής, το παράδειγμα του αλμυρού Ηρακλείου, Κρήτης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο. Θεσσαλονίκη.
- Περάκη Μαρία (2014). Μοντελοποίησης της υπόγειας ροής και μελέτης του φαινομένου της υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα της περιοχής Μαλίων, Κρήτης με χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας FEFLOW, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Anderson, M.,Woessner, W., (1992). Applied groundwater modeling, Simulation of flow and advective transport, London, Academic Press.
- Jakimavieute - Maseliene, V., Mazeika, J., Peteosious, R., (2006). Modelling of coupled groundwater flow an radionuclide transport in crystalline basement using FEFLOW 5.0.
- Γκούμας Χρήστος, (2016). Μελέτη της υπόγειας ροής στον κάμπο Χανίων με χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code), Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Lau, L.K., W.J. Kaufman, and D.K. Todd, Studies of dispersion in a radial flow system, Canal Seepage Research: Dispersion Phenomena in Flow Through Porous Media, Progress Rep. 3, I.E.R. Ser. 93, issue 3, Sanit. Eng. Res. Lab., Dep. of Eng. and School of P.
- 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, 1972.

- Masch, F.E. and K.J. Denny, Grain size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands. Water Resour. Res. 2, 665-677, 1966.
- McGraw-Hill, (1979). Hydraulics of Groundwater.
- Hans-Jörg, G.Diersch (2014). FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer.
- Trefry, M. G., & Muffels, C. (2007). FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. Ground Water, 45(5), 525–528.
- Koskinen, L., Laitinen, M., Löfman, J., Meling, K., & Meszaros, F. (1996). FEFLOW: A finite element code for simulating groundwater flow, heat transfer and solute transport. In C. A. Brebbia, P. Zannetti, & D. W. Pepper (Eds.), Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies VII: Environmental Studies Vol 2 (pp. 287-297). Computational Mechanics Publications. WIT Transactions on Ecology and the Environment Vol. 10

### Διαδικτυακές πηγές

- Meteoblue.com, [https://www.meteoblue.com/el/καιρός/historyclimate/climatemodelled/Τυμπακι\\_Ελληνική-Δημοκρατία\\_252862](https://www.meteoblue.com/el/καιρός/historyclimate/climatemodelled/Τυμπακι_Ελληνική-Δημοκρατία_252862), [02/2021]
- Meteo24news.gr, <https://www.meteo24news.gr/2014/01/to-klima-tis-kritis.html>, [11/2020]
- Πολυτεχνείο Κρήτης, Eclass, <https://www.eclass.tuc.gr>, [2/2021]
- Meteo.gr, <https://www.meteo.gr>, [11/2020]
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, [http://lib.ntua.gr/?page\\_id=74](http://lib.ntua.gr/?page_id=74), [12/2020]
- United States Geological Survey, <https://www.usgs.gov>, [03/2021]
- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>, [11/2020]