



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ERDEMLI, MERSIN,
TURKEY ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ PTC
(PRINCETON TRANSPORT CODE)**

ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ

ΚΟΛΛΙΑΔΗΜΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Καθηγητής Βαρουχάκης Εμμανουήλ

ΧΑΝΙΑ 2022

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 τον 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

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής Princeton Transport Code, για τη προσομοίωση της ροής υπογείων υδάτων στην περιοχή Erdemli, Mersin, Turkey. Το Erdemli, βρίσκεται στη Νότια Τουρκία και είναι παραθαλάσσια περιοχή, η οποία έχει αγροτικές και τουριστικές χρήσεις.

Για την ορθή προσομοίωση της υπόγειας ροής, πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων με σκοπό την εισαγωγή τους στο μοντέλο PTC. Προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία είναι το Microsoft Excel και το ArcGIS. Στο Microsoft Excel έγινε επεξεργασία τιμών και ταξινόμηση τους για την ευκολότερη κατανόηση των δεδομένων. Το ArcGIS χρησιμοποιήθηκε για επεξεργασία χαρτών και παρουσίαση πινάκων για τιμές εισόδου στο μοντέλο. Στο μοντέλο PTC, έγινε εισαγωγή 22 πηγαδιών, για τα οποία υπήρχαν δεδομένα υδραυλικών υψών και ρυθμού άντλησης, για το χρονικό διάστημα 2003-2008. Έπειτα, εισήχθησαν τα δεδομένα βροχόπτωσης για τις αντίστοιχες χρονιές, καθώς και οι ισοϋψείς υψομέτρου της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, για την γεωλογία της περιοχής, έγινε εισαγωγή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Τέλος, ορίστηκαν οι οριακές τιμές στα βόρεια και νότια σύνορα του υδροφορέα της περιοχής μελέτης και τελέσθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου.

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έχει ως σκοπό, μέσω της μοντελοποίησης του υδροφορέα, την προσομοίωση του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και την αποτύπωση της ροής του νερού.

Abstract

This dissertation deals with the use of the Princeton Transport Code groundwater flow model, to simulate groundwater flow in the Erdemli, Mersin, Turkey area. Erdemli is located in southern Turkey and is a coastal area, which has agricultural and tourist uses.

For the correct simulation of the underground flow, the appropriate data processing was performed in order to insert them in the PTC model. Programs used for editing are Microsoft Excel and ArcGIS. The values were edited and sorted in Microsoft Excel for an easier data comprehension. ArcGIS was used to edit maps and present informational tables for input values to the model. In the present study 22 wells were imported to the PTC model, which include data on hydraulic heads and pumping rates, for the period 2003-2008. Then, the precipitation data for the respective years were entered into the model, as well as the altitude equivalents of the study area. Then, for the geology of the area, the hydraulic conductivity was introduced. Finally, the values of the northern and southern boundaries conditions were introduced and the model was calibrated.

The elaboration of the present dissertation aims, through the modeling of the aquifer, to simulate the hydraulic heads of the aquifer as well as to capture the water flow.

The present thesis is a part of the project funded by the General Secretariat for Research and Technology of the Ministry of Development and Investments under the PRIMA Programme (Sustain-COAST). PRIMA is an Art.185 initiative supported and co-funded under Horizon 2020, the European Union's Programme for Research and Innovation.



The PRIMA programme is an Art.185 initiative supported and funded under Horizon 2020, the European Union's Programme for Research and Innovation.

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καρατζά Γεώργιο, ο οποίος σαν επιβλέποντας καθηγητής με καθοδήγησε και η βοήθεια του ήταν πολύτιμη. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γκούμα Χρήστο για τη βοήθεια και τις συμβουλές του καθώς και τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο και τον κ. Βαρουχάκη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--|-----|
| Περίληψη | ii |
| Abstract..... | iii |
| Ευχαριστίες..... | iv |
| Πίνακας Περιεχομένων | v |
| Πίνακας Εικόνων | vi |
| 1. Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Σκοπός της Εργασίας..... | 1 |
| 1.2 Υδάτινοι Πόροι | 1 |
| 1.2.1 Υδρολογικός κύκλος..... | 2 |
| 1.2.2 Υδατικό Ισοζύγιο | 3 |
| 1.3 Υπόγεια Ύδατα | 4 |
| 1.4 Υδροφορείς | 6 |
| 1.5 Παράμετροι Υδροφορέων..... | 6 |
| 2. Περιοχή Μελέτης | 9 |
| 2.1 Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης..... | 9 |
| 2.2 Λεκάνες Απορροής της περιοχής Mersin-Erdemli | 11 |
| 2.3 Γεωλογία της περιοχής Mersin-Erdemli..... | 16 |
| 2.4 Κλιματικές-Μετεωρολογικές Συνθήκες..... | 17 |
| 3. Μοντελοποίηση με το Μοντέλο PRINCETON TRANSPORT CODE..... | 20 |
| 3.1 Μοντελοποίηση Υπόγειων Υδάτων..... | 20 |
| 3.2 Χρήση του ArgusONE για το μοντέλο PTC..... | 20 |
| 3.2.1 Το πρόγραμμα ArgusONE | 20 |
| 3.2.2 Το μοντέλο PTC | 21 |
| 4. Εισαγωγή και Επεξεργασία Δεδομένων..... | 24 |
| 4.1 Το ArcGIS στην επεξεργασία των δεδομένων..... | 24 |
| 4.2 Το περιβάλλον του μοντέλου PTC μέσω του ArgusONE..... | 28 |
| 4.3 Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο PTC..... | 31 |
| 4.4 Βαθμονόμηση Μοντέλου | 37 |
| 5. Αποτελέσματα | 40 |
| 6. Συμπεράσματα | 52 |
| Βιβλιογραφία | 53 |

Πίνακας Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1.1 Παγκόσμια ποσότητα νερού (USGS, Accessed 17/12/2021) | 1 |
| Εικόνα 1.2 Ο κύκλος του νερού (USGS, Accessed 17/12/2021) | 2 |
| Εικόνα 1.3 Απεικόνιση κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης (USGS, Accessed 17/12/2021) . | 4 |
| Εικόνα 2.1 Χάρτης της περιοχής Erdemli (Erdemli Government Site, Accessed 14/12/2021) | 9 |
| Εικόνα 2.2 Χάρτης χρήσης γης (CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service) | 10 |
| Εικόνα 2.3 Περιοχές με πρόβλημα ύδρευσης στο Erdemli (Koukadaki et al, 2007) | 10 |
| Εικόνα 2.4 Συνολικός χάρτης λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey | 11 |
| Εικόνα 2.5 Χάρτης λεκανών απορροής στα παράλια της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey | 12 |
| Εικόνα 2.6 Χάρτης δυτικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey..... | 13 |
| Εικόνα 2.7 Χάρτης κεντρικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey..... | 14 |
| Εικόνα 2.8 Χάρτης ανατολικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey..... | 15 |
| Εικόνα 2.9 Γενική στρωματογραφία της λεκάνης απορροής της Mersin-Erdemli (Demirel & Güler, 2005)..... | 16 |
| Εικόνα 2.10 Κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger (Beck et al, 2018) | 18 |
| Εικόνα 2.11 Μέση θερμοκρασία Erdemli (Climate Data, Accessed 17/12/2021) | 18 |
| Εικόνα 2.12 Ραβδόγραμμα καιρικών συνθηκών Erdemli ανά μήνα (Climate Data, Accessed 17/12/2021) | 19 |
| Εικόνα 2.13 Γράφημα καιρικών μέσων όρων Erdemli ανά μήνα (Climate Data, 17/12/2021) | 19 |
| Εικόνα 4.1 Εμφάνιση της εικόνας αναμονής έναρξης του ArcMap | 24 |
| Εικόνα 4.2 Χάρτης ορίων περιοχής μελέτης και τοποθεσίας αρχικών πηγαδιών..... | 25 |
| Εικόνα 4.3 Χάρτης τοποθεσίας τελικών πηγαδιών..... | 25 |
| Εικόνα 4.4 Δεδομένα τελικών πηγαδιών όπως φαίνονται μέσα από την εφαρμογή ArcMap | 26 |
| Εικόνα 4.5 Χάρτης ισοϋψών περιοχής μελέτης | 26 |
| Εικόνα 4.6 Χάρτης γεωλογίας για υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης για τον αρχικό αριθμό πηγαδιών | 27 |
| Εικόνα 4.7 Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας και γεωλογικών στρωμάτων..... | 27 |
| Εικόνα 4.8 Χάρτης οριακών συνθηκών εισροών της περιοχής μελέτης | 28 |
| Εικόνα 4.9 Εμφάνιση της οθόνης έναρξης του ArgusOne για φοιτητές | 28 |
| Εικόνα 4.10 Αρχικό περιβάλλον του ArgusOne..... | 29 |
| Εικόνα 4.11 Καρτέλα έναρξης παραθύρου PTC Configuration..... | 31 |
| Εικόνα 4.12 Καρτέλα Stresses του παραθύρου PTC Configuration | 32 |
| Εικόνα 4.13 Πολύγωνο περιοχής μελέτης μαζί με τις γεωτρήσεις | 32 |
| Εικόνα 4.14 Χάρτης ισοϋψών καμπυλών υψομέτρου..... | 33 |
| Εικόνα 4.15 Δεδομένα διήθησης λόγω βροχοπτώσεως | 34 |
| Εικόνα 4.16 Δεδομένα εισροών νερού έξω από την περιοχή μελέτης | 34 |
| Εικόνα 4.17 Χάρτης οριακών συνθηκών για το επίπεδο L3 | 35 |
| Εικόνα 4.18 Πλέγμα στοιχείων της περιοχής μελέτης του μοντέλου PTC | 36 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 4.19 Παράθυρο εκτέλεσης MS-DOS του μοντέλου PTC | 36 |
| Εικόνα 4.20 Γράφημα ισοϋψών υδραυλικών υψών για το μοντέλο FEFLOW | 37 |
| Εικόνα 4.21 Πίνακας εισροών για βαθμονόμηση του μοντέλου PTC | 38 |
| Εικόνα 4.22 Γράφημα σύγκρισης αποτελεσμάτων μοντέλων FEFLOW και PTC | 38 |
| Εικόνα 4.23 Γράφημα ισοϋψών υδραυλικών υψών για το μοντέλο PTC..... | 39 |
| Εικόνα 4.24 Γράφημα ταχύτητας ροής για το μοντέλο PTC | 39 |
| Εικόνα 5.1 Γράφημα υδραυλικών υψών 1 ^{ης} περιόδου..... | 40 |
| Εικόνα 5.2 Γράφημα υδραυλικών υψών 3 ^{ης} περιόδου..... | 41 |
| Εικόνα 5.3 Γράφημα υδραυλικών υψών 5 ^{ης} περιόδου..... | 41 |
| Εικόνα 5.4 Γράφημα υδραυλικών υψών 7 ^{ης} περιόδου..... | 42 |
| Εικόνα 5.5 Γράφημα υδραυλικών υψών 9 ^{ης} περιόδου..... | 42 |
| Εικόνα 5.6 Γράφημα ταχυτήτων ροής 1 ^{ης} περιόδου..... | 43 |
| Εικόνα 5.7 Γράφημα ταχυτήτων ροής 3 ^{ης} περιόδου..... | 43 |
| Εικόνα 5.8 Γράφημα ταχυτήτων ροής 5 ^{ης} περιόδου..... | 44 |
| Εικόνα 5.9 Γράφημα ταχυτήτων ροής 7 ^{ης} περιόδου..... | 44 |
| Εικόνα 5.10 Γράφημα ταχυτήτων ροής 9 ^{ης} περιόδου..... | 45 |
| Εικόνα 5.11 Γράφημα υδραυλικών υψών 2 ^{ης} περιόδου..... | 46 |
| Εικόνα 5.12 Γράφημα υδραυλικών υψών 4 ^{ης} περιόδου..... | 46 |
| Εικόνα 5.13 Γράφημα υδραυλικών υψών 6 ^{ης} περιόδου | 47 |
| Εικόνα 5.14 Γράφημα υδραυλικών υψών 8 ^{ης} περιόδου | 47 |
| Εικόνα 5.15 Γράφημα υδραυλικών υψών 10 ^{ης} περιόδου | 48 |
| Εικόνα 5.16 Γράφημα ταχυτήτων ροής 2 ^{ης} περιόδου..... | 48 |
| Εικόνα 5.17 Γράφημα ταχυτήτων ροής 4 ^{ης} περιόδου..... | 49 |
| Εικόνα 5.18 Γράφημα ταχυτήτων ροής 6 ^{ης} περιόδου..... | 49 |
| Εικόνα 5.19 Γράφημα ταχυτήτων ροής 8 ^{ης} περιόδου..... | 50 |
| Εικόνα 5.20 Γράφημα ταχυτήτων ροής 10 ^{ης} περιόδου | 50 |
| Εικόνα 5.21 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα υδραυλικά ύψη | 51 |
| Εικόνα 5.22 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες ροής | 51 |

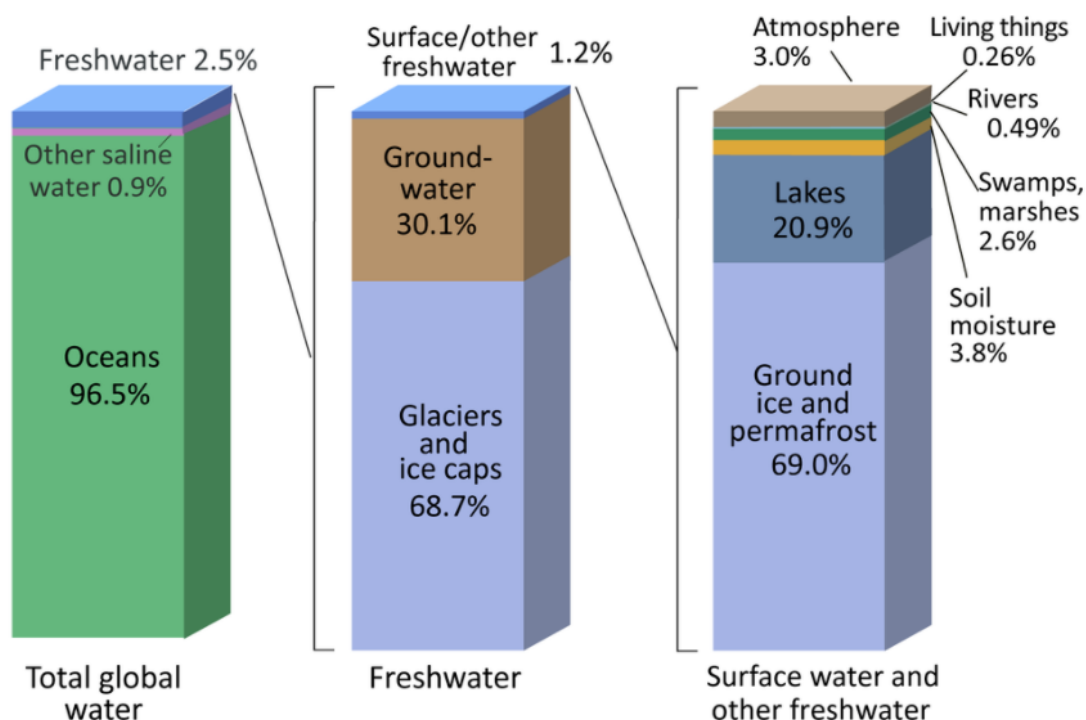
1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ροής των υπογείων υδάτων σε παραθαλάσσια περιοχή όπου παρατηρείται έντονη άντληση από πηγάδια. Η μελέτη εκπονείται για τη περιοχή Erdemli της νότιας Τουρκίας. Το Erdemli είναι η τρίτη μεγαλύτερη πόλη της περιφέρειας Mersin, η οποία κατοικείται κυρίως από αγρότες και χρησιμοποιείται για την καλλιέργεια διάφορων προϊόντων. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής γίνεται με τη χρήση του μοντέλου PTC. Το μοντέλο Princeton Transport Code λειτουργεί μέσω του λογισμικού ArgusOne και στα δεδομένα έγινε επεξεργασία, ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο, μέσω του λογισμικού ArcGIS.

1.2 Υδάτινοι Πόροι

Η επιφάνεια της Γης αποτελείται από περίπου 71% νερό, το μεγαλύτερο ποσοστό του οποίου βρίσκεται στους ωκεανούς. Νερό μπορεί επίσης να εντοπιστεί στον αέρα ως υδρατμοί, στους ποταμούς, στις λίμνες, σε παγόβουνα και παγετώνες, στο έδαφος ως υγρασία, καθώς και στους υδροφορείς. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω ραβδόγραμμα μόνο το 2.5% του συνολικού νερού που υπάρχει στη Γη είναι γλυκό νερό, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της ανθρώπινης ζωής. Το μεγαλύτερο ποσοστό του γλυκού νερού βρίσκεται σε μορφή πάγου ή ως υπόγεια ύδατα, έτσι απομένει ένα πολύ μικρό ποσοστό το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των οργανισμών που υπάρχουν στη Γη. Από τα επιφανειακά ύδατα, το μεγαλύτερο μέρος του νερού παρατηρείται στις λίμνες, ενώ ένα μικρό κομμάτι βρίσκεται στα ποτάμια, τα οποία είναι μεγάλη πηγή νερού για τους ανθρώπους. [USGS, Accessed 17/12/2021]



Εικόνα 1.1 Παγκόσμια ποσότητα νερού (USGS, Accessed 17/12/2021)

1.2.1 Υδρολογικός κύκλος

Ο όρος υδρολογικός κύκλος, αφορά την κίνηση του νερού στην επιφάνεια της Γης, καθώς και κάτω κι από πάνω από αυτή. Το νερό στη Γη είναι σε διαρκή κίνηση και αλλαγή της φυσικής του κατάστασης, από υγρό μεταμορφώνεται σε αέριο ή πάγο και μετά γίνεται πάλι υγρό, μέσω διάφορων διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Ο ήλιος δίνει θερμότητα έτσι ώστε να εξατμιστεί το νερό από τα επιφανειακά ύδατα με τη μορφή υδρατμών, οι οποίοι στη συνέχεια συμπυκνώνονται σχηματίζοντας σύννεφα. Σύννεφα μπορούν να παραχθούν και από ενεργά ηφαίστεια τα οποία παράγουν επίσης ατμό. Αέρια ρεύματα παρασύρουν τα σύννεφα γύρω από τη Γη. Μέσω του υετού, το νερό στα ψυχρά κλίματα επιστρέφει σαν χιόνι, πάγος ή παγετώνες. Το χιόνι, λιώνει και επιστρέφει στα επιφανειακά ύδατα ή εξατμίζεται στον αέρα (εξάχνωση). Στα πιο ζεστά κλίματα, με επιφανειακή απορροή, τα κατακρημνίσματα ρέουν από τα υψηλότερα υψόμετρα στα χαμηλότερα, ανατροφοδοτώντας λίμνες, ποτάμια και ωκεανούς. Μέρος της βροχής, διηθείται στο έδαφος και σε μικρό βάθος λαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών, για να το αποβάλουν στην ατμόσφαιρα από τα φύλλα τους μέσω της εξατμισοδιαπνοής, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος τροφοδοτεί τα υπόγεια ύδατα. Τα υπόγεια ύδατα με τη σειρά τους παραμένουν στο υπέδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα και εκρέουν στους ωκεανούς, συντηρώντας με αυτό τον τρόπο τον κύκλο του νερού. [USGS, Accessed 17/12/2021]



Εικόνα 1.2 Ο κύκλος του νερού (USGS, Accessed 17/12/2021)

1.2.2 Υδατικό Ισοζύγιο

Το υδατικό ή υδρολογικό ισοζύγιο είναι η μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου μιας λεκάνης απορροής. Λεκάνη απορροής ορίζεται η περιοχή η οποία αποστραγγίζεται από ένα ρέμα ή από ένα σύστημα συγκοινωνούντων ρεμάτων τα οποία καταλήγουν σε ένα μοναδικό σημείο απορροής.[Καρατζάς, 2021]

Το υδατικό ισοζύγιο εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - O \quad (1.1)$$

όπου,

- **I** η μέση εισροή στη λεκάνη απορροής
- **O** η μέση εκροή από τη λεκάνη απορροής
- **ΔS** ο ρυθμός αποθήκευσης νερού στη λεκάνη απορροής
- **Δt** καθορισμένο χρονικό διάστημα

Η εισροές σε μια λεκάνη απορροής προέρχονται από κατακρημνίσεις και εκροές έχουν διάφορες μορφές, οι οποίες διαμορφώνουν την παρακάτω εξίσωση:

$$\Delta S = P - R - E - T \quad (1.2)$$

όπου,

- **P** ποσότητα νερού από κατακρημνίσεις
- **R** ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά
- **E** ποσότητα νερού που απορρέει υπόγεια
- **T** ποσότητα νερού που διαπνέεται από φυλλώματα βλάστησης

Αναλύοντας επιμέρους τους όρους της (1.2):

Κατακρήμνιση (P)

Ως κατακρήμνιση αναφέρεται η βροχόπτωση η οποία χωρίζεται σε τρεις μορφές, σε εκείνες που οφείλονται σε κίνηση θερμών και ψυχρών μετώπων, σε εκείνες που συμβαίνουν λόγω φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και σε αυτές που προέρχονται από ορογραφικές επιδράσεις. Μετρήσεις βροχόπτωσης μπορούν να παρθούν σε κάθε ανοιχτό δοχείο, το όργανο που χρησιμοποιείται λέγεται βροχόμετρο και η τοποθέτησή του πρέπει να είναι κοντά στο έδαφος ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση από τον άνεμο. Για κατοικημένες περιοχές, θα πρέπει να τοποθετηθεί μακριά από εμπόδια, όπως κτήρια και δέντρα. Οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται καθημερινά και για τον υπολογισμό για μια περιοχή θα πρέπει να τοποθετούνται αρκετά ομοιόμορφα κατανεμημένα βροχόμετρα, για τον ορθό υπολογισμό του μέσου όρου του πραγματικού ύψους βροχόπτωσης. [Καρατζάς, 2021]

Εξάτμιση (E)

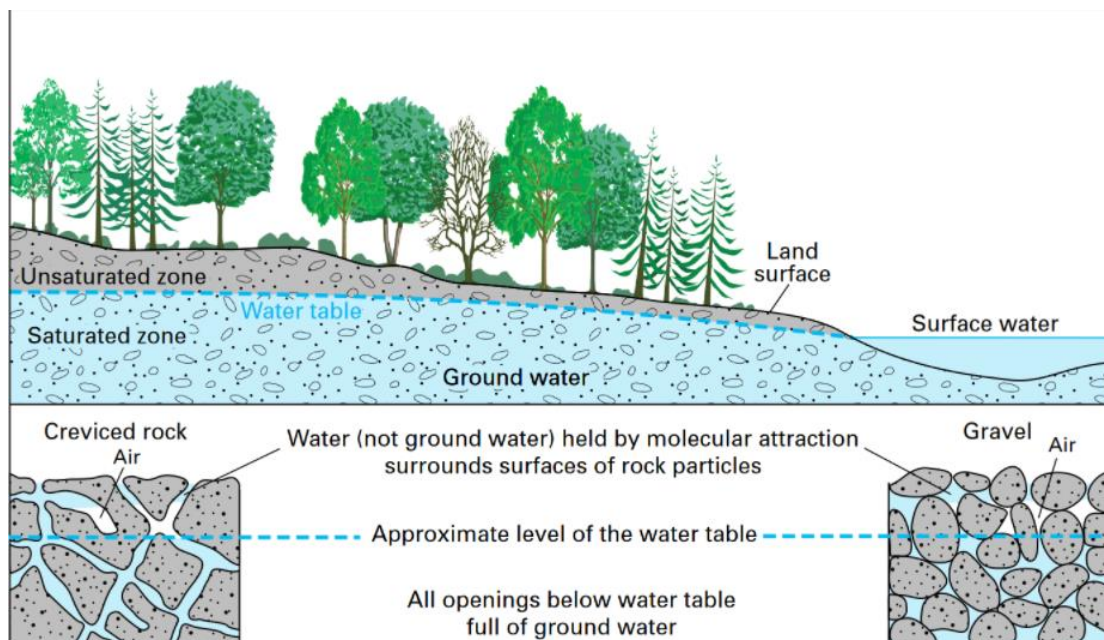
Στο φαινόμενο της εξάτμισης, η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο θερμαίνει τα νερά που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης, όπως λίμνες και θάλασσες, με αποτέλεσμα την εξάτμισή τους. Το φαινόμενο μπορούν να επηρεάσουν η θερμοκρασία του ύδατος, η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία του αέρα που έρχεται σε άμεση επαφή με το υδάτινο σώμα και ο άνεμος. Είναι πιθανή η λανθασμένη μέτρηση εάν, υπάρχει δυνατή βροχόπτωση, υπάρχουν πτηνά στον αέρα και γενικότερα η κίνηση του ανέμου. [Καρατζάς, 2021]

Εξατμισοδιαπνοή (T)

Με τον όρο εξατμισοδιαπνοή, μετράται η ολική απώλεια νερού από τη περιοχή μελέτης. Η εξατμισοδιαπνοή αποτελείται από την διεργασία της εξάτμισης και της διαπνοής, όμως είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθούν ξεχωριστά αυτοί οι όροι, επομένως μετράται το συνολικό τους αποτέλεσμα. Η εξατμισοδιαπνοή χωρίζεται σε δυναμική, δηλαδή η απώλεια νερού για μια χρονική στιγμή που δεν φαίνεται έλλειμα νερού στο υπέδαφος από την βλάστηση και σε πραγματική, όπου αποτελεί το πραγματικό ποσό της εξατμισοδιαπνοής για τις συνθήκες πεδίου. [Καρατζάς, 2021]

1.3 Υπόγεια Ύδατα

Στα υπόγεια ύδατα το νερό διηθείται κάτω από το έδαφος και χωρίζεται σε δύο ζώνες, στην κορεσμένη και την ακόρεστη.



Εικόνα 1.3 Απεικόνιση κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης (USGS, Accessed 17/12/2021)

Η ακόρεστη ζώνη ορίζεται ως η ζώνη του υπόγειου ύδατος, όπου οι πόροι του εδάφους καταλαμβάνονται ταυτόχρονα από αέρα και νερό. Η ζώνη αυτή διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Τη ζώνη του εδαφικού ύδατος, που εκτείνεται από την επιφάνεια μέχρι τις ρίζες των φυτών.
- Τη ζώνη τριχοειδών φαινομένων, η οποία εκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι το όριο στο οποίο διαφαίνονται τριχοειδή φαινόμενα.

Η τριχοειδής ανύψωση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h_c = \frac{2\tau}{\varepsilon R} \sigma \nu \nu \varphi \quad (1.3)$$

όπου,

- τ η επιφανειακή τάση
- ε το ειδικό βάρος του νερού
- R η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα
- φ η γωνία ανάμεσα στα τοιχώματα του μηνίσκου και του σωλήνα

Για τον υπολογισμό του νερού στην ακόρεστη ζώνη χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \quad (1.4)$$

όπου,

- V_w ο όγκος του νερού
- V_T ο όγκος του μέσου

Η κορεσμένη ζώνη ορίζεται η ζώνη του υπόγειου ύδατος, όπου όλοι οι πόροι και ρωγμές των πετρωμάτων είναι πλήρως γεμάτοι με νερό και έχει μικρότερη πίεση από την υδροστατική. Ο υδροφόρος ορίζοντας είναι το ανώτατο όριο της ζώνης, όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. [Καρατζάς, 2021]

1.4 Υδροφορείς

Υδροφορείς είναι σχηματισμοί στο υπέδαφος, οι οποίοι περιέχουν μεγάλες ποσότητες υλικών κορεσμένων με νερό, όπου χρησιμοποιούνται ως πηγές νερού μέσω φρεατίων και πηγαδιών. Κατηγοριοποιούνται, ανάλογα με τη θέση τους, σε περιορισμένους ή αρτεσιανούς και ελεύθερους. Στους περιορισμένους υδροφορείς το νερό βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται από πάνω και κάτω από αδιαπέρατα στρώματα. [Καρατζάς, 2021]

Ελεύθεροι Υδροφορείς

Ελεύθεροι ονομάζονται οι υδροφορείς οι οποίοι οριοθετούνται στην κάτω πλευρά από ένα αδιαπέραστο στρώμα και στην πάνω πλευρά από ένα διαπερατό στρώμα. Επομένως, η πάνω πλευρά του υδροφορέα πρόκειται για την ελεύθερη επιφάνεια των υπογείων υδάτων, όπου η υδροστατική πίεση ταυτίζεται με την ατμοσφαιρική. Ανάλογα με τη στάθμη του νερού μεταβάλλεται και ο όγκος του αποθηκευμένου νερού. [Καρατζάς, 2021]

Αρτεσιανοί Υδροφορείς

Αρτεσιανοί ή περιορισμένοι υδροφορείς ονομάζονται εκείνοι που περιέχονται ανάμεσα από αδιαπέρατα γεωλογικά στρώματα στο άνω και κάτω μέρος τους. Σε όλο τους το πάχος είναι κορεσμένοι και έχουν πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. [Καρατζάς, 2021]

Ημιαρτεσιανοί Υδροφορείς

Ημιαρτεσιανοί υδροφορείς ονομάζονται οι αρτεσιανοί υδροφορείς στους οποίους το υπερκείμενο στρώμα παρουσιάζει μικρή υδατοπερατότητα. Πρόκειται για υδροφορείς που αναπτύσσονται σε καρστικά (ανθρακικά) και πορώδη (κοκκώδη) πετρώματα. [Καρατζάς, 2021]

1.5 Παράμετροι Υδροφορέων

Πορώδες (n)

Το ποσοστό μιας εδαφικής στρώσεως, το οποίο καταλαμβάνεται από νερό ή αέρα, ονομάζεται πορώδες και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{V_V}{V_0} \quad (1.5)$$

όπου,

- V_V ο όγκος των κενών
- V_0 ο συνολικός όγκος του δείγματος

Το πορώδες μπορεί να επηρεαστεί από τη σύνθεση της κοκκομετρίας του εδάφους, τη διάταξη των κόκκων και το σχήμα των κόκκων. [Καρατζάς, 2021]

Σημαντική παράμετρος είναι επίσης το ενεργό πορώδες ή ειδική απόδοση, η οποία αφορά το ποσοστό των πόρων του εδάφους το οποίο μπορεί να βοηθήσει τη ροή του νερού, αφού μερικοί πόροι δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$n_e = \frac{V_\gamma}{V_0} \quad (1.6)$$

όπου,

- V_γ ο όγκος του νερού που στραγγίζεται λόγω βαρύτητας
- V_0 ο συνολικός όγκος του εδάφους

Χρησιμοποιείται επίσης ο όρος ειδική συγκράτηση (S_r), ο οποίος ορίζεται ως η διαφορά του ολικού πορώδες μείον το ενεργό πορώδες. [Καρατζάς, 2021]

Υδραυλική Αγωγιμότητα (K)

Ο όρος της υδραυλικής αγωγιμότητας προέρχεται από τον γάλλο μηχανικό Henry Darcy, ο οποίος μετά από μελέτη συμπεράνε πως η ισχύει η παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.7)$$

όπου,

- Q η παροχή (m^3/d)
- A η επιφάνεια του εδάφους (m^2)
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (m/d)
- Δh η απώλεια φορτίου (m)
- L το μήκος της στήλης (m)
- q η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy (m/d)

Ταχύτητα Διήθησης (q_p)

Η ταχύτητα διήθησης, εν αντιθέσει με την ταχύτητα Darcy, λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους που υπάρχουν στην επιφάνεια ροής. [Καρατζάς, 2021]

Η πραγματική ταχύτητα του ρευστού ορίζεται:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.8)$$

όπου,

- q_p η ταχύτητα διήθησης (m/d)
- Q ο ρυθμός παροχής (m^3/d)
- A η επιφάνεια του εδάφους (m^2)
- n το πορώδες
- q η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy (m/d)
- K η υδραυλική αγωγιμότητα (m/d)
- dh η απώλεια φορτίου (m)
- dl το μήκος της στήλης (m)

Ειδική Διαπερατότητα (k)

Η ειδική διαπερατότητα ενός πορώδους μέσου ορίζεται ως το γινόμενο ενός συντελεστή (C) που εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, τη σφαιρικότητά και τη διάταξή τους, επί το τετράγωνο της διαμέτρου ενός σφαιρικού πόρου (d). [Καρατζάς, 2021]

Προκύπτει από την εξίσωση του νόμου Darcy λυμένη ως προς την υδραυλική αγωγιμότητα:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (1.9)$$

όπου,

$$k = Cd^2$$

Συντελεστής Μεταβασιμότητας (T)

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας αφορά τον ρυθμό κίνησης του νερού με δεδομένο κινητικό ιξώδες μέσω ενός υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση. Μαθηματικά εκφράζεται ως το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας επί το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα και μονάδα μέτρησης (m^2/d).

$$T = Kb \quad (1.10)$$

Συντελεστής Αποθηκευτικότητας

Η ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει νερό ορίζεται ως η αποθηκευτικότητά του. Παράγοντες που επηρεάζουν την αποθηκευτικότητα είναι το είδος του υδροφορέα, η συμπίεστικότητα του νερού, η συμπίεστικότητα του υλικού, καθώς και η πλήρωση και εκκένωση των πόρων. [Καββαδάς, 2019]

2. Περιοχή Μελέτης

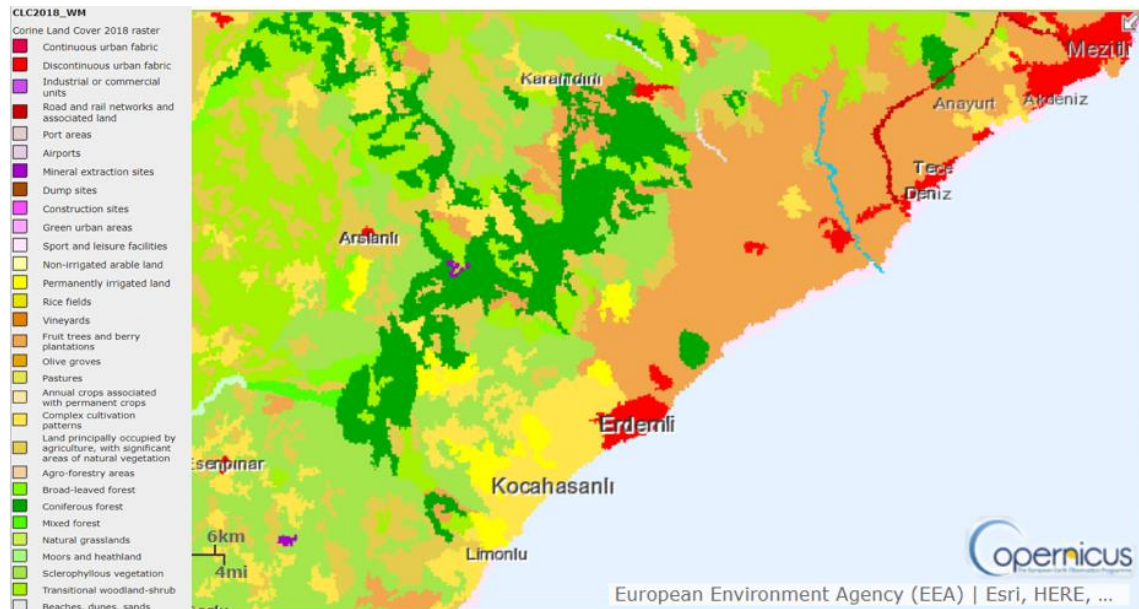
2.1 Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης

Ο παράκτιος υδροφορέας του Erdemli βρίσκεται περίπου 30 km δυτικά του κέντρο της πόλης Mersin στην Νότιο Ανατολική Τουρκία, καλύπτοντας μια έκταση 45 km² ανάμεσα στα γεωγραφικά πλάτη 36°34' – 36°39' Β και γεωγραφικά μήκη 34°14' – 34°21' Α. Το Erdemli περικλείεται από τις περιοχές Mezitli στα ανατολικά, Silifke στα δυτικά, συνορεύει με την επαρχία Karaman στα βόρεια και στα νότια βρέχεται από τη Μεσόγειο Θάλασσα. Η περιοχή εκτείνεται από την μεσογειακή παράκτια πεδιάδα μέχρι τα βουνά του Ταύρου. Στο Erdemli υπάρχουν ορισμένα παραρτήματα τμημάτων του Πανεπιστημίου της Μερσίνης, ενώ το Τεχνικό Πανεπιστήμιο Μέσης Ανατολής στην Άγκυρα έχει μεταπτυχιακό Ινστιτούτο Θαλασσίων Επιστημών, το οποίο παρακολουθεί την μεσογειακές φώκιες που φιλοξενεί η παράκτια περιοχή. Αποτελεί την μεγαλύτερη γεωργική περιοχή της επαρχίας της Mersin, η οποία κατοικείται κυρίως από αγρότες. Ο πληθυσμός της περιοχής για το 2019 είναι 140,331 άτομα. Οι καλλιέργειες αποτελούν εσπεριδοειδή, μπανάνες και διάφορα φρούτα και λαχανικά που καλλιεργούνται όλο το χρόνο σε ανοιχτά χωράφια ή θερμοκήπια. Στα βουνά υπάρχουν λιβάδια φυτεμένα με όσπρια και φρούτα όπως μήλα, ροδάκινα και κεράσια, καθώς και αμπέλια ελαιώνες και συκίες.



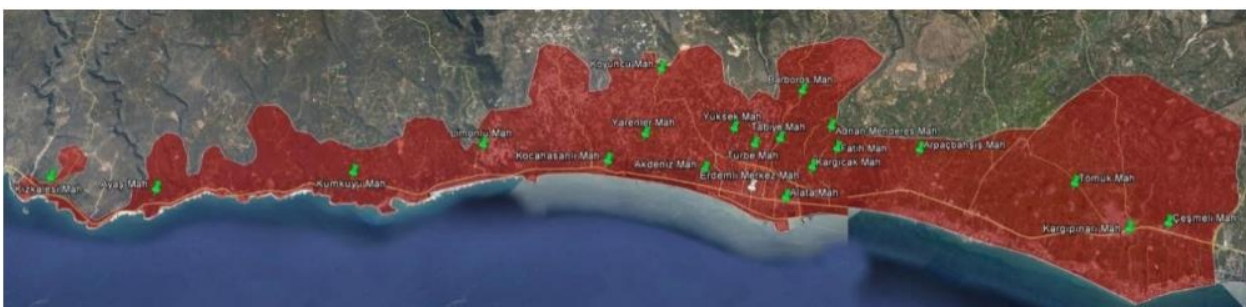
Εικόνα 2.1 Χάρτης της περιοχής Erdemli (Erdemli Government Site, Accessed 14/12/2021)

Πρόσφατα , τα τελευταία 25 χρόνια, η παράκτια περιοχή από τη πόλη της Mersin μέχρι το Erdemli, αποτελείται από αστικό ιστό, όπως βίλες και συγκροτήματα πολυκατοικιών, τα οποία είναι κυρίως κατοικήσιμα τους καλοκαιρινούς μήνες ως εξοχικές κατοικίες. Η αύξηση του πληθυσμού ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, σε συνδυασμό με την αγροτική ανάπτυξη, αυξάνει την απαίτηση σε γλυκό νερό την στιγμή που παρατηρείται η πιο άνυδρη περίοδος του χρόνου. Η παροχή νερού, για τους περισσότερους δήμους της περιοχής, προέρχεται από αυτοσχέδια πηγάδια. [Koukadaki et al, 2007]



Εικόνα 2.2 Χάρτης χρήσης γης (CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service)

Τη θερινή περίοδο που παρατηρείται η αύξηση στη ζήτηση νερού, φαίνεται να υπάρχουν προβλήματα ύδρευσης σε αρκετές περιοχές της λεκάνης απορροής της Mersin, μερικές είναι Aydinlar-Sarikaya, Arslanlı, Hacialanlı και Esenpinar, οι οποίες έχουν μεγάλο αριθμό πηγών νερού. Αυτό οφείλεται στην ανοργάνωτη διαχείριση των υδάτινων πόρων. [Koukadaki et al, 2007]

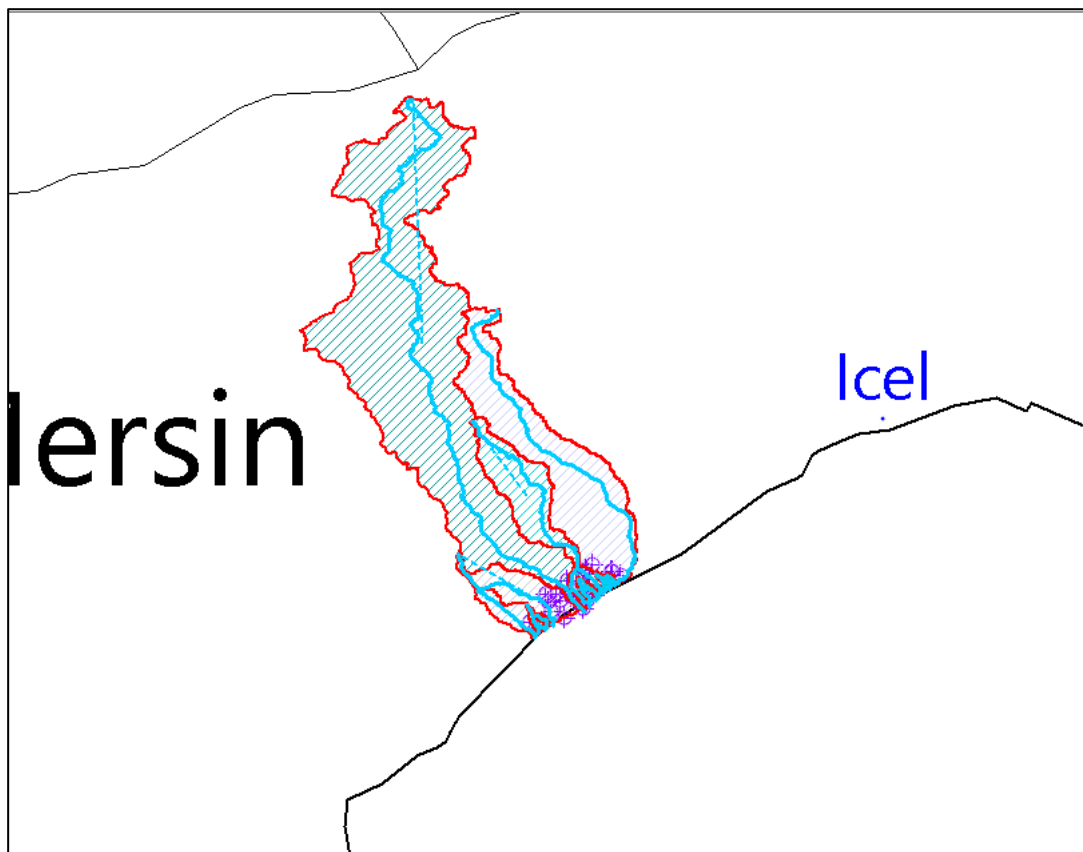


Εικόνα 2.3 Περιοχές με πρόβλημα ύδρευσης στο Erdemli (Koukadaki et al, 2007)

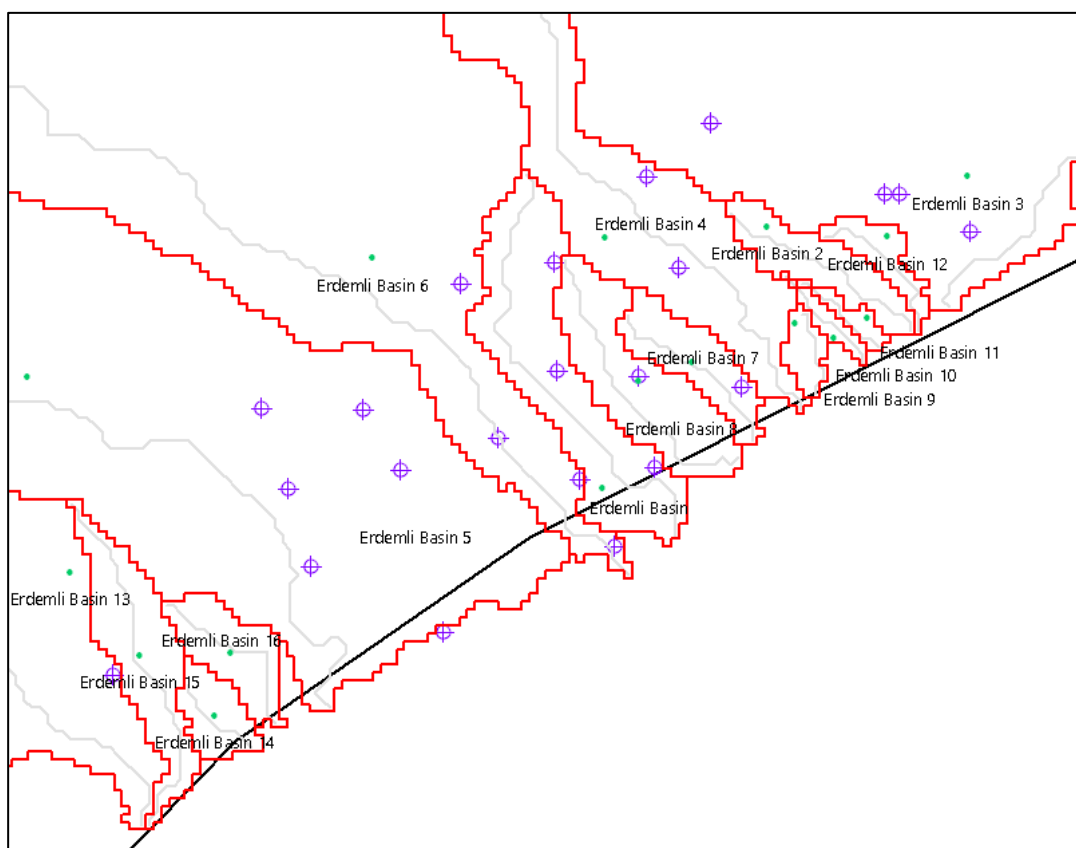
2.2 Λεκάνες Απορροής της περιοχής Mersin-Erdemli

Η λεκάνη απορροής ενός ποταμού είναι η περιοχή η οποία αποστραγγίζεται ένα ρέμα ή ένα σύστημα ρεμάτων που επικοινωνούν και καταλήγουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο απορροής. Οι εισροές σε μια λεκάνη απορροής αποτελούνται από διαφορετικές μορφές κατακρήμνισης, ενώ οι εκροές είναι το άθροισμα της επιφανειακής και υπόγειας απορροής, της εξάτμισης, της διαπνοής και της διήθησης. [Καρατζάς, 2021]

Η περιοχή του Erdemli, περιέχει δέκα έξι (16) λεκάνες απορροής από τις οποίες πέντε είναι ιδιαίτερα μεγάλες και οι υπόλοιπες έντεκα είναι σημαντικά μικρότερες. Στις παρακάτω εικόνες αναπαρίστανται μέσω του προγράμματος WEAP οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης σχεδιασμένες με κόκκινο χρώμα, και τα πηγάδια άντλησης με μωβ χρωματισμένο σύμβολο.

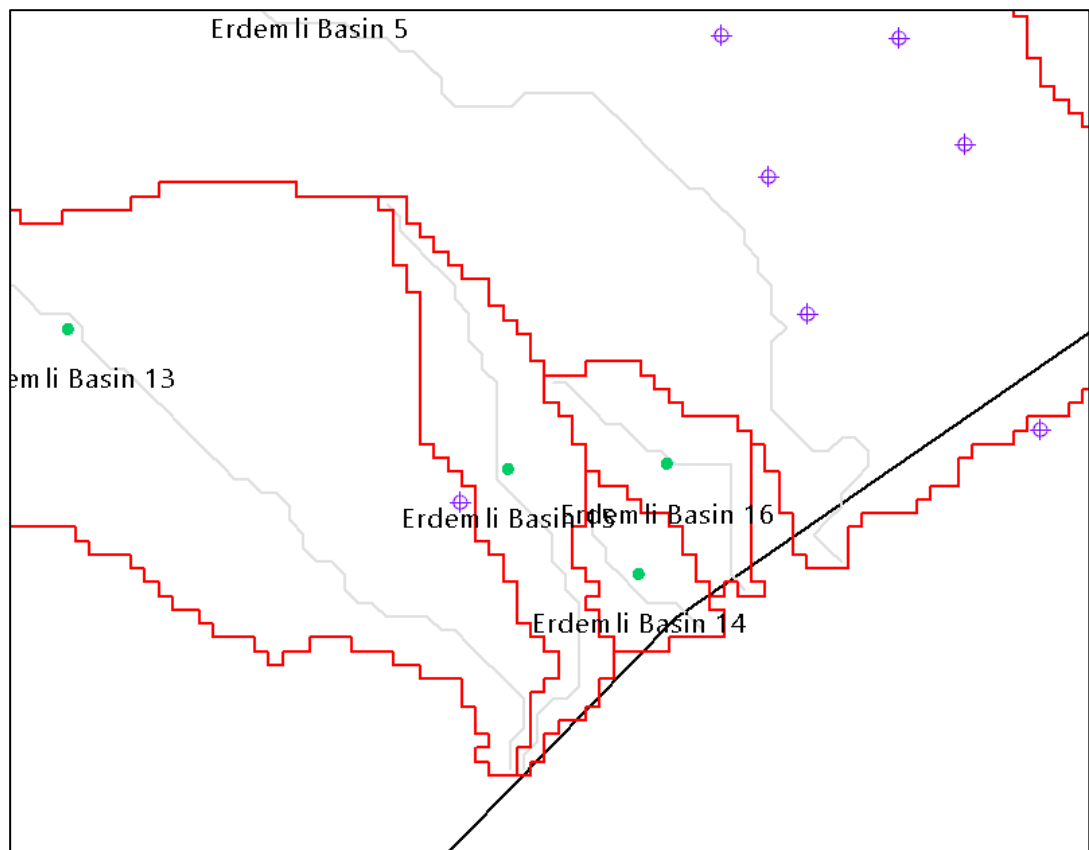


Εικόνα 2.4 Συνολικός χάρτης λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey



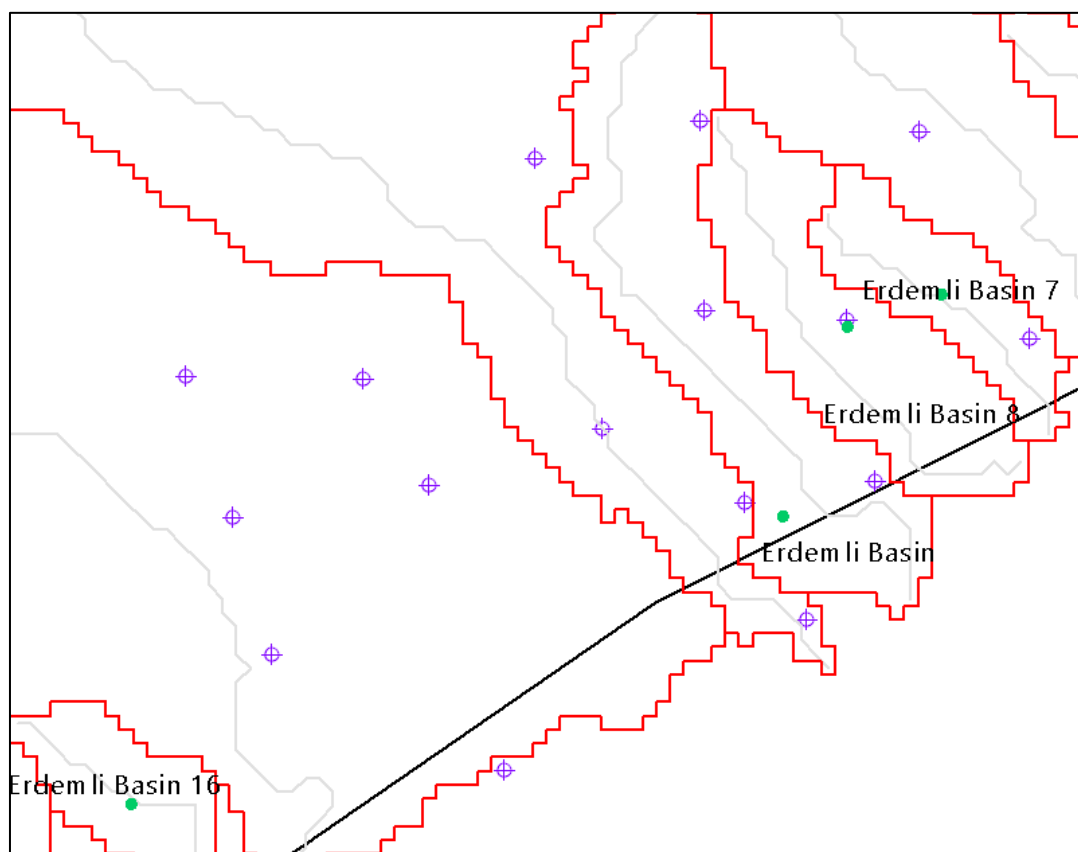
Εικόνα 2.5 Χάρτης λεκανών απορροής στα παράλια της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey

Οι λεκάνες απορροής που περιέχουν πηγάδια άντλησης είναι οκτώ (8), με την λεκάνη απορροής νούμερο πέντε (5), να περιλαμβάνει το μεγαλύτερο πλήθος των έξι (6) πηγαδιών άντλησης.



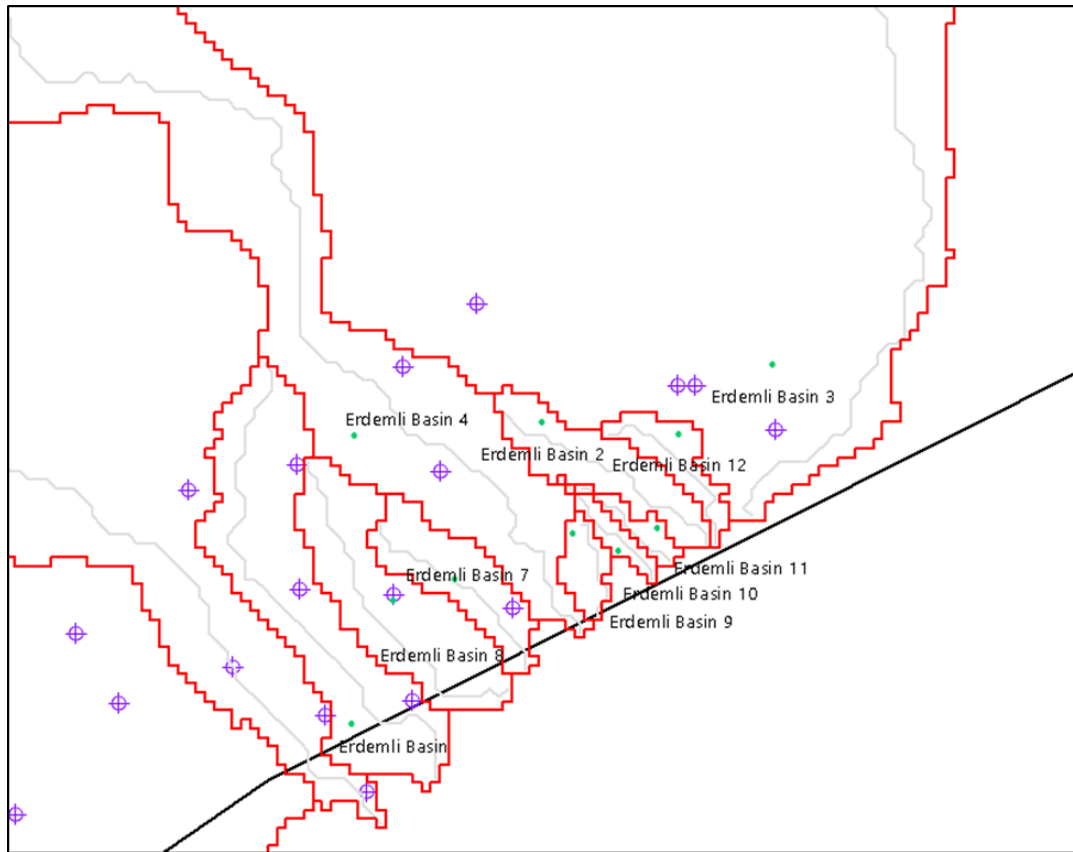
Εικόνα 2.6 Χάρτης δυτικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey

Στην Εικόνα 2.6 απεικονίζεται η δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης με τις λεκάνες απορροής τις οποίες αποτελείται. Είναι εμφανές, πως οι λεκάνες απορροής νούμερο 14, 15, 16 είναι κατά πολύ μικρότερες συγκριτικά με τις λεκάνες απορροής νούμερο 5 και 13.



Εικόνα 2.7 Χάρτης κεντρικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey

Στην Εικόνα 2.7 απεικονίζονται οι λεκάνες απορροής του κέντρου της περιοχής μελέτης, φαίνεται η κατάληξη της μεγαλύτερης λεκάνης, νούμερο 6, καθώς και τρεις αρκετά μικρότερες συγκριτικά, οι νούμερο 1, 7 και 8.



Εικόνα 2.8 Χάρτης ανατολικών μικρών λεκανών απορροής της περιοχής Erdemli, Mersin, Turkey

Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζεται η κεντρική και ανατολική περιοχή μελέτης με τις λεκάνες απορροής που βρίσκονται εκεί. Η ανατολή πλευρά της μελετώμενης περιοχής αποτελείται από επτά λεκάνες απορροής, από τις οποίες μεγάλες σε μέγεθος είναι δύο, οι νούμερο 4 και νούμερο 3, ενώ οι υπόλοιπες πέντε είναι αρκετά μικρότερες. Ιδιαίτερα μικρές λεκάνες απορροής φαίνεται πως είναι οι λεκάνες νούμερο 9, 10 και 11.

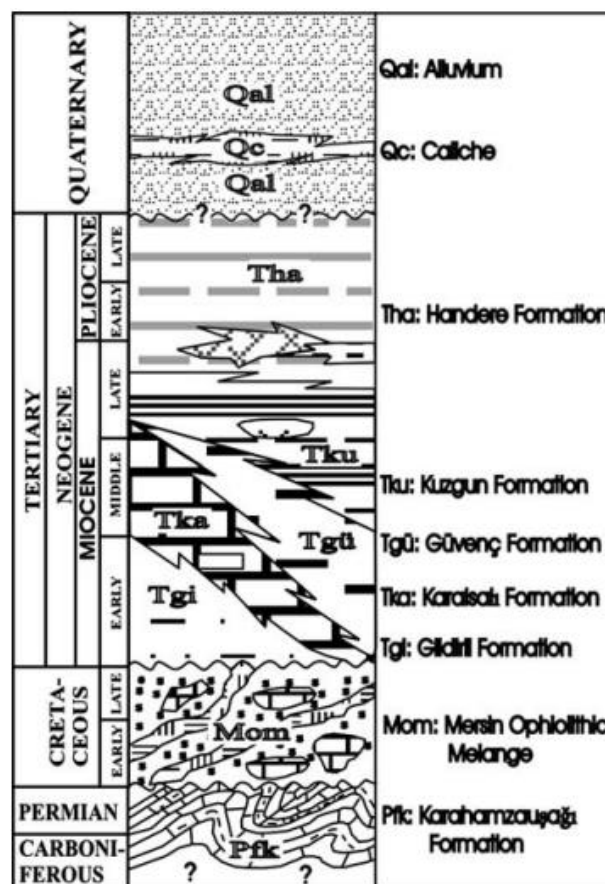
2.3 Γεωλογία της περιοχής Mersin-Erdemli

Τα μη ενοποιημένα κοιτάσματα της περιοχής της λεκάνης απορροής της περιοχής Erdemli και οι βράχοι, χωρίζονται σε τρεις γεωλογικές μονάδες, το ανώτερο Κρητιδικό οφιολιθικό τεκτονικό μίγμα της περιοχής Mersin, της τριτογενούς μονάδες και τα τεταρτογενή κοιτάσματα πλήρωσης της λεκάνης απορροής της Mersin.

Το οφιολιθικό τεκτονικό μίγμα της Mersin, περιέχει διάφορους βράχους με διαφορετικές συνθέσεις όπως γάββρος, δουνίτης, κλινοπυροξενίτης, διαβάσης και ραδιολαρίτης.

Οι τριτογενείς μονάδες αποτελούνται από τον Ολιγο-Μειόκαινο σχηματισμό της περιοχής Gildir, τον κατώτερο και μέσο Μειόκαινο σχηματισμό της περιοχής Karaisali και τον μέσο και ανώτερο Μειόκαινο σχηματισμό της περιοχής Kuzgun, τον σχηματισμό της περιοχής Guvenç και τον Μειόκαινο και Πλειόκαινο σχηματισμό της περιοχής Handere. Οι τριτογενείς βράχοι αποτελούνται από μια σειρά θαλάσσιων, λιμναίων και ποτάμιων κοιτασμάτων, τα οποία παρουσιάζουν μεταβατικά χαρακτηριστικά τόσο κατακόρυφα όσο και στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης.

Τα τεταρτογενή κοιτάσματα πλήρωσης της λεκάνης απορροής είναι ένα ετερογενές μίγμα μεταμορφικών, ηφαιστειακών και ιζηματογενών πετρωμάτων τα οποία κυμαίνονται από πηλό έως και το μέγεθος ογκόλιθου. Το μίγμα περιέχει κοιτάσματα πρόσχωσης ρέματος, κοιτάσματα ρέματος αναβαθμίδας, κοιτάσματα ριπιδίου, κοιτάσματα δέλτα, κοιτάσματα ακτής, ασβεστοπαγές, καθώς και κοιτάσματα τύπου Terra Rosa, δηλαδή Μεσογειακό κόκκινο έδαφος. Οι εναποθέσεις πλήρωσης λεκάνης ποικίλλουν σημαντικά στη λιθολογία και το μέγεθος των κόκκων, τόσο κατακόρυφα όσο και στην επιφάνεια της περιοχής. Επομένως, οι υδραυλικές ιδιότητες αυτών των εναποθέσεων μπορεί να διαφέρουν πολύ σε μικρές αποστάσεις, τόσο πλευρικά όσο και κάθετα. [Demirel et al, 2005]



Εικόνα 2.9 Γενική στρωματογραφία της λεκάνης απορροής της Mersin-Erdemli (Demirel & Güler, 2005)

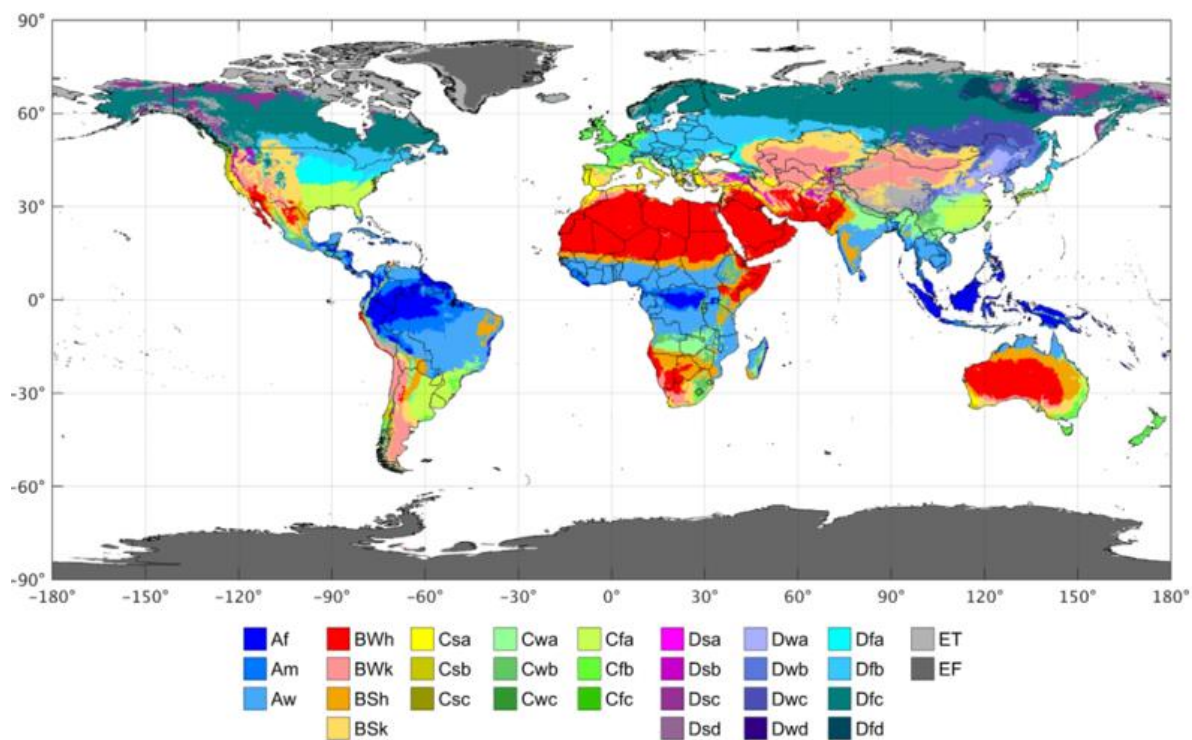
2.4 Κλιματικές-Μετεωρολογικές Συνθήκες

Οι κλιματικές και μετεωρολογικές συνθήκες μιας περιοχής επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τον κύκλο του νερού και κατά συνέπεια την ποσότητα του νερού στα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα. Σε μέρη με περισσότερη βροχόπτωση αναμένεται να υπάρχουν μεγαλύτερες ποσότητες επιφανειακών υδάτων και πιο πλούσιοι υπόγειοι υδροφορείς. Στην περιοχή μελέτης, το Erdemli της Τουρκίας, το κλίμα θεωρείται θερμό και εύκρατο, με περισσότερες βροχοπτώσεις τη χειμερινή περίοδο. Ταξινομείται στην κλιματική κλίμακα Köppen-Geiger ως Csa. [Climate Data, Accessed 17/12/2021]

Το σύστημα κλιματικής ταξινόμησης Köppen χωρίζει σε κατηγορίες τις κλιματικές ζώνες παγκοσμίως με βάση τη τοπική βλάστηση. Η βλάστηση σε μια περιοχή εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση του μέρους, για αυτό το λόγο περιοχές με περισσότερες βροχοπτώσεις και υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν περισσότερα δάση. Το σύστημα Köppen αποτελείται από πέντε κλιματικές ζώνες, οι οποίες απεικονίζονται με διαφορετικά χρώματα και αποχρώσεις. Οι ζώνες είναι οι εξής:

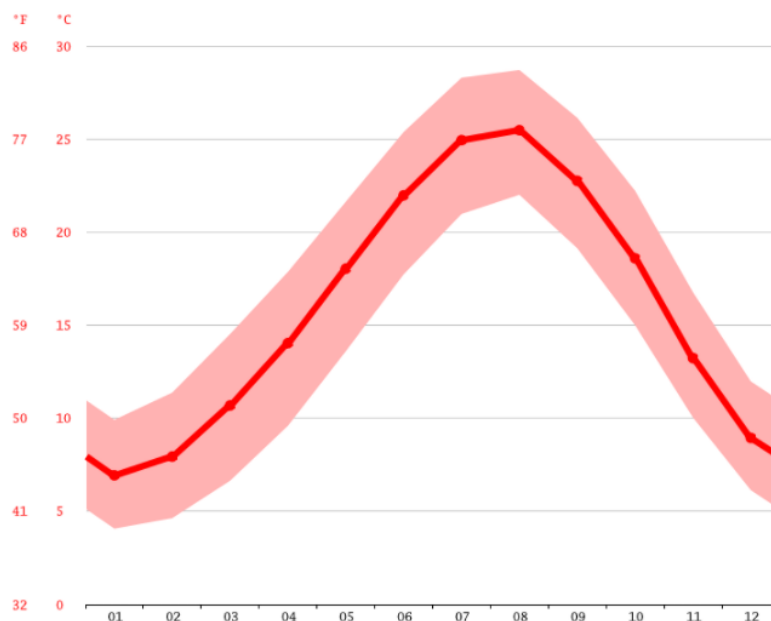
- Ζώνη Α: τροπική ή ισημερινή ζώνη, απεικονίζεται με μπλε χρώμα
- Ζώνη Β: άνυδρη ή ξηρή ζώνη, απεικονίζεται με κόκκινο, ροζ και πορτοκαλί χρώμα
- Ζώνη C: θερμή-ήπια εύκρατη ζώνη, απεικονίζεται με πράσινα χρώματα
- Ζώνη D: ηπειρωτική ζώνη, απεικονίζεται με μωβ, βιολετί και γαλάζια χρώματα
- Ζώνη Ε: πολική ζώνη, απεικονίζεται με γκρι χρώματα

Γίνεται περαιτέρω υποδιαίρεση βάση της θερμοκρασίας ή της ξηρότητας της περιοχής. Η ζώνη C στην οποία ανήκει η περιοχή του Erdemli, χωρίζεται σε κατηγορίες με βάση το πότε εμφανίζονται οι ξηρές περιόδους, καθώς και το κρύο του καλοκαιριού και τη ζέση του χειμώνα. Το κλίμα Csa, που αφορά την περιοχή μελέτης, είναι το Μεσογειακό κλίμα ζεστού καλοκαιριού. Αυτή η κλιματική ζώνη περιλαμβάνει τρεις φορές περισσότερες βροχοπτώσεις τον πιο υγρό μήνα του χειμώνα από τον πιο ξηρό μήνα του καλοκαιριού. [National Geographic, Accessed 17/12/2021]



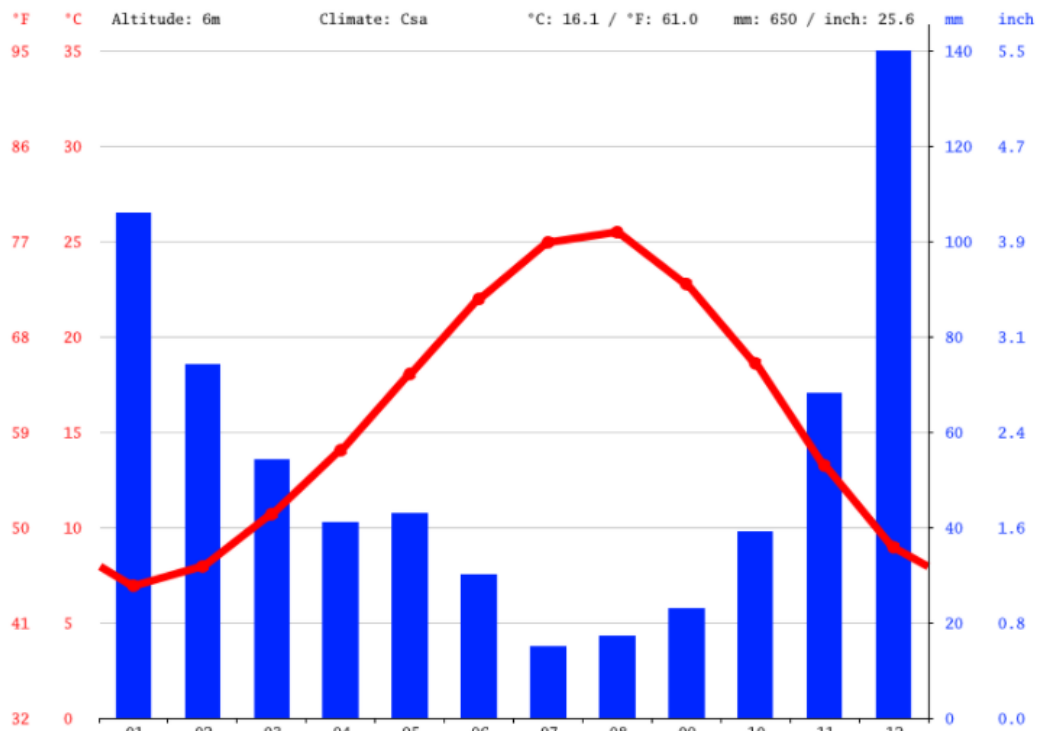
Εικόνα 2.10 Κλιματική ταξινόμηση Köppen-Geiger (Beck et al, 2018)

Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή Erdemli, η μέση θερμοκρασία είναι 16.1°C, οι υψηλότερες θερμοκρασίες παρατηρούνται κατά μέσο όρο τον Αύγουστο περίπου στους 25.5°C , ενώ τον Ιανουάριο παρατηρείται η χαμηλότερη θερμοκρασία του έτους περίπου στους 6.9°C.



Εικόνα 2.11 Μέση θερμοκρασία Erdemli (Climate Data, Accessed 17/12/2021)

Για τη βροχόπτωση της περιοχής σε περίοδο ενός έτους πέφτουν περίπου 650mm υετού, οι λιγότερες βροχοπτώσεις συναντώνται τον Ιούλιο με μέσο όρο βροχόπτωσης 15mm, ενώ μεγαλύτερη βροχόπτωση έχει τον Δεκέμβριο με 140mm υετού.



Εικόνα 2.12 Ραβδόγραμμα καιρικών συνθηκών Erdemli ανά μήνα (Climate Data, Accessed 17/12/2021)

Αναλυτικότερα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω πίνακα (Εικόνα 2.8), υπάρχουν δεδομένα μέγιστης, ελάχιστης και μέσης θερμοκρασίας, καθώς και βροχόπτωσης, υγρασίας, ημέρες που έβρεξε και ώρες ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα του έτους.

| | Ιανουάριος | Φεβρουάριος | Μάρτιος | Απρίλιος | Ενδέχεται | Ιούνιος | Ιούλιος | Αύγουστος | Σεπτέμβριος | Οκτώβριος | Νοέμβριος | Δεκέμβριος |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Μέσος όρος | 8.9 °C | 7.9 °C | 10.7 °C | 14 °C | 18 °C | 22 °C | 24.9 °C | 25.6 °C | 22.8 °C | 18.8 °C | 13.2 °C | 8.9 °C |
| Θερμοκρασία °C (°F) | (44.5) °F | (46.3) °F | (51.2) °F | (57.3) °F | (64.5) °F | (71.6) °F | (76.9) °F | (77.9) °F | (73) °F | (65.5) °F | (55.8) °F | (48.1) °F |
| Ελάχ. Θερμοκρασία °C (°F) | 4.1 °C | 4.6 °C | 6.8 °C | 9.8 °C | 13.8 °C | 17.7 °C | 21 °C | 22 °C | 19.1 °C | 15 °C | 10 °C | 6.1 °C |
| | (39.3) °F | (40.3) °F | (44) °F | (49.3) °F | (56.5) °F | (63.9) °F | (69.7) °F | (71.6) °F | (66.4) °F | (59) °F | (50.1) °F | (43) °F |
| Μέγιστη | 9.9 °C | 11.4 °C | 14.5 °C | 17.9 °C | 21.6 °C | 25.4 °C | 28.3 °C | 28.7 °C | 26.1 °C | 22.2 °C | 16.8 °C | 12 °C |
| Θερμοκρασία °C (°F) | (49.8) °F | (52.5) °F | (58.1) °F | (64.2) °F | (70.9) °F | (77.7) °F | (82.9) °F | (83.7) °F | (79.1) °F | (72) °F | (62.2) °F | (53.6) °F |
| Υετός / Βροχόπτωση mm (in) | 106 (4.2) | 74 (2.9) | 54 (2.1) | 41 (1.6) | 43 (1.7) | 30 (1.2) | 15 (0.6) | 17 (0.7) | 23 (0.9) | 39 (1.5) | 68 (2.7) | 140 (5.5) |
| Υγρασία(%) | 74% | 72% | 70% | 72% | 74% | 75% | 75% | 75% | 72% | 67% | 66% | 72% |
| Βροχερές μέρες (δ) | 9 | 7 | 7 | 7 | 7 | 6 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 8 |
| μέσος όρος Ηλιακές ώρες (ώρες) | 6.4 | 7.5 | 9.0 | 10.3 | 11.3 | 11.9 | 11.9 | 11.2 | 10.3 | 9.4 | 8.1 | 6.6 |

Εικόνα 2.13 Γράφημα καιρικών μέσων όρων Erdemli ανά μήνα (Climate Data, 17/12/2021)

3. Μοντελοποίηση με το Μοντέλο PRINCETON TRANSPORT CODE

3.1 Μοντελοποίηση Υπόγειων Υδάτων

Η μοντελοποίηση και πιο συγκεκριμένα η μαθηματική μοντελοποίηση αφορά τη μαθηματική περιγραφή ενός φαινομένου, χρησιμοποιώντας μαθηματικά σύμβολα και έννοιες. Οι στόχοι ενός μαθηματικού μοντέλου είναι η μελέτη και η κατανόηση της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων τους, καθώς και ο έλεγχος των υποθέσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο και η βελτίωση του. Τα μοντέλα δεν είναι τέλεια, βασίζονται σε υποθέσεις και παρατηρήσεις, οι οποίες ενδέχεται να μην είναι σωστές. Τα συστήματα που περιγράφονται μέσω των μοντέλων διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί αρκετές διαφορετικές κατηγορίες μαθηματικών μοντέλων. Ορισμένα από αυτά είναι τα Γραμμικά-Μη Γραμμικά μοντέλα, τα Μηχανικά-Περιγραφικά μοντέλα, τα Ντετερμινιστικά-Στοχαστικά μοντέλα και τα Χρονοεξαρτώμενα-Χρονοανεξάρτητα μοντέλα.

Στην μοντελοποίηση υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται μαθηματικά μοντέλα και φυσικά μοντέλα. Τα φυσικά μοντέλα, εξομοιώνουν την περιοχή μελέτης μέσα σε εργαστήρια ώστε να ληφθούν μετρήσεις. Τα μαθηματικά μοντέλα προσομοιώνουν τη περιοχή μελέτης προσεγγιστικά μέσω μαθηματικών εξισώσεων, χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες μπορούν να λυθούν αριθμητικά, αναλυτικά είτε με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για τη μοντελοποίηση μιας περιοχής μελέτης, σύμφωνα με τους Anderson και Woessner, πρέπει να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο σκοπός του μοντέλου, να σχηματιστεί ένα θεωρητικό μοντέλο, επιλέγεται ο κατάλληλος κώδικας, σχεδιάζεται το μοντέλο και βαθμονομείται. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της βαθμονόμησης του μοντέλου, επαλήθευση του μοντέλου, πρόβλεψη και πρόβλεψη για την ανάλυση της ευαισθησίας. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, γίνεται εισαγωγή νέων δεδομένων πεδίου και ανάλυσή τους για το μέλλον και τελικά επανασχεδιάζεται το μοντέλο με τα νέα αποτελέσματα.[Anderson et al, 2015]

3.2 Χρήση του ArgusONE για το μοντέλο PTC

3.2.1 Το πρόγραμμα ArgusONE

Το ArgusOne έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί και να επεξεργάζεται πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να εφαρμόζει περιορισμούς στη περιοχή μελέτης, ενώ δίνει και τη δυνατότητα εισαγωγής αρχικών περιορισμών. Τέλος, παρουσιάζει τα αποτελέσματα με ενσωματωμένα εργαλεία απεικόνισης. Για τα προβλήματα ροής υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται τεχνολογίες Plug-In Extensions (PIE), όπου ορισμένα είναι το MODFLOW, MOC3D, MODPATH, SUTRA και PTC. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της περιοχής που εξετάζει η συγκεκριμένη εργασία είναι το Princeton Transport Code (PTC), το οποίο χρησιμοποιεί ως πλατφόρμα για να υλοποιηθεί το πρόγραμμα ArgusOne. [ArgusONE User's Guide, Accessed 14/12/2021]

3.2.2 Το μοντέλο PTC

Το μοντέλο Princeton Transport Code, μεταχειρίζοντας το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων, αναπαράσκει τη ροή υπογείων υδάτων συναρτήσει του υδραυλικού ύψους h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (3.1)$$

των στοιχείων ταχύτητας ως προς τις τρεις κατευθύνσεις (x,y,z),

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.2)$$

όπου,

- h το υδραυλικό ύψος (m)
- K_{xx} η υδραυλική αγωγιμότητα στην x κατεύθυνση (m/d)
- K_{yy} η υδραυλική αγωγιμότητα στην y κατεύθυνση (m/d)
- K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στην z κατεύθυνση (m/d)
- S ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης (m^{-1})
- t ο χρόνος αποθήκευσης (d)
- Q η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα (m^3/d)

και τη μεταφορά των ρύπων συναρτήσει της συγκέντρωσης c για τις τρεις κατευθύνσεις (x,y,z),

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E_{(c)}] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

όπου,

- c η αρχική συγκέντρωση του ρύπου (g/m^3)
- c^w η τελική συγκέντρωση του ρύπου (g/m^3)
- D_{xx} ο συντελεστής διάχυσης στην x κατεύθυνση (m/d)
- D_{yy} ο συντελεστής διάχυσης στην y κατεύθυνση (m/d)
- D_{zz} ο συντελεστής διάχυσης στην z κατεύθυνση (m/d)
- Q η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα (m^3/d)
- θ η ογκομετρική εδαφική υγρασία
- $E_{(c)}$ συνάρτηση εξάτμισης ρύπου

Το σύστημα των εξισώσεων προκύπτει από τον νόμο του Darcy και την αρχή διατήρησης της μάζας. Για την επίλυση των εξισώσεων αρχικά, υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη από την εξίσωση (3.1), έπειτα υπολογίζονται οι ταχύτητες κατά Darcy από την εξίσωση (3.2) και με τα παραπάνω λύνεται η εξίσωση (3.3) ώστε να βρεθεί η συγκέντρωση c του ρύπου. [Babu et al, 2002]

Διαδικασία επίλυσης αλγορίθμου PTC

Το PTC για να επιλύσει τις διαφορικές εξισώσεις χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους, και πιο συγκεκριμένα ένα διαχωριστικό αλγόριθμο, για την απλοποίηση και μείωση του χρόνου υπολογισμού και την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται.

Ο αλγόριθμος ακολουθεί την εξής διαδικασία:

- Διαχωρισμός συστήματος σε παράλληλα οριζόντια στρώματα για τη διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων
- Με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών συνδέονται κάθετα τα στρώματα

Κατά την επίλυση, η κάθε επανάληψη, διαιρείται σε δύο βήματα, αρχικά γίνονται οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων και έπειτα, σε ανεξάρτητο βήμα, γίνονται οι κάθετες εξισώσεις. [Babu et al, 2002]

Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες για ροή υπογείων υδάτων κατά το μοντέλο PTC χωρίζεται σε τρία είδη, οι συνθήκες Dirichlet, Neumann και τρίτου τύπου. Το μοντέλο ορίζει για όλα τα όρια ως αρχική οριακή συνθήκη τη μηδενική ροή, δηλαδή γίνεται υπόθεση πως ο υδροφορέας είναι περιορισμένος και οι πλευρές και ο πυθμένας είναι αδιαπέραστα. Ανάλογα με τη περιοχή μελέτης, ο εκάστοτε χρήστης, έχει τη δυνατότητα να αλλάξει τις οριακές συνθήκες έτσι ώστε να γίνεται σωστή αναπαράσταση των υδρολογικών συνθηκών.

Πιο συγκεκριμένα για τα τρία είδη οριακών συνθηκών:

1) Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Η οριακή συνθήκη πρώτου τύπου αφορά καθορισμένα υδραυλικά ύψη (Prescribed Head), τα οποία προσδιορίζουν κόμβοι στους οποίους αναλογούν συγκεκριμένες τιμές υδραυλικών υψών. Ο κώδικας του μοντέλου αυτόματα προσδιορίζει έναν πίνακα που περιέχει τους κόμβους, στον οποίο αντίστοιχα ορίζονται ως σταθεροί όροι οι συντελεστές τους.

2) Καθορισμένη ροή

Για τον υπολογισμό των οριακών συνθηκών για καθορισμένη ροή (Specified Gradients or Fluxes), εφαρμόζεται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Green. Ο χρήστης πρέπει μόνο να υπολογίσει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο ώστε να μπορέσει να γίνει αναπαράσταση της ροής σε ένα όριο. Σε όποιο σημείο της περιοχής υπάρχει πηγάδι άντλησης, ο προσδιορισμός της ροής γίνεται με την ίδια μέθοδο, του κόμβου. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα ορισμού κομβικής ροής διήθησης, έτσι ώστε με ολοκλήρωση της περιοχής μελέτης, να εισαχθεί η διήθηση ομοιόμορφα και να καθοριστεί η ογκομετρική ροή.

3) Προσδιορισμένη διαρροή

Για την προσδιορισμένη διαρροή (Specified Leakages), οι οριακές συνθήκες καθορίζονται με την εισαγωγή του όρου της αγωγιμότητας διαρροής (k_L), ο οποίος υποδηλώνει κάθετη διαρροή σε μια επιφάνεια. Με τον προσδιορισμό της σταθεράς k_L , ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την διαρροή ως προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. [Babu et al, 2002]

4. Εισαγωγή και Επεξεργασία Δεδομένων

4.1 Το ArcGIS στην επεξεργασία των δεδομένων

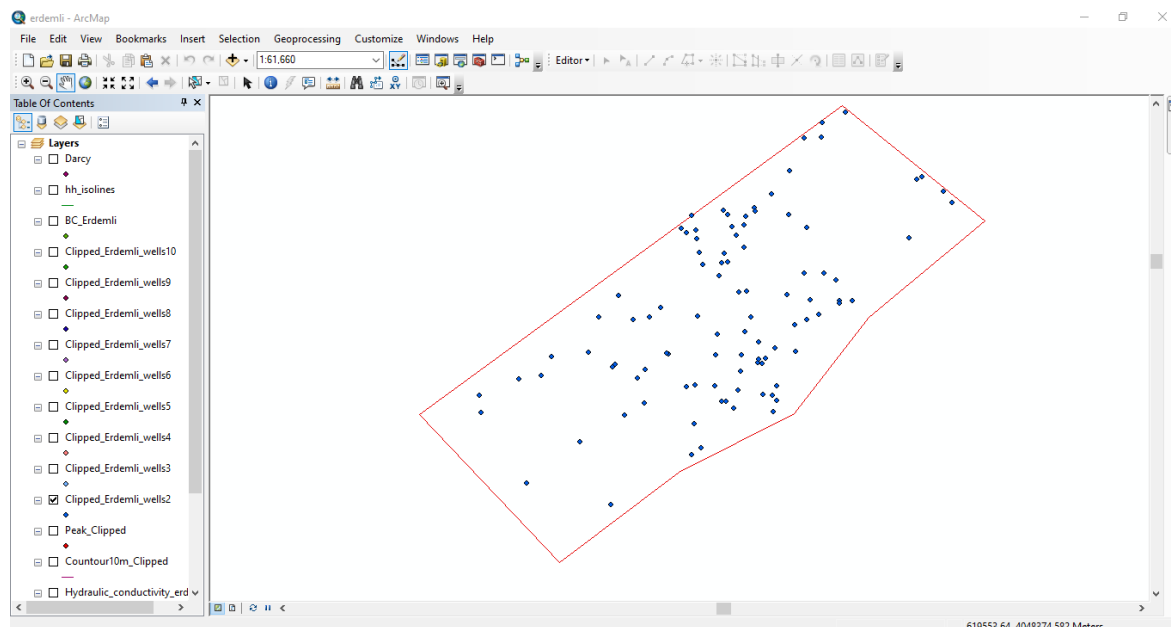
Για την καταγραφή, επεξεργασία των δεδομένων, καθώς και τον προσδιορισμό της μορφολογίας του εδάφους και των ειδικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, ήταν αναγκαία η χρήση ψηφιοποιημένων χαρτών. Με σκοπό την προετοιμασία των δεδομένων για την εισαγωγή τους στο ArgusOne, ήταν απαραίτητη η χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών και πιο συγκεκριμένα του ArcGIS. Με τις εφαρμογές του ArcGIS μπορεί να υλοποιηθεί η χαρτογράφηση μιας περιοχής, σύνθεση και επεξεργασία δεδομένων, γεωανάλυση και απεικόνιση. Στην παρούσα εργασία από τη σουίτα εφαρμογών του ArcGIS Desktop έγινε χρήση του ArcMap για την επεξεργασία αρχείων Shape File.

Η έκδοση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε είναι η ArcMap 10.5, στην οποία αναπαρίστανται γεωγραφικές πληροφορίες ως σύνολο επιπέδων και άλλων στοιχείων μέσα σε ένα χάρτη. Στοιχεία ενός χάρτη μεταξύ άλλων αποτελούν, ο χάρακας κλίμακα του χάρτη, το βέλος που υποδηλώνει τον Βορρά, ο τίτλος του χάρτη και το υπόμνημα στο οποίο γίνεται επεξήγηση συμβόλων.



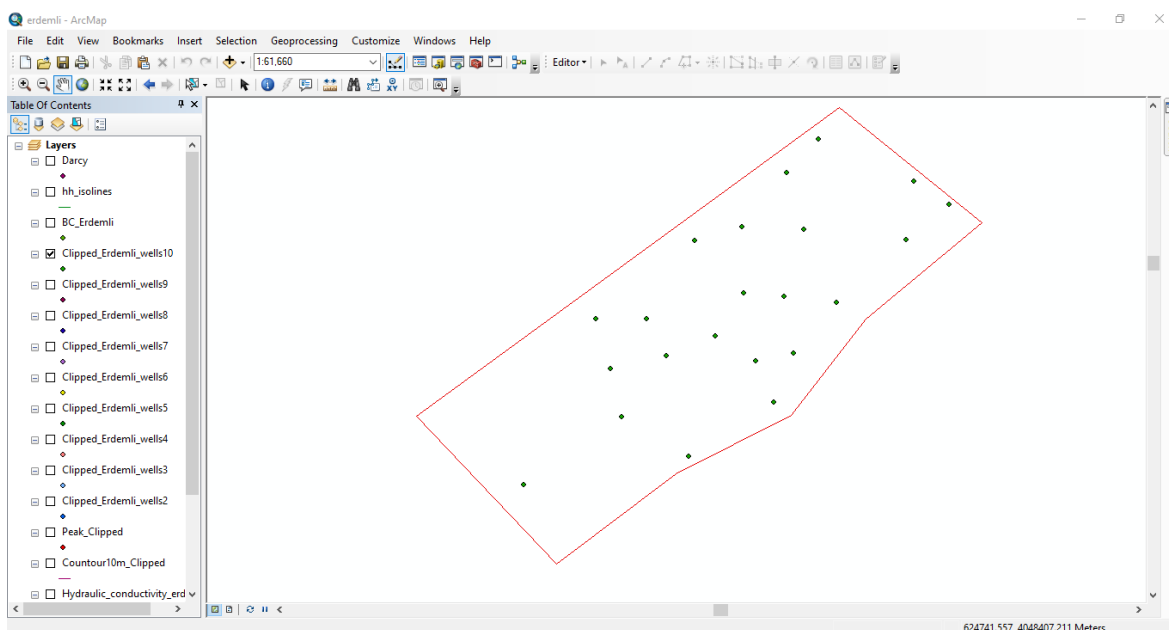
Εικόνα 4.1 Εμφάνιση της εικόνας αναμονής έναρξης του ArcMap

Για την συγκεκριμένη εργασία, στο ArcMap εισήχθησαν αρχεία τύπου shape file και έγινε ομαδοποίηση δεδομένων έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο PTC. Τα δεδομένα που υπήρχαν μέσα στα αρχεία περιείχαν τον χάρτη της περιοχής, πληροφορίες συντεταγμένων πηγαδιών, στάθμες νερού, ρυθμό άντλησης, ισοϋψείς υψομέτρου και τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.




Εικόνα 4.2 Χάρτης ορίων περιοχής μελέτης και τοποθεσίας αρχικών πηγαδιών

Τα δεδομένα αυτά προέκυψαν από άλλη μελέτη πάνω στην ίδια περιοχή για μοντελοποίηση με το μοντέλο FEFLOW. Τα αρχικά πηγάδια ήταν ενενήντα επτά (97) και αρκετά κοντά μεταξύ τους, επίσης ορισμένα από αυτά δεν αντλούσαν, οπότε ήταν αναγκαία η ομαδοποίησή τους. Μετά από δοκιμή αρκετών διαφορετικών ομαδοποιήσεων, η τελική μορφή των πηγαδιών εξαρτήθηκε από την απόσταση μεταξύ τους και τον αριθμό των πηγαδιών σε μικρή έκταση μέσα στην περιοχή μελέτης.



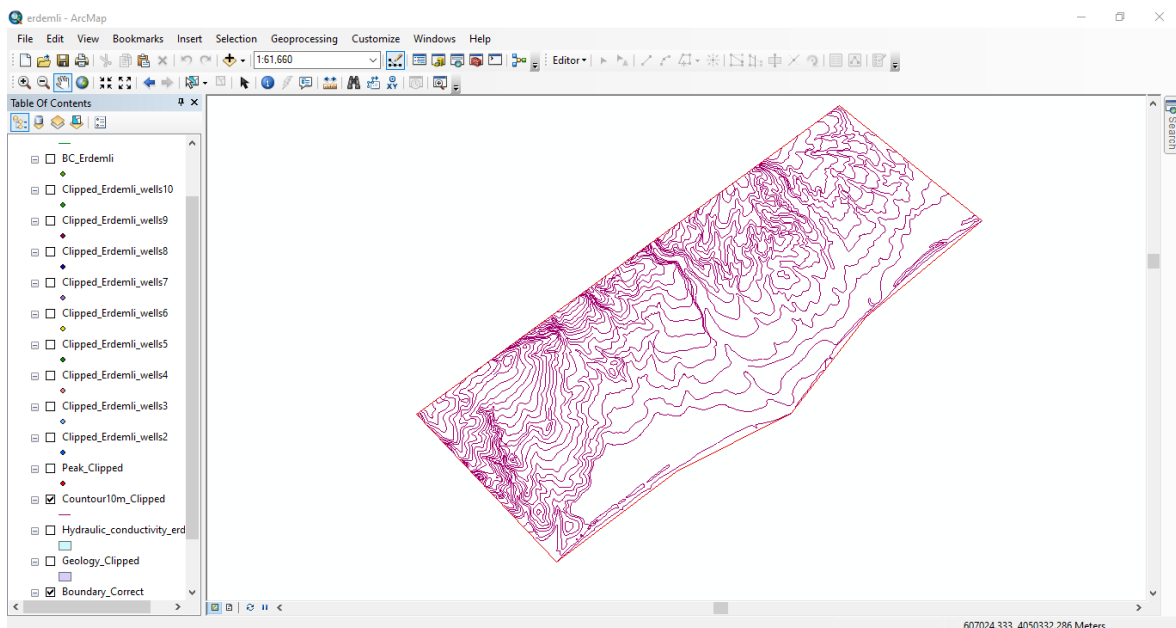
Εικόνα 4.3 Χάρτης τοποθεσίας τελικών πηγαδιών

Τα ενενήντα επτά (97) πηγάδια συμπτύχθηκαν σε είκοσι δύο (22) τελικά πηγάδια, με ύψος νερού το ύψος του πηγαδιού αναφοράς που συμπτύχθηκαν γύρω του άλλα πηγάδια και ρυθμό άντλησης το άθροισμα του ρυθμού όλων των συμπτυγμένων πηγαδιών.

| Table | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|---------|------|------|-------|--------|---------|-----------|------------|---------|---------|-----------|
|  | | | | | | | | | | | | |
| Clipped_Erdemli_wells10 | | | | | | | | | | | | |
| | FID | Shape * | FID_ | NODE | SLICE | X | Y | Sta_level | Well_depth | Dyn_lev | Elev_m_ | Pump_m3_d |
| ▶ | 0 | Point | 7 | 930 | 1 | 618594 | 4057139 | 20 | 110 | 80 | 85 | -1907 |
| | 1 | Point | 12 | 1012 | 1 | 616125 | 4051110 | 20 | 120 | 50 | 1 | -3456 |
| | 2 | Point | 14 | 1042 | 1 | 621069 | 4055889 | 25 | 60 | 35 | 9 | -86 |
| | 3 | Point | 16 | 1060 | 1 | 617991 | 4056498 | 39 | 105 | 57 | 97 | -432 |
| | 4 | Point | 18 | 1070 | 1 | 616236 | 4055210 | 30 | 120 | 70 | 85 | -432 |
| | 5 | Point | 22 | 1187 | 1 | 614368 | 4053730 | 40 | 100 | 60 | 107 | -173 |
| | 6 | Point | 23 | 1246 | 1 | 620255 | 4055230 | 4 | 170 | 75 | 9 | -1037 |
| | 7 | Point | 24 | 1255 | 1 | 620398 | 4056332 | 10 | 164 | 70 | 20 | -1123 |
| | 8 | Point | 35 | 1350 | 1 | 617131 | 4055476 | 27 | 115 | 40 | 102 | -1987 |
| | 9 | Point | 39 | 1412 | 1 | 618932 | 4054039 | 30 | 140 | 80 | 21 | -4666 |
| | 10 | Point | 46 | 1527 | 1 | 615331 | 4053723 | 15 | 150 | 22 | 50 | -432 |
| | 11 | Point | 49 | 1549 | 1 | 613000 | 4050574 | 22 | 120 | 35 | 63 | -173 |
| | 12 | Point | 59 | 1793 | 1 | 614635 | 4052785 | 20 | 65 | 40 | 54 | -1036 |
| | 13 | Point | 62 | 1834 | 1 | 618111 | 4053076 | 16 | 110 | 40 | 15 | -346 |
| | 14 | Point | 75 | 2099 | 1 | 618314 | 4055426 | 10 | 60 | 45 | 62 | -1296 |
| | 15 | Point | 76 | 2115 | 1 | 615696 | 4053017 | 40 | 150 | 60 | 39 | -2506 |
| | 16 | Point | 85 | 2283 | 1 | 617169 | 4054208 | 20 | 70 | 40 | 59 | -9072 |
| | 17 | Point | 86 | 2289 | 1 | 616627 | 4053407 | 10 | 84 | 56 | 86 | -1210 |
| | 18 | Point | 89 | 2317 | 1 | 617943 | 4054152 | 26 | 90 | 60 | 40 | -1296 |
| | 19 | Point | 91 | 2362 | 1 | 614858 | 4051863 | 8 | 28 | 16 | 17 | -346 |
| | 20 | Point | 93 | 3130 | 1 | 617402 | 4052921 | 16 | 72 | 24 | 20 | -1382 |
| | 21 | Point | 94 | 3602 | 1 | 617748 | 4052140 | 4 | 24 | 15 | 5 | -1037 |

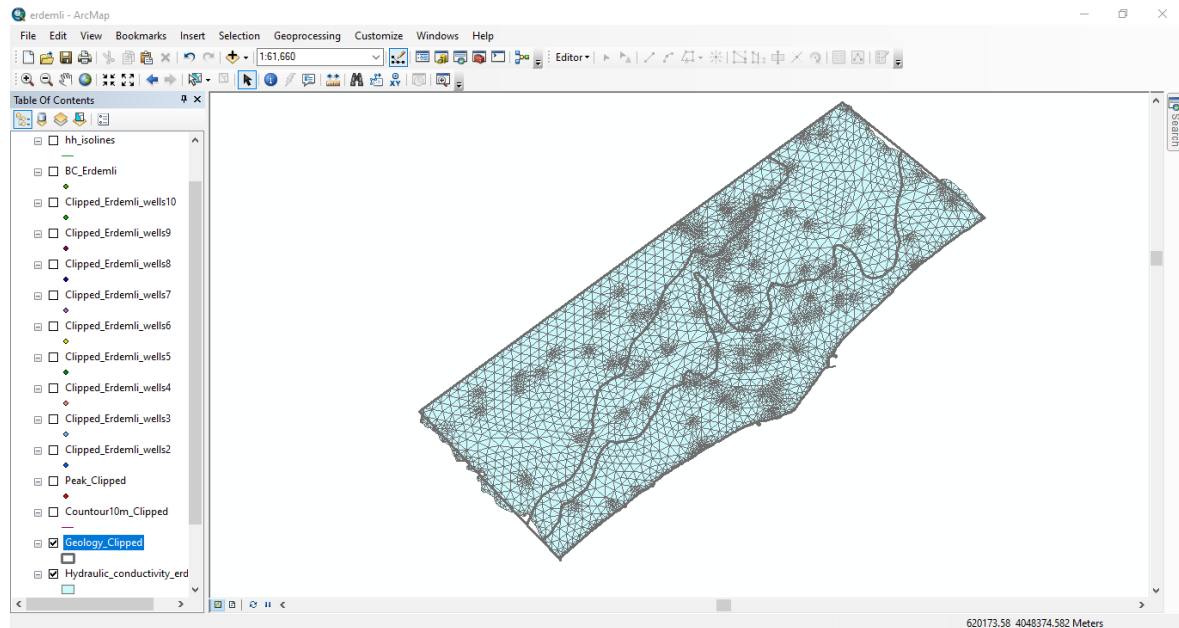
Εικόνα 4.4 Δεδομένα τελικών πηγαδιών όπως φαίνονται μέσα από την εφαρμογή ArcMap

Στα δεδομένα ισοϋψών που εισάχθηκαν στο ArcMap, έγινε πρόσθεση του βάθους υδροφορέα. Το βάθος του υδροφορέα προσδιορίστηκε ως το μεγαλύτερο από τα βάθη των πηγαδιών. Τα βάθη των πηγαδιών υπολογίστηκαν ως το απόλυτο της διαφοράς του αρχικού υψομέτρου (Elev_m) μείον το βάθος του εκάστοτε πηγαδιού (Well_depth). Το βάθος του υδροφορέα μετά την επεξεργασία των δεδομένων βρέθηκε εκατό εξήντα ένα (161) μέτρα.



Εικόνα 4.5 Χάρτης ισοϋψών περιοχής μελέτης

Τα δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας μετά την εισαγωγή τους στην εφαρμογή εκτιμήθηκαν και συμπτύχθηκαν με το αρχείο της γεωλογίας της περιοχής, έτσι ώστε να είναι έτοιμο για να εισαχθεί στο μοντέλο PTC.



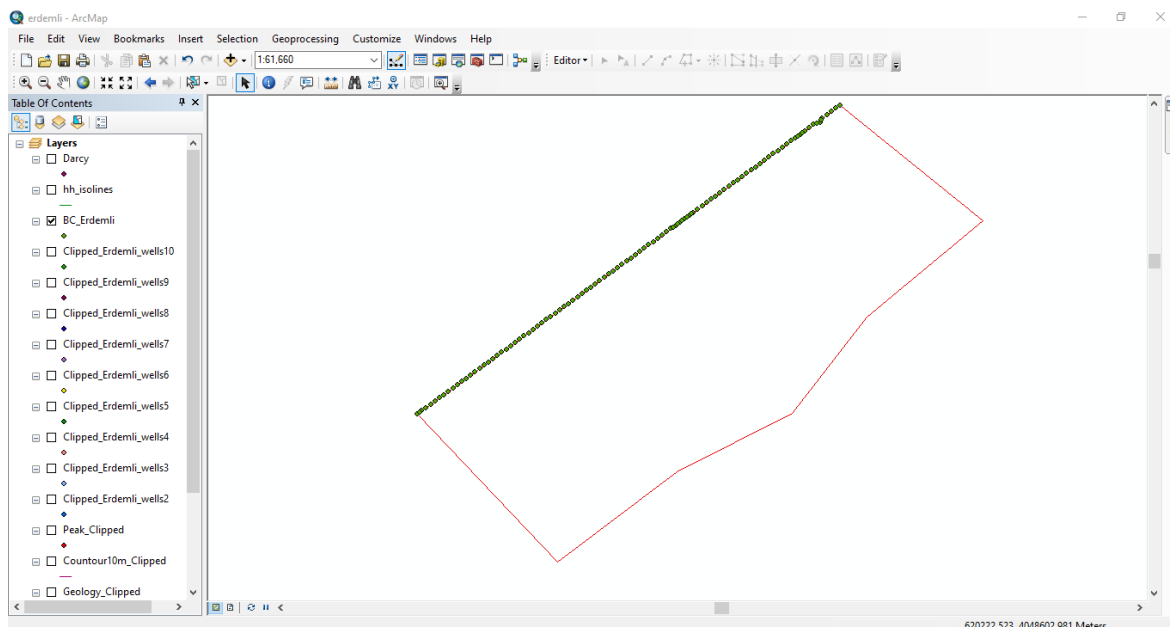
Εικόνα 4.6 Χάρτης γεωλογίας για υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης για τον αρχικό αριθμό πηγαδιών

Για μεγαλύτερη ευκολία στην εισαγωγή των δεδομένων στο PTC και αφού παρατηρήθηκε πως σε κάθε γεωλογικό στρώμα υπάρχει μια συγκεκριμένη τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας, έγινε επεξεργασία των δεδομένων τα οποία παρουσιάζονται στην τελική τους μορφή στον πίνακα ιδιοτήτων του shape file της γεωλογίας με μονάδες μέτρησης μέτρα ανά ημέρα

| Table | | | | | | | | | |
|-----------------|-----|------------|--------|-----------|-----------------------|----|-----------------|-----|------|
| Geology_Clipped | | | | | | | | | |
| | FID | Shape * | Symbol | Area | Lithology | ID | Formation | Age | Cond |
| | 0 | Polygon ZM | Qa | 21.265483 | Alluvium | 1 | Delta sediments | | 100 |
| | 1 | Polygon ZM | Qk | 35.798922 | Terrestrial carbonate | 4 | Caliche | | 50 |
| | 2 | Polygon ZM | Tka | 71.075867 | Limestone | 7 | Karaisali fm. | | 50 |

Εικόνα 4.7 Δεδομένα υδραυλικής αγωγιμότητας και γεωλογικών στρωμάτων

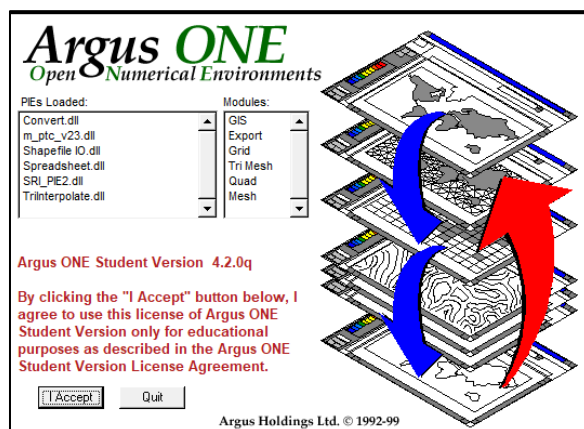
Επίσης, έγινε εισαγωγή των αρχικών συνθηκών εισροής νερού στην περιοχή μελέτης, οι οποίες φαίνονται ως πράσινες κουκίδες και έχουν συγκεκριμένες τιμές για κάποια κομμάτια της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.8 Χάρτης οριακών συνθηκών εισροών της περιοχής μελέτης

4.2 Το περιβάλλον του μοντέλου PTC μέσω του ArgusONE

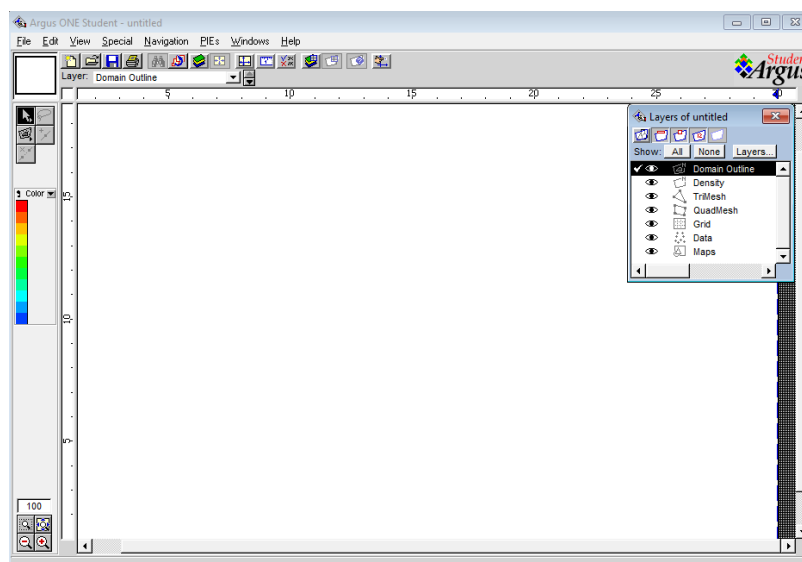
Το πρόγραμμα ArgusOne μαζί με το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code) χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση ροής των υπογείων υδάτων. Το ArgusOne δημιουργεί ένα σύνολο πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών και επιτρέπει την εισαγωγή δεδομένων από Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, μέσω εργαλείων που περιλαμβάνει. Έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί αυτόματα πλέγματα στη περιοχή μελέτης, καθώς και να αντιστοιχεί μεταβλητές σε συγκεκριμένους κόμβους και στοιχεία του πλέγματος, ανάμεσα στα στρώματα που δημιουργεί.



Εικόνα 4.9 Εμφάνιση της οθόνης έναρξης του ArgusOne για φοιτητές

Με τη δημιουργία διάφορων επιπέδων (layers) το ArgusOne συσχετίζει τις εκάστοτε μεταβλητές στο πλέγμα ή σε συγκεκριμένους κόμβους ή στοιχεία του πλέγματος. Ανάλογα με τα δεδομένα που περιέχονται μέσα σε ένα επίπεδο, το κάθε layer έχει διαφορετικό τύπο.

Στο επίπεδο Domain Outline, περιέχονται στοιχεία τα οποία καθορίζουν την περιοχή μελέτης. Στο επίπεδο Mesh γίνεται ο υπολογισμός των μεταβλητών ενώ στα επίπεδα Information γίνεται ο συσχετισμός των μεταβλητών με τα πλέγματα, με τη δυνατότητα προσδιορισμού πολλαπλών μεταβλητών ανά επίπεδο πληροφοριών. Τα επίπεδα τύπου Grid, μπορούν να περιέχουν πληροφορίες σε μορφή blocks (τετραγώνων). Στα Layers τα οποία είναι τύπου Data, εισάγονται δεδομένα από άλλα προγράμματα, όπως το PTC, στο λογισμικό του ArgusOne με σκοπό τη δημιουργία γραφημάτων από τα δεδομένα που εξάγονται από το μοντέλο PTC. Τα επίπεδα μπορούν να αποθηκευτούν ως αρχείο τύπου .mtmb, έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να μεταφέρει το μοντέλο και να το τρέξει σε όποιον υπολογιστή χρειαστεί χωρίς να είναι αναγκαία η εισαγωγή όλων των αρχείων. [Olivares, 2000]



Εικόνα 4.10 Αρχικό περιβάλλον του ArgusOne

Η επιλογή να τρέξει το μοντέλο μπορεί να βρεθεί στο μενού PTEs, στο οποίο δημιουργούνται νέα έργα, γίνεται επεξεργασία του υπάρχοντος σχεδίου PTC, καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του μοντέλου PTC. Τα Layers που δημιουργεί το ArgusOne κατά την έναρξη ενός καινούριου έργου PTC είναι τα παρακάτω.

Στο PTC Domain Outline, ορίζεται η περιοχή μελέτης ως ένα κλειστό πολύγωνο το οποίο προσομοιάζει τα όρια της πραγματικής περιοχής η οποία εξετάζεται. Στο PTC Mesh Density, όταν το πλέγμα δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα, προσδιορίζεται το μέσο μήκος της πλευράς των στοιχείων του. Στο επίπεδο PTC Mesh, δημιουργείται το τριγωνικό ή τετραγωνικό πλέγμα, το σχήμα εξαρτάται από τον χρήστη και ορίζεται από τη έναρξη της δημιουργίας του έργου PTC. Στο επίπεδο PTC Data, εισάγονται τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί, από άλλα προγράμματα, μέσα στο ArgusOne. Στο επίπεδο Maps, εισάγονται ψηφιοποιημένοι χάρτες. Στο PTC Output Graphs, μπορούν να σχεδιαστούν γραφικά για τα υδραυλικά ύψη, τις ταχύτητες ροής και τις συγκεντρώσεις ρύπων από το επίπεδο PTC Data. Στο επίπεδο Rain, προσδιορίζεται η διήθηση της βροχής για το ανώτερο στρώμα. Στο επίπεδο Bottom Elevation, προσδιορίζεται το υψόμετρο του κατώτερου στρώματος.

Για την κάθε περιοχή μελέτης μπορούν να οριστούν πολλαπλά στρώματα, καθένα από τα οποία περιέχουν επίπεδα τα οποία ενδέχεται να έχουν διαφορετικές παραμέτρους. Για κάθε στρώμα ορίζονται οριακές συνθήκες, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω επίπεδα και έχουν ως δείκτη τον αριθμό του στρώματος στο οποίο αναφέρεται.

Για το πρώτο στρώμα, στο επίπεδο Elevation L1, ορίζεται το υψόμετρο του στρώματος. Στο επίπεδο Conductivity L1, ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα ως προς τις τρεις κατευθύνσεις (x, y, z). Στο Initial Heads L1, παρατίθενται τα υδραυλικά ύψη των πηγαδιών. Στο Storativity L1, ορίζεται η αποθηκευτικότητα. Στο επίπεδο BC Flow L1, παρατίθενται η οριακές συνθήκες για τη ροή ως προς τον τύπο και ως προς τις χρονικές περιόδους. Οι χρονικές περίοδοι ορίζονται από την έναρξη του έργου αλλά μπορεί να γίνει επεξεργασία και αργότερα. Ο τύπος της οριακής συνθήκης μπορεί να είναι είτε ένα (1), το οποίο αφορά σταθερό υδραυλικό ύψος, είτε τύπου δύο (2), όπου αφορά σταθερή ροή. Στο επίπεδο Dispersivity L1, ορίζεται η διασπορά ως προς τις τρεις κατευθύνσεις (x, y, z). Στο επίπεδο Porosity L1, ορίζεται η πορώδης της περιοχής μελέτης. Στο Adsorption L1, ορίζεται η προσρόφηση με τρεις μεταβλητές alpha, beta, gamma. Στο Initial Concentration L1, ορίζονται οι αρχικές συγκεντρώσεις ρύπου, εάν υπάρχει ρύπος στο υπέδαφος. Στο επίπεδο BC Transport L1, ορίζονται οι οριακές συνθήκες για τη μεταφορά του ρύπου ως προς τον τύπο και ως προς τις χρονικές περιόδους. Ο τύπος της οριακής συνθήκης μπορεί να είναι είτε ένα (1), το οποίο αφορά συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης σε κόμβο, είτε τύπου δύο (2), όπου αφορά σταθερή συγκέντρωση στο νερό που εισέρχεται. Στο επίπεδο BC Leakage L1, ορίζονται οριακές συνθήκες διαρροής με τις μεταβλητές, Reference_h_L1, Conductance_L1 και Reference_c_L1. Επίσης, δημιουργούνται δύο επίπεδα τα οποία αφορούν την ταχύτητα του ύδατος, το PTC xvelocities, το οποίο αφορά τη συνιστώσα V_x της ταχύτητας που υπολογίστηκε από το μοντέλο PTC και το , το PTC yvelocities, το οποίο αφορά τη συνιστώσα V_y της ταχύτητας που υπολογίστηκε από το μοντέλο PTC.

Πιο συγκεκριμένα, για την έναρξη ενός έργου PTC και την εισαγωγή δεδομένων θα πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

- Εγκατάσταση του μοντέλου PTC και εκκίνηση του ArgusOne.
- Από το μενού PIEs επιλογή New PTC Project και επιλογή τύπου πλέγματος και αριθμού γεωλογικών στρωμάτων, στα οποία μπορεί να γίνει επεξεργασία και μεταγενέστερα.
- Έπειτα, ανοίγει άλλο παράθυρο στο οποίο γίνεται επιλογή του μεγέθους και του αριθμού των χρονικών βημάτων που θα χρησιμοποιήσει το μοντέλο και επιλογή υπολογισμού ταχύτητας, ροής, καθώς και μεταφοράς ρύπων.
- Μετά, γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων είτε βάζοντας τις κατάλληλες τιμές ή με σχεδιασμό σχημάτων στο περιβάλλον σχεδίασης του ArgusOne και μπορεί επίσης να γίνει εισαγωγή δεδομένων με αρχεία τύπου TXT, DXF και SHP. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων ορίζεται η πυκνότητα του πλέγματος από τον χρήστη.
- Στο επίπεδο PTC Mesh, χρησιμοποιώντας το εργαλείο μαγικό ραβδί και επιλέγοντας μέσα στα όρια της περιοχής μελέτης που έχει σχεδιαστεί, δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Μετέπειτα γίνεται έλεγχος έτσι ώστε τα σημεία εισαγωγής ή άντλησης νερού να βρίσκονται πάνω σε κάποιο κόμβο του πλέγματος.
- Από το μενού Special, με την επιλογή Renumber και επιλεγμένη την εντολή Optimize Bandwidth, γίνεται η βελτιστοποίηση στην αρίθμηση των κόμβων. Τέλος, με επιλεγμένο το επίπεδο του PTC Mesh, από το μενού PIEs με επιλογή της εντολής Run PTC ξεκινάει το πρόγραμμα να εκτελεί τη μοντελοποίηση.

4.3 Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο PTC

Στο μοντέλο PTC, για την εισαγωγή των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArgusOne, με τις επεκτάσεις PTC PIE. Για τις παραμέτρους του πεδίου, οι μονάδες μέτρησης είναι ίδιες, το μήκος έχει μονάδα τα μέτρα (m) και ο χρόνος έχει μονάδα μέτρησης την ημέρα (d).

Ρυθμίσεις κατά την εκκίνηση

Με την εκκίνηση του προγράμματος, πρέπει να γίνει επιλογή κάποιων αρχικών παραμέτρων για το μοντέλο στο παράθυρο PTC Configuration. Ονομάστηκε το έργο Project Erdemli, επιλέχθηκε τριγωνικός τύπος πλέγματος, για μεγαλύτερη ακρίβεια και ορίστηκε πως η περιοχή μελέτης θα χωριστεί σε τρία επίπεδα του εδάφους.

PTC Configuration

General | Stresses

Project title: Project Erdemli

Mesh type

- ☒ Triangular
- ☐ Quadrilateral

Physical properties

Molecular diffusion: 0.0001

Upstream weight: 1

Biodegradation

☐ Biodegradation

Dissolved phase: 0.5

Sorbed phase: 1

Use water table

☒ Use water table

Number of iterations for watertable: 50

Convergence criterion: 0.0001

Radioactive decay

☐ Radioactive decay

Radioactive decay: 0

Steady state criterion: 0.01

Number of layers: 3

Layer number

- 1
- 2
- 3

Insert Layer

Delete Layer

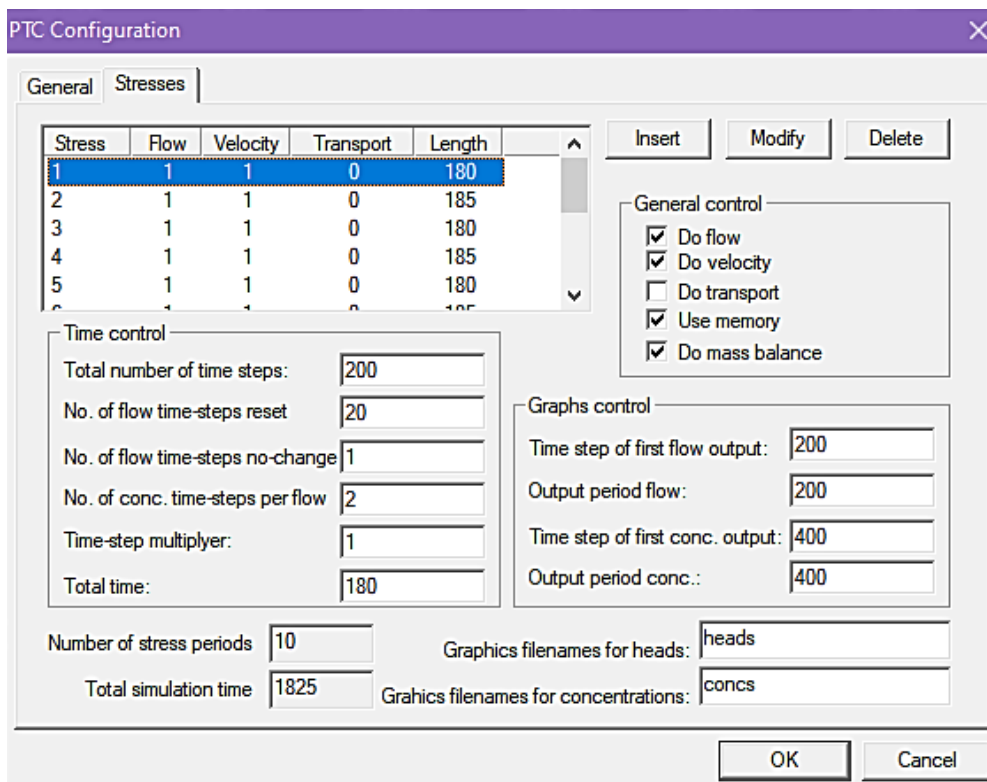
Output Control

- ☒ Echo nodal coordinates
- ☒ Echo interface elevations
- ☒ Echo boundary conditions
- ☒ Echo material properties
- ☒ Echo incidence list
- ☒ Echo infiltration flux
- ☒ Echo initial heads
- ☒ Echo initial concentrations

OK Cancel

Εικόνα 4.11 Καρτέλα έναρξης παραθύρου PTC Configuration

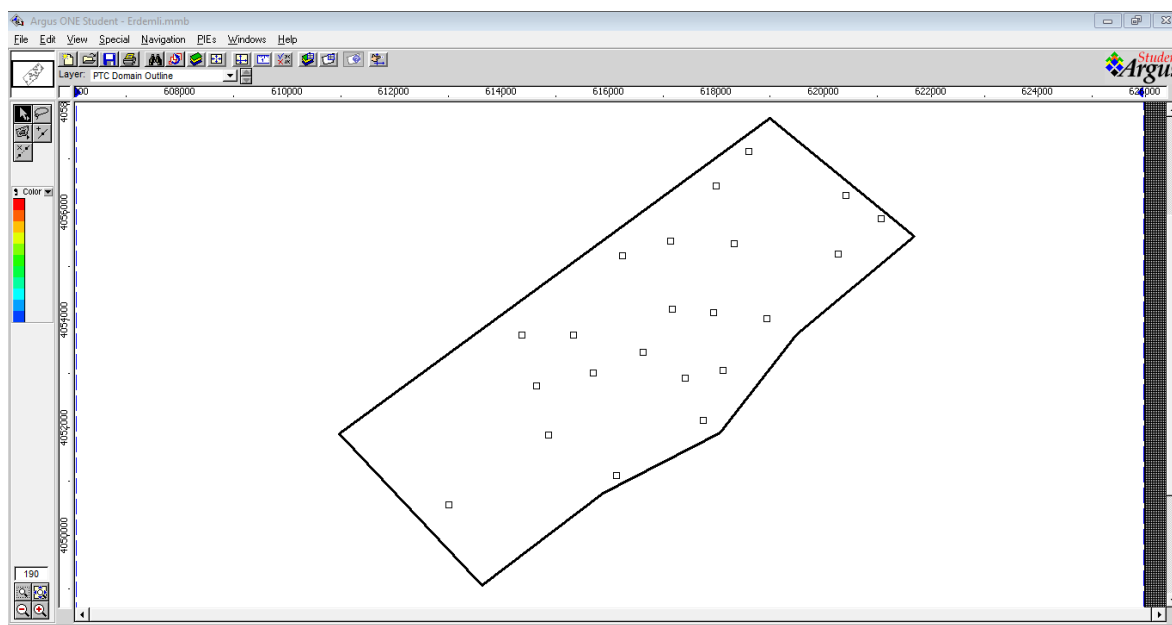
Στη δεύτερη καρτέλα του παραθύρου, γίνεται καθορισμός του χρονικού βήματος που ακολουθεί το μοντέλο, καθώς και τις ιδιότητές του (stresses). Επιλέχθηκε το μοντέλο να τρέξει για πέντε (5) χρονικές περιόδους, για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης και χωρίστηκαν σε υγρή και ξηρή περίοδο. Για την εισαγωγή των δεδομένων ήταν αναγκαία η δημιουργία ξεχωριστού stress για κάθε περίοδο, επομένως στη καρτέλα stresses δημιουργήθηκαν δέκα (10) χρονικές περίοδοι. Επίσης, επιλέχθηκε να μην υπολογίσει το μοντέλο τη μεταφορά ρύπων.



Εικόνα 4.12 Καρτέλα Stresses του παραθύρου PTC Configuration

Εισαγωγή των κύριων δεδομένων

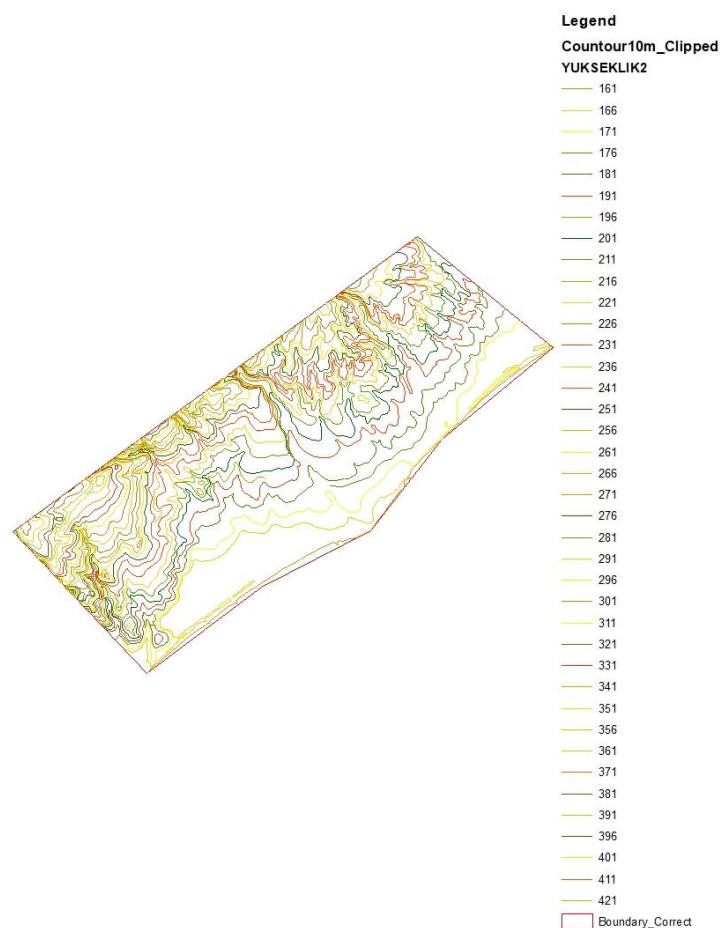
Αρχικά, στο επίπεδο PTC Domain Outline, εισήχθη το πολύγωνο της περιοχής μελέτης, το οποίο δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του ArcGIS και αποθηκεύτηκε σε αρχείο μορφής shape file (.shp). Στο μοντέλο, γίνεται εισαγωγή επιλέγοντας το PTC Domain Outline Layer, από την καρτέλα File, Import PTC Domain Outline, Import Shapefile. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για την εισαγωγή των πηγαδιών πολύγωνο της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.13 Πολύγωνο περιοχής μελέτης μαζί με τις γεωτρήσεις

Από προηγούμενη μελέτη στην περιοχή υπήρχαν ήδη δεδομένα για τη γεωλογία και την υδραυλική αγωγιμότητα που υπάρχει στην περιοχή τα οποία ήταν αποθηκευμένα σε αρχείο shape file. Εισάγοντας το αρχείο της γεωλογίας, παρείχε πληροφορίες και για τα τρία στρώματα L1, L2, L3, καθώς η γεωλογία της περιοχής είναι ομοιόμορφη για το βάθος στο οποίο υπάρχουν τα πηγάδια.

Έπειτα, έγινε εισαγωγή των δεδομένων για το υψόμετρο στο Layer του Elevation L1, Elevation L2, Elevation L3 και Bottom Elevation. Το κατώτατο υψόμετρο θεωρήθηκε ίσο με μηδέν (0) και τα δύο κατώτερα στρώματα θεωρήθηκε πως έχουν σταθερό πάχος και σταθερό ύψος. Για το επίπεδο L1 το υψόμετρο θεωρήθηκε ογδόντα ένα μέτρα (81m) και για το επίπεδο L2 το υψόμετρο θεωρήθηκε εκατό σαράντα ένα μέτρα (141m). Στο επίπεδο L3 έγινε εισαγωγή του shapefile των ισοϋψών καμπυλών και κατά το μήκος της ακτογραμμής σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο το οποίο αφορά το βάθος του υδροφορέα.



Εικόνα 4.14 Χάρτης ισοϋψών καμπυλών υψομέτρου

Στο μοντέλο εισήχθη και η παράμετρος της βροχής ως διήθηση του νερού της βροχής, με ποσοστό διήθησης τριάντα τοις εκατό (30%) επί της μετρημένης βροχόπτωσης. Για τα μέτρα βροχόπτωσης ανά ημέρα, τα δεδομένα λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη για την περίοδο πέντε χρόνων και χωρισμένα σε δέκα περιόδους ανάλογα με την ξηρά και υγρή περίοδο. Στη συγκεκριμένη μελέτη, ως υγρή περίοδος ορίστηκαν οι μήνες από τον Οκτώβριο έως και τον Μάρτιο, ενώ ξηροί μήνες ορίστηκαν από τον Απρίλιο μέχρι και τον Σεπτέμβριο για χρονική περίοδο από 2003 έως 2008.

| Stress Period | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| PTC Rain (m/d) | 0.0007613 | 0.0001090 | 0.0004348 | 0.0001198 | 0.0004768 | 0.0000485 | 0.0007058 | 0.0001260 | 0.0006297 | 0.0001171 |

Εικόνα 4.15 Δεδομένα διήθησης λόγω βροχόπτωσης

Για τον υπολογισμό της διήθησης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης τα οποία αφορούσαν την βροχή για κάθε συγκεκριμένη μέρα του χρόνου. Έγινε κατηγοριοποίηση ανάλογα με την περίοδο, αθροίστηκε η βροχόπτωση και διαιρέθηκε με τον αριθμό των ημερών της κάθε περιόδου. Για να υπολογιστεί η διήθηση λόγω βροχόπτωσης το προηγούμενο αποτέλεσμα πολλαπλασιάστηκε με 0.3 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.15 .

Εισαγωγή Οριακών Συνθηκών

Σε όλα τα μοντέλα είναι αναγκαίος ο ορισμός οριακών συνθηκών για τον υπολογισμό και την εκτέλεση του μοντέλου. Στο μοντέλο PTC, οι οριακές συνθήκες εισάγονται στο BC Flow Layer για κάθε επίπεδο I1, L2, L3. Οι οριακές συνθήκες χωρίζονται στους εξής δύο τύπους:

- 1^{ου} τύπου : Οι οριακές συνθήκες οι οποίες αφορούν σταθερό υδραυλικό ύψος
- 2^{ου} τύπου : Οι οριακές συνθήκες οι οποίες αφορούν σταθερό ροή

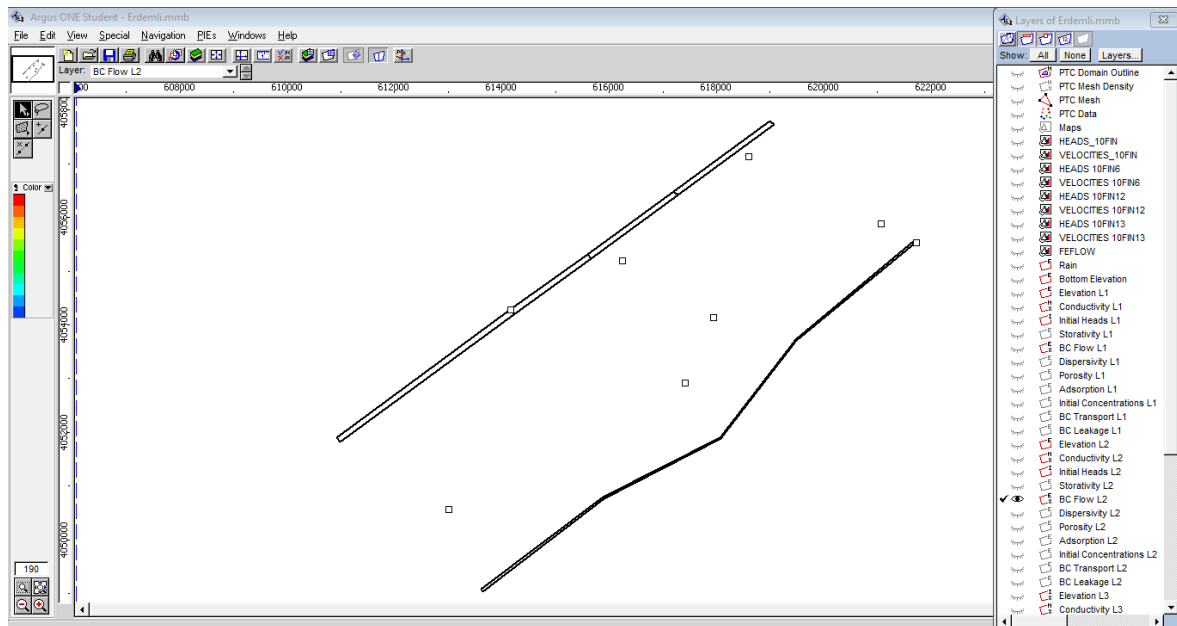
Οι συνθήκες πρώτου τύπου, στη συγκεκριμένη εργασία, αφορούν τη στάθμη της θάλασσας. Ως βάθος του υδροφορέα και στάθμη της θάλασσας, ορίστηκε το κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο ύψος νερού μέσα στα πηγάδια, το οποίο παρατηρήθηκε στα εκατό εξήντα ένα μέτρα (161m). Στο επίπεδο Elevation L3 προστέθηκαν τα 161m έτσι ώστε οι ισοϋψείς να έχουν το σωστό υψόμετρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Στο επίπεδο BC Flow L3 σχεδιάζεται ένα πολύγωνο στη μεριά που υπάρχει η θάλασσα στη περιοχή μελέτης και παίρνει την τιμή της οριακής συνθήκης, έπειτα αντιγράφεται και στα υπόλοιπα επίπεδα, BC Flow L1, BC Flow L2.

Οι συνθήκες δεύτερου τύπου, στην παρούσα εργασία, αφορούν τα πηγάδια άντλησης και τα πολύγωνα που παρουσιάζουν την εισροή νερού έξω από την περιοχή μελέτης. Τα πολύγωνα εισροών δημιουργήθηκαν με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε και για τις συνθήκες πρώτου τύπου στο επίπεδο BC Flow L3 και αντιγράφηκαν στα αντίστοιχα Layers των άλλων επιπέδων. Τα δεδομένα των εισροών πάρθηκαν από προηγούμενη μελέτη της περιοχής και θεωρήθηκαν ίδια για όλες τις χρονικές περιόδους.

| Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------|---------|--------|--------|--------|
| F | 17840.0 | 9948.4 | 3519.0 | 6760.1 |

Εικόνα 4.16 Δεδομένα εισροών νερού έξω από την περιοχή μελέτης

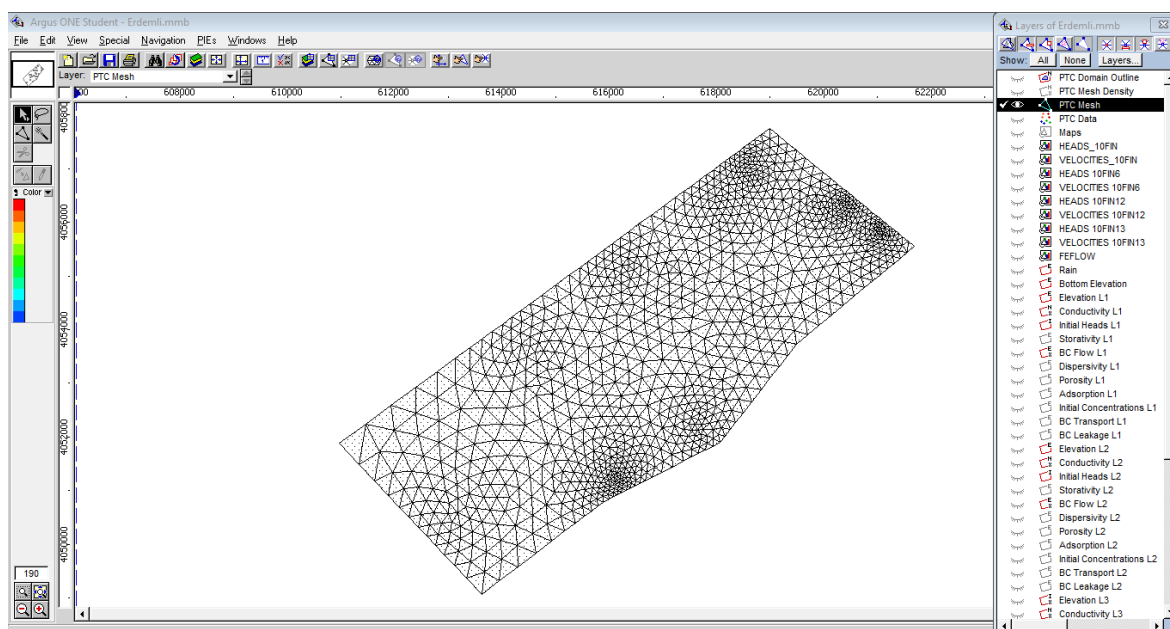
Τα πηγάδια άντλησης διαχωρίστηκαν ανάλογα με το βάθος τους στο κατάλληλο επίπεδο Elevation του μοντέλου. Οι τιμές της άντλησης εισάγονται στο μοντέλο με αρνητικό πρόσημο, αυτό οφείλεται στην αφαίρεση νερού από το υπέδαφος. Οι τιμές των οριακών συνθηκών εισάγονται στο μοντέλο με θετικό πρόσημο γιατί αφορούν την εισχώρηση νερού στο πεδίο μελέτης.



Εικόνα 4.17 Χάρτης οριακών συνθηκών για το επίπεδο L3

Σχεδιασμός Πλέγματος (PTC Mesh)

Ολοκληρώνοντας όλα τα παραπάνω βήματα, το τελικό στάδιο είναι ο σχεδιασμός του πλέγματος έτσι ώστε να εκτελεστεί το πρόγραμμα. Για τη σωστή δημιουργία του πλέγματος, θα πρέπει να αντιγραφούν τα πηγάδια άντλησης στο Domain Outline Layer, ώστε το πρόγραμμα να σχεδιάσει, ακριβώς επάνω στο κάθε ένα, κόμβο. Η πυκνότητα του πολυγώνου της περιοχής μελέτης ορίζεται 5000 και των γεωτρήσεων ορίζεται 4000. Στο επίπεδο PTC Mesh, ενεργοποιώντας το εργαλείο «Magic Wand», γίνεται κλικ σε οποιοδήποτε σημείο μέσα στη περιοχή που μελετάται και το ArgusOne φτιάχνει το πλέγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.18 . Στο πλέγμα δημιουργήθηκαν 1048 κόμβοι, οπότε ήταν αναγκαία η σωστή αρίθμηση τους, από το μενού Special, στην επιλογή Renumber, επιλέγεται το κουτί Optimize Bandwidth.



Εικόνα 4.18 Πλέγμα στοιχείων της περιοχής μελέτης του μοντέλου PTC

Μετά τη διαδικασία της επαναρίθμησης, μπορεί να γίνει η εκτέλεση του μοντέλου PTC. Στο επίπεδο PTC Mesh, στο μενού PIEs, επιλέγεται το Run PTC. Στο παράθυρο που ανοίγει ορίζεται ο φάκελος που θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα εξαγωγής και το όνομά τους και εκτελείται το μοντέλο σε αναδυόμενο παράθυρο MS-DOS.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

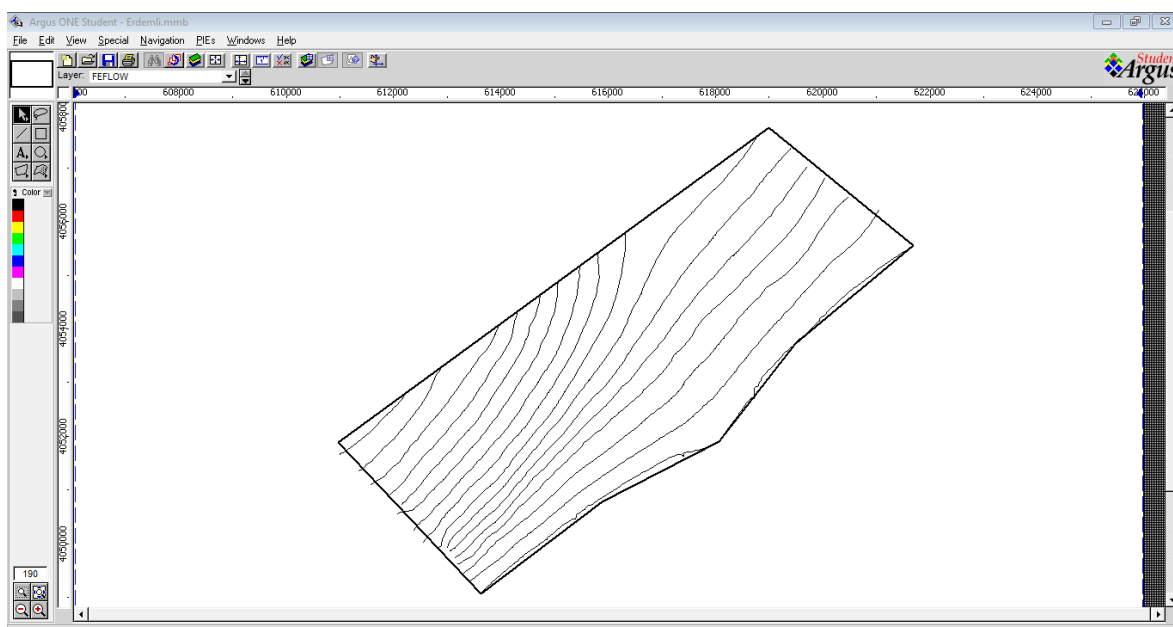
completed flow time step number    7
completed flow time step number    8
completed flow time step number    9
completed flow time step number   10
completed flow time step number   11
completed flow time step number   12
completed flow time step number   13
completed flow time step number   14
completed flow time step number   15
completed flow time step number   16
completed flow time step number   17
completed flow time step number   18
completed flow time step number   19
completed flow time step number   20

```

Εικόνα 4.19 Παράθυρο εκτέλεσης MS-DOS του μοντέλου PTC

4.4 Βαθμονόμηση Μοντέλου

Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου, αποσκοπεί στην επίτευξη της όσο το δυνατό ικανοποιητικότερης συμφωνίας των μετρήσεων στο πεδίο με τα αποτελέσματα που εξήγαγε το μοντέλο. Για να γίνει βαθμονόμηση θα πρέπει να επιλεχθεί μια συγκεκριμένη χρονική περίοδος και δεδομένα τα οποία αντιστοιχούν σε αυτή. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα και με μεταβολές σε μεταβλητές του μοντέλου, όπως τις εισροές στη περιοχή μελέτης, επιτελείται βελτίωση των αρχικών αποτελεσμάτων του μοντέλου. Από προηγούμενη μελέτη της περιοχής του Erdemli, πάρθηκαν τα δεδομένα στάθμης στη περιοχή μελέτης ως αρχικές τιμές, για το ίδιο χρονικό διάστημα που έτρεξε το μοντέλο PTC. Στην εικόνα 4.20 φαίνονται οι ισοϋψείς καμπύλες που προέκυψαν από τη προηγούμενη μελέτη της περιοχής, στην οποία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο FEFLOW. Οι ισοϋψείς είναι σχεδιασμένες ανά πέντε (5) μέτρα ξεκινώντας από μηδέν (0) στην επιφάνεια της θάλασσας και καταλήγοντας στα εβδομήντα πέντε (75) μέτρα προς τα δυτικά της περιοχής.



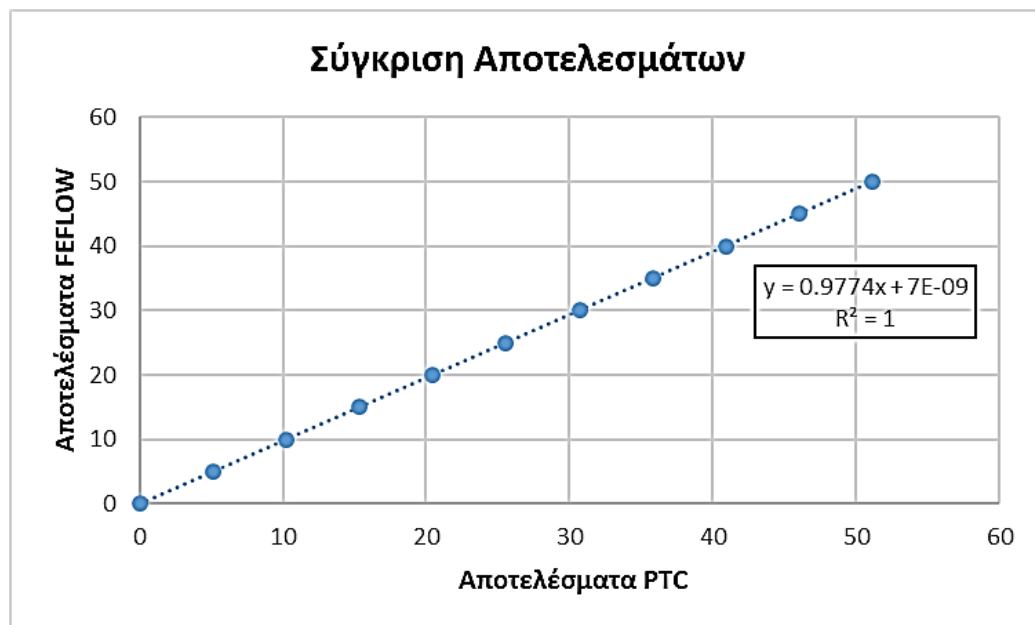
Εικόνα 4.20 Γράφημα ισοϋψών υδραυλικών υψών για το μοντέλο FEFLOW

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ως κύρια μεταβλητή ορίστηκαν οι εισροές, οι οποίες προέρχονται έξω από την περιοχή μελέτης και εισχωρούν σε αυτή. Οι αρχικές εισροές που εισήχθησαν ως δεδομένα πολλαπλασιάστηκαν με διάφορες τιμές, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.21, έτσι ώστε τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC να προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του μοντέλου FEFLOW. Το μοντέλο έτρεξε για όλες τις τιμές έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή εισροών (F).

| x1 | | | | | x2 | | | | |
|-------------|---------|---------|-------|--------|-------------|---------|--------|--------|--------|
| Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 | Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 |
| F | 2098.8 | 1170.4 | 414.0 | 795.3 | F | 4197.6 | 2340.8 | 828 | 1590.6 |
| x4 | | | | | x6 | | | | |
| Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 | Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 |
| F | 8395.2 | 4681.6 | 1656 | 3181.2 | F | 12592.8 | 7022.4 | 2484 | 4771.8 |
| x8 | | | | | x8.5 | | | | |
| Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 | Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 |
| F | 16790.4 | 9363.2 | 3312 | 6362.4 | F | 17840.0 | 9948.4 | 3519.0 | 6760.1 |
| x9 | | | | | x10 | | | | |
| Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 | Flow Stream | 1 | 2 | 3 | 4 |
| F | 18889.2 | 10533.6 | 3726 | 7157.7 | F | 20988 | 11704 | 4140 | 7953 |

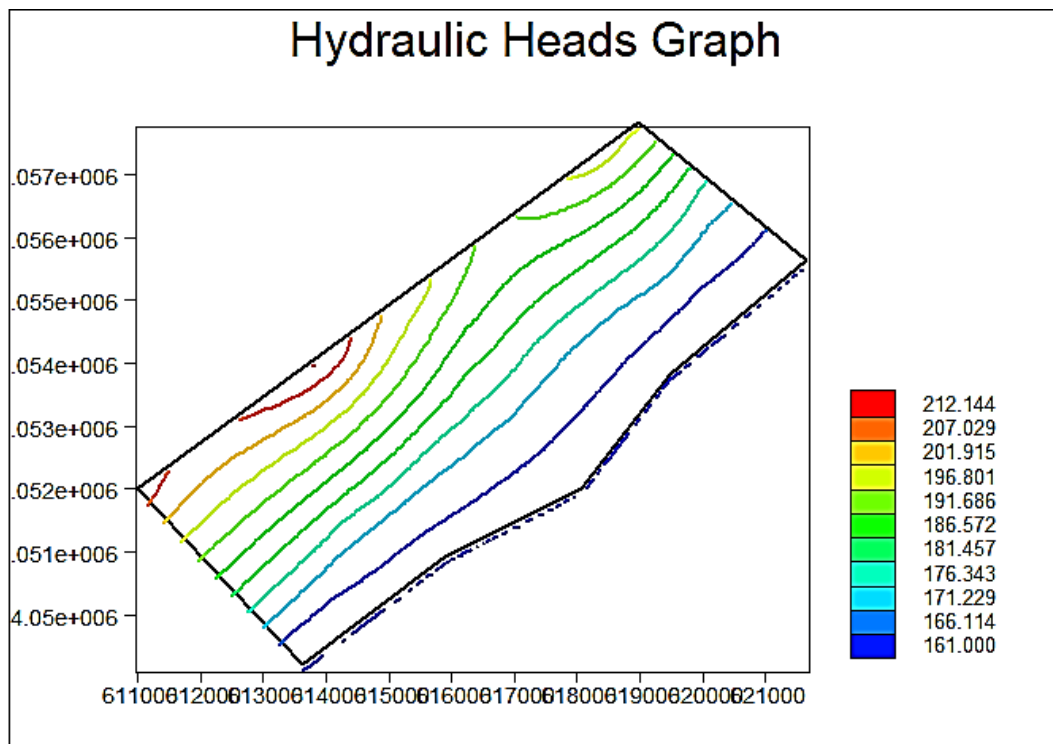
Εικόνα 4.21 Πίνακας εισροών για βαθμονόμηση του μοντέλου PTC

Έπειτα από την εύρεση των τιμών εισροής, δημιουργήθηκε ένα γράφημα (Εικόνα 4.22) το οποίο απεικονίζει τα υδραυλικά ύψη που βρέθηκαν με το μοντέλο FEFLOW στον κάθετο άξονα και τα υδραυλικά ύψη που βρέθηκαν με το μοντέλο PTC στον οριζόντιο άξονα. Τα αποτελέσματα βρίσκονται επάνω στην γραμμή τάσης των σαράντα πέντε (45) μοιρών, οπότε η βαθμονόμηση του μοντέλου είναι επιτυχής.

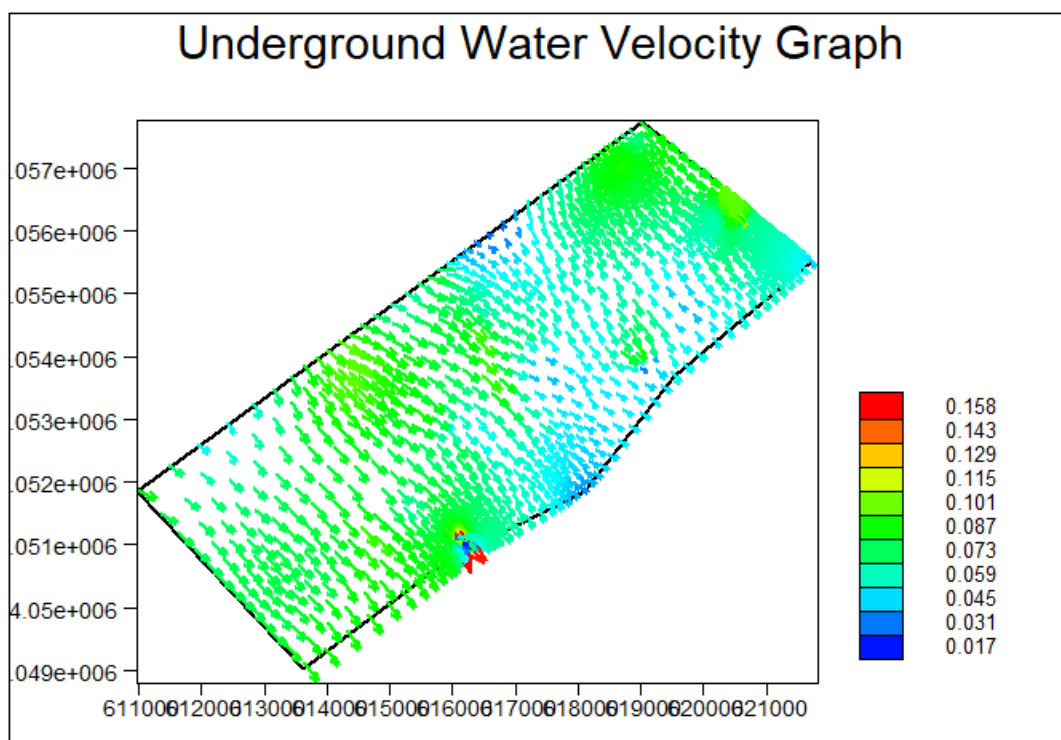


Εικόνα 4.22 Γράφημα σύγκρισης αποτελεσμάτων μοντέλων FEFLOW και PTC

Τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC πριν την βαθμονόμηση, για τα υδραυλικά ύψη φαίνονται στην εικόνα 4.23 και τα αποτελέσματα για την ταχύτητα ροής φαίνονται στην εικόνα 4.24.



Εικόνα 4.23 Γράφημα ισοϒψών υδραυλικών υψών για το μοντέλο PTC



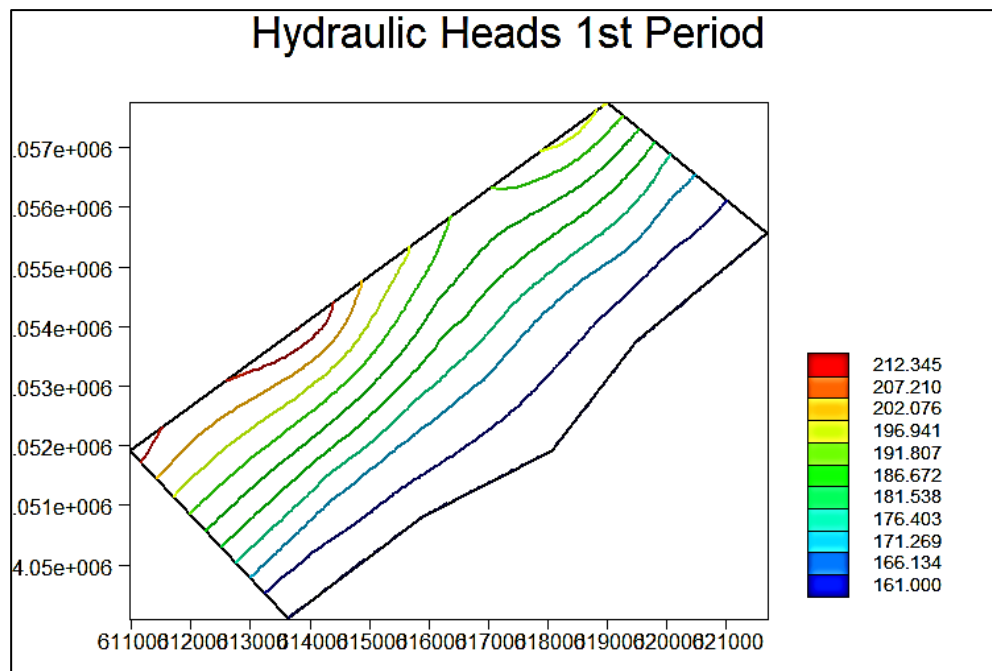
Εικόνα 4.24 Γράφημα ταχύτητας ροής για το μοντέλο PTC

5. Αποτελέσματα

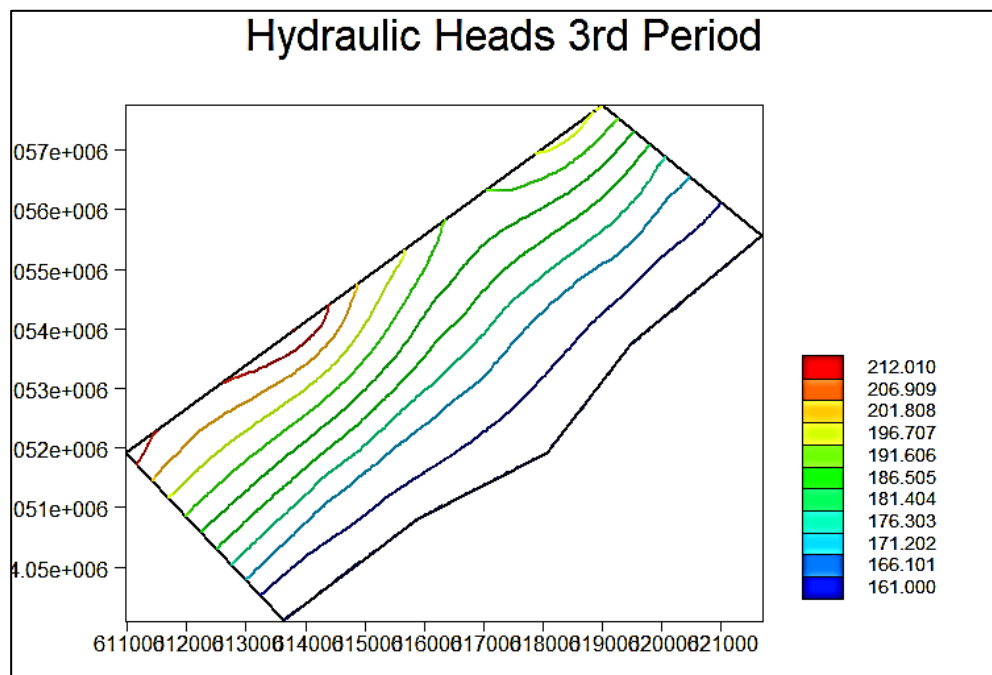
Μετά τη βαθμονόμηση, το μοντέλο έχει δημιουργήσει τους χάρτες υδραυλικού ύψους και ταχύτητας ροής, για δέκα χρονικές περιόδους. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται ανά χρονική περίοδο για τις χειμερινές και θερινές περιόδους ξεχωριστά.

Χειμερινή περίοδος

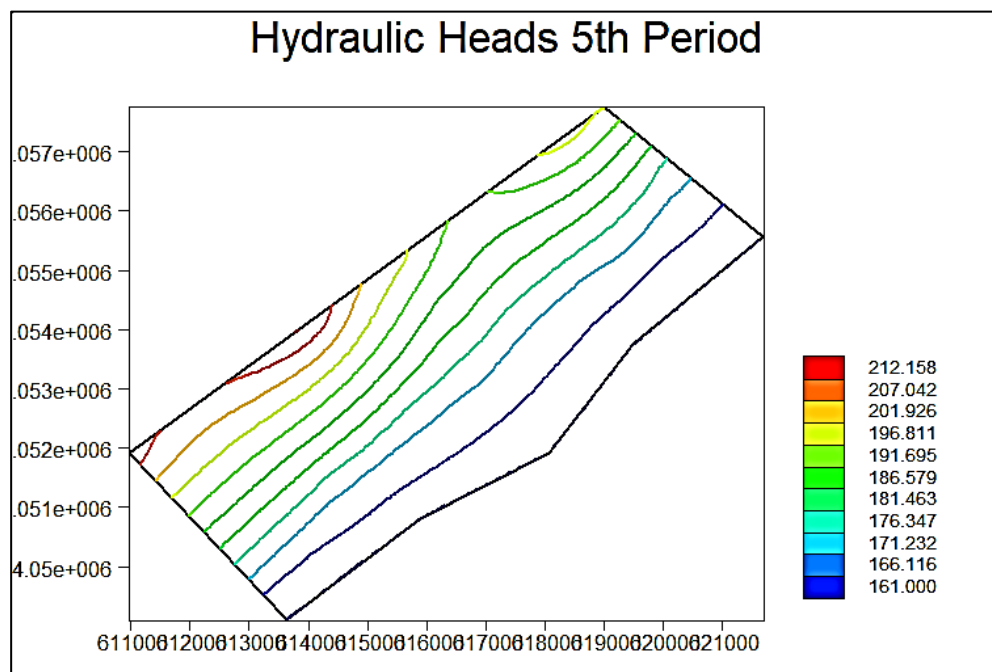
Η χειμερινή περίοδος για τη συγκεκριμένη εργασία αρχίζει από τον Οκτώβριο και λήγει τέλη Μαρτίου. Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν το υδραυλικό ύψος του νερού στη περιοχή μελέτης όπου το επίπεδο της θάλασσας θεωρήθηκε 161m.



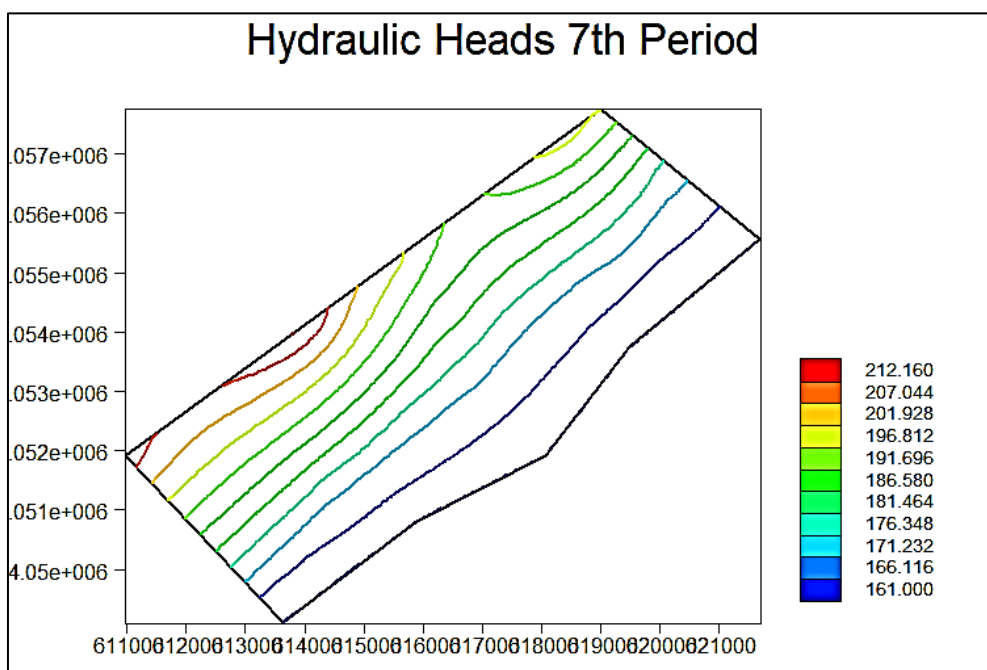
Εικόνα 5.1 Γράφημα υδραυλικών υψών 1^{ης} περιόδου



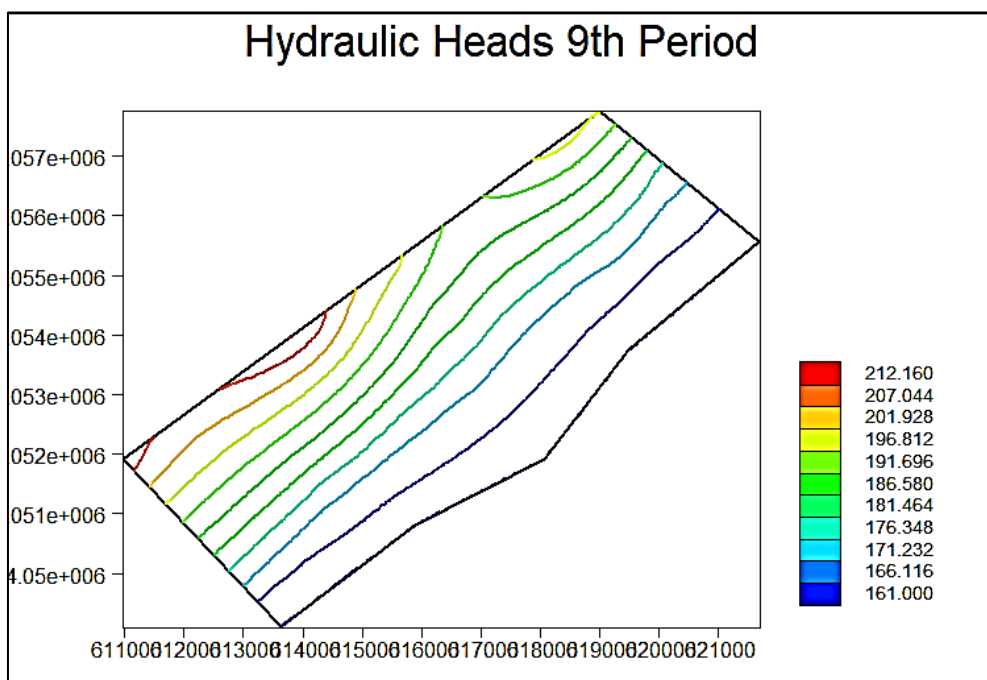
Εικόνα 5.2 Γράφημα υδραυλικών υψών 3^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.3 Γράφημα υδραυλικών υψών 5^{ης} περιόδου

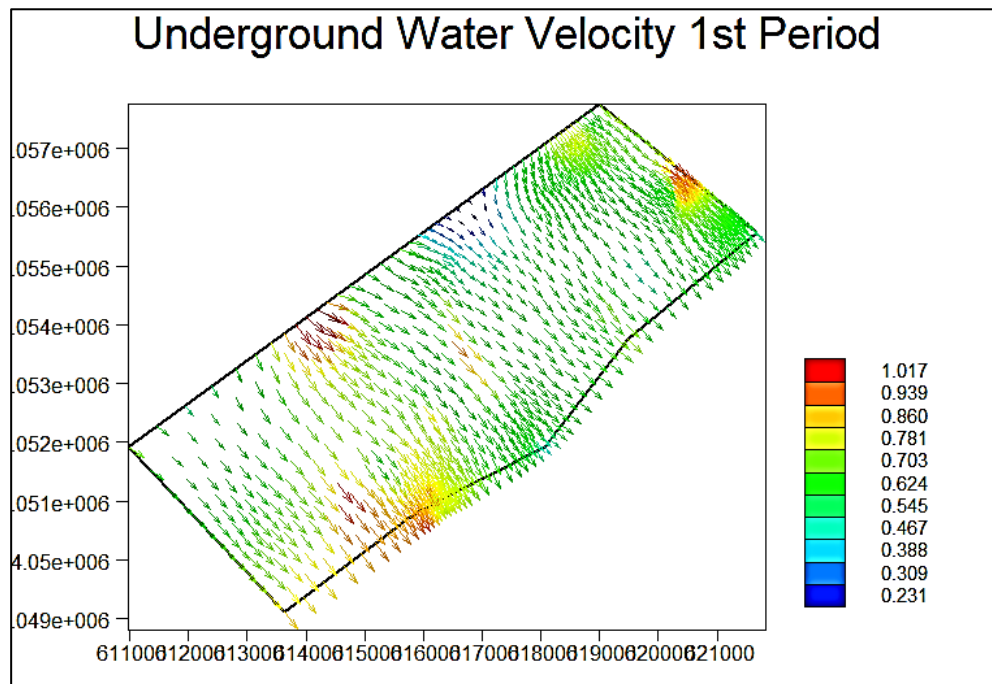


Εικόνα 5.4 Γράφημα υδραυλικών υψών 7^{ης} περιόδου

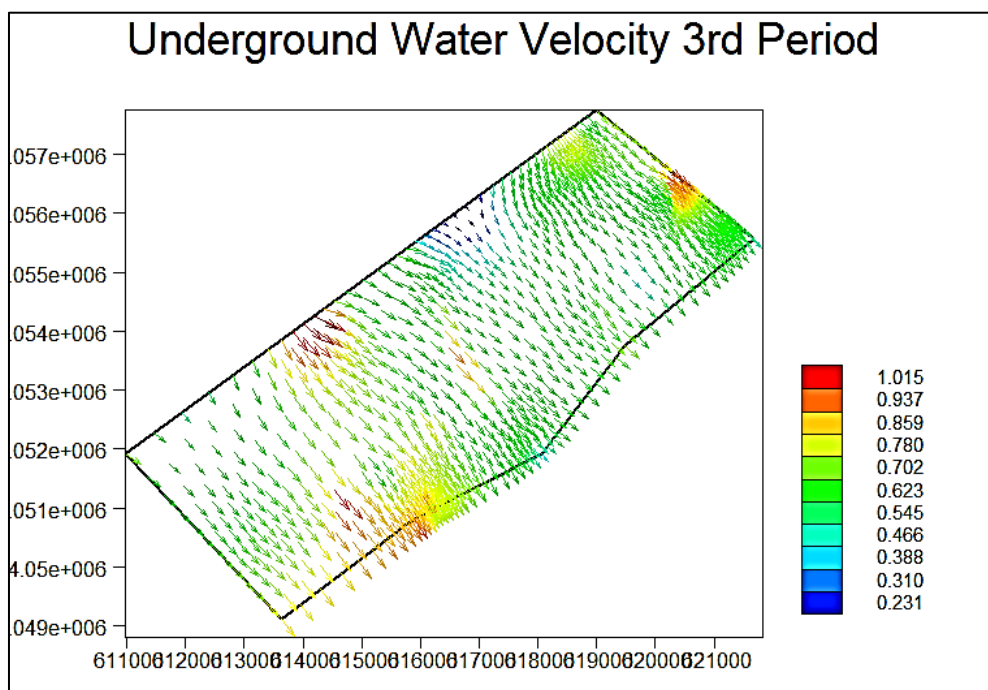


Εικόνα 5.5 Γράφημα υδραυλικών υψών 9^{ης} περιόδου

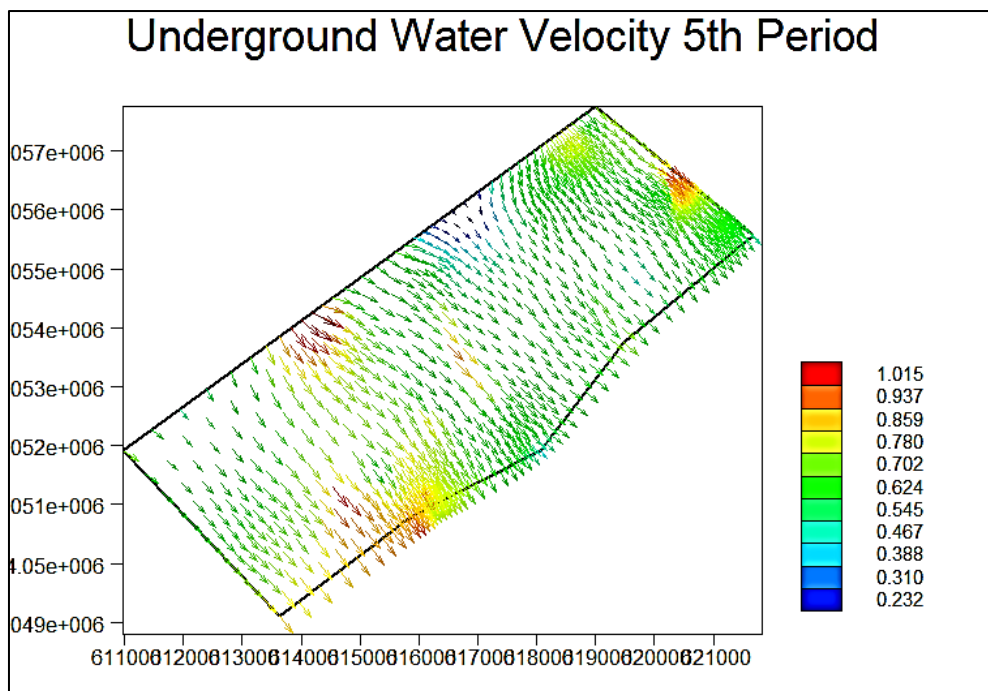
Από τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνεται πως για την πρώτη χειμερινή περίοδο που έτρεξε το μοντέλο το ανώτατο υδραυλικό ύψος είναι το υψηλότερο ενώ για την δεύτερη χειμερινή περίοδο παρατηρείται το χαμηλότερο ανώτατο υδραυλικό ύψος. Για τη ταχύτητα ροής του ύδατος τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC για τις χειμερινές περιόδους παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



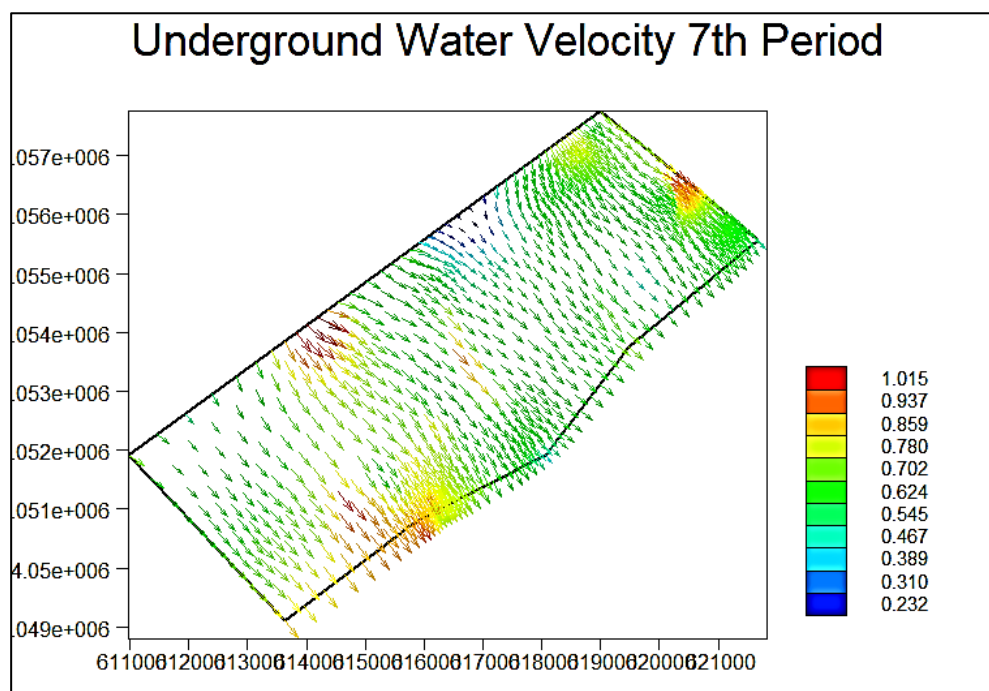
Εικόνα 5.6 Γράφημα ταχυτήτων ροής 1^{ης} περιόδου



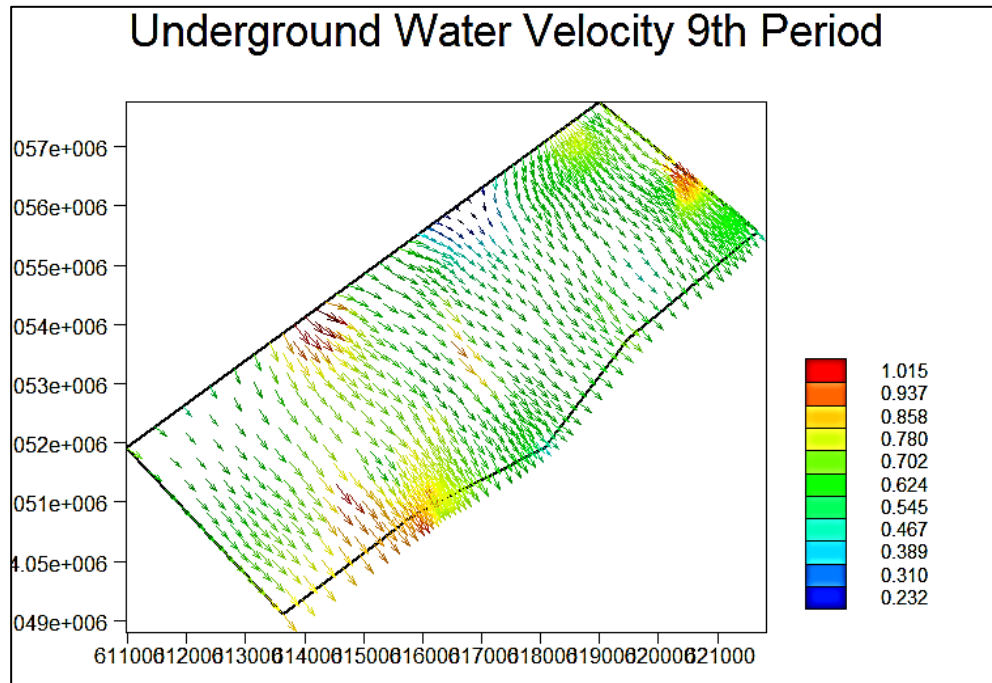
Εικόνα 5.7 Γράφημα ταχυτήτων ροής 3^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.8 Γράφημα ταχυτήτων ροής 5^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.9 Γράφημα ταχυτήτων ροής 7^{ης} περιόδου

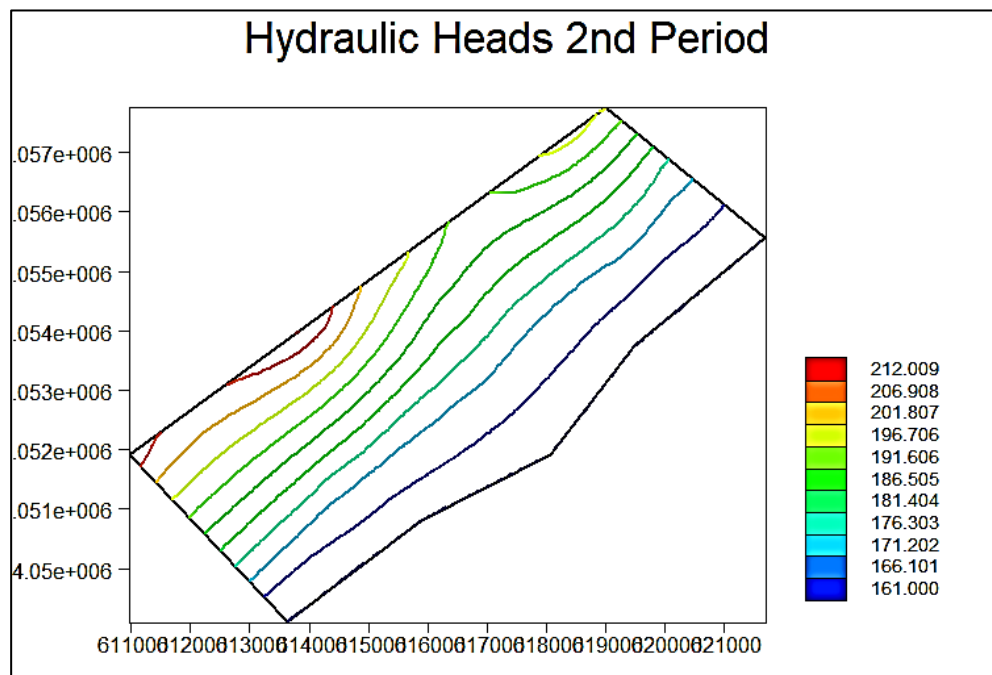


Εικόνα 5.10 Γράφημα ταχυτήτων ροής 9^{ης} περιόδου

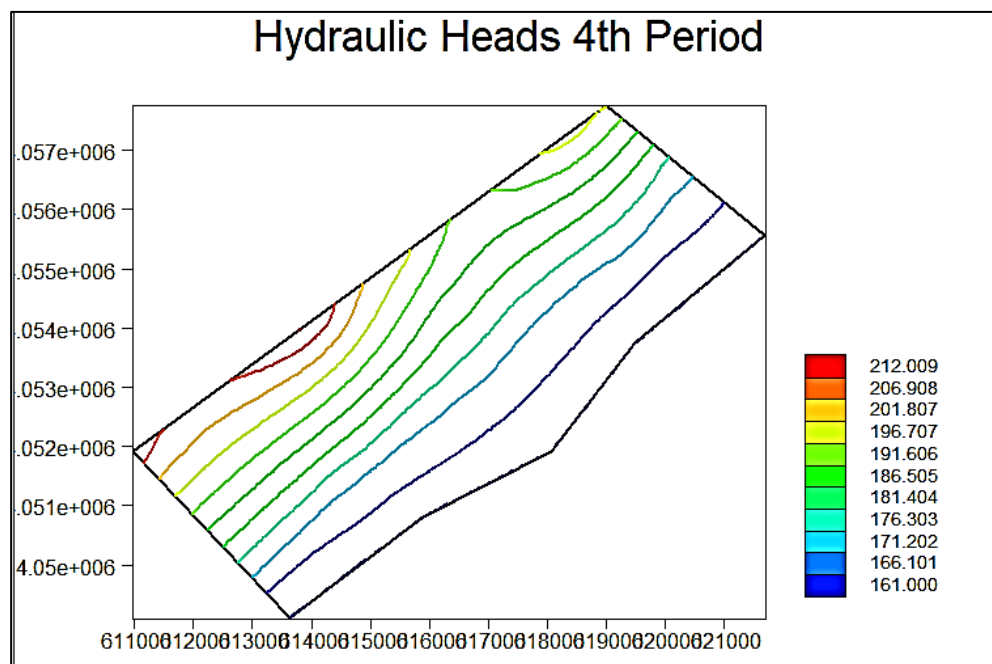
Για τη ταχύτητα ροής παρατηρείται το ίδιο μοτίβο ροής για όλες τις χειμερινές περιόδους που έτρεξε το μοντέλο. Ελάχιστα μεγαλύτερη ταχύτητα ροής υπολογίστηκε από το μοντέλο για την πρώτη χειμερινή περίοδο, ενώ για τις υπόλοιπες περιόδους οι μεταβολές βρίσκονται στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο. Μεγαλύτερη ταχύτητα ροής παρατηρείται σε σημεία που υπάρχει απότομη αλλαγή στο υψόμετρο, καθώς και στην περιοχή η οποία δέχεται το μεγαλύτερο ποσό εισροών έξω από τη περιοχή μελέτης.

Θερινή περίοδος

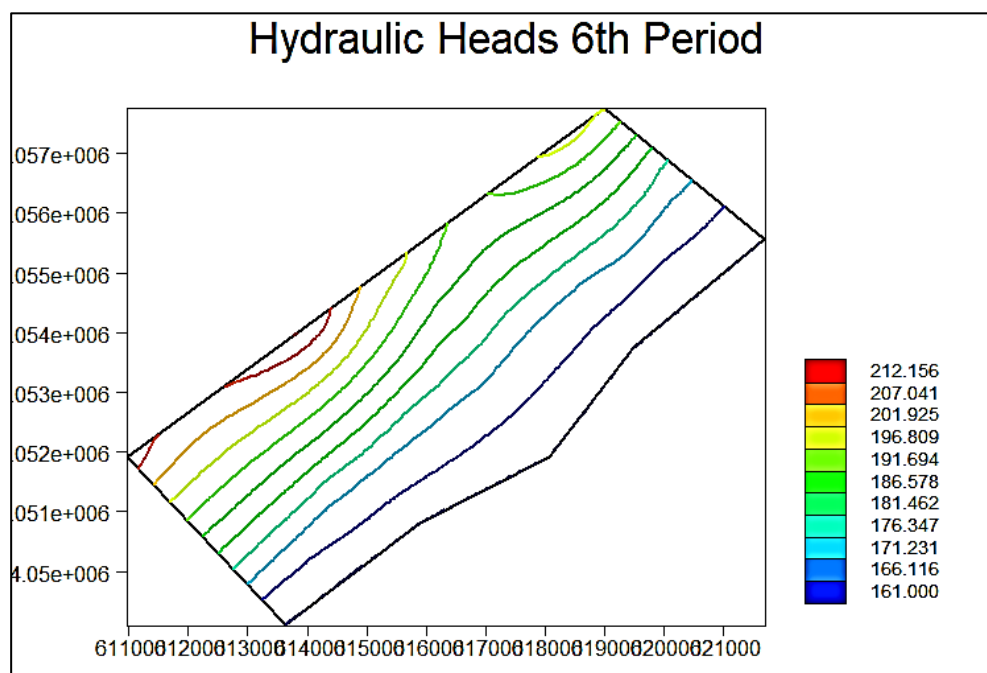
Η θερινή περίοδος αρχίζει από τον Απρίλιο και λήγει τέλη Σεπτεμβρίου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου Princeton Transport Code για τις ισοϋψείς γραμμές υδραυλικών υψών παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



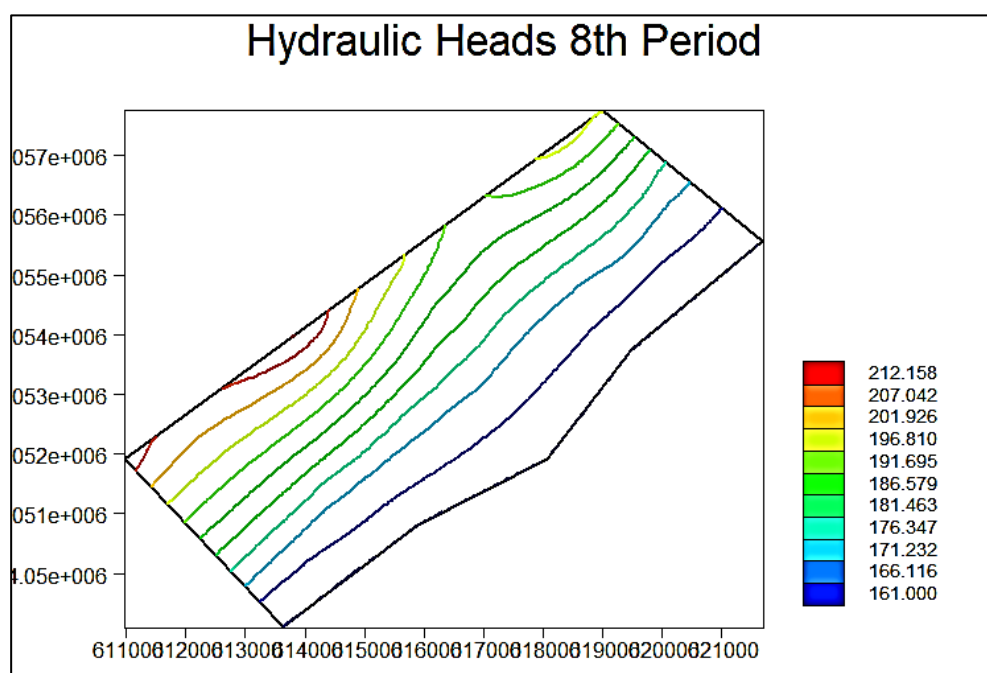
Εικόνα 5.11 Γράφημα υδραυλικών υψών 2^{ης} περιόδου



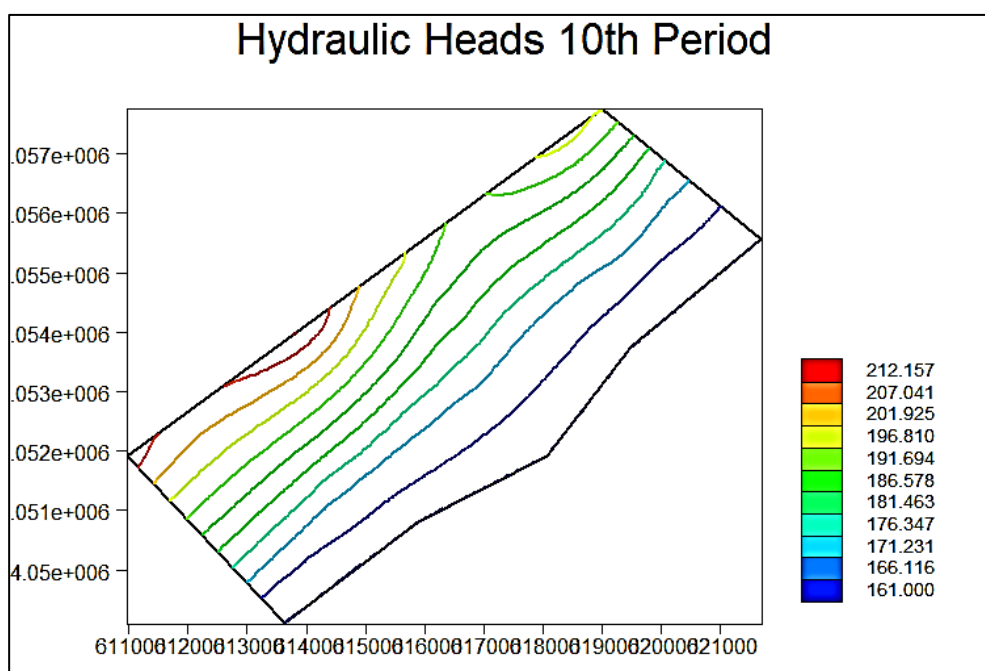
Εικόνα 5.12 Γράφημα υδραυλικών υψών 4^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.13 Γράφημα υδραυλικών υψών 6^{ης} περιόδου

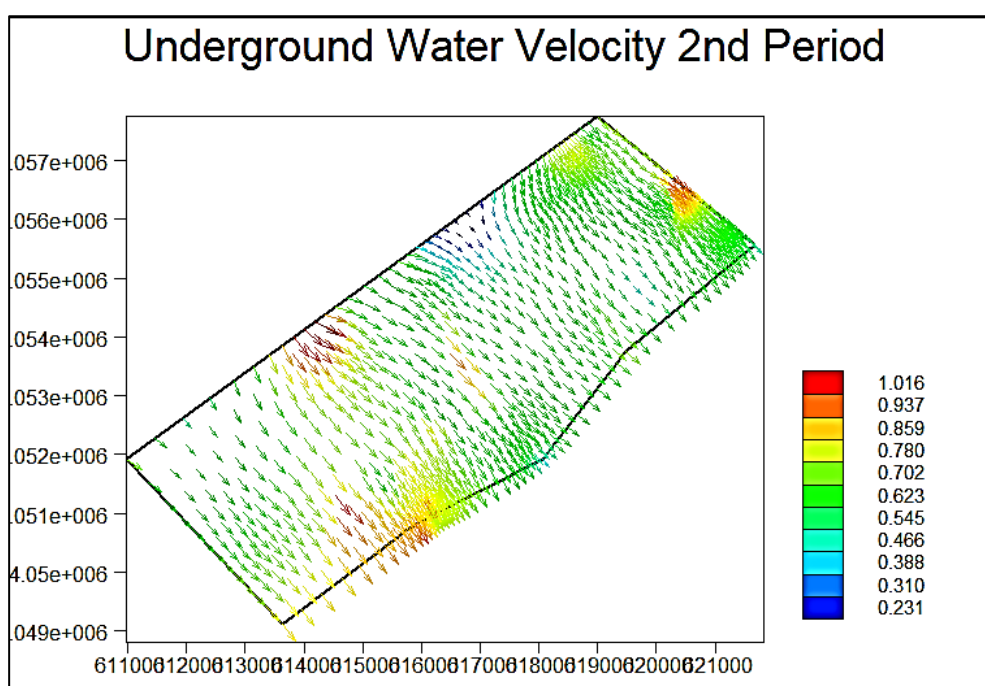


Εικόνα 5.14 Γράφημα υδραυλικών υψών 8^{ης} περιόδου

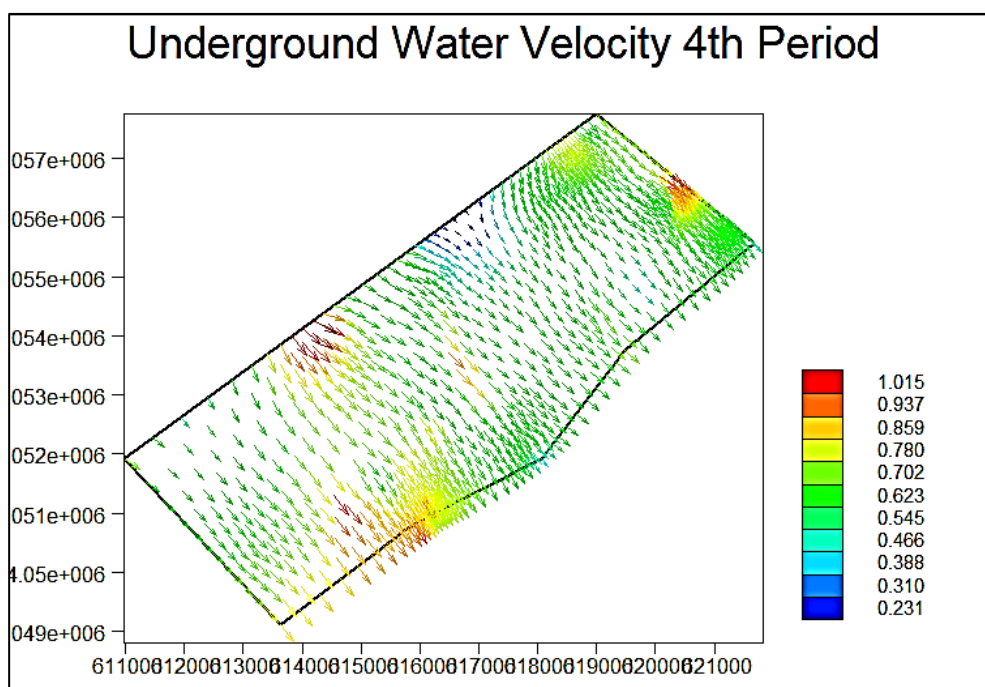


Εικόνα 5.15 Γράφημα υδραυλικών υψών 10^{ης} περιόδου

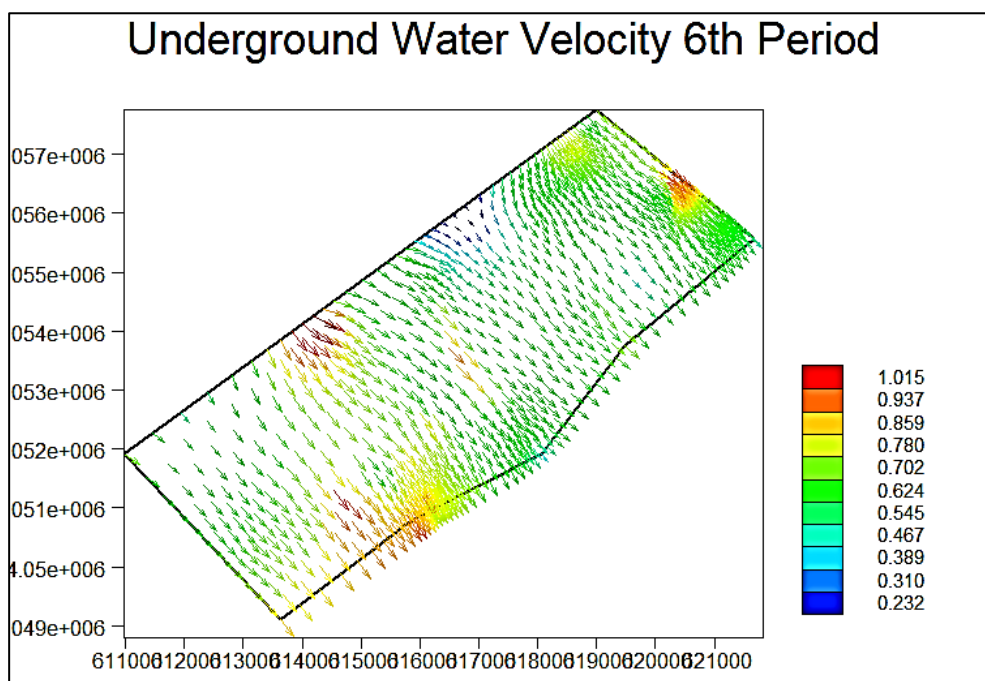
Για τους θερινούς μήνες, παρατηρείται τις πρώτες δύο περιόδους, χαμηλότερο υδραυλικό ύψος με απότομη αύξηση την τρίτη περίοδο, της κλίμακας των εκατοστών. Το υδραυλικό ύψος, για τις υπόλοιπες περιόδους, φαίνεται να έχει ελάχιστες μεταβολές. Για τη ταχύτητα ροής του ύδατος τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC για τις θερινές περιόδους παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



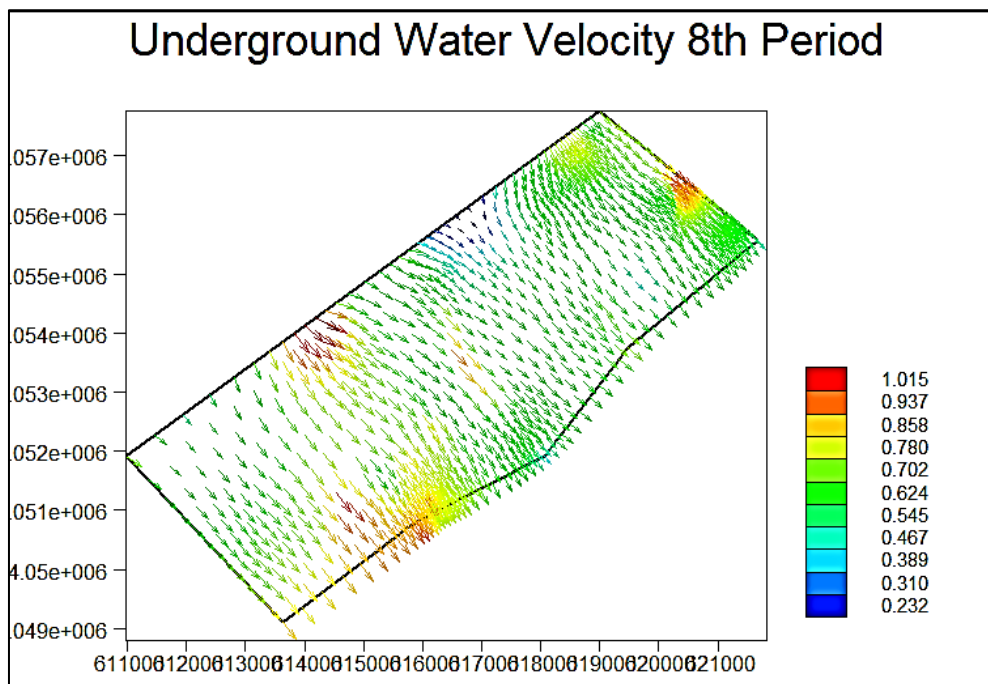
Εικόνα 5.16 Γράφημα ταχυτήτων ροής 2^{ης} περιόδου



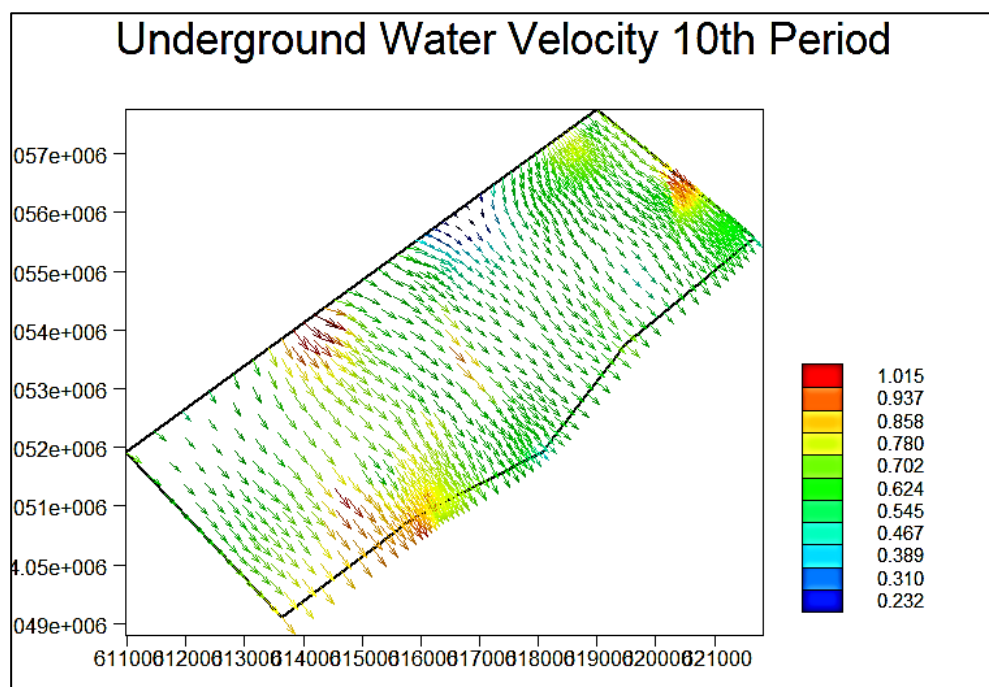
Εικόνα 5.17 Γράφημα ταχυτήτων ροής 4^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.18 Γράφημα ταχυτήτων ροής 6^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.19 Γράφημα ταχυτήτων ροής 8^{ης} περιόδου



Εικόνα 5.20 Γράφημα ταχυτήτων ροής 10^{ης} περιόδου

Για τη θερινή περίοδο, η ταχύτητα ροής παρατηρείται πως παραμένει σχετικά σταθερή για το διάστημα των πέντε χρόνων στο οποίο διεξάγεται η εργασία. Οι διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο, το οποίο ισχύει και την χειμερινή περίοδο.

Για την πιο εύστοχη ανάλυση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, έγινε επεξεργασία στα υδραυλικά ύψη, έτσι ώστε να παρουσιάζεται το ύψος του νερού ως προς την επιφάνεια της θάλασσας. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που φαίνονται στην Εικόνα 5.21 έγινε η ανάλυση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων. Αντίστοιχα, για τις ταχύτητες ροής δημιουργήθηκε ο συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων, τα οποία παρατίθενται στην Εικόνα 5.22, με σκοπό την ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

| Stress Period 1 | Stress Period 2 | Stress Period 3 | Stress Period 4 | Stress Period 5 | Stress Period 6 | Stress Period 7 | Stress Period 8 | Stress Period 9 | Stress Period 10 |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5.134 | 5.101 | 5.101 | 5.101 | 5.116 | 5.116 | 5.116 | 5.116 | 5.116 | 5.116 |
| 10.269 | 10.202 | 10.202 | 10.202 | 10.232 | 10.231 | 10.232 | 10.232 | 10.232 | 10.232 |
| 15.403 | 15.303 | 15.303 | 15.303 | 15.347 | 15.347 | 15.348 | 15.347 | 15.348 | 15.348 |
| 20.538 | 20.404 | 20.404 | 20.404 | 20.463 | 20.462 | 20.464 | 20.463 | 20.464 | 20.464 |
| 25.672 | 25.505 | 25.505 | 25.505 | 25.579 | 25.578 | 25.580 | 25.579 | 25.580 | 25.580 |
| 30.807 | 30.606 | 30.606 | 30.606 | 30.695 | 30.694 | 30.696 | 30.695 | 30.696 | 30.696 |
| 35.941 | 35.706 | 35.707 | 35.707 | 35.811 | 35.809 | 35.812 | 35.810 | 35.812 | 35.812 |
| 41.076 | 40.807 | 40.808 | 40.807 | 40.926 | 40.925 | 40.928 | 40.926 | 40.928 | 40.928 |
| 46.210 | 45.908 | 45.909 | 45.908 | 46.042 | 46.041 | 46.044 | 46.042 | 46.044 | 46.044 |
| 51.345 | 51.009 | 51.010 | 51.009 | 51.158 | 51.156 | 51.160 | 51.158 | 51.160 | 51.160 |

Εικόνα 5.21 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα υδραυλικά ύψη

| Stress Period 1 | Stress Period 2 | Stress Period 3 | Stress Period 4 | Stress Period 5 | Stress Period 6 | Stress Period 7 | Stress Period 8 | Stress Period 9 | Stress Period 10 |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 0.231 | 0.231 | 0.231 | 0.231 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 |
| 0.309 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 |
| 0.388 | 0.388 | 0.388 | 0.388 | 0.388 | 0.389 | 0.389 | 0.389 | 0.389 | 0.389 |
| 0.467 | 0.466 | 0.466 | 0.466 | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 | 0.467 |
| 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 | 0.545 |
| 0.624 | 0.623 | 0.623 | 0.623 | 0.624 | 0.624 | 0.624 | 0.624 | 0.624 | 0.624 |
| 0.703 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 | 0.702 |
| 0.781 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 | 0.780 |
| 0.860 | 0.859 | 0.859 | 0.859 | 0.859 | 0.859 | 0.859 | 0.858 | 0.858 | 0.858 |
| 0.939 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 | 0.937 |
| 1.017 | 1.016 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 1.015 | 1.015 |

Εικόνα 5.22 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες ροής

6. Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μοντελοποιήθηκε η υπόγεια ροή της περιοχής Erdemli, η οποία βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Mersin στην Τουρκία. Στην εκπόνηση της εργασίας έγινε χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής Princeton Transport Code, καθώς και του προγράμματος ArcGIS. Η περίοδος για την οποία έτρεξε το μοντέλο είναι πέντε χρόνια, από 1 Νοεμβρίου 2003 έως και 30 Σεπτεμβρίου 2008 και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από προηγούμενη μελέτη της περιοχής.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο, δείχνουν ελάχιστες διαφοροποιήσεις για τους χειμερινούς και θερινούς μήνες. Τα εξαγόμενα υδραυλικά ύψη, στο σύνολό τους, για τις χειμερινές περιόδους, δεν έχουν σημαντικές μεταβολές. Παρατηρήθηκε πως μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη συναντώνται σε μεγαλύτερα υψόμετρα, καθώς και πως το ύψος του θαλασσινού νερού δεν φαίνεται να εισχωρεί στην περιοχή μελέτης. Επομένως, στη περιοχή του Erdemli, για τη χειμερινή περίοδο, δεν συναντάται το φαινόμενο της υπαλμύρισης το οποίο παρουσιάζεται συχνά σε παραθαλάσσιες περιοχές και μπορεί να οφείλεται στην υπεράντληση των πηγαδιών της περιοχής. Τα υδραυλικά ύψη, για τους θερινούς μήνες, έχουν αύξηση την τρίτη περίοδο, της κλίμακας των εκατοστών, το οποίο ενδέχεται να οφείλεται στην αυξημένη βροχόπτωση που δέχθηκε η περιοχή την προηγούμενη χειμερινή περίοδο. Το υδραυλικό ύψος, για τις υπόλοιπες περιόδους, φαίνεται να έχει ελάχιστες μεταβολές, αποτέλεσμα που επιβεβαιώνεται από τα δεδομένα βροχόπτωσης τα οποία δείχνουν παρόμοιο ποσό υετού τις προηγούμενες χειμερινές περιόδους. Είναι εμφανές, πως αντίστοιχα με τους χειμερινούς μήνες, δεν παρατηρείται το φαινόμενο της υπαλμύρισης, το οποίο είναι πιο σύνηθες να εμφανίζεται κατά τους θερινούς μήνες, όπου υπάρχει μειωμένη βροχόπτωση. Με μειωμένη βροχόπτωση τα ύδατα του υδροφορέα δεν αναπληρώνονται τόσο γρήγορα όσο το χειμώνα, με αποτέλεσμα, λόγω υπεράντλησης, να εισχωρήσει θαλασσινό νερό στο υπέδαφος.

Όσον αφορά τις ταχύτητες ροής, ως επί το πλείστον παραμένουν ίδιες, για όλες τις χειμερινές περιόδους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως παρατηρήθηκε ελάχιστη άνοδος της χαμηλότερης ταχύτητας και ελάχιστη κάθοδος τη υψηλότερης, με την πάροδο του χρόνου. Για τις θερινές περιόδους, η ταχύτητα ροής στη περιοχή μελέτης, δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες μεταβολές για το χρονικό διάστημα το οποίο έτρεξε το πρόγραμμα. Η παροχή νερού από παράγοντες έξω από την περιοχή μελέτης δεν αλλάζει για τις εκάστοτε περιόδους, επομένως είναι λογικό να μην υπάρχει σημαντική διαφορά στην ταχύτητα ροής εφόσον δεν υπήρξε και κάποια άλλη επέμβαση στη μορφολογία του εδάφους. Σε γενικό πλαίσιο, η μέγιστη ταχύτητα ροής παρατηρήθηκε στα Βόρειο Ανατολικά του πολυγώνου της περιοχής, στο υψηλότερο υψόμετρο, στο σημείο που αλλάζει η τιμή των εξωτερικών εισροών και η κλίση της πλαγίας είναι ίδια με την φορά της ταχύτητας ροής του νερού.

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ήταν αρκετά μεγάλος και τα πηγάδια ήταν σε πολύ μικρή απόσταση το ένα με το άλλο, όμως τα δεδομένα στάθμης στα πηγάδια παρατήρησης ήταν ελλιπείς. Για το κάθε πηγάδι υπήρχε μόνο μία ένδειξη στάθμης νερού, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η πλήρης εικόνα της εξεταζόμενης περιοχής.

Η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής του νερού σε μια περιοχή, επιτρέπει σε μελετητές και παρατηρητές, την επιλογή σημείου διάνοιξης καινούριας γεώτρησης, με μεγάλη ακρίβεια, έτσι ώστε να μην επιβαρυνθεί ο υδροφορέας της περιοχής. Με υπεράντληση της περιοχής, υπάρχει κίνδυνος να χαμηλώσει το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα οι ρίζες των φυτών να μην έχουν πρόσβαση με νερό, δηλαδή να υπάρξει ξηρασία στην περιοχή. Επίσης, σημαντικός κίνδυνος σε παραθαλάσσιες περιοχές είναι η υπαλμύριση, οπότε η στρατηγική διάνοιξη πηγαδιών άντλησης είναι υψίστης σημασίας, ώστε να μην εισχωρήσει αλμυρό νερό στο υπέδαφος τις περιοχές. Η παράλληλη χρήση μοντέλων ροής υπογείων υδάτων, με την απόφαση ανοίγματος γεώτρησης, είναι απαραίτητη για την διατήρηση ενός πλήρους και υγιούς υδροφορέα.

Βιβλιογραφία

- ❖ Anderson, Mary P, Woessner, William W. and Hunt, Randall J., Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 2nd edition, August 2015
- ❖ Babu, D.K, Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld, D.P. and Stothoff, S.A., Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows, Princeton University, 84-WR-3
- ❖ Bear J (1979) Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering
- ❖ Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. *et al.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* **5**, 180214 (2018).
- ❖ Demirel, Z., & Güler, C. (2005). Hydrogeochemical evolution of groundwater in a Mediterranean coastal aquifer, Mersin-Erdemli basin (Turkey). *Environmental Geology*, 49(3), 477–487
- ❖ M.A. Koukadaki, Karatzas G.P., M.P. Papadopoulou and A. Vafidis, Identification of the Saline Zone in a Coastal Aquifer using Electrical Tomography Data and Simulation, Water Resources Management, Springer Science + Business Media B.V. 2007
- ❖ Olivares JL (2000) Argus ONE-PTC interface, v. 2.2 User's guide PTC User's Manual
- ❖ Καββαδάς Μιχαήλ (2019). Σημειώσεις Εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- ❖ Καρατζάς, Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2021.

Διαδικτυακές πηγές

- ❖ <https://www.erdemli.bel.tr/> [Accessed 14/12/2021]
- ❖ <http://www.mersin.edu.tr/> [Accessed 14/12/2021]
- ❖ Ptctutor.pdf (argusone.com) [Accessed 14/12/2021]
- ❖ http://www.argusone.com/pub/OnLineDocs/ArgusONE_UsersGuide.pdf [Accessed 14/12/2021]
- ❖ <https://www.usgs.gov/> [Accessed 17/12/2021]
- ❖ CLC 2018 — Copernicus Land Monitoring Service [Accessed 17/12/2021]
- ❖ http://www.eleto.gr/download/Bodies/Geoterms_Glossary.pdf [Accessed 17/12/2021]
- ❖ <https://www.sustain-coast.tuc.gr/en/living-labs/erdemli-turkey> [Accessed 17/12/2021]
- ❖ <https://en.climate-data.org/asia/turkey/mersin/erdemli-26441/> [Accessed 17/12/2021]
- ❖ <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/koppen-climate-classification-system/> [Accessed 17/12/2021]

The present thesis is a part of the project funded by the General Secretariat for Research and Technology of the Ministry of Development and Investments under the PRIMA Programme (Sustain-COAST). PRIMA is an Art.185 initiative supported and co-funded under Horizon 2020, the European Union's Programme for Research and Innovation.



The PRIMA programme is an Art.185 initiative supported and funded under Horizon 2020, the European Union's Programme for Research and Innovation.