



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας στην περιοχή
Χερσονήσου Ηρακλείου με χρήση επικαιροποιημένων δεδομένων”**

**(Modelling groundwater flow and mass transport in the area of Chersonisos-
Heraklion using updated information)**

Γαβριέλλα-Φωτεινή Βουτσινά

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)
2. Νικολαΐδης Νικόλαος
3. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

Χανιά,
Ιούλιος 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 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.”

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη μοντελοποίηση του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής της Χερσονήσου, στο νομό Ηρακλείου Κρήτης, καθώς και τη μοντελοποίηση μεταφοράς μάζας από τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής για τα υδρολογικά έτη 2011-2021.

Η προσομοίωση της ροής των υπογείων υδάτων καθώς και των υπόγειων ρύπων για τα παραπάνω υδρολογικά έτη, επετεύχθη με τη χρήση του μοντέλου Princeton Transport Code (PTC). Ο κώδικας PTC αποτελεί ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Επίσης έγινε χρήση του λογισμικού ArcGIS για την απεικόνιση, προετοιμασία και εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο. Η χρήση του κώδικα PTC είχε ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανόηση του όγκου εισροών και απορροών από τους υπόγειους υδροφορείς και την πρόβλεψη διάχυσης του ρύπου σε πιθανή μελλοντική διαρροή των στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ.

Η περιοχή που μελετήθηκε τοποθετείται 26 km ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου Κρήτης και συνορεύει ανατολικά με το νομό Λασιθίου, νότια με τους δήμους Μινώα-Πεδιάδος και Αρχανών-Αστερουσίων και δυτικά με το δήμο Ηρακλείου. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 272 km² και ο πληθυσμός της είναι 26.717 κάτοικοι. Η Χερσόνησος είναι κατεχοχήν τουριστική, με σημαντική οικονομική δραστηριότητα.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται αρχικά γενικές πληροφορίες που αφορούν την κίνηση των υπογείων υδάτων μέσα από θεμελιώδεις εξισώσεις, τα υδραυλικά στοιχεία των υδροφορέων και την υφαλμύριση των υδάτων. Εν συνεχεία, γίνεται αναλυτική περιγραφή της μελετηθείσας περιοχής και παρουσιάζονται στοιχεία για την τοποθεσία, το κλίμα, την χλωρίδα, την πανίδα και την υδρογεωλογία. Έπειτα, γίνεται περιγραφή του υπογείου μοντέλου PTC όπου αναλύονται σε επιμέρους κεφάλαια οι μαθηματικές θεωρήσεις της υπόγειας ροής, η παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος, τα μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής και η προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται με τη μορφή γραφημάτων τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη βοήθεια του λογισμικού μοντελοποίησης PTC. Εισάγοντας τα απαραίτητα στοιχεία στο μοντέλο έγινε η προσομοίωση του υδροφορέα, των εκθέσεων υπολογισμών ισοζυγίου μάζας, καθώς και των ταχύτητων των υπογείων υδάτων.

Το συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη αυτή είναι ότι δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στο απόθεμα των υπογείων υδάτων στην περιοχή της Χερσονήσου Ηρακλείου μεταξύ των υγρών, χειμερινών περιόδων, στο βαθμό που οι παρατηρούμενες διαφορές μπορούν να εξηγηθούν από τα διαφορετικά ετήσια ύψη βροχοπτώσεων. Αντιθέτως, οι διαφορές αυτές

εμφανίζονται έντονες μεταξύ χειμερινών και θερινών περιόδων. Όσον αφορά την διάχυση των ρυπογόνων ουσιών και των συγκεντρώσεών τους από τον ΧΥΤΑ, τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, αφού, σύμφωνα με το μοντέλο, η ρύπανση εξαπλώνεται με τον χρόνο και οι συγκεντρώσεις αυξάνονται. Τέλος οι ταχύτητες ροής των υπογείων υδάτων βρέθηκαν να είναι γενικά χαμηλές, με την εξαίρεση δύο συγκεκριμένων περιοχών στις οποίες η μετακίνηση των υπογείων υδάτων εντείνεται. Από τα παραπάνω ευρήματα γίνεται φανερό ότι το λογισμικό μοντελοποίησης PTC έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει αποτελεσματικά την κίνηση του υπόγειου υδροφορέα και να περιγράψει τη μεταφορά των ρύπων.

ABSTRACT

The present diploma thesis aimed at modeling the aquifer of the Hersonissos region, in the prefecture of Heraklion, Crete, as well as modeling mass transfer from the Landfill for the hydrological years 2011-2021.

The simulation of groundwater flow as well as groundwater pollutants for the above hydrological years was achieved using the Princeton Transport Code (PTC) model. The PTC is a hybrid three-dimensional model of finite elements and finite differences. ArcGIS software was also used to display, prepare and import the data into the model. The use of the PTC resulted in a better understanding of the volume of inputs and run-off from the underground aquifers and the prediction of diffusion of the pollutant in a possible future leakage of the leachate of the landfill.

The studied area is located 26 km east of the city of Heraklion, Crete, and borders to the east with the prefecture of Lassithi, to the south with the municipalities of Minoa-Pediados and Archanes-Asterousia and to the west with the municipality of Heraklion. It occupies an area of about 272 km² and its population is 26,717 inhabitants. Hersonissos is eminently touristic, with significant economic activity.

The first part of the work initially presents general information concerning the movement of groundwater through fundamental equations, the hydraulic elements of aquifers and the salinization of water. Then, a detailed description of the studied area is made and data on the location, climate, flora, fauna and hydrogeology are presented. Then, a description of the underground PTC model is given, where the mathematical considerations of the underground flow, the detachment of the system equations, the groundwater flow simulation models and the simulation of the insatiable zone are analyzed in individual chapters. In the second part of the work, the results of the analysis are presented in the form of graphs with the help of the PTC modeling software. By introducing the necessary elements into the model, the aquifer, the mass balance calculation reports, as well as the groundwater speeds were simulated.

The conclusion that emerged from this study is that there are no significant changes in the groundwater supplies in the region of Hersonissos Heraklion between the wet, winter periods, since the observed differences can be explained by the differential annual rainfall heights. On the contrary, these differences are significant between winter and summer. As far as the diffusion of polluting substances and their concentrations from the landfill is concerned, the results are not particularly encouraging, since, according to the present analysis (model), pollution spreads over time and concentrations increase. Finally, the flow rates of groundwater

were found to be generally low, with the exception of two specific areas where the movement of groundwater intensifies. From the above findings it becomes obvious that the PTC modeling software has the ability to effectively simulate the movement of the underground aquifer and describe the transport of pollutants.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιθυμώ να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου κατά το διάστημα της εκπόνησης της.

Ιδιαίτερως, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κύριο Γεώργιο Καρατζά για τις συμβουλές, τη σωστή καθοδήγηση και τη συνεχή στήριξή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η βοήθεια του ήταν πολύτιμη.. ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να μου προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του γύρω από το αντικείμενο της μελέτης.

Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, καθηγητές κ.Νικόλαο Νικολαΐδη και κ.Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την προθυμία τους να συμμετέχουν στην εξέταση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους, πνευματική και υλική.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥΣ	15
1.1 Γενικά για τα ύδατα	15
1.2 Υπόγεια ύδατα	15
1.3 Κατανομή υπογείων υδάτων	16
1.4 Υδροφορείς	17
1.5 Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων	18
1.6 Το φαινόμενο της υπαλμύρισης	24
1.6.1 Εισαγωγή	24
1.6.2 Μηχανισμός της υπαλμύρισης	25
1.7 Ρύπανση υπόγειων υδάτων	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	28
2.1 Για τη χερσόνησο	28
2.2 Κλιματολογικά στοιχεία	29
2.3 Χλωρίδα	34
2.4 Πανίδα	35
2.5 Γεωλογία	36
2.5.1 Υδροπερατοί σχηματισμοί	36
2.5.2 Υδατοστεγείς σχηματισμοί	37
2.5.3 Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενοτήτων	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ	41
3.1 Μαθηματικές θεωρήσεις της υπόγειας ροής	41
3.2 Παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος	45
3.3 Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής	48
3.4 Οριακές συνθήκες	52
3.5 Προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης	53
3.6 Μοντέλο PTC (Princeton Transport Code)	54
3.6.1 Οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου PTC	55

3.6.2 Αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου PTC.....	56
3.6.3 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων	57
3.6.3.1 Βασική εξίσωση	57
3.6.3.2 Οριακές συνθήκες.....	58
3.6.3.3 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα	60
3.6.4 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπου	62
3.6.4.1 Εξισώσεις συστήματος.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	65
4.1 Αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη	65
4.2 Αποτελέσματα για την διάχυση/εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις	68
4.3 Αποτελέσματα για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	79
Ελληνική βιβλιογραφία.....	79
Ιστοσελίδες	80

Περιεχόμενα Πινάκων

Κεφάλαιο 1^ο

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης (Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980; Driscoll, 1986).....	19
Πίνακας 1.2: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, Γ., Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 1999)	21

Κεφάλαιο 3^ο

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των προσεγγίσεων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Καρτεράκης Σ., Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, 2005)	50
---	----

Περιεχόμενα Εικόνων

Κεφάλαιο 1^ο

Εικόνα 1.1: Η υποθαλάσσια ζώνη στην οποία το γεωλογικό υλικό περιέχει τόσο νερό όσο και αέρα σε χώρους πόρων. Η κορυφή της ακόρεστης ζώνης είναι συνήθως στην επιφάνεια της γης (https://mikeb203.tripod.com/water/src/unsatur.htm)	17
Εικόνα 1.2: Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφορέας	18
Εικόνα 1.3: Ροή υπογείων υδάτων και η ζώνη διασποράς σε έναν παράκτιο ομοιογενή υδροφορέα (water usgs gov).....	25
Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben-Herzberg (Πρακτικά 9 ^{ου} Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003).....	26

Κεφάλαιο 2^ο

Εικόνα 2.1: Χάρτης Χερσονήσου (Επεξεργασία GIS)	29
Εικόνα 2.2: Μέση θερμοκρασία Χερσονήσου (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php).....	30
Εικόνα 2.3: Μέση ημερήσια διάρκεια ημέρας στη Χερσόνησο (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)	31

Εικόνα 2.4: Μέση βροχόπτωση Χερσονήσου (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php).....	32
Εικόνα 2.5: Μέση θερμοκρασία θάλασσας στη Χερσόνησο (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)	33
Εικόνα 2.6: Ανεμολογικά στοιχεία Χερσονήσου (http://www.emy.gr/emv/el/)	34

Κεφάλαιο 3^ο

Εικόνα 3.1: Οι δύο θεωρήσεις διαφορίσης μιας εξίσωσης του συστήματος υπογείων υδάτων (Mary P. Anderson, William W. Woessner, <i>Applied Groundwater Modeling</i> , Academic Press, 1992)	42
Εικόνα 3.2: Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος (Τριχάκης Ι., Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρινσης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, 2004)	46
Εικόνα 3.3: Το μοντέλο των πεπρασμένων διαφορών (Τριχάκης Ι., Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρινσης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, 2004).....	51
Εικόνα 3.4: Σχέδιο των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στοίβες, που παράγουν τον τρισδιάστατο διαχωρισμό (Princeton Transport Code Manual)	57
Εικόνα 3.5: Κατανομή στους κόμβους της παροχής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία κάθε κόμβος έχει τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας (Princeton Transport Code Manual).....	60
Εικόνα 3.6: Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες που είναι σημειωμένες με $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., αποτελούν καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα (Princeton Transport Code Manual)	62

Κεφάλαιο 4^ο

Εικόνα 4.1: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την πρώτη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	65
Εικόνα 4.2: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την ένατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	66

Εικόνα 4.3: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	66
Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	67
Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δέκατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	67
Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την εικοστή περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	68
Εικόνα 4.7: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την πρώτη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	69
Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την ένατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	69
Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	70
Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	71
Εικόνα 4.11: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δέκατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	71
Εικόνα 4.12: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την εικοστή περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मारीα ανά λίτρο (mg/L) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC)	72
Εικόνα 4.13: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την πρώτη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	73
Εικόνα 4.14: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την ένατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	73

Εικόνα 4.15: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	74
Εικόνα 4.16: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	75
Εικόνα 4.17: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δέκατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	75
Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την εικοστή περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d) (Επεξεργασία με το μοντέλο PTC).....	76

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε ένα ορισμένο τμήμα της περιοχής της Χερσονήσου Ηρακλείου κατά την περίοδο των υδρολογικών ετών 2011-2021, καθώς και η πρόβλεψη της τύχης του ρύπου σε πιθανή μελλοντική διαρροή των στραγγισμάτων του Χώρου Υγειονομικής Ταφής. Η προσομοίωση έγινε με χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής Princeton Transport Code (PTC), μέσω του λογισμικού ArgusONE, αλλά και με χρήση λογισμικού ArcGIS για την απεικόνιση, προετοιμασία και εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής: στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υπόγεια ύδατα και η διαχείριση τους, στο δεύτερο περιγράφεται η μελετώμενη περιοχή, στο τρίτο το μαθηματικό υπόβαθρο του μοντέλου υπόγειας ροής, στο τέταρτο παρατίθενται τα αποτελέσματα με τα γραφήματα του μοντέλου και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥΣ

1.1 Γενικά για τα ύδατα

Το νερό είναι βασικό και αναντικατάστατο στοιχείο, αναγκαίο για την επιβίωση της ανθρωπότητας καθώς και την ανάπτυξη. Αντιμετωπίζεται ως φυσικός πόρος, οικονομικό αγαθό, κοινωνικό αγαθό, ή/και περιβαλλοντικό στοιχείο. Ωστόσο θεωρείται ευαίσθητο και το πρώτο θιγόμενο περιβαλλοντικό συστατικό από τα δύο σύνδρομα της σύγχρονης κοινωνίας: την υπερκατανάλωση και τη ρύπανση. Παρ'όλα αυτά στη χώρα μας μια σχεδίαση ορθής Υδατικής Πολιτικής θα μπορούσε να έχει διπλό αποτέλεσμα. Πρώτον να το προστατεύει τα ύδατα από τα παραπάνω σύνδρομα της σύγχρονης κοινωνίας και δεύτερον να εξασφαλίζει τις απαιτούμενες ποσότητές τους στην κατάλληλη ποιότητα, υπό συνθήκες αειφόρου ανάπτυξης και προστασίας του περιβάλλοντος. [1]

Η ποσότητα του νερού στον πλανήτη ανέρχεται στα $1600 \times 10^6 \text{ km}^3$ και η ποσότητα του νερού που υπάρχει ελεύθερο στην επιφάνεια του πλανήτη ανέρχεται στα $1370 \times 10^6 \text{ km}^3$ με το 97.2% αυτής της ποσότητας να παραμένει ανεκμετάλλευτο, λόγω αλατότητας και το 2.1% να μην μπορεί να αξιοποιηθεί διότι έχει τη μορφή πάγου ή διότι είναι ατμοσφαιρικοί υδρατμοί. Συνεπώς μόνο 0.6% είναι διαθέσιμο στον άνθρωπο αντιπροσωπεύοντας το $8.2 \times 10^6 \text{ km}^3$ νερού. [2]

Από το διαθέσιμο νερό στον άνθρωπο, αυτό που υπάρχει στην επιφάνεια του πλανήτη (ποταμοί – λίμνες) αντιπροσωπεύει το 12%, τα υπόλοιπα $7.2 \times 10^6 \text{ km}^3$ νερού είναι υπόγεια ύδατα. Ωστόσο το υπόγειο νερό δεν είναι όλο άμεσα διαθέσιμο, αφού το μισό από αυτό βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο από 800 m, ενώ πρέπει να αφαιρεθεί και ένα ποσοστό 0.6% της συνολικής ποσότητας του υπόγειου νερού, που αποτελούν η υγρασία και οι διάφορες απώλειες. Συνεπώς το διαθέσιμο νερό για κατανάλωση είναι $0.1 \times 10^6 \text{ km}^3$ επιφανειακού νερού και $3 \times 10^6 \text{ km}^3$ υπόγειου νερού. Συνολικά οι χρησιμοποιούμενοι υδατικοί πόροι (γλυκό νερό πλην των παγετώνων) αποτελούνται κατά 95% από το υπόγειο νερό. [2]

1.2 Υπόγεια ύδατα

Οι επιφανειακοί πόροι είναι απολύτως διακριτοί, αφού συγκεντρώνονται στις λεκάνες απορροής. Τα όριά τους είναι τοπογραφικά και χρησιμοποιώντας τοπογραφικούς χάρτες μπορούν να χαραχθούν. Το νερό ρέει προς την κατεύθυνση που κλίνει τοπογραφικά η μορφολογία. Καθόσον αφορά τα επιφανειακά νερά δεν έχουν την ικανότητα να διασχίσουν τους τοπογραφικούς υδροκρίτες. Οι θέσεις των αυτών των υδροκριτών είναι σταθερές, τουλάχιστον

στην χρονική κλίμακα του μηχανικού. Αντιθέτως, οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δεν είναι ευδιάκριτοι, αλλά και πολλές φορές δεν είναι ούτε διακριτοί μεταξύ τους. Τα όρια των υδροφορέων δεν είναι τοπογραφικά, αλλά φυσικά. Σε δοσμένο σημείο μπορεί να υπόκεινται της επιφάνειας του εδάφους περισσότεροι υδροφορείς. Ο κάθε υδροφορέας μπορεί να έχει διαφορετικά χημικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά, διαφορετική πηγή ή περιοχή εμπλουτισμού αλλά και διαφορετική περιοχή εκφόρτισης. Επιπροσθέτως, οι υπόγειοι υδροκρίτες δεν γίνεται να συμπίπτουν με τους επιφανειακούς. Το υπόγειο νερό έχει προέλευση από την επιφάνεια με κύριες πηγές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων υδάτων να περιλαμβάνουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, την επιφανειακή απορροή και τις φυσικές και τεχνητές λίμνες. Ο τεχνητός εμπλουτισμός προέρχεται από το πλεόνασμα του αρδευτικού νερού, τις διαρροές και τις διηθήσεις από τα κανάλια μεταφοράς και από τα έργα τεχνητού εμπλουτισμού. [2]

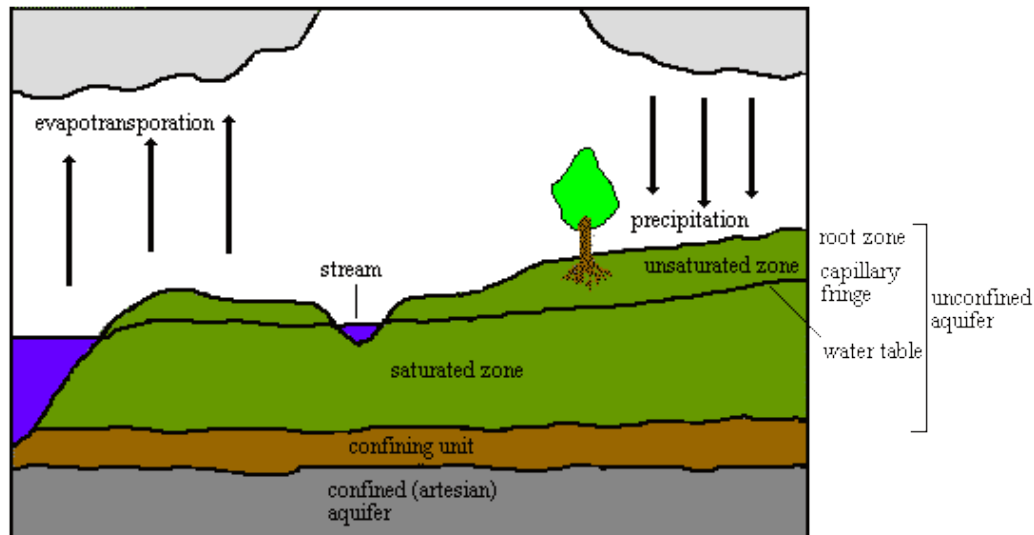
1.3 Κατανομή υπογείων υδάτων

Υπόγειο νερό είναι κατά κανόνα το νερό κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως του βάθους και της κατάστασης που βρίσκεται. Έχει προέλευση κατεξοχήν από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Επίσης υπάρχει ένα μικρό ποσοστό του υπογείου νερού που είναι μαγματικής ή κοσμικής προέλευσης και εισέρχεται στον υδρολογικό κύκλο για πρώτη φορά. Υπάρχουν δύο ζώνες στις οποίες μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό. [3]

Η ακόρεστη ή μη κορεσμένη ζώνη (unsaturated zone), στην οποία οι πόροι του εδάφους καταλαμβάνονται μερικώς από αέρα και μερικώς από νερό (διφασική ροή). Οι πλημμύρες είναι ειδική περίπτωση όπου όλα τα διάκενα των πόρων καταλαμβάνονται προσωρινά από νερό. Εδώ η κίνηση του νερού γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει τρεις υποκατηγορίες και ξεκινώντας από την επιφάνεια του εδάφους είναι οι ακόλουθες:

1. Ζώνη εδαφικού ύδατος μικρού πάχους (soil zone), η οποία εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος της ζώνης του ριζικού συστήματος. Το πάχος της ποικίλλει ανάλογα τον τύπο του εδάφους και της βλάστησης.
2. Ενδιάμεση ζώνη (intermediate zone), από την οποία διέρχεται το νερό κινούμενο προς τα κάτω και έχει ως κατώτατο όριο την έναρξη τριχοειδών φαινομένων.
3. Ζώνη τριχοειδών φαινομένων (capillary zone). Η ζώνη αυτή εκτείνεται από το όριο που παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα. Το πάχος της είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθος των διάκενων του εδάφους.

Επιπροσθέτως, στη ζώνη κορεσμού (saturated zone) όλα τα διάκενα είναι γεμάτα με νερό (μονοφασική ροή). Η κίνηση του νερού στη ζώνη κορεσμού γίνεται κατεξοχήν κατά την οριζόντια διεύθυνση. Αυτή η ζώνη απαρτίζει το υδροφόρο στρώμα το οποίο τροφοδοτεί με νερό. Το άνω όριο της ζώνης αυτής είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. [3]



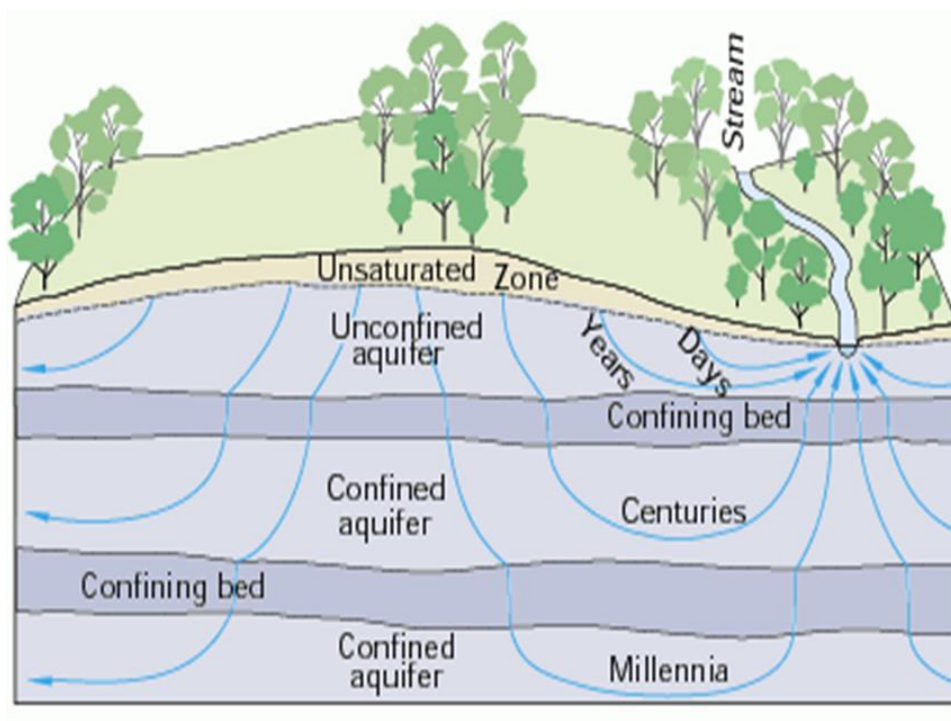
Εικόνα 1.1: Η υποθαλάσσια ζώνη στην οποία το γεωλογικό υλικό περιέχει τόσο νερό όσο και αέρα σε χώρους πόρων. Η κορυφή της ακόρεστης ζώνης είναι συνήθως στην επιφάνεια της γης (<https://mikeb203.tripod.com/water/src/unsatur.htm>)

1.4 Υδροφορείς

Υδροφορέας ορίζεται ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Η ταξινόμηση των υδροφορέων γίνεται με βάση την ανώτατη στάθμη του νερού στο έδαφος, δηλαδή τον υδροφόρο ορίζοντα. Διακρίνονται δύο είδη υδροφορέων :

- Ελεύθερος υδροφορέας (unconfined aquifer) χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας που το κατώτερο όριο του είναι ένα στεγανό στρώμα, ενώ η ανώτερη επιφάνεια του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.
- Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας (confined aquifer) είναι αυτός στον οποίο το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα σε αδιαπέρατα στρώματα στο δάπεδο και την οροφή. Η πίεση που επικρατεί στον υδροφορέα αυτού του τύπου είναι υψηλότερη της

ατμοσφαιρικής. Αυτός είναι και ο λόγος που η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία αντιστοιχεί σε μία εικονική επιφάνεια που συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφορέα, βρίσκεται πιο ψηλά από το ανώτερο αδιαπέρατο στρώμα. [5]



Εικόνα 1.2: Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφορέας
(Groundwater | KY OCP (wordpress.com))

1.5 Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων

Οι υδροφορείς μπορούν να χαρακτηριστούν από την ικανότητά τους να συγκρατούν και να μετακινούν νερό, δηλαδή δρουν σαν αγωγοί. Τα πιο σημαντικά υδραυλικά χαρακτηριστικά που τους χαρακτηρίζουν είναι τα εξής: [3]

1. Το πορώδες (porosity) [n,ε], το οποίο χαρακτηρίζει το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά και ορίζεται ως:

$$n = \frac{V_V}{V_0} \quad (1.1)$$

Όπου:

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

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι: η κοκκομετρική σύνθεση, η διάταξη των κόκκων καθώς και το σχήμα των κόκκων. [5]

Υλικά	Πορώδες (%)	Ειδική απόδοση (%)
Μη διαστρωματοποιημένα υλικά		
Χαλίκια	25-35	15-30
Άμμος	25-45	10-30
Ιλύς	35-50	5-10
Πηλός	45-55	1-5
Άμμος και Χαλίκια	20-30	10-20
Διαστρωματοποιημένα Υλικά		
Αμμόλιθος	5-30	3-15
Δομολιτικοί Ασβεστόλιθοι	1-20	0,5-10
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5-30	2-15
Σχιστόλιθος	1-10	0,5-5
Κυστοιδής Βασάλτης	10-40	5-15
Αποσαθρωμένος Βασάλτης	5-30	2-10
Πορώδες Βράχος	10-60	5-20
Φρέσκος Γρανίτης και γνευσίτης	0,01-2	<0,1
Αποσαθρωμένος Γρανίτης και γνευσίτης	1-15	0,5-5

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης (Freeze and Cherry, 1979; Todd, 1980; Driscoll, 1986)

2. Το ενεργό πορώδες (effective porosity, n_e), ή ειδική απόδοση (specific yield). Το ενεργό πορώδες χαρακτηρίζει το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων δεν επικοινωνεί. Ορίζεται ως:

$$n_e = \frac{V_V}{V_0} \quad (1.2)$$

Όπου:

- V_V : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.
- V_0 : ο συνολικός όγκος του εδάφους.

Παρατήρηση: Τα ιζηματογενή πετρώματα δεν έχουν διακυμάνσεις στις τιμές του πορώδους n και του ενεργού πορώδους n_e , σε αντίθεση με τα αργιλώδη εδάφη που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. [5]

3. Το υδραυλικό ύψος (hydraulic head), όπου η ενέργεια την οποία φέρουν τα υπόγεια ύδατα και βάση της οποίας κινούνται, ισούται ανά μονάδα όγκου με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής. Η ενέργεια αυτή ανά μονάδα βάρους λέγεται και υδραυλικό ύψος (h) και ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης (P/γ) και του φορτίου ύψους (z). Η σχέση είναι η εξής:

$$h = \frac{P}{\gamma} + z \quad (1.3)$$

Όπου:

- P : η υδροστατική πίεση
- γ : το ειδικό βάρος του νερού

Σε γεωτρήσεις σε ελεύθερο υδροφορέα το υδραυλικό ύψος ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού. Αντιθέτως, σε γεωτρήσεις σε περιορισμένο υδροφορέα το υδραυλικό ύψος είναι το υψόμετρο που θα έφτανε το νερό σε περίπτωση που ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν ακόμα και ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους.

4. Η υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity), k και η διαπερατότητα (permeability), K . Η υδραυλική αγωγιμότητα (k) εκφράζει το πόσο εύκολα μπορεί να ρέει ένα ρευστό μέσα σε ένα πορώδες μέσο και εξαρτάται από το πορώδες υλικό και από το είδος του ρευστού. Ο Henry Darcy (Γάλλος μηχανικός υδραυλικής) μελέτησε το 1856 τη ροή του ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Αποτέλεσμα αυτής της μελέτης ήταν ότι ο ρυθμός ροής διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος του συντελεστή της

υδραυλικής αγωγιμότητας και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής. Έτσι βγήκε η εξίσωση που αναφέρεται ως νόμος Darcy [5]:

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -k \frac{\Delta h}{L} \quad (1.4)$$

Όπου:

- Q: η παροχή
- A: η επιφάνεια
- k: η υδραυλική αγωγιμότητα
- Δh: η απώλεια φορτίου
- L: το μήκος της στήλης
- q: η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή

Η έκφραση $\frac{\Delta h}{L}$ αναφέρεται ως υδραυλική κλίση (hydraulic gradient) και το αρνητικό πρόσημο στο Ν. Darcy υπάρχει επειδή η κατεύθυνση της ροής είναι προς τα εκεί που μειώνεται το υδραυλικό ύψος.

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \times 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \times 10^{-3}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \times 10^{-3}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \times 10^{-3}$
Ιλύς	$9,2 \times 10^{-3}$
Άργιλος	$2,3 \times 10^{-3}$

Πίνακας 1.2: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, Γ., Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 1999)

Η διαπερατότητα (K) είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου, δηλαδή το σχήμα, τη διάταξη και το μέγεθος των κόκκων [3]. Εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας (L^2) και συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα με την σχέση:

$$K = \frac{k \cdot \mu}{\gamma} \quad (1.5)$$

Όπου:

- μ : το δυναμικό ιξώδες
- γ : το ειδικό βάρος του ρευστού

5. Η ταχύτητα διήθησης (seepage velocity). Η ταχύτητα Darcy θεωρεί ότι η ροή πραγματοποιείται μέσω της ολικής επιφάνειας του εδάφους, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το στέρεο υλικό και τους πόρους. Για αυτό συχνά χρησιμοποιείται η ταχύτητα διήθησης, ή αλλιώς πραγματική ταχύτητα, η οποία αναφέρεται στη ροή ενός ρευστού διαμέσου του χώρου των πόρων ενός πορώδους υλικού και υπολογίζεται από την εξής σχέση [5]:

$$q_p = \frac{Q}{n \cdot A} = \frac{q}{n} = - \frac{k}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.6)$$

Όπου:

- q_p : η ταχύτητα διήθησης
- Q : η παροχή
- A : η επιφάνεια
- n : το πορώδες
- q : η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή
- k : η υδραυλική αγωγιμότητα
- Δh : η απώλεια φορτίου
- dl : το μήκος της στήλης

6. Ο συντελεστής μεταβασιμότητας (transmissivity), T, ο οποίος εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο το νερό ενός δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους υδροφορέα με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και ορίζεται ως [5]:

$$T = k \cdot D \quad (1.7)$$

Όπου:

- T : η μεταβασιμότητα
- k : η υδραυλική αγωγιμότητα
- D : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα

7. Η αποθηκευτικότητα (storativity) ή υδροχωρητικότητα, S . Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) αποτελεί τον όγκο του νερού που μπορεί να ληφθεί ή να αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφορέα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Είναι καθαρός αριθμός και μαθηματικά εκφράζεται από την εξής σχέση [3]:

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad (1.8)$$

Όπου: ο όγκος νερού, που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A , λόγω της μοναδιαίας πτώσεις ή αύξησης του φορτίου Δh .

Στους ελεύθερους υδροφορείς η αποθηκευτικότητα (S) παίρνει τιμές από 1%-30% και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πλήρωση ή εκκένωση των πόρων, και ελάχιστα από την συμπιεστότητα του εδάφους ή του ύδατος. Επομένως, συμπίπτει με το ενεργό πορώδες.

Εξαιτίας του διαφορετικού μηχανισμού απελευθέρωσης νερού, στους υπό πίεση υδροφορείς, ο συντελεστής S παίρνει πολύ χαμηλότερες τιμές και συγκεκριμένα κυμαίνεται από 0,0001%-0,5%. Στους συγκεκριμένους υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα. Συνεπώς η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχομένου. Δηλαδή, για να επιτευχθεί άντληση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, είναι αναγκαίες μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα.

1.6 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης

1.6.1 Εισαγωγή

Ο όρος υφαλμύριση υπόγειου υδροφορέα σημαίνει ότι γίνεται διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό με παράλληλη αύξηση της αλατότητας του σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Η υφαλμύριση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές αφού το 60 με 70 % του παγκοσμίου πληθυσμού ζει σε αυτές. Ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων καθώς και τη μείωση των ποσοτήτων των φρέσκων υδάτων.

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η μεγάλη τουριστική ανάπτυξη έχει οδηγήσει στην υπερβολική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων. Συνεπώς, υπάρχει αύξηση των αναγκών σε φρέσκο νερό με αποτέλεσμα τα αποθέματα να εξαντλούνται.

Στον Ελλαδικό χώρο το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι ιδιαίτερα έντονο καθώς έχει επηρεάσει τις πιο πολλές παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας, αλλά κυρίως τα νησιά. Η στάθμη στους υπόγειους υδροφορείς μειώνεται κατά 5 μέτρα ετησίως και το βάθος άντλησης νερού φτάνει και τα 300 μέτρα. Γενικότερα, είναι αντιληπτό ότι με τον καιρό το πρόβλημα τείνει να οξυνθεί όλο και περισσότερο. Η υφαλμύριση ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να έχει δύο αιτίες:

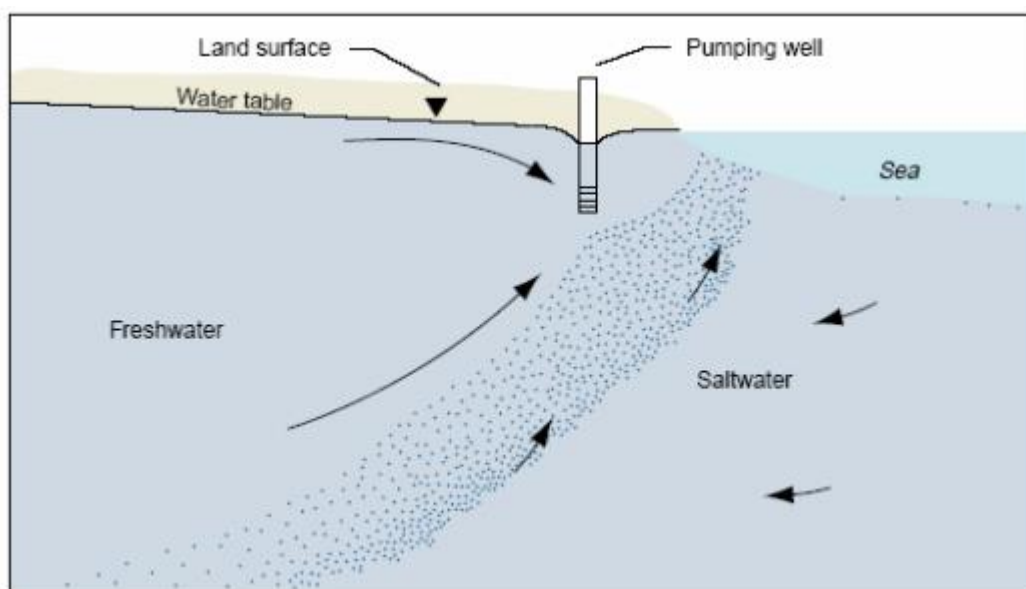
1. Φυσική, διότι υπάρχει θαλασσινό νερό και άλμη που βρίσκεται σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα.
2. Ανθρωπογενής, λόγω της διείσδυσης είτε του αλατιού που χρησιμοποιείται για την τήξη του πάγου είτε των υγρών διασταλλαγμάτων διήθησης των χωματερών στο έδαφος.

Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται συνήθως σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού προκάλεσε την διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υδροφορείς. Όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό, τότε ένα μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, και έτσι έχει ως αποτέλεσμα να δυσκολεύει τη διαδικασία αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Επιπροσθέτως, η αργή κίνηση του υπόγειου νερού αυξάνει το χρόνο αποκατάστασης του υδροφορέα. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων, αφού καταστρέφει τις καλλιέργειες και αχρηστεύει τα χωράφια, ενώ διαβρώνει σωλήνες και λέβητες σε βιομηχανικές

χρήσεις. Γι' αυτό το λόγο η υφαλμύριση ενός υδροφορέα γλυκού νερού συνεπάγεται την απώλεια αυτού του υδροφορέα ως πηγή νερού. [8]

1.6.2 Μηχανισμός της υφαλμύρισης

Λόγω του ότι το θαλασσινό νερό είναι βαρύτερο, τείνει να κινείται κάτω από το στρώμα του φρέσκου νερού. Παρ'όλα αυτά, η υδραυλική κλίση του φρέσκου νερού μειώνεται προς την ακτή, και τελικά κινείται προς τη θάλασσα. Το φρέσκο αυτό νερό οφείλεται στον συνεχή εμπλουτισμό λόγω βροχόπτωσης. Χωρίς αυτή τη δύναμη το θαλασσινό νερό θα κινούταν σταδιακά προς τα ανάντη, τείνοντας να καταλάβει ολόκληρο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Αυτή η ορμή του φρέσκου νερού προβάλλει αντίσταση στην κίνηση του θαλασσινού νερού λόγω πυκνότητας και τελικά επιφέρει μία κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 1.3: Ροή υπογείων υδάτων και η ζώνη διασποράς σε έναν παράκτιο ομοιογενή υδροφορέα (water usgs gov)

Μια ευρέως αποδεκτή και απλή στην εφαρμογή της θεωρίας για την προσέγγιση της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση των Ghyben – Herzberg, όπου η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Ορίζοντας με h_f

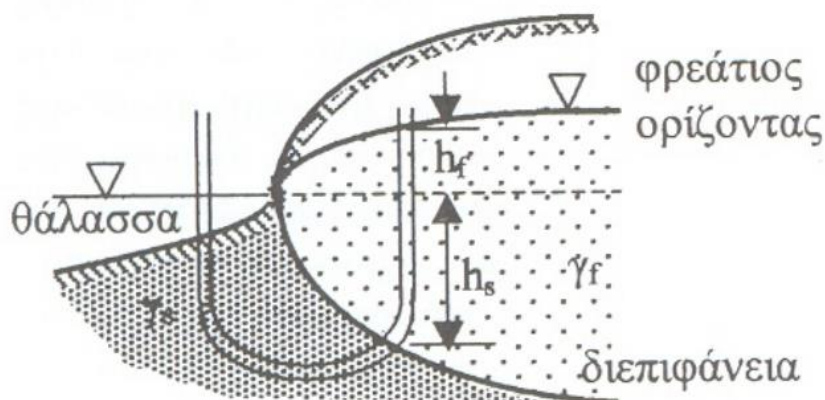
το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και h_s τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού κάτω από αυτή, γ_f, γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα ισχύει :

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{(\gamma_s - \gamma_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g \rho_f}{g(\rho_s - \rho_f)} h_f \Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)} h_f \quad (1.9)$$

Όπου

- ρ_f η πυκνότητα του γλυκού νερού και ίση με 1.000 kg/m^3
- ρ_s η πυκνότητα του αλμυρού νερού και ίση με 1.025 kg/m^3

Επομένως με αντικατάσταση στην (1.9) προκύπτει ότι: $h_s = \frac{1.000}{(1.025 - 1.000)} h_f \Rightarrow h_s \cong 40 h_f$



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben-Herzberg (Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003)

Στην πραγματικότητα η προσέγγιση Ghyben – Herzberg δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας δεδομένου ότι:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής, αφού υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, κυρίως στην επιφάνεια διαστάλαξης του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία διέρχεται το γλυκό νερό προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού συνήθως κινείται προς το

εσωτερικό του υδροφορέα ή αντίστροφα.

- Δεν είναι εύκολο να προβλέψει την επιφάνεια διήθησης στους ελεύθερους υδροφορείς.

Παρ'όλα αυτά η εξίσωση Ghyben – Herzgerg είναι πολύ χρήσιμη, αφού επιτρέπει με απλό τρόπο την εύρεση προσεγγιστικά της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού. Αν είναι γνωστές οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας ή τα πιεζομετρικά φορτία, τότε γίνεται να εκτιμηθεί το κάτω όριο της ροής και να ελεγχθεί εάν συμπίπτει με το αδιαπέραστο όριο του υδροφορέα ή και εάν υπάρχει διείσδυση της θάλασσας σε αυτόν. [10]

1.7 Ρύπανση υπόγειων υδάτων

Ρύπανση υπογείων υδάτων σύμφωνα με τον Todd (1980) είναι η τεχνητά προκαλούμενη υποβάθμιση της ποιότητας τους, ωστόσο πολλές φορές αναφέρεται και ως μόλυνση (Bouwer, 1978). Χρησιμοποιώντας τους δυο αυτούς όρους είτε με ταυτόσημο, είτε με διαφορετικό περιεχόμενο δημιουργήθηκε σύγχυση και έγινε ανώφελη προσπάθεια διαχωρισμού τους ανάλογα με τα αίτια που προκαλούν την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Επομένως, ρύπανση ή μόλυνση αναφέρουμε οποιαδήποτε υποβάθμιση της φυσικής ποιότητας του νερού, που είναι αποτέλεσμα δραστηριοτήτων του ανθρώπου. Η ρύπανση του νερού, ανάλογα με την έκταση της, μπορεί να αποβεί καθοριστικός παράγοντας στη μη χρησιμοποίησή του, αλλά και στη δημιουργία κινδύνων στη δημόσια υγεία (τοξικότητα του νερού, μετάδοση ασθενειών). Στα υπόγεια νερά οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται για τον εντοπισμό της ρύπανσης καθώς και την αντιμετώπισή της είναι πολύ μεγαλύτερες απότι στα επιφανειακά ύδατα. [11] Επίσης το νερό που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις και τα υγρά απόβλητα που εφαρμόζονται στο έδαφος είναι ο κύριος παράγοντας μεταφοράς ουσιών μέσα στο έδαφος. Η ταφή των αστικών και βιομηχανικών στερεών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι πιθανό να αποτελέσει αιτία υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων λόγω της έκπλυσης που προκαλεί το νερό που διέρχεται από τη μάζα των αποβλήτων. Τα εκπλύματα αυτά δημιουργούνται από το νερό που καθώς κινείται δια μέσου της μάζας των στερεών αποβλήτων και εμπλουτίζεται με ρύπους και με τα παράγωγα της αποικοδόμησης των αποβλήτων. [12] Τέλος, η ρύπανση των υδάτων οφείλεται σε τοξικές οργανικές ή ανόργανες ουσίες, σε οργανική ύλη και τα προϊόντα αποσύνθεσής της, σε άλατα αζώτου ή φωσφόρου κλπ. [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Για τη χερσόνησο

Ο Δήμος Χερσονήσου είναι δήμος της περιφέρειας της Κρήτης που συστάθηκε με το Πρόγραμμα Καλλικράτης. Προέκυψε από τη συνένωση των προϋπαρχόντων δήμων Γουβών, Χερσονήσου, Επισκοπής και Μαλίων. Ο Δήμος Χερσονήσου αποτελεί έναν από τους οκτώ δήμους της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου και απέχει μόλις 25 km από την πόλη του Ηρακλείου. Η έκταση του νέου Δήμου είναι 271,58 τ.χλμ και ο πληθυσμός του 26.717 κάτοικοι, σύμφωνα με την Απογραφή του 2011. Έδρα του νέου δήμου ορίστηκαν οι Γούρνες. [14]

Ο Δήμος Χερσονήσου είναι ορεινός στο μεγαλύτερο μέρος του αλλά με έντονες αλλαγές στη μορφολογία του. Ο Δήμος απλώνεται από τα βόρεια παράλια του κέντρου της Κρήτης και στο ανατολικό όριο του, απολήγει η Δίκτη. Επιπροσθέτως, διαθέτει πλούσιο φυσικό περιβάλλον, το οποίο συνδυάζει μεγάλους ορεινούς όγκους, πεδιάδες, ποτάμια και φαράγγια δημιουργώντας ένα μοναδικό τοπίο. Ο παραθαλάσσιος χαρακτήρας της περιοχής (όπου εκεί παρατηρείται και η μεγαλύτερη τουριστική δραστηριότητα) σε συνδυασμό με τις συνεχείς εναλλαγές του τοπίου και το ιδανικό κλίμα της περιοχής συντελεί στην ύπαρξη και ανάπτυξη πολλών ειδών χλωρίδας και πανίδας.

Η βασική απασχόληση του πληθυσμού μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1960 ήταν η γεωργία και η κτηνοτροφία σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Πλέον όμως έχει παρατηρηθεί ότι ένας συντριπτικός αριθμός των κατοίκων απασχολείται στον τριτογενή τομέα της παροχής υπηρεσιών. Ακόμα η περιοχή της Χερσονήσου είναι σήμερα ένας από τους πιο δημοφιλείς και ανεπτυγμένους τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης αλλά και της χώρας. Με βάση στοιχεία του 1999 υπήρχαν 118 ξενοδοχεία με συνολικά 19.566 κλίνες κύριων τουριστικών καταλυμάτων, τα οποία αντιστοιχούν στο 17,7 % των κλινών της Κρήτης και στο 3,3 % της Ελλάδας. Μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό δείγμα των ανεπτυγμένων τουριστικών περιοχών της Ελλάδας, αλλά και της Μεσογείου γενικότερα. [15]



Εικόνα 2.1: Χάρτης Χερσονήσου (Επεξεργασία GIS)

2.2 Κλιματολογικά στοιχεία

Η Χερσονήσος βρίσκεται στη Βορειοανατολική πλευρά της Κρήτης και ως εκ τούτου απολαμβάνει τυπικό και ευχάριστο Μεσογειακό κλίμα, με ήπιους χειμώνες και ζεστά, ξηρά καλοκαίρια.

Την άνοιξη καθώς ο καιρός ζεσταίνει κατά το Μάρτη, Απρίλη και Μάη, η άνοιξη είναι ιδιαίτερα όμορφη εποχή στην Κρήτη, με θερμοκρασίες από περίπου 16°C ως τους 20 °C και με την εξοχή να ανθίζει. Όλο το χρόνο, αλλά κυρίως την άνοιξη, η Κρήτη δέχεται ένα νότιο κύμα ζεστού αέρα από τη Βόρειο Αφρική, κυρίως την έρημο της Λιβύης. Αυτές οι ξηρές και ανεμώδεις ημέρες είναι ασυνήθιστα ζεστές για την εποχή και κάπως απρόβλεπτες, αλλά ευτυχώς κρατάνε μόνο μια δυο μέρες.

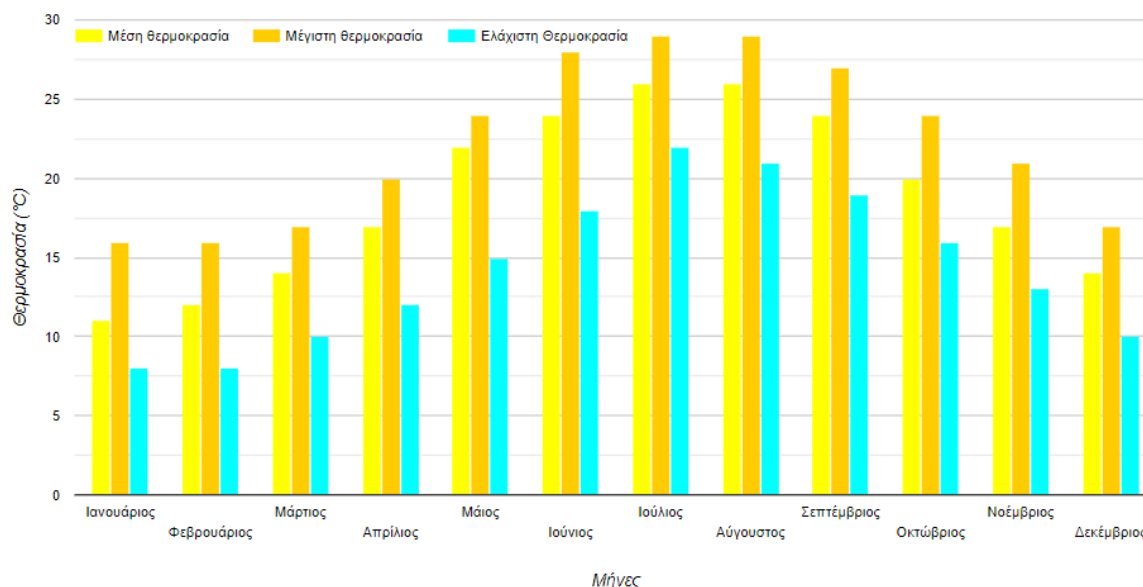
Το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες της Χερσονήσου τυπικά κυμαίνονται από 26 °C με 32 °C τον Ιούνιο, τον Ιούλιο γύρω στους 35 °C, όπως και τον Αύγουστο, και ο καιρός είναι ζεστός και

ηλιόλουστος κατά τη διάρκεια της ημέρας, με χαμηλή υγρασία και μια ευχάριστη ζέστη το βράδυ. Μερικές φορές οι θερμοκρασίες φτάνουν και τους 40 °C , και όταν αυτό συμβαίνει, η έντονη ζέστη δημιουργεί ληθαργικά ήσυχες και ακίνητες θάλασσες.

Το φθινόπωρο από τα τέλη Σεπτέμβρη και μέχρι το Δεκέμβρη, οι θερμοκρασίες γίνονται ηπιότερες και γενικά πέφτουν στους 20 °C, αν και η θάλασσα διατηρεί τη θερμότητα της και το κολύμπι συνεχίζεται. Οι βροχοπτώσεις γίνονται πιο συχνές, προσφέροντας μια κάποια ανακούφιση από την καλοκαιρινή ζέστη και ανυδρία. Το Νοέμβρη οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, γύρω στους 15 °C και η Χερσόνησος αρχίζει να προετοιμάζεται για αλλαγή ρυθμού και στόχων. Η δράση απομακρύνεται από τη θάλασσα και τον ήλιο στην ενδοχώρα, στα χωράφια, τα βουνά και την γεωργία.

Το χειμώνα ο καιρός κρυώνει κατά πολύ και πέφτει χιόνι στο όρος Δίκτυ, ή ακόμα και στις ακτές μερικές φορές. Οι βροχές είναι πολύ συχνές, κυρίως το Φλεβάρη, αλλά γενικά ο χειμώνας δεν διαρκεί για πολύ στη Χερσόνησο.

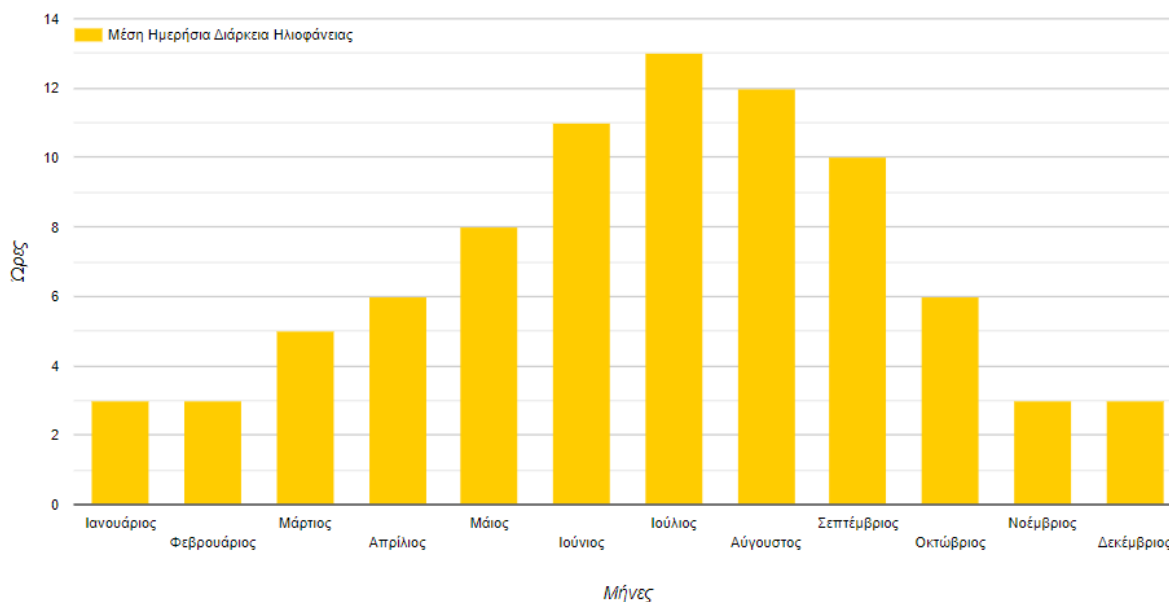
Ό,τι εποχή και αν είναι, αυτή η γωνιά της Κρήτης είναι πλούσια σε φυσικές ομορφιές, και προσφέρει την πιο σαγηνευτική ατμόσφαιρα χάρη στο ήπιο κλίμα της και τον πλούτο της γεωπολιτικής της ποικιλότητας. [17]



Εικόνα 2.2: Μέση θερμοκρασία Χερσονήσου (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)

Ηλιοφάνεια

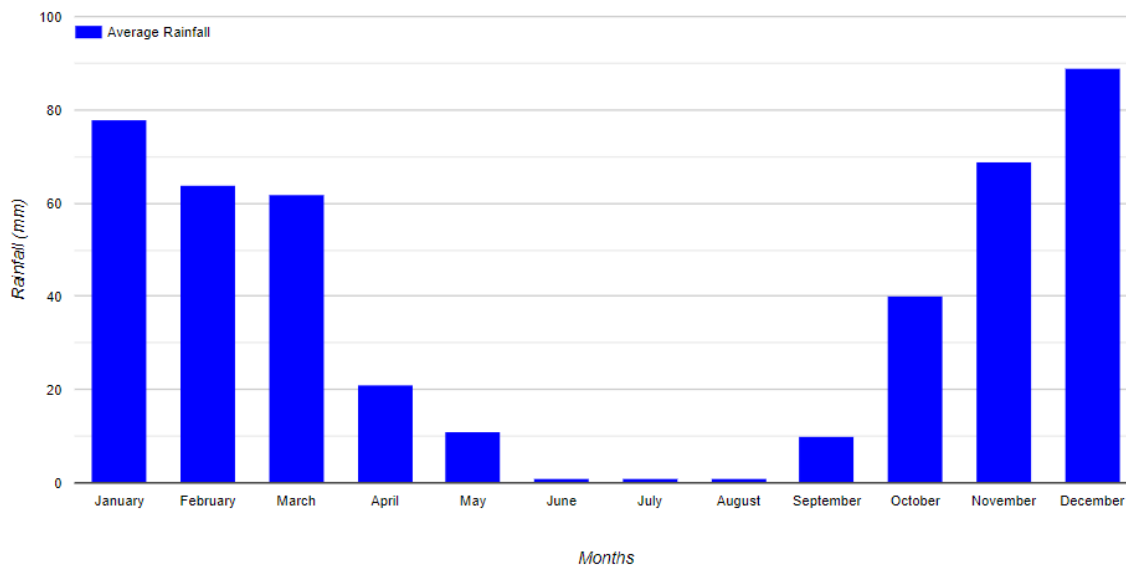
Τα περισσότερα μέρη στην Κρήτη έχουν πάνω από 2000 ώρες ηλιοφάνειας το χρόνο, με τις πιο ηλιόλουστες περιοχές – Νότια Κρήτη και τη Γαύδο – να λαμβάνουν πάνω από 2.400 ώρες. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες το φως της ημέρας μπορεί να διαρκέσει μέχρι τις 21:00.



Εικόνα 2.3: Μέση ημερήσια διάρκεια ημέρας στη Χερσόνησο (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)

Βροχοπτώσεις

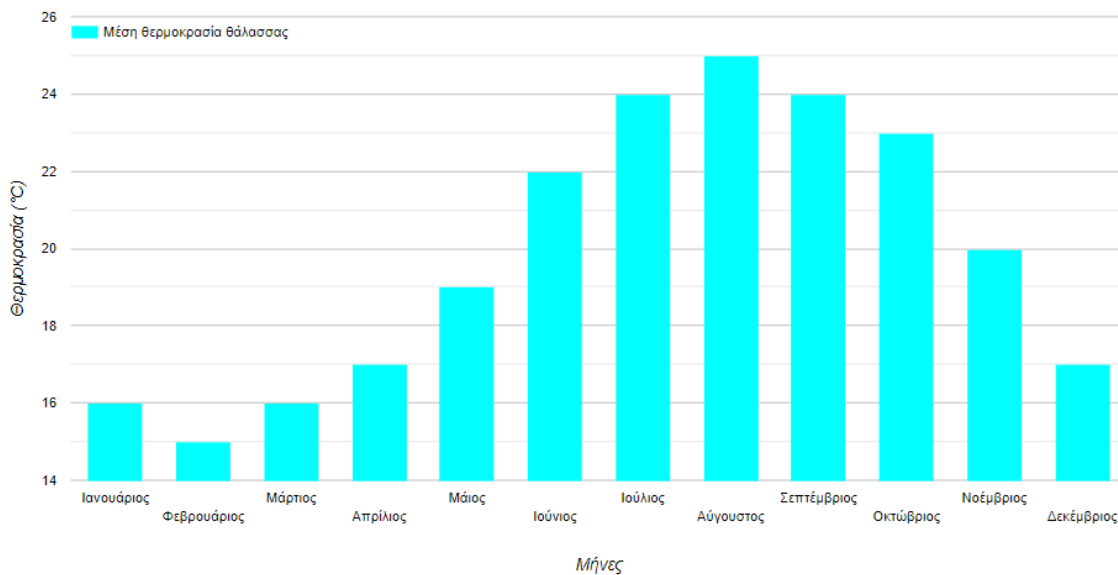
Η μέση βροχόπτωση είναι χαμηλή στα χαμηλά υψόμετρα και σχεδόν εξαφανίζεται το καλοκαίρι. Τα βουνά ωστόσο δέχονται το μεγαλύτερο μέρος του νερού της βροχής. Παρά τις χαμηλές βροχοπτώσεις, η Κρήτη είναι ένα ιδανικό μέρος για τη γεωργία και την θερμοκηπιακή καλλιέργεια, καθώς το αδρευτικό νερό αποθηκεύεται σε μεγάλα φράγματα. Είναι πολύ ενδιαφέρον το ότι στο νησί μπορούμε να παράγουμε από λωτούς που ωριμάζουν στο χιόνι και κάστανα ως και τροπικές μπανάνες και μάνγκο.



Εικόνα 2.4: Μέση βροχόπτωση Χερσονήσου (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)

Θερμοκρασία θάλασσας

Το φθινόπωρο η θερμοκρασία της θάλασσας είναι συνήθως ψηλότερη από τον Ιούνιο (19-20°C). Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες προκύπτουν τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο, αλλά ποτέ δεν πέφτουν κάτω από 14°C. Η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται απότομα όταν το πρώτο χιόνι εμφανιστεί στα βουνά, ειδικά σε περιοχές που καταλήγουν ποτάμια και χείμαρροι, που μεταφέρουν το παγωμένο νερό στη θάλασσα.



Εικόνα 2.5: Μέση θερμοκρασία θάλασσας στη Χερσόνησο (http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php)

Ανεμολογικά στοιχεία

Από επεξεργασία των στοιχείων από το μετεωρολογικό σταθμό του Ηρακλείου για την περίοδο 1955 έως 1998 προέκυψε ότι :

- Η συχνότητα των ανέμων είναι κυρίως Βόρειοι και Βορειοδυτικοί με ποσοστά 16.9% και 28.9% αντίστοιχα ενώ σημαντική είναι και η συχνότητα των Νότιων ανέμων με 14.6% καθώς και της νηνεμίας με ποσοστό 17.5%
- Η ένταση των ανέμων είναι κυρίως της τάξης 2, 3 και 4 Beaufour με συνολικό ποσοστό 64.68% ενώ τη μεγαλύτερη συχνότητα έχουν οι άνεμοι των 3 Beaufour με ποσοστό 22.3%
- Ακραία καιρικά φαινόμενα με ανέμους της τάξης των 10 Beaufour είναι σπάνια αλλά όταν συμβαίνουν είναι νότιας και νοτιοδυτικής κυρίως διεύθυνσης

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754										
Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2										
Ύψος σταθμού 38 m										
BEAUF	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALM	SUM
0									17.527	17.527
1	0.855	0.537	0.372	0.613	1.468	0.603	0.307	0.646		5.401
2	4.360	2.279	0.9653	2.312	5.149	1.884	1.183	3.725		21.845
3	4.941	1.435	0.603	1.183	2.695	0.865	1.490	9.082		22.294
4	4.229	0.438	0.142	0.657	2.241	0.679	1.326	10.649		20.541
5	1.665	0.142	0.033	0.351	1.589	0.449	0.362	3.571		8.162
6	0.690	0.033	0.011	0.208	0.898	0.208	0.088	1.019		3.155
7	0.164	0.011	0.011	0.066	0.274	0.055	0.022	0.142		0.745
8	0.055	0.000	0.000	0.033	0.110	0.011	0.011	0.044		0.264
9	0.011	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.011		0.044
10	0.000	0.000	0.000	0.011	0.011	0.000	0.000	0.000		0.022
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.000
SUM	16.970	4.875	2.125	5.445	14.626	4.754	4.789	28.885	17.527	100.000

Εικόνα 2.6: Ανεμολογικά στοιχεία Χερσονήσου (<http://www.emy.gr/emv/el/>)

Χιονοπτώσεις

Το χιόνι εμφανίζεται συνήθως κατά τους μήνες Ιανουάριο έως τον Μάρτιο, αν και υπάρχουν έτη που χιονίζει κι εκτός αυτών των μηνών. Το περισσότερο χιόνι στην Κρήτη πέφτει στις ορεινές περιοχές, όπως τα Λευκά Όρη, τον Ψηλορείτη και τη Δίκτη. [19]

2.3 Χλωρίδα

Η Κρήτη χαρακτηρίζεται από μια εξαιρετική ποικιλομορφία ζωντανών οργανισμών. Αν και απομονωμένη, συγκεντρώνει έναν πολύ μεγάλο αριθμό ειδών χλωρίδας. Η Κρήτη είναι πλουσιότερη σε αριθμό φυτικών ειδών από όλα τα νησιά της Μεσογείου, εκτός της Σικελίας. Η χλωρίδα της Κρήτης αποτελείται από 1800 περίπου είδη φυτών από τα οποία τα 180 είναι ενδημικά φυτά της Κρήτης, δηλαδή φυτά που συναντώνται στην Κρήτη και πουθενά αλλού στον κόσμο. Στην Κρήτη συναντάμε στοιχεία και από τη Βορειοαφρικάνικη χλωρίδα. Εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης και της συνύπαρξης των παραπάνω χλωριδικών περιοχών, η χλωρίδα

της Ελλάδας είναι, αναλογικά με την έκτασή της, από τις πλουσιότερες της Ευρώπης με πάνω από 6.000 είδη φανερόγαμων φυτών.

Πιο συγκεκριμένα, στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν τα οικοσυστήματα της πεδινής και ημιορεινής ζώνης ενώ επικρατεί η αυτοφυής υποβαθμισμένη βλάστηση. Η σημασία της χλωρίδας της φυσικής βλάστησης και γενικά των φυτών είναι πολύ σημαντική, αφού τα φυτά είναι οι μόνοι αυτότροφοι οργανισμοί, παράγουν από ανόργανα στοιχεία οργανική ουσία, είναι η βάση της τροφικής αλυσίδας.

Η χλωρίδα της υπό μελέτης περιοχής αναπτύσσεται από δέντρα, θάμνους και από ποώδης βλάστηση. Παρατηρούνται φρύγανα, αστιβίδες, θυμάρι, αφάνες, ασπάλαθοι, θρύμινια αλλά και αραιές στοιβάδες από ξυλώδη βλάστηση σκληρόφυλλων και αείφυλλων, όπως: σχοίνος, χαρουπιά, ερείκη, πρίνος κ.ά. [20]

2.4 Πανίδα

Η Κρήτη γενικά είναι απομονωμένη από τις υπόλοιπες ηπειρωτικές περιοχές της Ευρώπης, της Ασίας και της Αφρικής, γεγονός που αποτυπώνεται έντονα στη γενετική διαφορετικότητα της πανίδας του νησιού. Από το περήφανο αγρίμι, τον φουρόγατο και την κρητική μυγαλή, ως τα στενοενδημικά αρθρόποδα και τις νυχτερίδες, η πανίδα της Κρήτης κρύβει πολλά μυστικά για την εξέλιξη των ειδών. Η ορνιθοπανίδα της Κρήτης, θεωρείται μια από τις πλουσιότερες της Ευρώπης, καθώς φιλοξενεί περισσότερα από 350 είδη πτηνών. Στα κρητικά βουνά παρατηρείται ο μεγαλύτερος νησιωτικός πληθυσμός από γύπες στον κόσμο.

Πιο συγκεκριμένα, στην Χερσόνησο Ηρακλείου καθώς και σε άλλα μέρη λόγω της αλόγιστης εκμετάλλευσης των οικοσυστημάτων από τον άνθρωπο, της σημαντικής υποβάθμισης της φυτικής βλάστησης, της παράνομης θήρευσης και της τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής ο αριθμός των ζώων στις ανώτερες τάξεις, πτηνά και θηλαστικά, είναι περιορισμένος.

Επιπροσθέτως, δεν υπάρχουν σπάνια ή προστατευόμενα είδη ενώ τα κύρια είδη της πανίδας είναι: ο λαγός, η ζουρίδα, το κουνάβι, η κουκουβάγια, οι σαύρες και διάφορα είδη πουλιών. Τέλος, οι οικοκλιματικές συνθήκες της Κρήτης είναι αρκετά ευνοϊκές για την ανάπτυξη αρθρόποδων, εντόμων, αραχνοειδών και μαλάκιων (σαλιγκάρια). [22]

2.5 Γεωλογία

Γεωλογία και Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωολογικοί σχηματισμοί, που καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Στους υδροπερατούς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι, τα κροκαλοπαγή, και οι ψαμμίτες του νεογενούς.
2. Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς, στους οποίους ανήκουν οι φυλλίτες-χαλαζίτες, ο φλύσχης του προνεογούς καθώς και οι μάργες και άργιλοι του νεογενούς.

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωολογική έρευνα, καθώς εντός αυτών αναπτύσσονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Παρ' όλα αυτά για τη διαμόρφωση, τη διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού ύδατος ιδιαίτερο ρόλο παρουσιάζουν και οι υδατοστεγείς σχηματισμοί.

2.5.1 Υδροπερατοί σχηματισμοί

Προνεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Αποτελούνται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους καθώς και από ανθρακικά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό υδροπερατότητας, κυρίως στις ζώνες διαρρήξεων και αποκάρσωσης, όπου τελικοί αποδέκτες του νερού της κατείσδυσης είναι οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι. Τα πετρώματα που δομούν τους δύο κύριους ορεινούς όγκους Δίκη και Ψηλορείτη είναι τα ανθρακικά, που λόγω του μεγάλου υψομέτρου δέχονται μεγάλες ποσότητες νερού από τη βροχή και το χιόνι. Επιπροσθέτως, λόγω της μεγάλης περατότητας που παρουσιάζουν (μέχρι και 50.73% των ετήσιων βροχοπτώσεων) συχνά διαμορφώνονται στο εσωτερικό τους υπόγειοι υδροφορείς με πλούσια αποθέματα νερού, όπως διαφαίνεται από τις πολλές πηγές (Ζαρού, Μαλίων κ.ά.). Επιπλέον, οι υδροφορείς αυτοί τροφοδοτούν με σημαντικό ποσοστό νερού τα υπόγεια και πλευρικά υδροφόρα στρώματα των νεογενών αποθέσεων που έρχονται σε άμεση επαφή, κυρίως στις παρυφές των ορεινών όγκων.

Η ποιότητα του νερού στους ανθρακικούς σχηματισμούς είναι συνήθως καλή, ωστόσο όταν έρχονται σε επαφή με τη θάλασσα αναπτύσσεται μέτωπο υφαλμύρισης. Στην περιοχή Χερσονήσου και Μαλίων παρατηρείται μικρό πρόβλημα στο τέλος της ξηράς περιόδου, αλλά με τις πρώτες βροχές το ποσοστό σε χλώρια επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.

Νεογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Στους υδροπερατούς σχηματισμούς του νεογενούς κατατάσσονται κυρίως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, τα κροκαλοπαγή, οι ψαμμίτες, η άμμος καθώς και διάφορα πετρώματα γύψων. Η περατότητα στους σχηματισμούς αυτούς οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες που δημιουργείται λόγω διάβρωσης ή τεκτονισμού (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, γύψος) ή στο πρωτογενές πορώδες, που εξαρτάται από τη σύσταση και την κοκκομετρία του πετρώματος (κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι).

Η διαμόρφωση των υπόγειων υδροφορέων εντός των σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από το συντελεστή κατείσδυσης, από τον όγκο που καταλαμβάνουν και από τη δυνατότητα τροφοδοσίας τους με νερό, είτε απευθείας από τη βροχή είτε πλευρικά από υδροφόρους προνεογενείς σχηματισμούς, με τους οποίους έρχονται σε άμεση επαφή. Σε αρκετές περιπτώσεις διαμορφώνονται αξιόλογοι υπόγειοι υδροφορείς κυρίως σε μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή και γύψους. Τα γυψούχα νερά είναι βέβαια ακατάλληλα για ύδρευση αλλά καλύπτουν σημαντικές αρδευτικές ανάγκες.

Τεταρτογενείς Υδροπερατοί Σχηματισμοί

Συναντώνται κυρίως σε ποτάμιες αποθέσεις, ψαμμίτες άμμου και κορήματα, που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους διακρίνονται από μεγάλη διαπερατότητα. Συνήθως, επειδή παρουσιάζουν μικρό πάχος, αναπτύσσεται στο εσωτερικό τους ελεύθερος υδροφορέας.

2.5.2 Υδατοστεγείς σχηματισμοί

Προνεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς προνεογενείς σχηματισμούς ανήκουν τα πετρώματα της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς, ο φλύσχης και οι σχηματισμοί των οφιολίθων και κρυσταλλοσχιστόδων. Οι σχηματισμοί αυτοί στο σύνολό τους χαρακτηρίζονται ως υδατοστεγείς, εξαίρεση όμως αποτελεί

το σαθρό κάλυμμα τους καθώς και κάποιο δευτερογενές πορώδες που οφείλεται σε τεκτονικά αίτια.

Η στεγανότητα των πετρωμάτων αυτής της κατηγορίας, σε συνδυασμό με την τεκτονική δομή της περιοχής, επηρεάζει σημαντικά τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου, τη διακίνηση του υπόγειου νερού και το διαχωρισμό της περιοχής σε υδρογεωλογικές ενότητες, ενώ σαν στεγανό διάφραγμα επιτρέπει τη διαμόρφωση υπόγειων υδροφορέων σε διάφορα υψόμετρα. Η ποιότητα του νερού, που εντοπίζεται στους σχηματισμούς αυτούς, είναι καλή και καλύπτει τοπικές υδρευτικές ανάγκες.

Νεογενείς Υδατοστεγείς Σχηματισμοί

Στους υδατοστεγείς σχηματισμούς του νεογενούς ανήκουν οι μάργες και οι άργιλοι, που λόγω της σύστασης και της κοκκομετρίας τους, είναι αδιαπέρατοι, πράγμα που αποκλείει τη διαμόρφωση αξιοποιήσιμων υπόγειων υδροφορέων. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα ανεπάρκειας νερού σε παραπλήσιες περιοχές. Επιπροσθέτως, προκαλούν αυξημένη επιφανειακή απορροή, με αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες νερού να καταλήγουν στη θάλασσα ανεκμετάλλευτες.

2.5.3 Διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενότητων

Η διαμόρφωση υδροφορέων και υδρογεωλογικών ενότητων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, τον γεωλογικό σχηματισμό, που είναι περατός από το νερό, και το στεγανό υπόβαθρο με κατάλληλη ανεκ τεκτονική μορφή (ήτο επίπεδο θάλασσας όταν πρόκειται για υπόβαθρο ανθρακικών πετρωμάτων). Στην περίπτωση που και οι τρεις παραπάνω παράγοντες είναι ευνοϊκοί, τα νερά της βροχής κατεισδύουν στα πετρώματα, συγκεντρώνονται στους πόρους (καρστικά και τεκτονικά διάκενα), διαμορφώνοντας υπόγειους υδροφορείς, υδρογεωλογικές ενότητες και λεκάνες υδρογεωλογικών ενότητων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δύο ορεινοί όγκοι Ψηλορείτης και Δίκτη είναι οι κύριοι τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων της ευρύτερης περιοχής, μπορούν να διακριθούν οι εξής υδρογεωλογικές ενότητες:

1. Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη.
2. Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη.

3. Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων.
4. Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου.

Η υδρογεωλογική ενότητα που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι εκείνη του καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη, η οποία περιλαμβάνει τις γεωλογικές ενότητες και τους υπόγειους υδροφορείς, που τροφοδοτούνται από τον ορεινό όγκο, άσχετα αν οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανήκουν ή όχι στον βασικό κορμό του.

Γενικότερα, ο ορεινός όγκος Δίκτη ανήκει στο μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό Λασιθίου, ενώ στο νομό Ηρακλείου ανήκει το δυτικό τμήμα. Δομείται κύρια από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς και είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη. Τον κύριο κορμό του ορεινού όγκου αποτελούν πλακώδεις ασβεστόλιθοι της αυτόχθονης γεωλογικής ενότητας, πάνω στην οποία έχουν απωθηθεί οι αλλόχθονες γεωλογικές ενότητες της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς και των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών. (Η ενότητα των οφιολίθων – κρυσταλλοσχιστοδών δεν εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης).

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες από αυτές που επικρατούν στο σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτη, ωστόσο η περιοχή χωρίζεται στις εξής ενότητες:

- Υπόγειοι υδροφορείς των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Πίνδου.
- Υπόγειοι υδροφορείς των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή Ανώπολης – Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γαλιπέ – Σκοτεινό.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται νότια της Χερσονήσου – Χαρασό – Κόξαρης – Καλού Χωριού.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου.
- Ανθρακικοί σχηματισμοί της περιοχής Μαλίων.

Όλες οι ερευνητικές γεωτρήσεις, που έχουν γίνει στην προσπάθεια της κοινότητας για τον εντοπισμό υπόγειων υδροφορέων για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών, έδωσαν υφάλμυρο νερό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης, που

έρχονται σε άμεση επαφή με τη θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστολιθικών του Ιουρασικού και των ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής. [23]

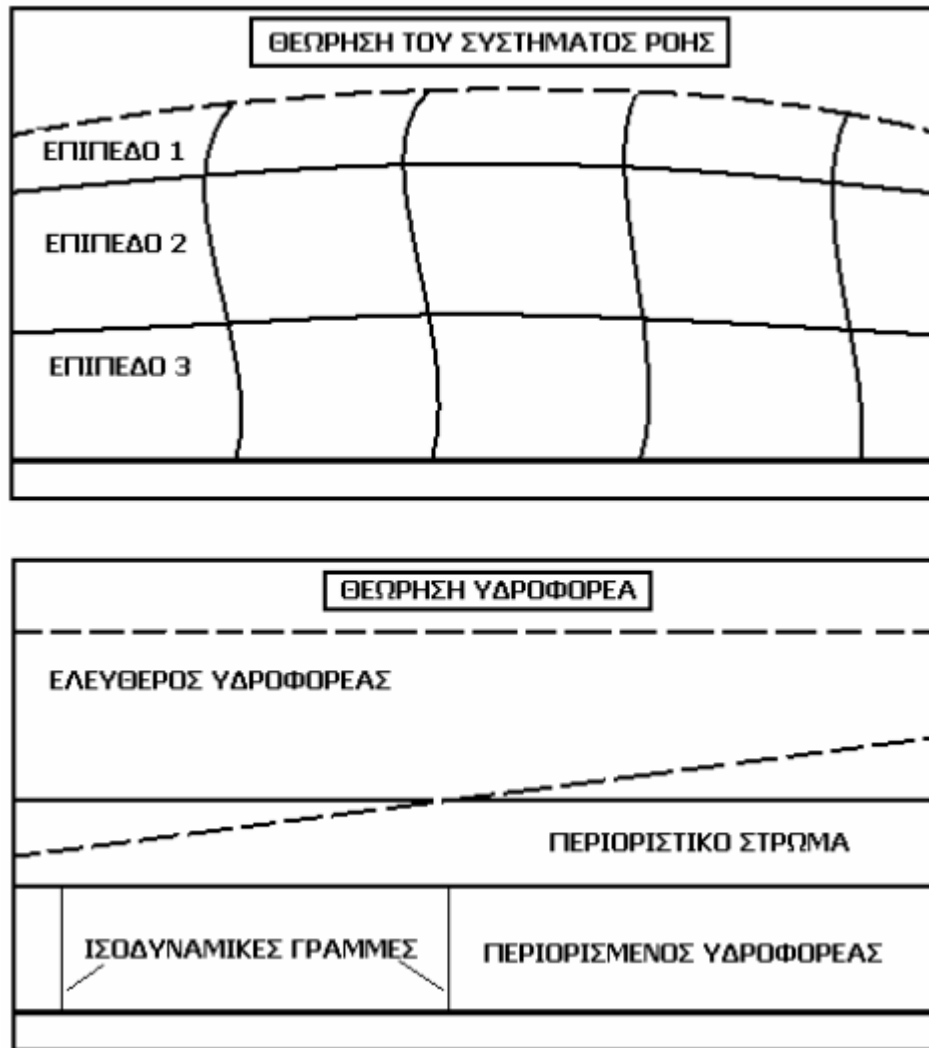
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

3.1 Μαθηματικές θεωρήσεις της υπόγειας ροής

Καθόσον αφορά τα συστήματα υπόγειων υδάτων υπάρχουν δύο θεωρήσεις διαφόρισης μιας εξίσωσης του συστήματος:

- η θεώρηση υδροφορέα
- η θεώρηση συστήματος ροής

Η θεώρηση υδροφορέα είναι βασισμένη στη λογική των περιορισμένων και ελεύθερων υδροφορέων. Ο υδροφορέας αποτελείται από πορώδες υλικό. Διακρίνεται από τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων ύδατος σε πηγάδια. Ο περιορισμένος υδροφορέας είναι καλυμμένος από ένα περιοριστικό στρώμα, το οποίο αποτελείται από ένα πορώδες υλικό και είναι υπεύθυνο στην επιβράδυνση της κίνησης του ύδατος. Αντιθέτως, ο ελεύθερος υδροφορέας έχει σαν πάνω όριό του τον υδροφόρο ορίζοντα. Στην περίπτωση ανάλυσης της ροής προς τα πηγάδια άντλησης εφαρμόζεται επιτυχώς η προσέγγιση αυτή και συνιστά τη βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις, όπως για παράδειγμα αυτές των Thiem, Theis και Jacob. Η ροή του υπόγειου ύδατος θεωρείται κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων και οριζόντια μεταξύ των υδροφορέων. Καθόσον αφορά τη μαθηματική πλευρά, ο υπολογισμός της μεταβιβασιμότητας γίνεται μέσω του ολοκληρώματος της διαπερατότητας στην κατακόρυφη διάσταση και ισούται με το γινόμενο της διαπερατότητας επί το πάχος της κορεσμένης ζώνης. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου ομογενούς και σταθερού πάχους υδροφορέα είναι σταθερή. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα είναι πάντα μεταβλητή χωρικά, διότι το πάχος της κορεσμένης ζώνης εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Εντούτοις πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η διαπερατότητα όσο και η μεταβιβασιμότητα είναι μεταβλητές χωρικά, παρότι στις αναλυτικές λύσεις θεωρούνται σταθερές. Αυτό συμβαίνει διότι οι υδροφορείς που συναντώνται στο πεδίο είναι πάντα ετερογενείς.



Εικόνα 3.1: Οι δύο θεωρήσεις διαφόρισης μιας εξίσωσης του συστήματος υπογείων υδάτων (Mary P. Anderson, William W. Woessner, *Applied Groundwater Modeling*, Academic Press, 1992)

Έτσι λοιπόν προσομοιώνονται τα συστήματα δισδιάστατης ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς, χρησιμοποιώντας δηλαδή αυτή τη θεώρηση. Στην περίπτωση περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή μπορούν να προσομοιωθούν με μία ψευδο-τριδιάστατη προσέγγιση στην οποία η κάθετη ροή μέσα από τα περιοριστικά στρώματα αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής, που προσθέτει ή αφαιρεί ποσότητα ύδατος από τους υποκείμενους ή υπερκείμενους υδροφορείς του περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή. Η υδραυλική κλίση του περιορισμένου υδροφορέα, το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα καθώς και η κάθετη διαπερατότητα του περιοριστικού στρώματος διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο αφού από αυτά εξαρτάται η ποσότητα της διαρροής. Τα περιοριστικά στρώματα δεν είναι σαφώς προσομοιωμένα και η οριζόντια ροή σε αυτά δεν υπολογίζεται.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (3.1)$$

$$\text{Όπου } L = K'_z \frac{h_{\text{source}} - h}{b'}$$

Οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (3.1) αντιπροσωπεύουν την οριζόντια ροή μέσω του υδροφορέα, όπου h συμβολίζει το υδραυλικό ύψος και T_x και T_y συμβολίζουν τις συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας. Χρησιμοποιώντας τους όρους T_x και T_y μέσα στα μερικά διαφορικά επιτρέπεται η χωρική μεταβολή τους, ενώ οι διαφορετικοί δείκτες για τις δύο διευθύνσεις επιτρέπουν την εφαρμογή της εξίσωσης σε ανισότροπους υδροφορείς όπου ισχύει ότι $T_x \neq T_y$. Το S είναι ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, το R είναι ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικός (εμπλουτισμός). Τη στιγμή που λαμβάνει χώρα άντληση με ρυθμό W , πρέπει να τεθεί στην εξίσωση $R = -W$. Στο δεξί μέρος της εξίσωσης ο τελευταίος όρος (L) δηλώνει ότι υπάρχει διαρροή από ένα περιοριστικό στρώμα. Το K'_z είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητά του, b' το πάχος του και h_{source} το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Κατά την εφαρμογή της (3.1) σε ελεύθερο υδροφορέα γίνονται οι εξής παραδοχές Dupuit:

- οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες
- η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους

Γενικά ισχύουν οι ισότητες $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$. Με h να είναι η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα από τον πυθμένα του υδροφορέα, δηλαδή το κορεσμένο πάχος. Αυτή η ανύψωση μπορεί να μεταβάλλεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Το S είναι η ειδική απόδοση καθώς και ο όρος της διαρροής είναι τις πιο πολλές φορές μηδενικός. Αυτό μπορεί να αλλάξει μόνο στην περίπτωση που υπάρχει διαρροή από ή προς κάποιο στρώμα κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα.

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας δεν υπάρχει. Αυτό συμβαίνει διότι στρογγυλοποιείται η μεταβιβασιμότητα στον μέσο όρο στην κάθετη διεύθυνση (η θεώρηση δισδιάστατης ροής συνεπάγεται μηδενική μεταβιβασιμότητα στον άξονα z). Οι ιδιότητες της μεταβίβασης σε ένα

σημείο του υδροφορέα περιγράφονται από την υδραυλική διαπερατότητα, η οποία για το λόγο αυτό έχει συνιστώσες και στις τρεις διευθύνσεις.

Η δεύτερη θεώρηση είναι εκείνη του συστήματος ροής. Δίνεται παραπάνω έμφαση στην ερμηνεία της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος. Ενώ, δεν αποδίδει βαρύτητα στη μελέτη των ίδιων των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων. Μέσω αυτής της θεώρησης επιτρέπονται τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα και επιπλέον την προσομοίωση της ροής είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις. Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι η παρακάτω:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.2)$$

Όπου

- K_x , K_y και K_z είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής διαπερατότητας,
- S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα,
- R^* είναι ένας γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης, ο οποίος στην εξίσωση θεωρείται θετικός (εμπλουτισμός) και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. (Στην περίπτωση άντλησης $R^* = -W$.) [24]

Στην περίπτωση που η εξίσωση (3.1) χρησιμοποιείται για προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων, τότε λαμβάνεται συνήθως $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$, με h να είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα.

Μπορεί να αντικατασταθεί στην εξίσωση (3.1) η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq και τελικά να προκύψει:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.3)$$

Επίσης ισχύει: $\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x}$ και $\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y}$

Εν τέλει η εξίσωση παίρνει την εξής μορφή: $\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R$ (3.4)

Η εξίσωση (3.4) είναι μη γραμμική, διότι ο όρος h είναι υψωμένος στη δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέλος της εξίσωσης ενώ στο δεξί είναι υψωμένος στην πρώτη δύναμη. Παρότι υπάρχουν αριθμητικές μέθοδοι για να λυθεί μια μη γραμμική εξίσωση, υπάρχει και πιο εύκολος τρόπος. Σε περίπτωση που είναι γνωστή μια τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα, τότε η εξίσωση είναι εύκολο να γραμμικοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα αριθμητικό μοντέλο. [24]

3.2 Παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος

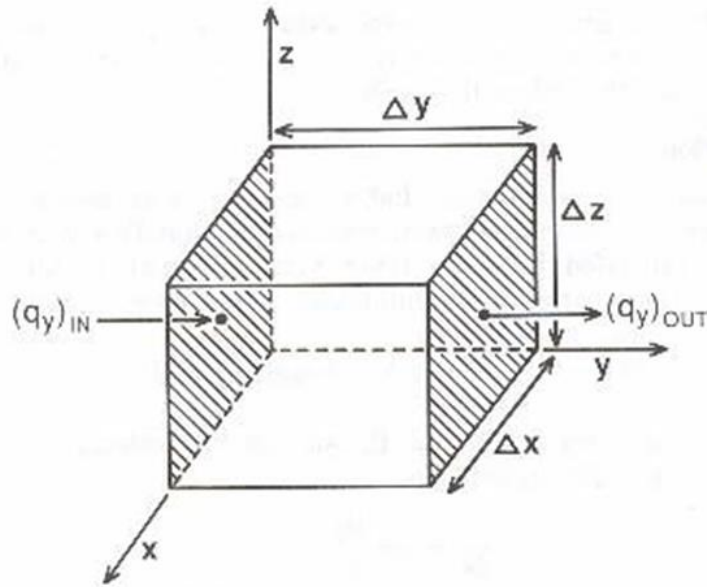
Για την παραγωγή της γενικής εξίσωσης (3.2) είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας κύβος ελέγχου από πορώδες υλικό, το οποίο πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και παράλληλα αρκετά μικρό ώστε η αλλαγή του ρεύματος μέσα στον όγκο ελέγχου να είναι πολύ μικρή.

Ο όγκος του μοναδιαίου αυτού κύβου ισούται με $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ και η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό άντλησης (q). Εκ των πραγμάτων πρόκειται για ένα διάνυσμα που έχει τη δυνατότητα να εκφραστεί ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών του q_x , q_y και q_z .

Ισχύει δηλαδή η εξής ισότητα:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (3.5)$$

όπου i_x , i_y και i_z τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων x , y και z αντίστοιχα.



Εικόνα 3.2: Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος (Τριχάκης Ι., Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υπαλμύρινσης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, 2004)

Όπως έχει συμφωνηθεί με το υδατικό ισοζύγιο, που εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας, ισχύει:

Έξοδος – Είσοδος = Αλλαγή στην αποθήκευση

Με τη θεώρηση ότι η ροή έχει κατεύθυνση κατά μήκος του άξονα y του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια $\Delta x \cdot \Delta z$ και ισούται με $(q_y)_{in}$ ενώ η εκροή είναι $(q_y)_{out}$.

Έτσι λοιπόν, ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής είναι ίσος με:

$$[(q_y)_{out} - (q_y)_{in}] \cdot \Delta x \cdot \Delta z \text{ ή } \frac{(q_y)_{out} - (q_y)_{in}}{\Delta y} (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (3.6)$$

Μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (3.7)$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων x και z. Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (3.8)$$

Επιπροσθέτως, για την ύπαρξη μιας πηγής εμπλουτισμού μέσα στον όγκο ελέγχου προστίθεται και ο όρος $R \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$. Επομένως, η αλλαγή της αποθήκευσης είναι η εξής:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^* \right) \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (3.9)$$

Επιπλέον, με τη θεώρηση ότι το Δh είναι αρνητικό όταν το ΔV είναι θετικό (δηλαδή το νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται) και λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα, προκύπτει:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (3.10)$$

Ακόμα, ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta V}{\Delta h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z} \quad (3.11)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και διαιρώντας τις με $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ δίνεται η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (3.12)$$

Λόγω του ότι το q δεν είναι άμεσα μετρήσιμο η εξίσωση εν τέλει έχει πολύ περιορισμένη χρήση. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιείται και ο νόμος του Darcy, ο οποίος συσχετίζει το q και το άμεσα μετρήσιμο υδραυλικό ύψος h. Ο νόμος του Darcy για τις τρεις διαστάσεις γράφεται ως εξής:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.13)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η εξίσωση (3.2). Θέτοντας $\frac{\partial h}{\partial x}=0$, πολλαπλασιάζοντας με το b , προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας $b \cdot S_s = S$ και $b \cdot R^* = R$ τελικά προκύπτει η (3.1).

Σε αυτές τις δύο εξισώσεις (3.1) και (3.2) θεωρείται ότι τα K_x, K_y και K_z (ή T_x, T_y) είναι συγγραμικά με τους άξονες x, y και z . Στην περίπτωση που η γεωλογία είναι τέτοια ώστε να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με το ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, τότε χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας (\bar{K}), η οποία γράφεται ως εξής:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα μετρώνται κατά τη διάρκεια μίας δοκιμής άντλησης. Ωστόσο, όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, μεταθέτονται οι συντεταγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνουν τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου ίσα με το μηδέν. Με την επίτευξη των προηγούμενων ορίζεται ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη την περιοχή μελέτης καθώς και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Επιπροσθέτως, στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Με την εισαγωγή των συντεταγμένων είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα.

Ένας ακόμα υπολογίσιμος παράγοντας σε προβλήματα που περιλαμβάνουν αλμυρό νερό, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα της υφαλμύρισης, είναι και η πυκνότητα. Αν επιρρεάζεται σημαντικά τότε χρειάζεται μια διαφορετική εξίσωση του συστήματος και ένας ειδικός αριθμητικός κώδικας. [24]

3.3 Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής

Προκειμένου να επιλυθούν αναλυτικά οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) είναι αναγκαίο να υποστούν ορισμένες απλοποιήσεις, οι οποίες συνήθως αφορούν περιπτώσεις με ομοιογένεια και μονοδιάστατη ή δισδιάστατη ροή. Πέραν των εφαρμογών σε υδραυλική πηγαδιών, οι αναλυτικές λύσεις δεν χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Επιπροσθέτως, είναι

προτιμότερες οι αριθμητικές λύσεις, αφού είναι πιο ευπροσάρμοστες και εύκολες στη χρήση από τις πιο σύνθετες αναλυτικές λύσεις. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των υπολογιστών.

Στην προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω κατηγορίες μοντέλων:

1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών
2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων
3. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
4. Η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης
5. Η μέθοδος των αναλυτικών στοιχείων

Μέθοδοι όπως οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν διαδοθεί ευρέως πλέον προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα ροής. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες θεωρούνται νέες τεχνικές και όχι τόσο διαδεδομένες όσο οι δύο πρώτες.

Έπειτα, περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Με τη βοήθεια ενός συγκεκριμένου προγράμματος στον υπολογιστή, επιλύεται μία ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται από προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες), οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης ενεργούν το μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που να μπορεί να λυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. Το ίδιο συμβαίνει και στις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία. Όσες αλγεβρικές εξισώσεις παράγονται κατ'αυτόν τον τρόπο εκφράζονται ως συνάρτηση πινάκων.

Σε περίπτωση που στο πρόβλημα υπάρχουν κόμβοι ανά ίσα διαστήματα, οι παραγόμενες αλγεβρικές εξισώσεις από τις δύο μεθόδους είναι οι ίδιες, μολονότι έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Είναι φανερό πως οι δύο μέθοδοι διαφέρουν. Η θεμελιώδης διαφορά φιλοσοφίας παίζει σημαντικό ρόλο. Σε κάθε κόμβο υπολογίζεται μια τιμή για το υδραυλικό ύψος μέσω των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η τιμή είναι και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από αυτόν τον κόμβο. Για τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το

υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον άλλο δε γίνεται κάποια υπόθεση. Απεναντίας, η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο ορίζεται από τα πεπερασμένα στοιχεία με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών συναρτήσεων. Από τους κόμβους υπολογίζονται τα υδραυτικά ύψη για διευκόλυνση, ωστόσο το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων. [8]

<u>ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ</u>	<u>ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</u>
Ευκολία στην κατανόηση και τον προγραμματισμό	Καλύτερη προσέγγιση των ορίων ακανόνιστου σχήματος
	Ευκολία στην προσαρμογή του μεγέθους μεμονωμένων στοιχείων και στη θέση των ορίων
Μικρότερες απαιτήσεις σε στοιχεία για την κατασκευή πλέγματος	Καλύτερη διαχείριση των εσωτερικών ορίων
	Καλύτερη προσομοίωση σημειακών πηγών, επιφανειών με διαρροή και κινούμενων υδροφόρων οριζόντων

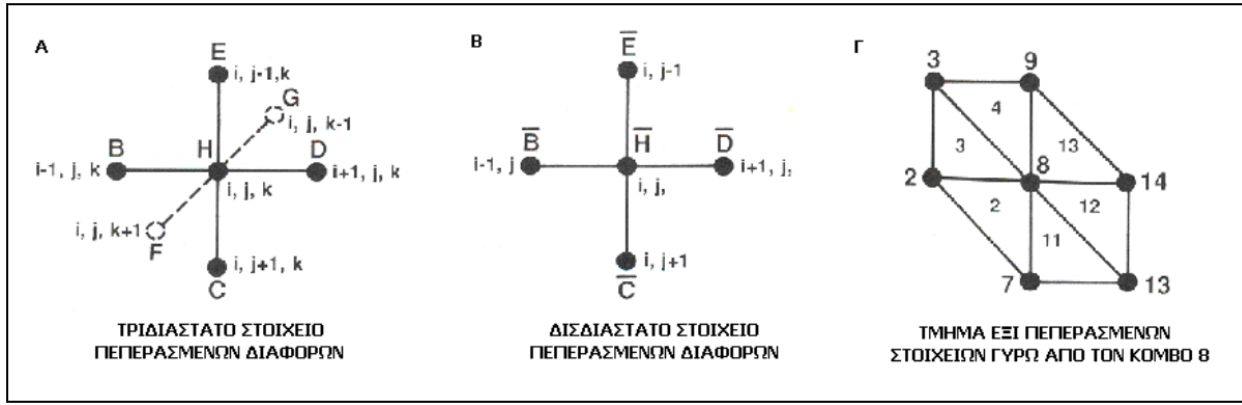
Πίνακας 2.1: Σύγκριση των προσεγγίσεων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Καρτεράκης Σ., Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, 2005)

Γενικότερα, η επιλογή της μίας ή της άλλης μεθόδου εξαρτάται κάθε φορά από την επίλυση του προβλήματος καθώς και από τις προτιμήσεις του ίδιου του χρήστη.

Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (3.2) καθώςον αφορά το υπολογιστικό τμήμα Α του παρακάτω σχήματος είναι η εξής:

(1^η εξίσωση)

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k-1} + Gh_{i,j,k+1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k}$$



Εικόνα 3.3: Το μοντέλο των πεπρασμένων διαφορών (Τριχάκης Ι., Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρινσης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, 2004)

Στην εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k ($h_{i,j,k}$) εμπεριέχεται το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο όπως και τα υδραυλικά ύψη στους έξι διπλανούς κόμβους. Τα υδραυλικά ύψη πολλαπλασιάζονται το καθένα με ένα συντελεστή (B, C, D, E, F, G ή H) που είναι μια συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων. Ως συνάρτηση του όρου της αποθήκευσης ορίζεται και ο συντελεστής H. Στην αποθήκευση και τους όρους εμπλουτισμού στο δεξί μέλος της εξίσωσης περιλαμβάνεται ο όρος $RHS_{i,j,k}$.

Η δισδιάστατη ροή, η οποία φαίνεται στο υπολογιστικό τμήμα B του παραπάνω σχήματος, μπορεί να αποδοθεί μαθηματικά από την εξίσωση:

(2^η εξίσωση)

$$\bar{B}h_{i-1,j} + \bar{C}h_{i,j+1} + \bar{D}h_{i+1,j} + \bar{E}h_{i,j-1} + \bar{H}h_{i,j} = RHS_{i,j}$$

Όπου $\bar{B}, \bar{C}, \bar{D}, \bar{E}, \bar{H}$ είναι συντελεστές.

Οι εξισώσεις (εξίσωση 1^η & 2^η) μπορούν να γραφούν ως εξισώσεις πινάκων υπό την μορφή:

$$[A] \cdot \{h\} = \{f\},$$

Οπου

- $[A]$ είναι ο πίνακας συντελεστών,
- $\{h\}$ το διάνυσμα των αγνώστων υδραυλικών υψών και
- $\{f\}$ το διάνυσμα των όρων του δεξιού μέλους (RHS) της εξίσωσης.

3.4 Οριακές συνθήκες

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των οριακών συνθηκών είναι ότι αποτελούν τη μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγό της (ροή) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Για την προσομοίωση ενός πραγματικού προβλήματος, για το οποίο πρέπει να έχει δομηθεί αλάνθαστα ένα μοντέλο, ο σωστός ορισμός των οριακών συνθηκών είναι βασική προτεραιότητα. Τα όρια καθορίζουν κατά βάση τη μορφή της ροής όταν πρόκειται για προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης.

Τα όρια αυτά ενδεχομένως να οφείλονται σε διάφορων ειδών αιτίες. Όπως για παράδειγμα, η φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος είναι ικανή να σχηματίσει τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων. Αντιθέτως, διαφορετικού τύπου όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών, όπως η ύπαρξη υπόγειων χωρισμάτων και ποταμών.

Τα υδρογεωλογικά όρια μπορούν να εκφραστούν από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (συνθήκες Dirichlet), για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό.
- Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής (συνθήκες Neumann), για τα οποία η παράγωγος της ροής κατά μήκος του ορίου είναι σταθερή.
- Τύπος 3: Όρια εξαρτημένης ροής από το υδραυλικό ύψος (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου), για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μία τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται ορισμένες φορές συνθήκη μικτού ορίου, διότι συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή.

Αν το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζει την επιλογή και την προσθήκη μίας οριακής συνθήκης στο πλέγμα.[8]

3.5 Προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης

Τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης θεωρούνται πιο πολύπλοκα και έτσι είναι απαραίτητες περισσότερες παράμετροι πεδίου σε σχέση με τα μοντέλα κορεσμένης ζώνης. Ωστόσο, όταν απαιτείται η προσομοίωση του εμπλουτισμού προκειμένου να καθοριστεί η πορεία του ύδατος που διηθείται προς τον υπόγειο υδροφόρο είναι πολύ χρήσιμα. Βασικό τους γνώρισμα είναι ότι απαιτούν τη γνώση του ρυθμού εμπλουτισμού, έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η άνω οριακή συνθήκη, με την προϋπόθεση ότι η διήθηση που εισάγεται στο άνω όριο του μοντέλου ακόρεστης ζώνης θα φτάσει εν τέλει στον υδροφόρο ορίζοντα ως εμπλουτισμός εκτός και αν προσομοιωθεί ως εξατμισοδιαπνοή. Γι'αυτό χρησιμοποιούνται, εάν και εφόσον υπάρχουν λόγοι που να δικαιολογούν την πρόσθετη πολυπλοκότητα που συνεπάγεται αυτό το είδος μοντελοποίησης.

Προκειμένου να προσομοιωθεί χρονικά η άφιξη του εμπλουτισμού στον υδροφόρο ορίζοντα έχουν χρησιμοποιηθεί τέτοια μοντέλα παλαιότερα. Παρ'όλα αυτά η έξοδος του μοντέλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εμπλουτισμός σε ένα μοντέλο κορεσμένης ζώνης. Το πρόβλημα είναι ότι τα μοντέλα για κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη δεν συσχετίζονται μεταξύ τους και αυτό είναι το κύριο μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης.

Διαφορετικά, ένα μοντέλο που περιλαμβάνει την κορεσμένη αλλά και την ακόρεστη ζώνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απόκρισης του υδροφόρου στον εμπλουτισμό. Το πεδίο ροής μεταξύ των δύο ζωνών είναι συνεχές και ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να υπολογισθεί ως η επιφάνεια μηδενικής πίεσης ύδατος, και αυτό είναι το θετικό σε αυτό το μοντέλο. Όμως, πρέπει να σημειωθεί το μειονέκτημα χρήσης του συγκεκριμένου ή και οποιουδήποτε άλλου μοντέλου που περιέχει ακόρεστη ζώνη ότι είναι η εισαγωγή σημαντικού βαθμού επιπλέον πολυπλοκότητας. [8],[26]

3.6 Μοντέλο PTC (Princeton Transport Code)

Το μοντέλο PTC είναι ένα τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο μεταφοράς υπογείων υδάτων και ρύπων, το οποίο προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος. Απαιτεί διάφορα βήματα πριν από οποιαδήποτε προσομοίωση που μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Με τη βοήθεια του αριθμητικού μοντέλου PTC προσομοιώνεται η ροή των υπόγειων υδάτων και οι μολυσμένες μαζικές μεταφορές, ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να καθοριστούν κριτήρια που θα μπορούσαν να προσαρμοστούν καλύτερα στις ανάγκες μιας συγκεκριμένης περιοχής. Η ανάλυση αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση των επιδόσεων ενός πεπερασμένου αριθμητικού μοντέλου με βάση ενός υβριδικού αριθμητικού μοντέλου ζεύξης πεπερασμένων στοιχείων (Princeton Transport Code-PTC), σχεδιασμένο για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων και της μαζικής μεταφοράς νιτρικών αλάτων σε έναν αλλουβιακό υδροφόρο ορίζοντα. Η αξιολόγηση των επιδόσεων του μοντέλου αξιολογείται με βάση τα στατιστικά μέτρα και την ανάλυση των γραφικών επιδόσεων των προβλέψεων του σημείου μοντέλου στις παρατηρούμενες τιμές. Εν τέλει, βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και προσομοίωση της ροής των υπογείων υδάτων στην Χερσόνησο Ηρακλείου, στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης. Με αυτό το μοντέλο είναι εφικτό τόσο η προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων υδάτων, όσο και η πρόβλεψη της διασποράς ενός ρύπου στον υπόγειο υδροφόρο.

Σε σχέση με άλλα μοντέλα

Με το πέρας των χρόνων έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες, οι οποίες χρησιμοποιούν πολλά διαφορετικά μοντέλα προκειμένου να γίνει η προσομοίωση υπόγειων υδροφορέων και η πρόβλεψη της μελλοντικής τους κατάστασης. Αυτά τα μοντέλα ποικίλλουν από μοντέλα φυσικής βάσης όπως το PTC και το MODFLOW και άλλα που χρησιμοποιούν εκτεταμένα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, μέχρι και μοντέλα, όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.

Γενικές παράμετροι μοντέλου

Αρχικά, σύμφωνα με τις υπάρχουσες υδρογεωλογικές συνθήκες και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν σε συνδυασμό με την χρονική περίοδο που τέθηκε ορίζονται οι αρχικοί παράμετροι, έτσι ώστε να εμφανίζονται εν τέλει ορισμένες βασικές έννοιες της υπόγειας υδραυλικής. Αυτοί περιλαμβάνουν γενικές πληροφορίες για τους υδροφορείς και τις ιδιότητες τους καθώς και πληροφορίες σχετικά με την κατηγοριοποίηση των μοντέλων και τη χρήση αυτών. Ακόμα, εισάγονται παράμετροι ελέγχου της προσομοίωσης σχετικά με τις χρονικές περιόδους.

Στο λογισμικό ArgusOne, μέσω του οποίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PTC, παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το PTC για την επίλυση των προβλημάτων ροής. Συμπεριλαμβάνονται η χρήση των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και των πεπερασμένων διαφορών.

Το PTC είναι γραμμένο στο FORTRAN 77, επομένως μπορεί να εκτελεστεί με επιτυχία σε διάφορους υπολογιστές με ελάχιστη ή καμία τροποποίηση. Αυτό προϋποθέτει ότι το PTC χρησιμοποιείται σε έναν προσωπικό υπολογιστή που εκτελεί DOS, για τους σκοπούς της επίδειξης. Οι λεπτομέρειες της εγκατάστασης και της σύνταξης εξαρτώνται από το σύστημα, φυσικά, αλλά θα πρέπει να εκτελεστούν τα ίδια γενικά βήματα για κάθε λειτουργικό σύστημα και κάθε μεταγλωττιστή.

Το PTC έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη ποικιλία προδιαγραφών εισόδου και εξόδου, που εκκρεμούν στις ιδιοτροπίες συγκεκριμένων εφαρμογών. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την προσαρμογή του αρχείου εντολών PTC, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτιμήσεις του μεμονωμένου χρήστη. Σε γενικές γραμμές, μπορούν να προσδιοριστούν δύο ευρείες κατηγορίες εισροών, η απλή εισαγωγή και η σύνθετη εισαγωγή, καθώς και η προσέγγιση για τη δημιουργία αρχείων εισόδου PTC, σε αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι αρκετά διαφορετική.

3.6.1 Οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου PTC

Το PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαράσχη τη ροή υπογείων υδάτων με:

- υδραυλικό ύψος h ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (3.14)$$

- στοιχεία ταχύτητας του Darcy,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.15)$$

- μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από την συγκέντρωση C ,

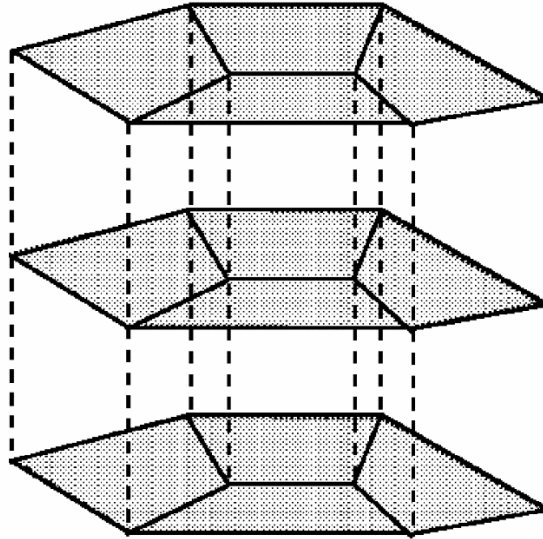
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) \quad (3.16) \end{aligned}$$

Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και τον νόμο του Darcy. Η λύση αυτών των εξισώσεων ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: πρώτα υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη h από την (3.14) μετά, οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y , V_z από την (3.15) και τελικά λύνεται η (3.16) για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου c .

3.6.2 Αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου PTC

Προκειμένου να επιλυθούν οι παραπάνω εξισώσεις για πολύπλοκα φυσικά συστήματα απαιτείται η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Καθόσον αφορά συστήματα σε κλίμακα πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια που έχει σχέση με την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι πολύ μεγάλη. Για την επίλυση των πλήρως τρισδιάστατων εξισώσεων το PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο. [8]

Ο αλγόριθμος περιέχει το διαχωρισμό της περιοχής σε παράλληλα οριζόντια στρώματα. Έτσι, γίνεται μια διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων μέσα σε αυτά τα στρώματα ώστε να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με πεπερασμένες διαφορές, ενώ η μέθοδος της υδρόβιας ένωσης των πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές εξασφαλίζει τη δυνατότητα για να ισχύσει η διαχωριστική διαδικασία. Κατά τη διάρκεια της επανάληψης μιας χρονικής περιόδου όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο μέρη, στο πρώτο όπου όλα τα οριζόντια πεπερασμένα στοιχεία επιλύονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και στο δεύτερο όπου επιλύονται όλες οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.



Εικόνα 3.4: Σχέδιο των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στοίβες, που παράγουν τον τρισδιάστατο διαχωρισμό (Princeton Transport Code Manual)

3.6.3 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων

3.6.3.1 Βασική εξίσωση

Το PTC ορίζει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος και βρίσκει το υδραυλικό ύψος από την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (3.17)$$

Όπου:

- h είναι το υδραυλικό ύψος [L],
- K_{xx} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην x οριζόντια κατεύθυνση [LT⁻¹],
- K_{yy} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια κατεύθυνση [LT⁻¹],
- K_{zz} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κάθετη) κατεύθυνση [LT⁻¹],

- S ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας [L^{-1}],
- Q_i ο όρος της πηγής καταβύθισης στη θέση i [L^3T^{-1}] (π.χ. πηγάδια, θετικές τιμές δηλώνουν άντληση)
- δ είναι η Δέλτα συνάρτηση και
- r ο αριθμός των σημείων που έχουν πηγή ή καταβόθρα

Χρησιμοποιούνται σαν βασικές μονάδες το μήκος [L], ο χρόνος [T] και η μάζα [M].

Λόγω ευκολίας ο τελευταίος όρος της (3.17) θα γράφεται συντεταγμένα ως Q . Η εξίσωση του συστήματος (3.17) λύνεται αριθμητικά από το PTC με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

3.6.3.2 Οριακές συνθήκες

Το PTC δέχεται τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής, οι οποίοι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και τρίτου τύπου (διαρροή).

Οι οριακές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής. Αυτό υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα κάτω και γύρω από αυτόν. Καθώς επιλέγονται διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος ουσιαστικά απαλοίζονται από την εξίσωση του πίνακα, απομένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.

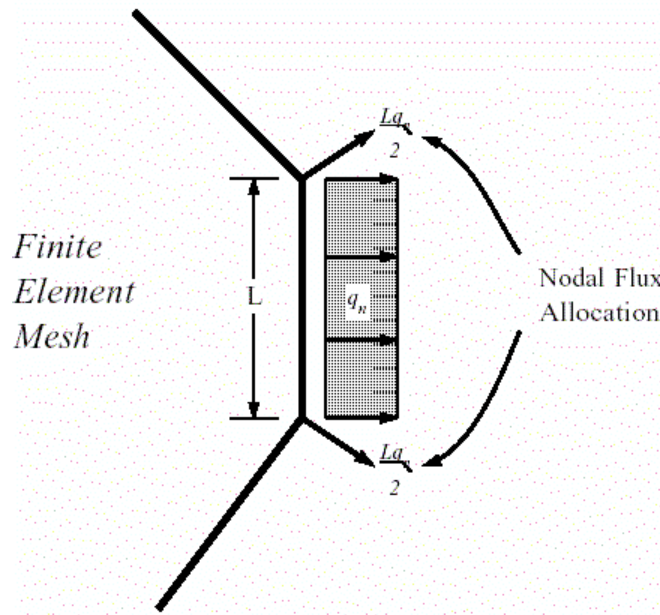
Καθορισμένη Ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής.

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Στην περίπτωση που η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές (όπως φαίνεται και στο σχήμα). Κατά συνέπεια, ο χρήστης φτάνει να ορίσει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο προκειμένου να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Με μαθηματικό τρόπο, λόγω άντλησης, καθώς και με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε ένα κόμβο γίνεται η εισαγωγή της ροής. Προκειμένου να γίνει πιο ομαλά η εισαγωγή της ομοιόμορφης διήθησης το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης. Επιπροσθέτως, κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή.

Τρίτου Τύπου

Γίνεται εισαγωγή των οριακών συνθηκών διαρροής με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ολοκληρώνεται αυτός ο όρος στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Οποιαδήποτε διαρροή μπορεί να οριστεί, εάν και εφόσον επιλεχθεί ο κατάλληλος ορισμός της παραμέτρου που δηλώνεται από τον χρήστη, k_L . [8],[27]



Εικόνα 3.5: Κατανομή στους κόμβους της παροχής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L . Για γραμμικά στοιχεία κάθε κόμβος έχει τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας (Princeton Transport Code Manual)

3.6.3.3 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα

Η επιβολή του υδροφόρου ορίζοντα ή οριακών συνθηκών ελεύθερου υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή των δύο οριακών συνθηκών, οι οποίες εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα.

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.6) απεικονίζεται μια σχηματική αναπαράσταση της κατάστασης που περιέχει έναν κινούμενο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος υπόκειται σε διήθηση μέτρου $R(x,y,t)$. Από τη σχέση $z = z_{M+1}(x,y,t)$ δίνεται η σταθερή ανύψωση του άνω ορίου της περιοχής ροής και από τη σχέση $z = z_{WT}(x,y,t)$ δίνεται η πραγματική ανύψωση.

Η πρώτη οριακή συνθήκη φανερώνει πρακτικά ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα (h_M) δείχνει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT} - z_M$). Σύμφωνα με αυτό σε κάθε κόμβο ζητάται:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (3.18)$$

Υπάρχει η θεώρηση ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα ($k = M$). Κατά συνέπεια, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, έχει

τη δυνατότητα να ελέγχει αν οι τιμές του h_M στους κόμβους είναι μέσα στα περιθώρια ανύψωσης που δίνει η εξίσωση:

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (3.19)$$

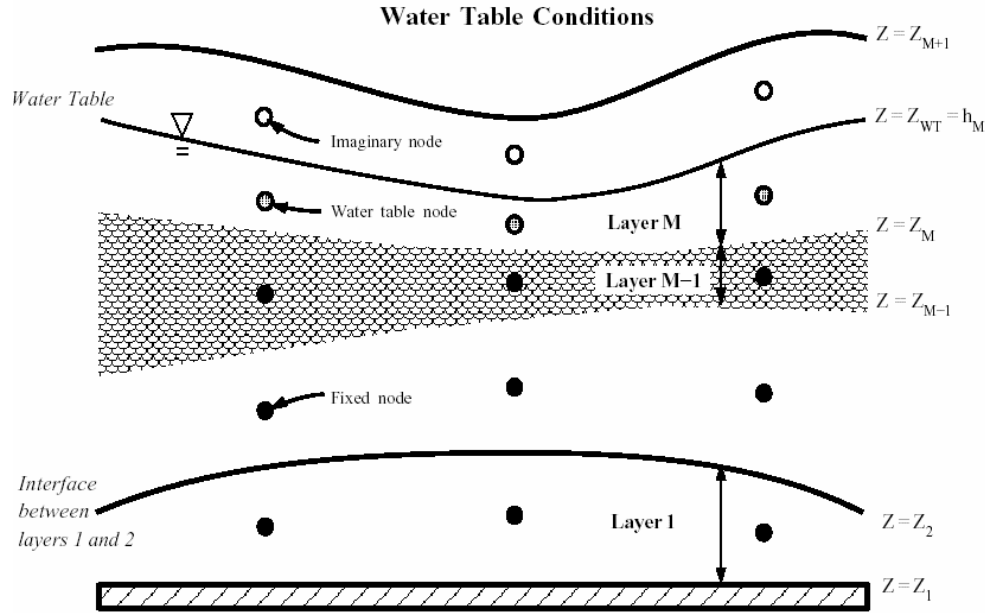
Στην περίπτωση που δεν ισχύει ή παραβιαστεί η παραπάνω συνθήκη το PTC δίνει ένα μήνυμα, το οποίο τυπώνει τη θέση του κόμβου, το μέγιστο πάχος και άλλα σχετικά με αυτή την παραβίαση. Έτσι σταματάει η εκτέλεση του προγράμματος. Άλλωστε η (3.19) πρέπει να ικανοποιείται και από τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους. Το z_{WT} ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, το οποίο βρίσκεται μέσα στους πίνακες των συντελεστών η (3.18) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής. Με την επανάληψη του δεύτερου βήματος του αλγορίθμου γίνεται πιο ομαλή η μη γραμμικότητα. Αυτές οι επαναλήψεις γίνονται σε ένα συγκεκριμένο βήμα χρόνου. Όταν το h μεταβάλλεται λιγότερο από ένα ορισμένο σφάλμα E , μια δεδομένη τιμή αντοχής, τότε σταματούν οι επαναλήψεις και συνεχίζονται κανονικά οι υπολογισμοί στο επόμενο βήμα.

Η μόνιμη απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στον εμπλουτισμό περιγράφεται από την δεύτερη οριακή συνθήκη υδροφόρου ορίζοντα, με την προϋπόθεση ότι το S_y σημαίνει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα. Επομένως, οι σχετικές εξισώσεις δίνονται από την:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial t} = R \quad (3.20)$$

Με τη χρήση των φανταστικών κόμβων του στρώματος πάνω από το ανώτερο στρώμα ($M + 1$), η (3.20) γράφεται με μορφή πεπερασμένων διαφορών, όπου για κάθε κόμβο i του ανώτερου στρώματος ($k = M$). Το S_{yi} συμβολίζει το πορώδες του υδροφορέα, το R_i είναι η καθαρή κάθετη διήθηση, το Δz_i συμβολίζει το πάχος του στρώματος, και το $(K_z)_i$ είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα.

Η εξίσωση που προκύπτει χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τις τελικές εξισώσεις του μοντέλου, όταν αυτό επιλύει το ανώτερο στρώμα $k = M$. Οι όροι που περιέχουν παραγώγους του χρόνου εισάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές (άγνωστοι) στις τελικές εξισώσεις του συστήματος μόνο για το ανώτερο στρώμα.



Εικόνα 3.6: Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες που είναι σημειωμένες με $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., αποτελούν καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα (Princeton Transport Code Manual)

Σημείωση: ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας $Z = Z_{WT}$ πρέπει να ικανοποιεί την $Z_M \leq Z_{WT} \leq Z_{M+1}$.

3.6.4 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία με την οποία υπολογίζονται τα μεταβατικά υδραυλικά ύψη $h(x,y,z,t)$ επιλύοντας την εξίσωση ροής. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι ανάλογες διαδικασίες για την εξίσωση μεταφοράς ρύπων.

3.6.4.1 Εξισώσεις συστήματος

Οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y and V_z εκτιμώνται ως ποσότητες στρογγυλοποιημένες στο μέσο όρο των στοιχείων. Οι όροι διασποράς από την εξίσωση μεταφοράς (3.19) δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + \right.$$

$$D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} + Q(c^w - c) - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.21)$$

Οι όροι διασποράς στην (3.21) δίνονται από τις εξισώσεις (Burnett and Frind [1987]):

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\ D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\ D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2)/V + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\ D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \\ D_{zx} &= D_{xz} = \frac{(a_L - a_V) V_z V_y}{V} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Όπου:

- a_L ο συντελεστής κατά μήκους διασποράς [L],
- a_T ο συντελεστής εγκάρσιας οριζόντιας διασποράς [L],
- a_V ο συντελεστής εγκάρσιας κάθετης διασποράς [L],
- V το μέτρο του διανύσματος της ταχύτητας [L/T] ($V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$),
- c η συγκέντρωση στο σημείο (x,y,z) σε χρόνο t [M/L³]
- θ το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο],
- $E(c)$ η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης,
- Q η δύναμη άντλησης / εμπλουτισμού [1/T] ($Q = Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$),
- Q_i ο ογκομετρικός ρυθμός άντλησης / εμπλουτισμού [L³/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i),
- c_w η συγκέντρωση του νερού στο σημείο (x_i, y_i, z_i),
- $\delta()$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

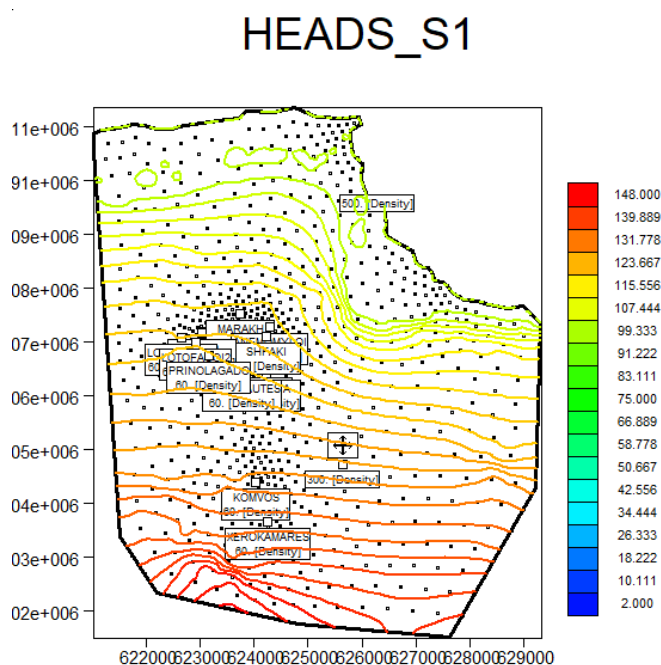
Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i \leq 0$), υπάρχει η θεώρηση ότι η συγκέντρωση του νερού που αντλείται c_w ισούται με τη συγκέντρωση του νερού στο περιβάλλον γύρω από το σημείο αυτό c . Επομένως, σε όλες τις αντλίες ο όρος $Q(c_w - c)$ θεωρείται ίσος με 0. Επιπροσθέτως, το μοντέλο συγκρατεί τους όρους με το Q μονάχα στην περίπτωση που η αντλία εμπλουτίζει τον υδροφορέα ($Q_i > 0$) με συγκέντρωση εισερχόμενου νερού c_w .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

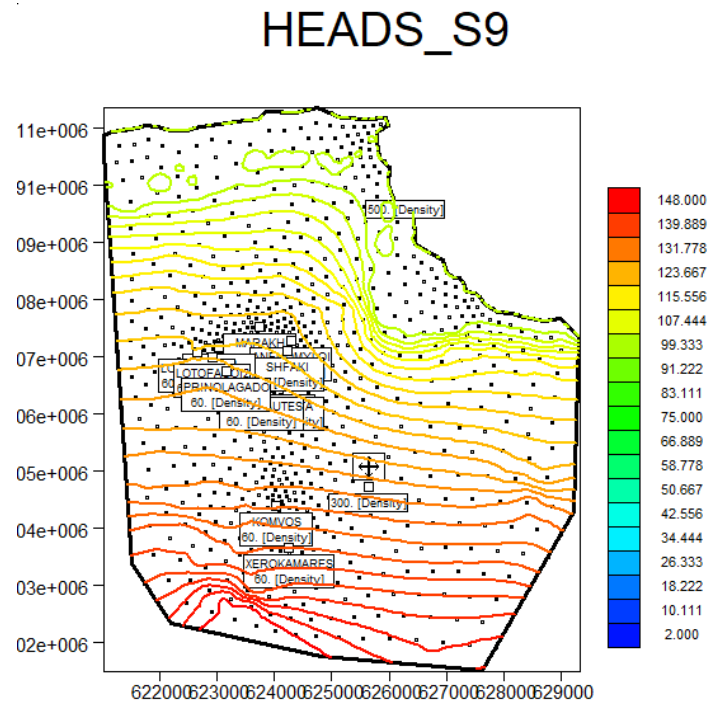
4.1 Αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη

Με την εισαγωγή όλων των απαραίτητων στοιχείων στο μοντέλο PTC έγινε μία προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής. Η μοντελοποίηση εκτελέστηκε για δέκα υδρολογικά έτη και κάθε έτος χωρίζεται σε δύο χρονικές περιόδους, τη χειμερινή και την καλοκαιρινή. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα **υδραυλικά ύψη** (των γεωτρήσεων) για τρεις χειμερινές περιόδους και για τρεις καλοκαιρινές.

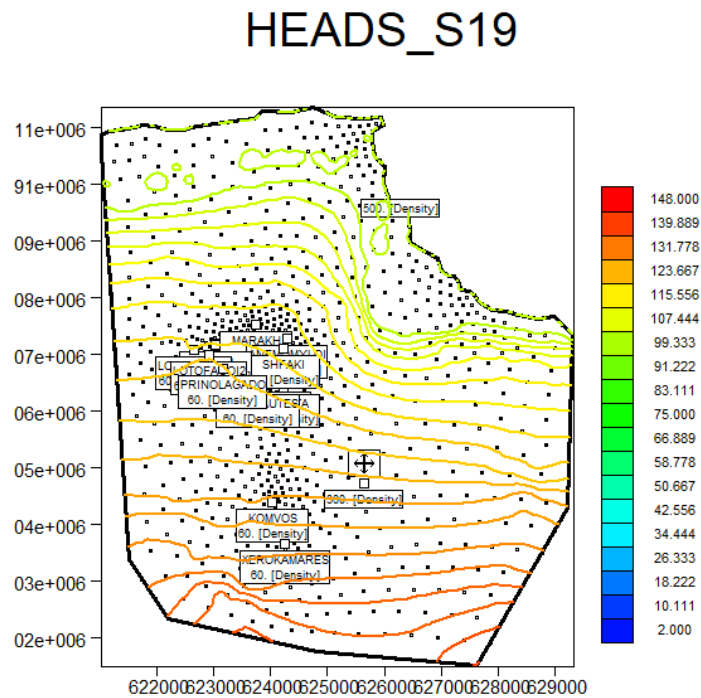
Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος-Απρίλιος)



Εικόνα 4.1: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την πρώτη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)



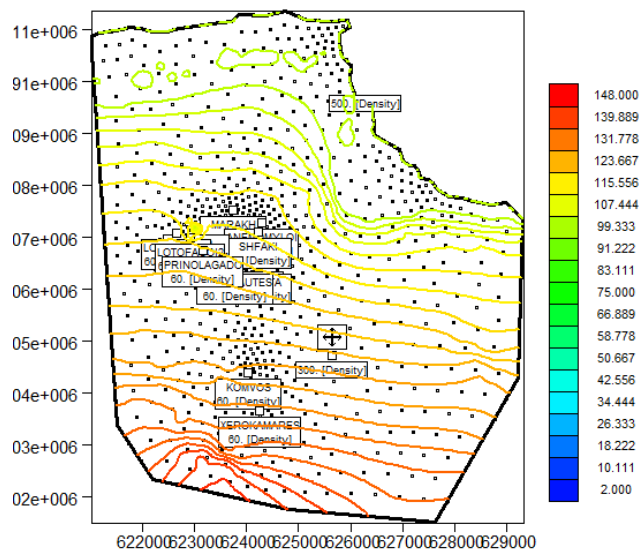
Εικόνα 4.2: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την ένατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)



Εικόνα 4.3: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)

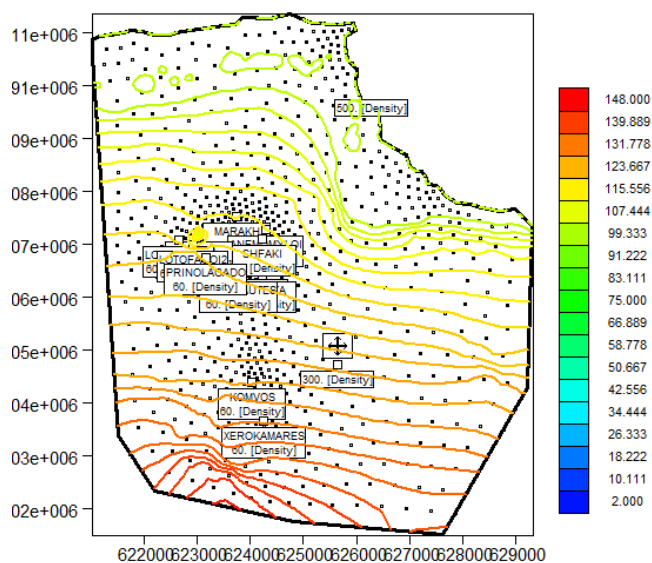
Θερινή περίοδος (Μάιος-Σεπτέμβριος)

HEADS_S2

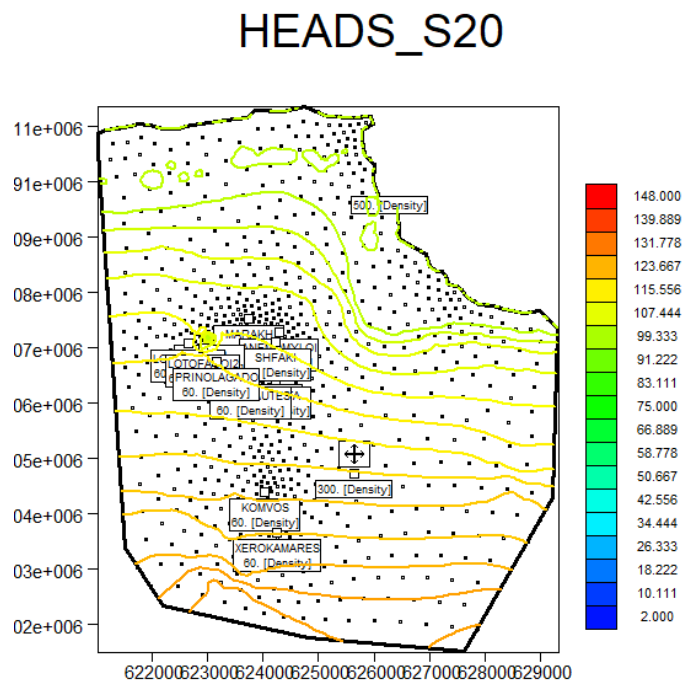


Εικόνα 4.4: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)

HEADS_S10



Εικόνα 4.5: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την δέκατη περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)

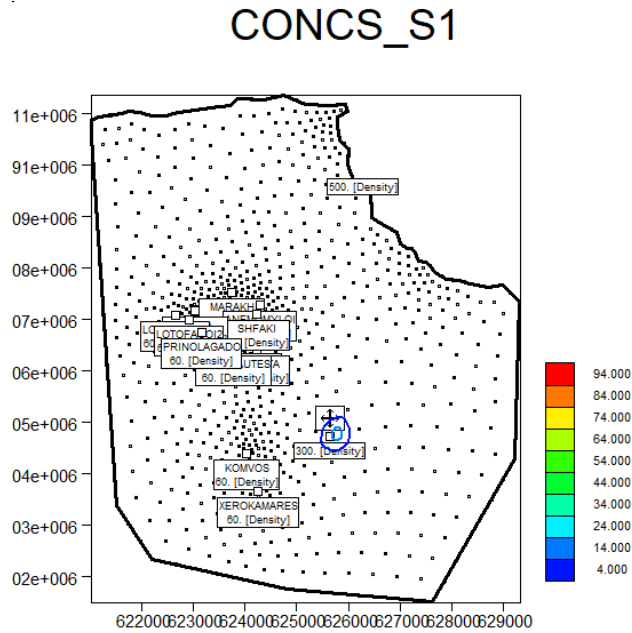


Εικόνα 4.6: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη για την εικοστή περίοδο. Οι τιμές του υδραυλικού ύψους είναι σε μέτρα (m)

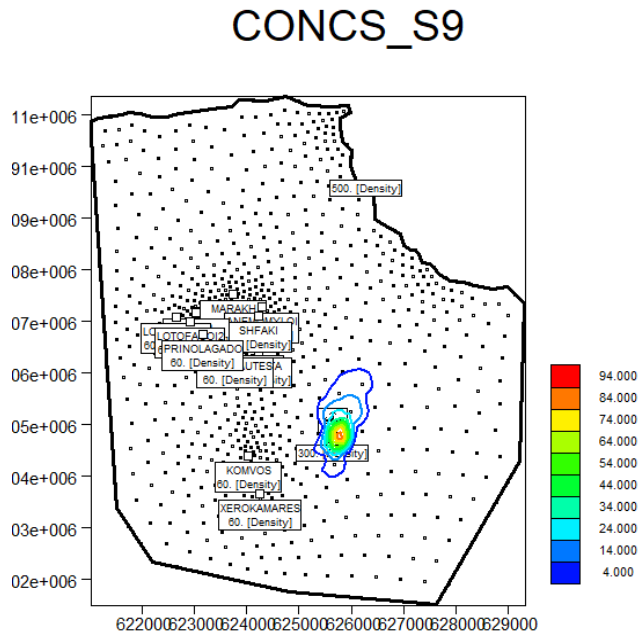
4.2 Αποτελέσματα για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις

Έπειτα εισάγοντας όλα τα απαραίτητα στοιχεία στο μοντέλο PTC γίνεται προσομοίωση για τις εκθέσεις υπολογισμών ισοζυγίου μάζας, δηλαδή η συγκέντρωση ρύπων στο νερό καθώς και τα παράγωγα της αποικοδόμησης των αποβλήτων με τις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις. Η μοντελοποίηση εκτελέστηκε για δέκα υδρολογικά έτη και κάθε έτος χωρίζεται σε δύο χρονικές περιόδους, τη χειμερινή και την καλοκαιρινή, όπως ακριβώς έγινε και για τα υδραυλικά ύψη. Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται τα αποτελέσματα του μοντέλου για τις συγκεντρώσεις για τρεις χειμερινές περιόδους και για τρεις καλοκαιρινές.

Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος-Απρίλιος)

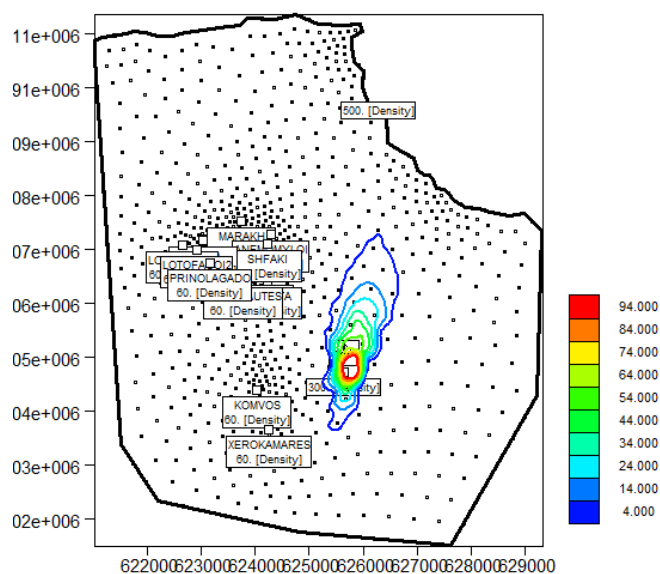


Εικόνα 4.7: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την πρώτη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलीग्राम्मάρια ανά λίτρο (mg/L)



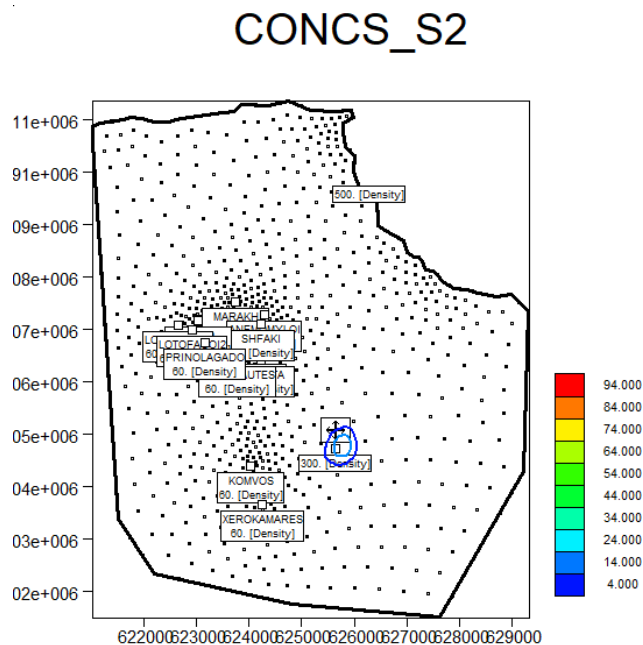
Εικόνα 4.8: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την ένατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलीग्राम्मάρια ανά λίτρο (mg/L)

CONCS_S19

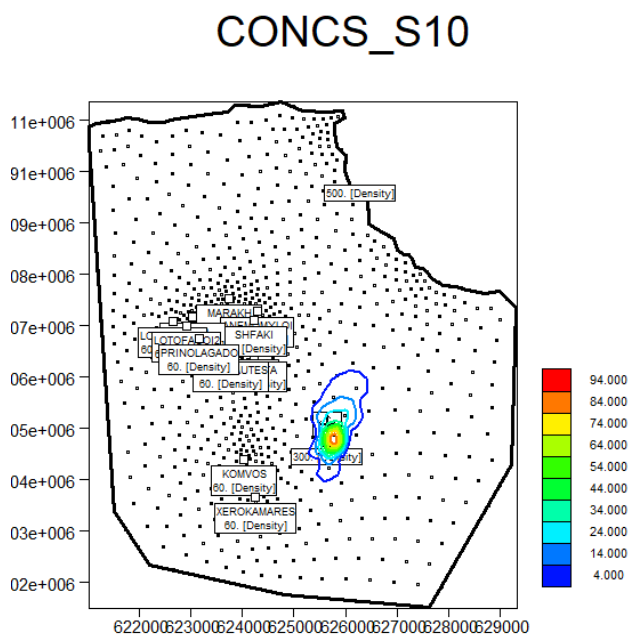


Εικόνα 4.9: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलीग्राम्माρία ανά λίτρο (mg/L)

Θερινή περίοδος (Μάιος-Σεπτέμβριος)

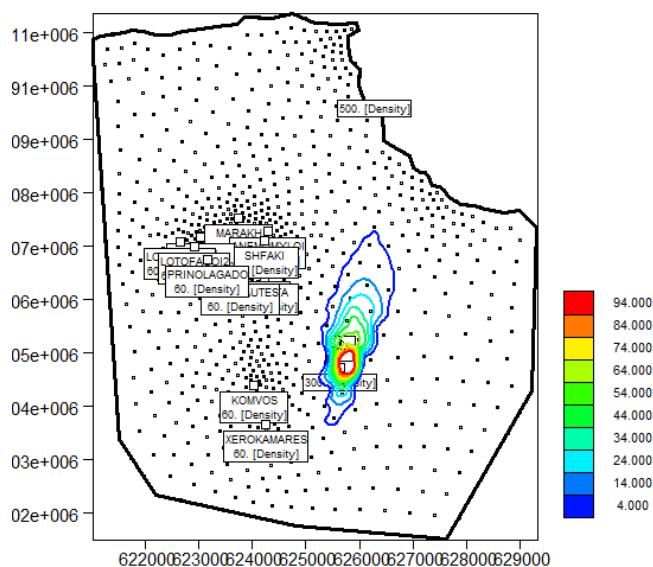


Εικόνα 4.10: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलीग्राम्मάρια ανά λίτρο (mg/L)



Εικόνα 4.11: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την δέκατη περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलीग्राम्मάρια ανά λίτρο (mg/L)

CONCS_S20

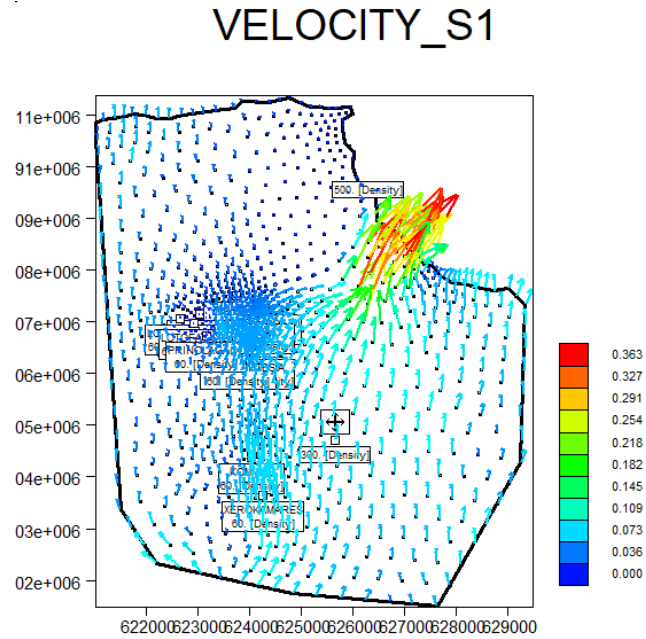


Εικόνα 4.12: Αποτελέσματα μοντέλου για την εξάπλωση ρυπογόνων ουσιών και τις συγκεντρώσεις τους κατά την εικοστή περίοδο. Οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι σε मिलिग्राम्मरिा ανά λίτρο (mg/L)

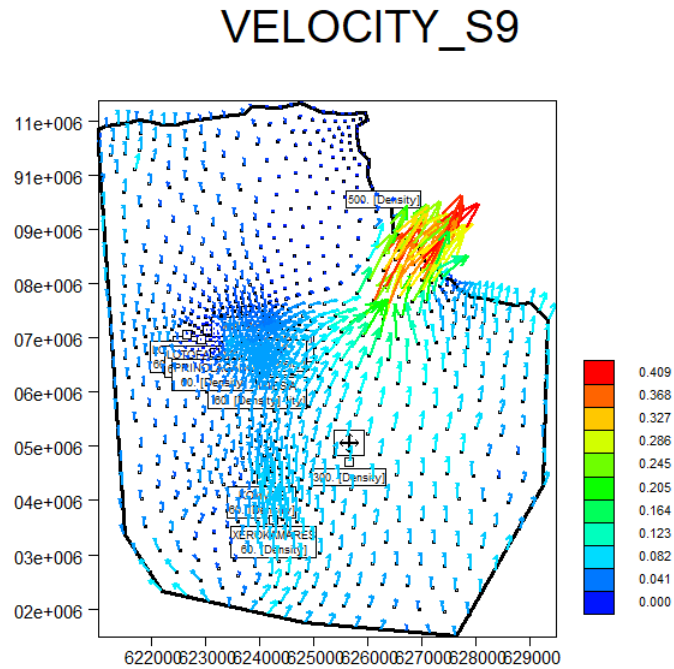
4.3 Αποτελέσματα για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων

Με την εισαγωγή όλων των απαραίτητων στοιχείων στο μοντέλο PTC έγινε μία προσομοίωση των ταχυτήτων των υπογείων υδάτων για τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο αντίστοιχα, μέσω των γραφημάτων που ακολουθούν.

Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος-Απρίλιος)

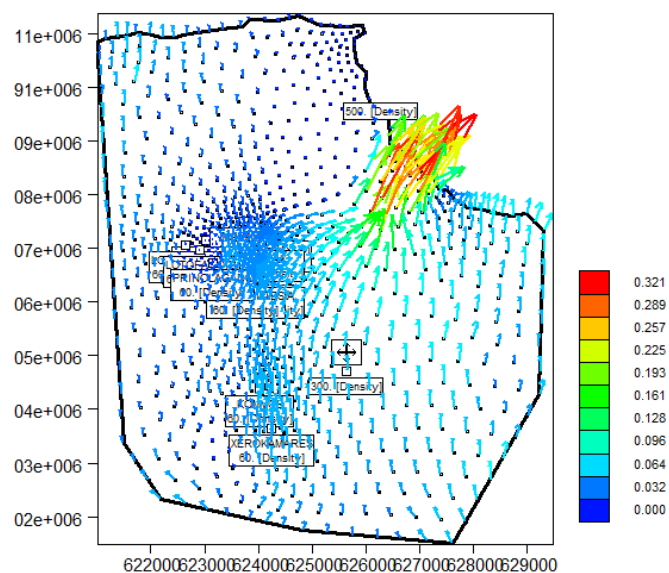


Εικόνα 4.13: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την πρώτη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)



Εικόνα 4.14: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την ένατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)

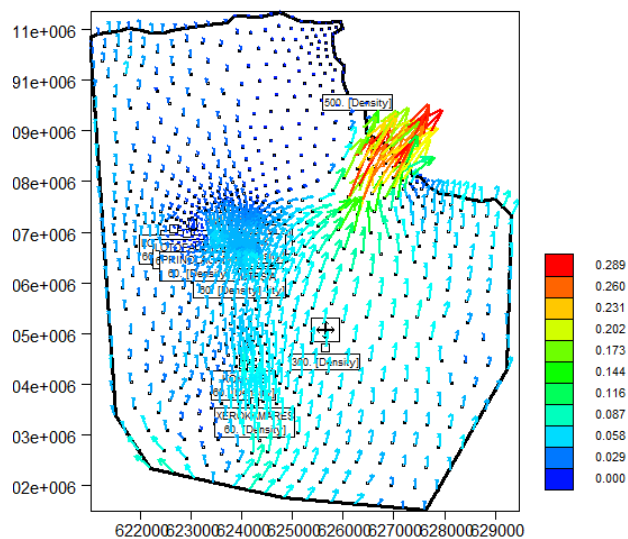
VELOCITY_S19



Εικόνα 4.15: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δέκατη ένατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)

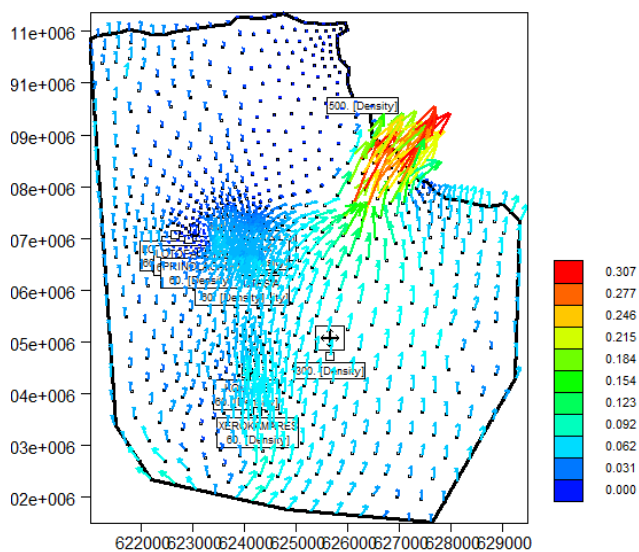
Θερινή περίοδος (Μάιος-Σεπτέμβριος)

VELOCITY_S2



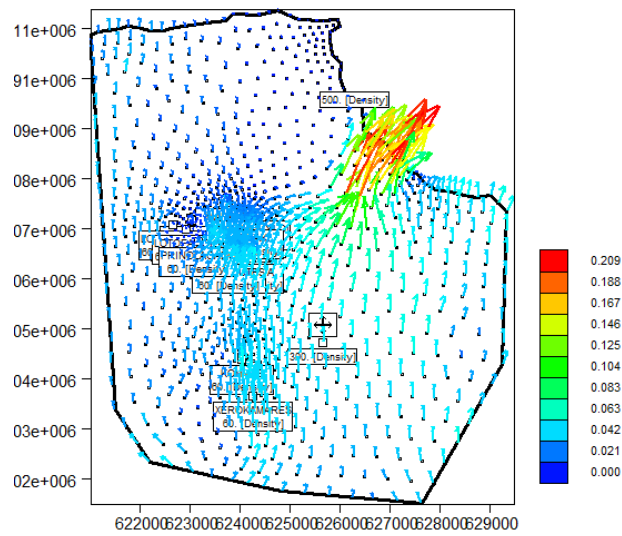
Εικόνα 4.16: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δεύτερη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)

VELOCITY_S10



Εικόνα 4.17: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την δέκατη περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)

VELOCITY_S20



Εικόνα 4.18: Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων για την εικοστή περίοδο. Οι τιμές των ταχυτήτων είναι σε μέτρα ανά μέρα (m/d)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά κατά τη χειμερινή περίοδο υπάρχουν έντονες βροχοπτώσεις και οι αντλήσεις είναι μηδαμινές, σε αντίθεση με τους θερινούς μήνες όπου υπάρχουν πολλές αντλήσεις αλλά όχι βροχοπτώσεις και διηθήσεις. Λόγω του ότι οι συνθήκες είναι σταθερές (Steady State) δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές από χειμώνα σε καλοκαίρι.

Από την σύγκριση των υδραυλικών υψών του μοντέλου για την πρώτη και την ένατη χειμερινή περίοδο γίνεται αντιληπτό ότι το υδραυλικό ύψος έχει μειωθεί ελάχιστα, αφού μόνο δύο μικρές ισοϋψείς καμπύλες που υπάρχουν στην εικόνα 4.1 δεν εμφανίζονται στην εικόνα 4.2. Ωστόσο τα υδραυλικά ύψη μεταξύ της ένατης και της δέκατης ένατης περιόδου έχουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους, αφού οι χαμηλότερες έξι ισοϋψείς καμπύλες που υπάρχουν στην εικόνα 4.2 δεν εμφανίζονται πια στην εικόνα 4.3. Συμπερασματικά, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υγρών χειμερινών περιόδων αλλά μεταξύ χειμερινών και θερινών.

Όσον αναφορά τη σύγκριση των υδραυλικών υψών μεταξύ της δεύτερης και της δέκατης θερινής περιόδου, στο πλαίσιο του μοντέλου, γίνεται αντιληπτό ότι το υδραυλικό ύψος δεν μειώνεται, αφού στην εικόνα 4.5 εμφανίζονται ακριβώς οι ίδιες ισοϋψείς καμπύλες που υπάρχουν στην εικόνα 4.4. Όμως τα υδραυλικά ύψη μεταξύ της δέκατης και της εικοστής περιόδου εμφανίζουν σημαντική διαφορά μεταξύ τους, αφού οι χαμηλότερες εννέα ισοϋψείς καμπύλες που υπάρχουν στην εικόνα 4.5 δεν εμφανίζονται πια στην εικόνα 4.6. Κατά συνέπεια, γίνεται φανερό ότι το απόθεμα υπογείων υδάτων μειώνεται σημαντικά από την δεύτερη στην εικοστή περίοδο.

Από τις εικόνες φαίνεται ότι ο ρύπος κινείται προς την παράκτια ζώνη, όμως λόγω του ότι οι αντλήσεις και στις δυο περιόδους είναι μικρές η μεταφορά του ρύπου δεν εμφανίζει κινήση προς τις θέσεις εκείνες που βρίσκονται οι γεωτρήσεις άντλησης. Σε περίπτωση που οι αντλήσεις αυξηθούν σημαντικά είναι ενδεχόμενο να παρατηρήσουμε μεταφορά ρύπου προς τις θέσεις των γεωτρήσεων. Ωστόσο, σε ξηρές περιόδους, με πιθανή αύξηση των αντλήσεων, ο ρύπος είναι δυνατόν να κινηθεί προς τις γεωτρήσεις. Επομένως, το φαινόμενο χρειάζεται προσοχή και συνεχή παρακολούθηση. Καθώς φαίνεται από τα αποτελέσματα του μοντέλου για τη μελετώμενη πρώτη χειμερινή περίοδο η ρύπανση ήταν εντοπισμένη και τα στραγγίσματα χαμηλά. Κατά την ένατη περίοδο όμως, η ρύπανση εμφανίζεται εξαπλωμένη και οι συγκεντρώσεις είναι σημαντικά υψηλότερες σε σχέση με την πρώτη περίοδο. Στη δέκατη ένατη περίοδο η ρύπανση έχει επεκταθεί σημαντικά με τις υψηλές συγκεντρώσεις ρυπογόνων

ουσιών να επεκτείνονται σε μεγαλύτερη επιφάνεια. Τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα παίρνουμε και στις σχετικές συγκρίσεις των θερινών περιόδων. Τέλος, προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή, δηλαδή η εξάπλωση του ρύπου, χρειάζεται να κατασκευαστούν δεξαμενές με στεγανοποιημένο πυθμένα.

Η μοντελοποίηση αφορά την κορεσμένη ζώνη. Αν και από τον πυθμένα στον υδροφόρο ορίζοντα υπάρχει διαφορά ύψους (βάθους), μεταξύ του πυθμένα και της κορεσμένης ζώνης παρεμβάλλεται η ακόρεστη ζώνη. Οπότε για να διασχίσει το νερό την ακόρεστη ζώνη και να φτάσει στην κορεσμένη χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια των έξι μελετώμενων περιόδων δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στις ταχύτητες ροής των υπογείων υδάτων. Κατά την εκφόρτιση προς τη θάλασσα όμως η ταχύτητα ροής αυξάνεται. Οι ταχύτητες ροής υπογείων υδάτων είναι γενικά χαμηλές με την εξαίρεση δύο συγκεκριμένων περιοχών στις οποίες η μετακίνηση των υπογείων υδάτων εντείνεται. Οι δυο περιοχές αυτές με τις μεγαλύτερες ταχύτητες ροής φαίνεται να επικοινωνούν, με τη βορειότερη να καταλήγει σε μια εκφόρτιση κατά την οποία παρατηρούνται εκεί οι υψηλότερες ταχύτητες ροής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

[11] Todd, D.K., Salt water intrusion and its control, Jour.Amer.Water Works Assoc., v.66,pp.180-187,1974

[24] Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992

[27] Princeton Transport Code Manual

Ελληνική βιβλιογραφία

[2] Καλλέργης, Γ., Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία , Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2001

[3] Καλλέργης, Γ., Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 1999

[5] Καρατζάς, Γ., Σημειώσεις μαθήματος Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης, 2003

[8] Τριχάκης Ι., Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υπαλμύρισης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, 2004

[10] Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003

[12] Αντωνόπουλος Β., Ποιότητα και Ρύπανση Υπόγειων Νερών, Εκδόσεις Ζήτη, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2001

[13] Χατζημπίρος Κ., Οικολογία. Οικοσυστήματα και Προστασία του Περιβάλλοντος, Γ΄ Έκδοση, 2007

[20] Τσάκαλος Φ., Μελετη εθνικών Δρυμών Ελλάδας. Χλωρίδα, πανίδα και καθεστώς Διαχείρισης

[23] Υδρογεωλογική μελέτη Βορείου Νομού Ηρακλείου, Έργο Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Ι.Γ.Μ.Ε., Παράρτημα Κρήτης

[25] Καρτεράκης Σ., Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, 2005

[26] Στεφανόπουλος Κ., Προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρωσης στην περιοχή Χερσονήσου – Ηρακλείου Κρήτης με χρήση προσομοίωσης και μετρήσεων πεδίου, 2004

Ιστοσελίδες

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

[14] https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%AE%CE%BC%CE%BF%CF%82_%CE%A7%CE%B5%CF%81%CF%83%CE%BF%CE%BD%CE%AE%CF%83%CE%BF%CF%85

[15] <https://www.hersonisos.gr/hersonisos/morphologicalcharacter/morphologypage.html>

[17] http://www.hersonissos-car-hire.co.uk/GR-hersonissos_weather.php

[18] <http://www.emy.gr/emv/el/>

[19] <https://www.cretanbeaches.com/el/%CE%B4%CE%B5%CE%B4%CE%BF%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B1/%CF%84%CE%BF-%CE%BA%CE%BB%CE%AF%CE%BC%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82>

[21] <https://www.nhmc.uoc.gr/el/content/%CE%B5%CE%BD%CE%B4%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AC-%CF%86%CF%85%CF%84%CE%AC-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82>

[22] <https://www.cretanbeaches.com/el/%CF%80%CE%B1%CE%BD%CE%AF%CE%B4%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B6%CF%8E%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82>