

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Διπλωματική Εργασία:  
**Μελέτη της Υπόγειας Ροής στον Κάμπο Χανίων με χρήση του  
μοντέλου PTC (Princeton Transport Code)**

Φοιτητής:  
Χρήστος Γκούμας

Εξεταστική Επιτροπή:  
Καθηγητής Δρ. Γεώργιος Καρατζάς (Επιβλέπων)  
Καθηγητής Δρ. Ιωάννης Τσάνης  
Επίκουρος Καθηγητής Δρ. Νικόλαος Παρανυχιανάκης

Χανιά 2016

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....</b>	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ. ....</b>	<b>5</b>
<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>5</b>
<b>Υδάτινοι πόροι.....</b>	<b>5</b>
<b>Υδρολογικός κύκλος.....</b>	<b>8</b>
<b>Είδη και ταξινόμηση υπόγειων υδάτων. ....</b>	<b>10</b>
<b>Υδροφορείς .....</b>	<b>12</b>
<b>Παράμετροι Υδροφορέων .....</b>	<b>13</b>
Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	15
Συντελεστής μεταβιβασιμότητας .....	17
Ομοιογένεια και ισοτροπία .....	17
Ταχύτητα Ροής .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΥΔΑΤΙΝΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑ. ....</b>	<b>20</b>
<b>Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης.....</b>	<b>20</b>
<b>Υδατικό Δυναμικό της Περιοχής Μελέτης .....</b>	<b>22</b>
Λεκάνη Ταυρωνίτη - Κολένη.....	23
Λεκάνη Κερίτη.....	23
Λεκάνη Στύλου, Αρμένων, Ζούρμπου, Βρύσσεσ.....	25
<b>Γεωλογία .....</b>	<b>27</b>
<b>Κλιματολογικές – Μετεωρολογικές συνθήκες .....</b>	<b>31</b>
Βροχόπτωση.....	31
Θερμοκρασία .....	32
Υγρασία .....	32
Άνεμοι .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE....</b>	<b>34</b>
<b>Μοντελοποίηση Υπογείων Υδάτων.....</b>	<b>34</b>
<b>Το μοντέλο PTC μέσω του προγράμματος ArgusONE .....</b>	<b>37</b>
Το πρόγραμμα ArgusONE .....	37
Το μοντέλο PTC .....	38
Βασικές Εξισώσεις του PTC.....	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. ....</b>	<b>42</b>
<b>Το λογισμικό ArcGIS και η χρήση στην παρούσα εργασία. ....</b>	<b>42</b>
<b>Το γραφικό περιβάλλον του PTC, μέσα από το ArgusONE. ....</b>	<b>45</b>
<b>Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο PTC .....</b>	<b>47</b>
1) Αρχικές ρυθμίσεις.....	48
2) Εισαγωγή κύριων δεδομένων.....	53
<b>Βαθμονόμηση.....</b>	<b>60</b>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	63
Θερινή Περίοδος (Απρίλιος – Σεπτέμβριος) .....	63
Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος – Μάρτιος) .....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ - SENSITIVITY ANALYSIS .....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	74
Ελληνική Βιβλιογραφία.....	74
Ξένη Βιβλιογραφία .....	74
Διαδικτυακές Πηγές .....	75

## ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος του κάμπου Χανίων, κατά την περίοδο 1998-2000. Στόχος είναι η επιτυχής προσομοίωση του υδάτινου συστήματος, με επαρκή βαθμονόμηση του μοντέλου. Ο κάμπος Χανίων αποτελείται από περισσότερες από μία λεκάνες απορροής, με τη λεκάνη απορροής του ποταμού Κουλιάρη να αποτελεί την πιο σημαντική, καθώς είναι μια περιοχή πλούσια σε νερό, με πηγές ιδιαίτερα σημαντικές οι οποίες τροφοδοτούνται κατά κύριο λόγο από τα Λευκά Όρη και έχουν πολύ μεγάλες εκροές. Η ύπαρξη μεγάλων ρηγμάτων στην περιοχή σε συνδυασμό με το μεγάλο υδατικό ισοζύγιο καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα την προσομοίωση της περιοχής. Η προσομοίωση γίνεται με χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής Princeton Transport Code (PTC), μέσω του λογισμικού ArgusONE, καθώς και με εκτεταμένη χρήση του λογισμικού ArcGIS για την απεικόνιση, προετοιμασία και εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο, καθώς υπήρχε μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων και η περιοχή μελέτης είναι αρκετά μεγάλης έκτασης.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε προσομοίωση μόνο της ροής του ύδατος, και όχι μεταφοράς ρύπων, παρά τις δυνατότητες του μοντέλου, καθώς ήταν πέρα από το σκοπό της παρούσας εργασίας. Μετά τη δημιουργία του μοντέλου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και κατόπιν έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου. Η βαθμονόμηση αφορούσε στις τιμές στάθμης του μοντέλου, συγκρινόμενες με τις μετρούμενες τιμές τον Απρίλιο του 2000. Τέλος, μετά το πέρας της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου, σε σχέση με τρεις βασικές παραμέτρους: Την υδραυλική αγωγιμότητα του υπεδάφους, τις τιμές των οριακών συνθηκών ροής (2<sup>ου</sup> τύπου) και τις παροχές άντλησης των γεωτρήσεων στο πεδίο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ: ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.

#### Εισαγωγή

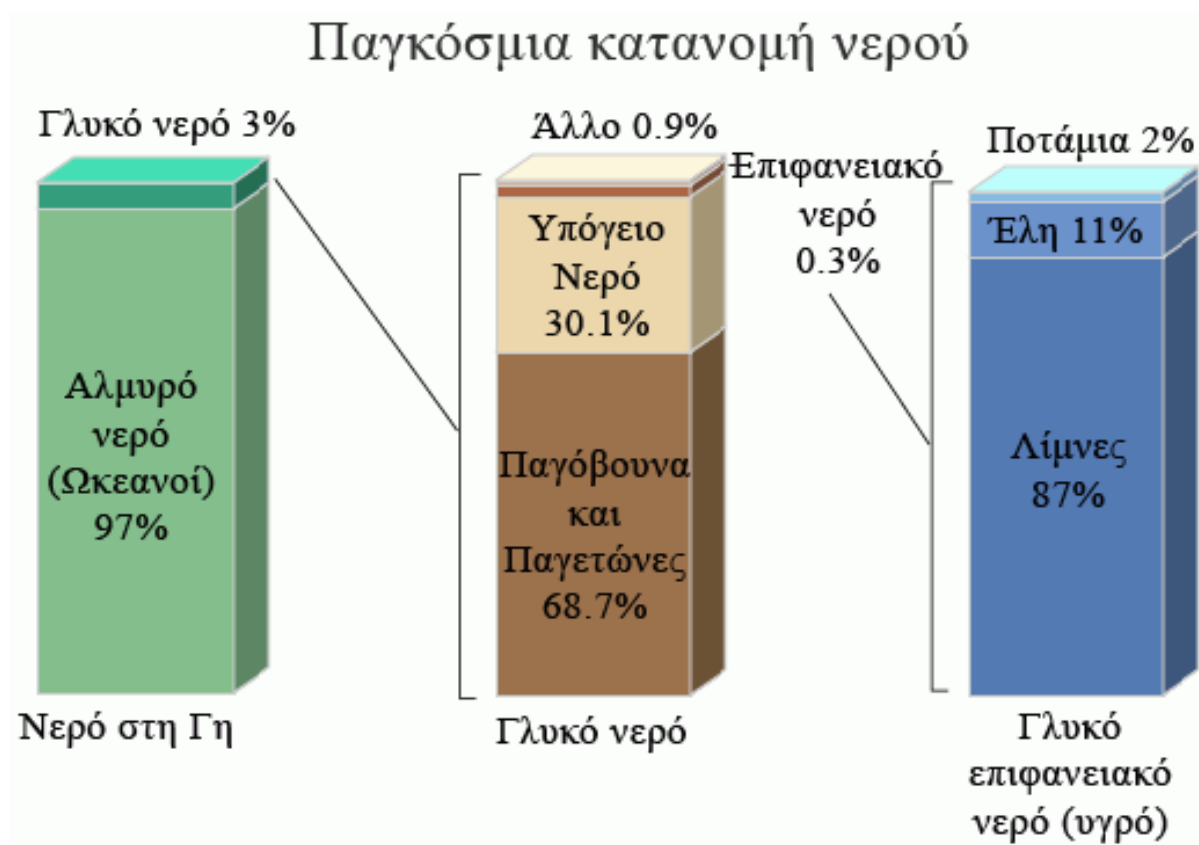
Η σημασία του νερού για τον άνθρωπο είναι αδιαμφισβήτητη. Αποτελεί το 60% του ανθρώπινου σώματος, ενώ η ανάγκη αναπλήρωσής του είναι διαρκής. Εκτός από βιολογικές, οι ανάγκες του ανθρώπου για καθαρό νερό εκτείνονται σε όλες τις πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ειδικότερα, το νερό είναι απαραίτητο για λόγους υγιεινής, για καθαριότητα, για καλλιέργεια γεωργικών προϊόντων και για κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Για όλα τα παραπάνω χρειάζεται γλυκό νερό, το οποίο συνήθως βρίσκεται σε λίμνες, πηγές και ποτάμια. Η συντριπτική πλειονότητα του νερού στην επιφάνεια της Γης είναι αλμυρό νερό στους ωκεανούς και αποτελεί το 96% της συνολικής ποσότητας νερού στον πλανήτη μας. Το γλυκό νερό βρίσκεται σε διάφορες μορφές, όπως βρόχινο, σε ποτάμια, λίμνες, χειμάρρους, αλλά και υπογείως, και είναι απαραίτητο για την καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Μπορεί να θεωρούμε ως βασική πηγή του γλυκού νερού τους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες, αλλά οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν σημαντικό κομμάτι του συνολικού διαθέσιμου νερού. Οι υπόγειοι υδροφορείς ανανεώνονται συνεχώς με τις βροχοπτώσεις και τροφοδοτούν πηγές και χειμάρρους.

Έτσι λοιπόν γίνεται χρήση των υπόγειων υδροφορέων έμμεσα. Όμως, ο ολοένα αυξανόμενος πληθυσμός της Γης σε συνδυασμό με την αλόγιστη χρήση του νερού καθιστούν αναγκαία την ορθή διαχείριση των υδάτινων πόρων.

#### Υδάτινοι πόροι

Τι εννοούμε με τον όρο υδάτινοι πόροι; Με τον όρο υδάτινοι πόροι αναφέρεται κανείς σε όλα τα επιφανειακά αλλά και υπόγεια ύδατα μιας περιοχής, ενώ ο όρος υπόγεια ύδατα αναφέρεται στις υδάτινες ποσότητες οι οποίες υπάρχουν στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (Καρατζάς, 2000).

Η οδηγία-πλαίσιο για τα ύδατα 2000/60/ΕΚ αποτελεί σημαντικότερο νομοθετικό θέσπισμα όσον αφορά τα ύδατα, καθώς μεταξύ άλλων ορίζει τα επιφανειακά ύδατα ως τα Εσωτερικά ύδατα, εξαιρώντας τα υπόγεια, τα μεταβατικά και τα παράκτια. Πιο συγκεκριμένα, τα εσωτερικά ύδατα είναι το σύνολο των στάσιμων ή των ρεόντων επιφανειακών υδάτων, αλλά και τα υπόγεια ύδατα τα οποία βρίσκονται προς την πλευρά της ξηράς σε σχέση με τη γραμμή βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων. Τα μεταβατικά ύδατα είναι τα επιφανειακά υδάτινα συστήματα τα οποία βρίσκονται πλησίον στομίων ποταμών και είναι εν μέρει αλμυρά λόγω γειτνίασης με παράκτια ύδατα, αλλά ουσιαστικά επηρεάζονται από ρεύματα γλυκού νερού. Τα παράκτια ύδατα είναι τα επιφανειακά ύδατα τα οποία απέχουν προς την θάλασσα το πολύ ένα ναυτικό μίλι, από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από το οποίο μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων. Τα παράκτια ύδατα, κατά περίπτωση, εκτείνονται μέχρι το ανώτερο όριο των μεταβατικών υδάτων. (Τζώρτζη, 2009). Η κατανομή του νερού στα διάφορα αυτά είδη σε παγκόσμια κλίμακα αναπαρίσταται γραφικά παρακάτω στην εικόνα 1.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια κατανομή νερού. (Πηγή: <http://water.usgs.gov/edu/graphics/greek/earthwheredistribution.gif>)

Με την σύγχρονη κοινωνία να έχει αναπτυχθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό και με την παροχή γλυκού νερού σε όλα τα σπίτια και τις βιομηχανίες, συνειδητοποιεί κανείς την τεράστια χρήση νερού που γίνεται σε καθημερινή βάση ανά τον κόσμο, και κατά συνέπεια πόσο σημαντική είναι η ορθή διαχείρισή τους. Στην Ελλάδα, το ποσοστό ετήσιας κατανάλωσης νερού στον αγροτικό τομέα φτάνει το 87% της συνολικής κατανάλωσης (Τάτσης, 2007). Όπως και στις άλλες μεσογειακές χώρες η ζήτηση του νερού αυξάνει κατά τους θερινούς μήνες, τότε που η προσφορά (διαθεσιμότητα) είναι στα χαμηλότερα επίπεδά της.

Πίνακας 1.1: Κατανομή του νερού στη γη. Πηγή: Gleick, P. H., 1996

Μορφή Νερού	Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό γλυκού νερού	Ποσοστό συνολικού νερού
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1.338.000.000	--	96,5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24.064.000	68,7	1,74
Υπόγειο Νερό	23.400.000	--	1,7
Γλυκό	10.530.000	30,1	0,76
Αλμυρό	12.870.000	--	0,94

Εδαφική Υγρασία	16.5	0,05	0,001
Εδαφικός πάχος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300	0,86	0,022
Λίμνες	176.4	--	0,013
Γλυκές	91	0,26	0,007
Αλμυρές	85.4	--	0,006
Ατμόσφαιρα	12.9	0,04	0,001
Έλη	11.47	0,03	0,0008
Ποταμοί	2.12	0,006	0,0002
Βιολογικό Νερό	1.12	0,003	0,0001
Σύνολο	1.386.000.000	-	100

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και των χρήσεων του νερού παρατηρείται υποβάθμιση της ποιότητάς του. Η αναγνώριση των αποτελεσμάτων αυτών χρειάστηκε πολλά χρόνια για να γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο όπως και να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις και ενέργειες. Λόγω της μεγάλης βιομηχανικής ανάπτυξης στα μέσα του 20ου αιώνα, παρατηρήθηκε μεγάλη εποχιακή μείωση οξυγόνου, γεγονός που οφειλόταν στην υπερφόρτωση των ποταμών από αποικοδομούμενα οργανικά λύματα αστικής και βιομηχανικής προέλευσης (Αντωνόπουλος, 2001). Αυτό συνετέλεσε στη γενική υποβάθμιση της ποιότητας των νερών των ποταμών, στην οποία μετέπειτα συνέβαλαν και άλλα προβλήματα όπως ο ευτροφισμός, η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων και μικρορύπων, όξυνση και τέλος αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών. Στη δεκαετία του 1970, η αύξηση της συγκέντρωσης βαρέων μετάλλων στα ιζήματα των νερών των λιμνών και των ποταμών οδήγησε σε επιπλέον προβλήματα. Ιδιαίτερα ο υδράργυρος και ο μόλυβδος που αποτελούν τα πιο επικίνδυνα βαρέα μέταλλα, προκάλεσαν την ανάγκη επέμβασης του ανθρώπου στις πηγές τους καθώς ακόμα και σήμερα διατηρούνται τα προβλήματα που δημιουργήθηκαν. Η ύπαρξή τους είναι έως σήμερα φανερή στα επιφανειακά και στα υπόγεια ύδατα, προκαλώντας προβλήματα στα ψάρια και γενικότερα στα οικοσυστήματα και στην υγεία του ανθρώπου (Αντωνόπουλος, 2001).

Άλλα σημαντικά προβλήματα ρύπανσης που παρατηρήθηκαν παγκοσμίως είναι:

- η παρουσία νιτρικών σε υπόγεια κι επιφανειακά νερά σε τιμές πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια, γεγονός που οφείλεται στην εκτεταμένη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων και στερεών αποβλήτων,
- η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου που οφείλεται στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα,
- η αύξηση της στάθμης της θάλασσας από το λιώσιμο των πάγων στους πόλους,
- η παρουσία έντονων πλημμυρών λόγω της αύξησης της ραγδιαιότητας των βροχών
- και η ερημοποίηση νέων εκτάσεων λόγω αλλαγής του κλίματος.

Στην Ελλάδα τα φαινόμενα ρύπανσης των υδάτων παρατηρήθηκαν με διαφορετική ένταση και σε διαφορετικούς χρόνους από ότι συνέβη στη Βόρεια Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, η παρατηρούμενη ρύπανση οφείλεται στην απότομη αύξηση του πληθυσμού στα αστικά κέντρα, στην ανεξέλεγκτη χρήση χημικών λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στη γεωργία, στη μεταφορά ρύπων από άλλες περιοχές και στην έλλειψη συστηματικού ελέγχου. Αυτοί οι

παράγοντες έφεραν την Ελλάδα αντιμέτωπη με προβλήματα δεύτερης και τρίτης γενιάς την στιγμή που ακόμα δεν έχουν αντιμετωπιστεί τα απλά προβλήματα ρύπανσης. Στην Ελλάδα, περίπου το 85% του νερού προς κατανάλωση χρησιμοποιείται για άρδευση, ενώ σχεδόν το 50% αυτού χάνεται κατά τη μεταφορά λόγω της κακής κατάστασης των αρδευτικών δικτύων ή λόγω ακατάλληλων τεχνικών. Ο αγροτικός τομέας, επίσης, έχει συνδράμει κατά ένα μεγάλο ποσοστό στην υποβάθμιση των υπόγειων αλλά και των επιφανειακών νερών μέσω της χρήσης φυτοφαρμάκων, αγροχημικών κλπ. (Δερματάς,-).

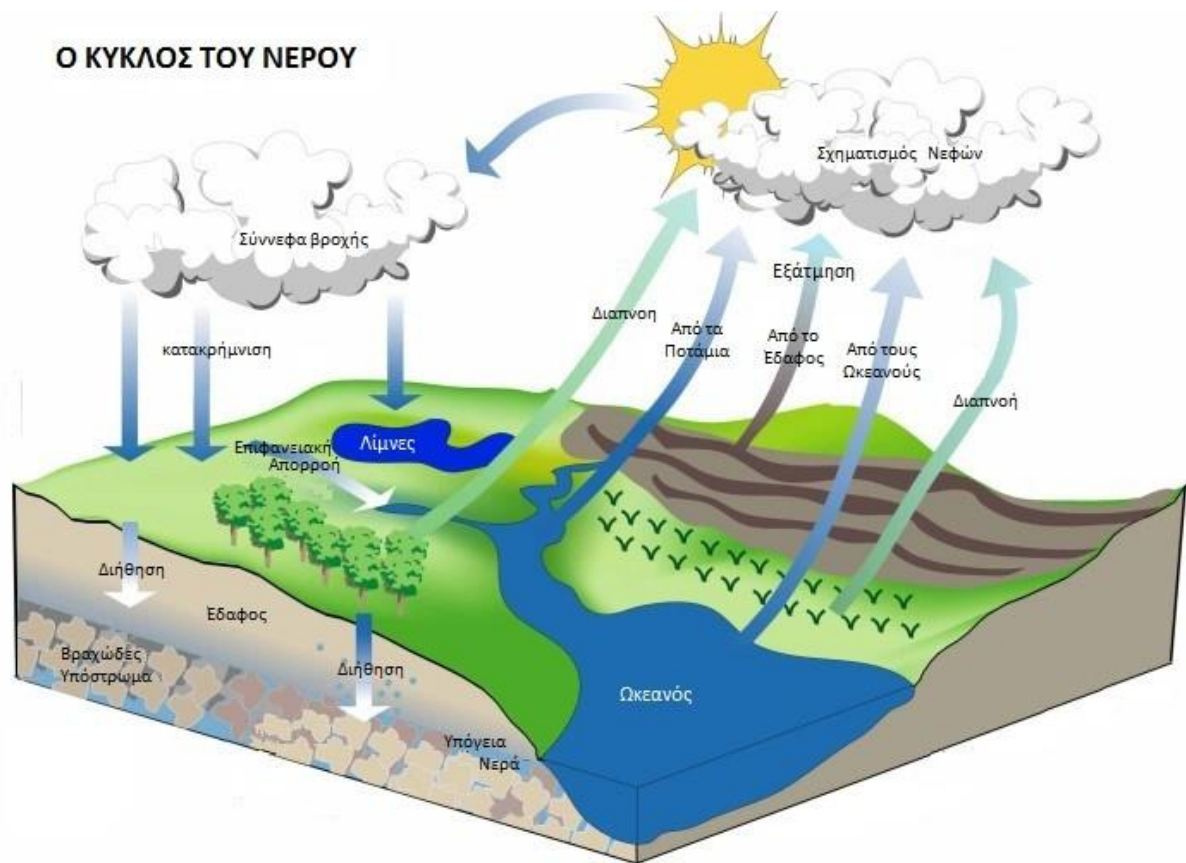
Εκτός όμως από την κακή διαχείριση του νερού, σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης που εντοπίζεται στην Ελλάδα είναι η υφαλμύριση των υδροφορέων. Με τον όρο υφαλμύριση εννοείται ο εμπλουτισμός του υπόγειου γλυκού νερού με διαλυμένα άλατα και συγκεκριμένα με ιόντα χλωρίου και νατρίου. Κύρια πηγή του άλατος του χλωριούχου νατρίου αποτελεί η θάλασσα, καθώς και τα κοιτάσματα ορυκτού άλατος ωστόσο στην Ελλάδα η υφαλμύριση από ορυκτό άλας είναι σπάνια έως και ανύπαρκτη. Η υφαλμύριση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υπεράντληση των γεωτρήσεων οι οποίες βρίσκονται είτε κοντά είτε μακριά από παράκτιες περιοχές, αλλά και στην ακατάλληλη χωροθέτησή τους π.χ. πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Με την υπεράντληση μειώνεται η στάθμη των υδροφορέων, με αποτέλεσμα την εισροή θαλασσινού νερού λόγω διαφοράς δυναμικού. Σημαντικός λόγος εμφάνισης της υφαλμύρισης είναι και η μείωση των βροχοπτώσεων, ένα ολοένα και αυξανόμενο ζήτημα. (Δασκαλάκη, 2008).

Καθίσταται λοιπόν πέρα για πέρα σαφές ότι η ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς μείωση των αποθεμάτων ή ρύπανση αυτών λόγω έλλειψης επιστημονικής γνώσης και ανάλογων πρακτικών, δύνανται να επιφέρουν ζημία στο οικοσύστημα και στον άνθρωπο, καθώς αποτελεί το βασικό αγαθό για την επιβίωσή του.

## **Υδρολογικός κύκλος**

Μια πρώτη προσέγγιση για την κατανόηση και συνεπώς ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι η κατανόηση του πώς αυξομειώνονται τα αποθέματα νερού στην επιφάνεια της γης και στο υπέδαφος, και πώς το νερό κυκλοφορεί ανάμεσα στους υδάτινους πόρους αλλά και στην ατμόσφαιρα, καθώς και ποιες είναι οι περιβαλλοντικές και κλιματικές συνθήκες που υποκινούν την κυκλοφορία αυτή. Μια ποιοτική αναπαράσταση της κυκλοφορίας του νερού στο υπέδαφος, στην ατμόσφαιρα και στους ωκεανούς, στις λίμνες και στα ποτάμια βρίσκεται στην εικόνα 2.





Εικόνα 1.2: Υδρολογικός κύκλος (<http://plemenosem.wikispaces.com/>).

Όπως καταδεικνύει και το σχήμα, η κινητήριος δύναμη του υδρολογικού κύκλου είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία εξατμίζει το νερό από τους επιφανειακούς υδροφορείς. Οι σχηματιζόμενοι υδρατμοί έπειτα συμπυκνώνονται στην ατμόσφαιρα, και τέλος επιστρέφουν στη γη με τη μορφή των κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Το μεγαλύτερο μέρος του εξατμιζόμενου νερού επιστρέφει στις θάλασσες και τους ωκεανούς σε ποσοστό 90%, ενώ το υπόλοιπο 10% επιστρέφει στη γη. Από την ποσότητα του νερού που πέφτει στη γη, συγκεντρώνεται στους ποταμούς και στις λίμνες, ένα άλλο μέρος προσλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών ενώ το υπόλοιπο προχωρά στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους. Ένα ποσοστό από το νερό αυτό παρακρατείται από τους κόκκους του χώματος. Το υπόλοιπο νερό που δεν δεσμεύεται καταλήγει στους υπόγειους υδροφορείς, και είναι αυτό που εμπλουτίζει και αναπληρώνει τα αποθέματα των υπόγειων υδάτων. Από εκεί, υπάρχει είτε επιφανειακή είτε υπόγεια απορροή και τελικά το νερό αυτό καταλήγει να εξατμιστεί πάλι. Η διαδικασία αυτή είναι συνεχής και αποτελεί τον υδρολογικό κύκλο. Δεν είναι μια αυστηρά τυποποιημένη διαδικασία αλλά μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, τη γεωγραφική θέση και την εποχή.

Πίνακας 1.2:Εκτίμηση των μέσων ετήσιων φυσικών διακινήσεων του νερού της Γης (συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου). Η επιφανειακή και η υπόγεια συνιστώσα απορροής αναφέρονται στην έξοδο προς τη θάλασσα (Κουτσογιάννης, Ξανθόπουλος, 1999).

	Έκταση σε δισεκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα	Διακίνηση	Μέσος ετήσιος όγκος σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό επί των κατακρημνισμάτων, %
Σύνολο επιφάνειας Γης	510,0	Κατακρημνίσματα = Εξατμοδιαπνοή	577	100,0
Ωκεανοί	361,1	Κατακρημνίσματα	458	100,0
		Εξάτμιση	505	110,3
Ξηρά	148,9	Κατακρημνίσματα	119	100,0
		Εξατμοδιαπνοή	72	60,5
		Συνολική απορροή	47	39,5
		Επιφανειακή συνιστώσα απορροής	44.7	37,6
		Υπόγεια συνιστώσα απορροής	2.3	1,9

Ο υδρολογικός κύκλος μπορεί να περιγραφεί με το ακόλουθο ισοζύγιο μάζας:

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (1.1)$$

Όπου: P: Βροχόπτωση

R: Επιφανειακή απορροή

G: Υπόγεια ροή

E: Εξάτμιση

T: Διαπνοή

ΔS: Μεταβολή ρυθμού αποθήκευσης νερού

### Είδη και ταξινόμηση υπόγειων υδάτων.

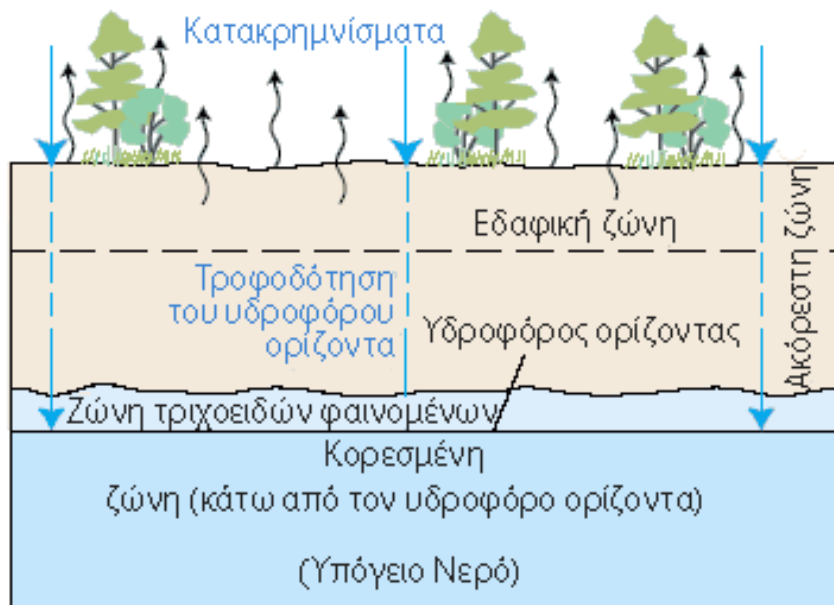
Το υπόγειο νερό που διηθείται στο υπέδαφος χωρίζεται σε νερό ακόρεστης ζώνης και σε νερό κορεσμένης ζώνης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τη διήθηση του νερού στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους, ένα μέρος του δεσμεύεται από τους κόκκους του εδάφους, συνιστώντας την ακόρεστη ζώνη, με τους πόρους να αποτελούνται από νερό και αέρα. Με τον όρο ακόρεστη καταλαβαίνει κανείς την δυνατότητα του εδάφους να δεσμεύσει μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Η ζώνη αυτή περιλαμβάνει 2 διαφορετικές υποκατηγορίες: τη ζώνη τριχοειδών φαινομένων και τη ζώνη εδαφικού ύδατος. Η ζώνη τριχοειδών φαινομένων δημιουργείται ακριβώς πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και εκτείνεται μέχρι το όριο που παρατηρούνται

τα τριχοειδή φαινόμενα, ενώ η ζώνη εδαφικού ύδατος εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος.

Το υπόλοιπο διηθούμενο νερό προχωρά στην κορεσμένη ζώνη, στην οποία όλοι οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από νερό, ακόμα και οι ρωγμές των πετρωμάτων. Το ανώτερο σημείο της κορεσμένης ζώνης ονομάζεται υδροφόρος ορίζοντας και το κατώτερο σημείο της είναι το όριο του αδιαπέρατου στρώματος εδάφους. (Καρατζάς Γ., 2003)

Η κίνηση και κατακόρυφη ροή του υπόγειου ύδατος αναπαρίσταται παρακάτω στην εικόνα 3.

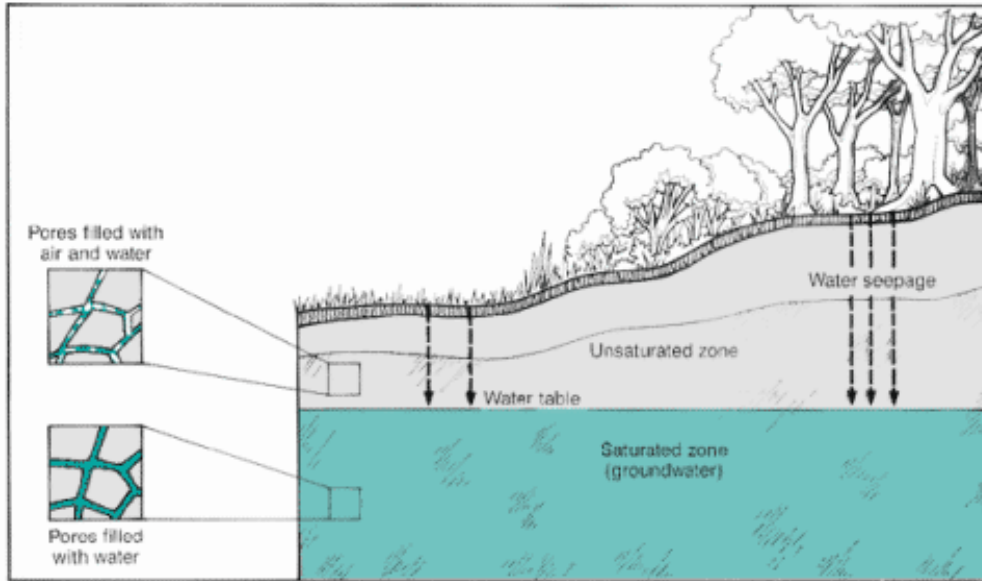


Εικόνα 1.3: Κίνηση και κατακόρυφη ροή υπόγειου ύδατος (Πηγή: <http://water.usgs.gov/edu/graphics/greek/wcinfiltrationsoilzone.gif>)

Ακόρεστη ζώνη ή μη κορεσμένη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπεδάφους όπου οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και ύδωρ ταυτόχρονα. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: τη ζώνη του εδαφικού ύδατος, η οποία επεκτείνεται από την εδαφική επιφάνεια μέχρι το τέλος της ζώνης του ριζικού συστήματος, και τη ζώνη τριχοειδών φαινομένων, όπου επεκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι του ορίου που παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα.

Κορεσμένη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπογείου ύδατος, όπου όλοι οι πόροι και οι ρωγμές των πετρωμάτων είναι πλήρεις ύδατος και χαρακτηρίζεται από πίεση μικρότερη της υδροστατικής. Το ανώτερο όριο της κορεσμένης ζώνης καλείται υδροφόρος ορίζοντας και η πίεση σε αυτό το σημείο είναι ίση με την ατμοσφαιρική (Καρατζάς, 2003).

Σχηματικά οι δύο αυτές ζώνες απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 1.4: Ακόρεστη-Κορεσμένη ζώνη.

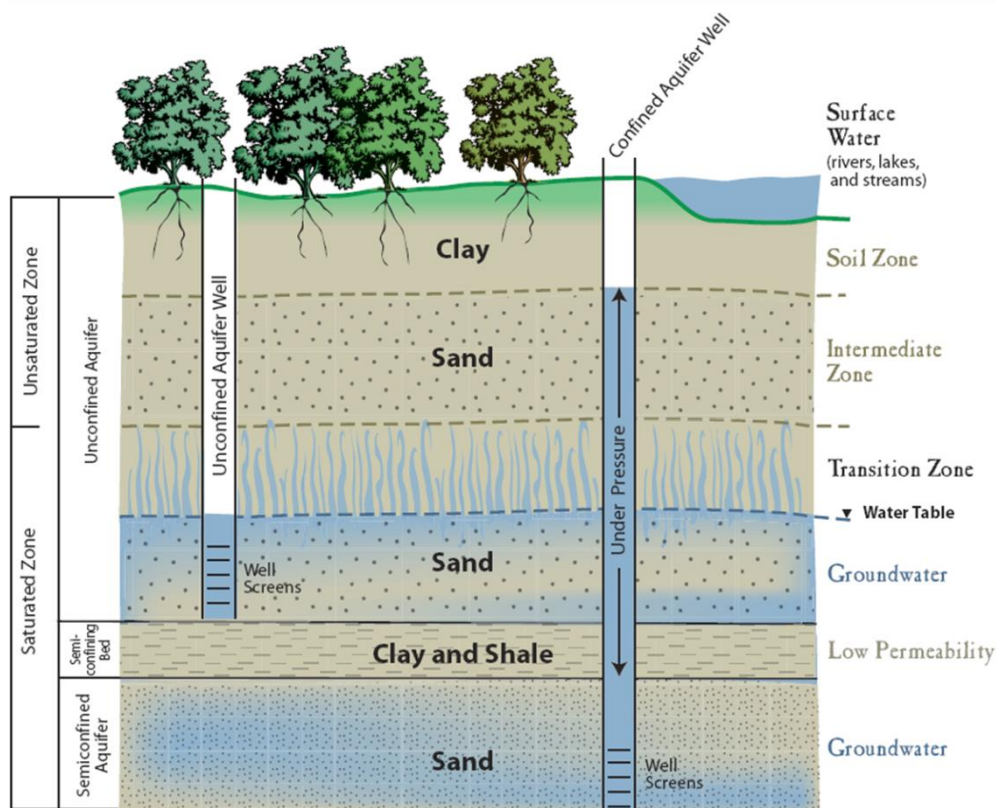
Πηγή: [http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater\\_basics/hydrologic\\_cycle.cfm](http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm)

## Υδροφορείς

Ως υδροφορέας ορίζεται ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλη έκταση και μπορούν να θεωρηθούν υπόγειες δεξαμενές.

Οι υδροφορείς μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα σε δύο κατηγορίες, τους ελεύθερους και τους περιορισμένους.

Στους ελεύθερους υδροφορείς η ανώτερη επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Αντίθετα σε έναν περιορισμένο υδροφορέα το νερό βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα (Καρατζάς, 2003).



Εικόνα 1.5: Περιορισμένος και Ελεύθερος Υδροφορέας (Πηγή: [http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater\\_basics/hydrologic\\_cycle.cfm](http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm))

## Παράμετροι Υδροφορέων

Οι υδροφορείς μπορούν να χαρακτηριστούν από την ικανότητα τους να συγκρατούν και να μετακινούν νερό. Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα ενός υδροφορέα είναι το πορώδες, δηλαδή το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά. (Καρατζάς, 2003)

### Πορώδες

Το πορώδες μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο 1.2

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad (1.2)$$

Όπου  $n$ : Πορώδες

$V_v$ : Όγκος των κενών

$V_o$ : Συνολικός όγκος του δείγματος

Εξαρτάται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων καθώς και τις διεργασίες που επιτελούνται κατά τη γένεση τους. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

- Κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους
- Διάταξη των κόκκων του εδάφους
- Σχήμα των κόκκων του εδάφους

Τυπικές τιμές πορώδους για διάφορα υλικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1.3: Εύρος πορώδους για διάφορα υλικά (Freeze & Cherry, 1979)

<b>Μη διαστρωματοποιημένα υλικά</b>	
Χαλίκια	25-35
Άμμος	25-45
Ιλύς	35-50
Πηλός	45-55
Άμμος και Χαλίκια	20-30
<b>Διαστρωματοποιημένα υλικά</b>	
Αμμόλιθος	5-30
Δολομιτικοί Ασβεστόλιθοι	1-20
Καρστικοί Ασβεστόλιθοι	5-30
Σχιστόλιθος	1-10
Κυστοειδής Βασάλτης	10-40
Αποσαθρωμένος Βασάλτης	5-30
Πορώδης Βράχος	10-60
Φρέσκος Γρανίτης και Γνευσίτης	0.01-2
Αποσαθρωμένος Γρανίτης και Γνευσίτης	1-15

Μια άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα ενός υδροφορέα που συνδέεται με το πορώδες είναι το ενεργό πορώδες. Ενεργό πορώδες είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για την ροή του ρευστού. Διαφέρει από το πορώδες καθώς ένα ποσοστό των πόρων δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, οπότε δεν είναι και διαθέσιμα για την ροή (Καρατζάς, 2003).

Το ενεργό πορώδες μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο 1.3

$$n_e = \frac{V_Y}{V_o} \quad (1.3)$$

Όπου  $n_e$ : Ενεργό πορώδες

$V_Y$ : Όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων

$V_o$ : Συνολικός όγκος του δείγματος

### **Υδραυλική Αγωγιμότητα**

#### **Νόμος του Darcy**

Ο Henry Darcy (1803 – 1858) μελέτησε τη ροή του ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος του ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους της πορείας ροής. Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy είναι:

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

Όπου:

$Q$ : Παροχή

$A$ : Επιφάνεια

$K$ : Υδραυλική αγωγιμότητα

$\Delta h$ : Απώλεια φορτίου- Υδραυλική κλίση

$L$ : Μήκος της στήλης

$q$ : Ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή

Το αρνητικό πρόσημο στην σχέση 1.4 δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Darcy πρέπει ο αριθμός Reynolds να είναι μικρότερος του 1. Έχει όμως παρατηρηθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για αριθμό Reynolds ίσο με 10. Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , οπότε

εξασφαλίζεται η χρήση του νόμου του Darcy χωρίς καμία προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων όπου έχουμε έντονη υδραυλική κλίση (Καρατζάς, 2003).

### Ταχύτητα διήθησης

Για την ταχύτητα του Darcy, η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη το στέρεο υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται από την σχέση 1.5

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.5)$$

Όπου

$q_p$ : Ταχύτητα διήθησης

$Q$ : Ρυθμός παροχής

$A$ : Επιφάνεια

$n$ : Πορώδες

$q$ : Ταχύτητα Darcy

$K$ : Υδραυλική αγωγιμότητα

$dh$ : Απώλεια φορτίου

$dl$ : Μήκος της στήλης

### Υδραυλική αγωγιμότητα - Ειδική διαπερατότητα

Από μία σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ομοιόμορφο, ιδεώδους πορώδους μέσο και από σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων αυτών με το νόμο του Darcy προέκυψε για την υδραυλική αγωγιμότητα η εξίσωση 1.6

$$K = \frac{\kappa \rho g}{\mu} \quad (1.6)$$

Όπου  $\kappa$ : Ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου που δίνεται από τον τύπο  $\kappa = Cd^2$

$K$ : Υδραυλική αγωγιμότητα

Στον πίνακα 1.4 φαίνονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους εδάφους:



Πίνακας 1.4: Χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Freeze & Cherry, 1979)

Τύπος εδάφους	Υδραυλική Αγωγιμότητα, K (cm/s)
Άργιλος	$10^{-9}$ - $10^{-6}$
Ιλύς	$10^{-7}$ - $10^{-3}$
Άμμος	$10^{-5}$ - $10^{-1}$
Χαλίκι	$10^{-1}$ - $10^{-2}$

#### Συντελεστής μεταβιβασιμότητας

Ως συντελεστής μεταβιβασιμότητας ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίον νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και εκφράζεται μαθηματικά από την σχέση 1.7:

$$T = Kb \quad (1.7)$$

Όπου K: Υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους

b: Κορεσμένο βάθος του υδροφορέα

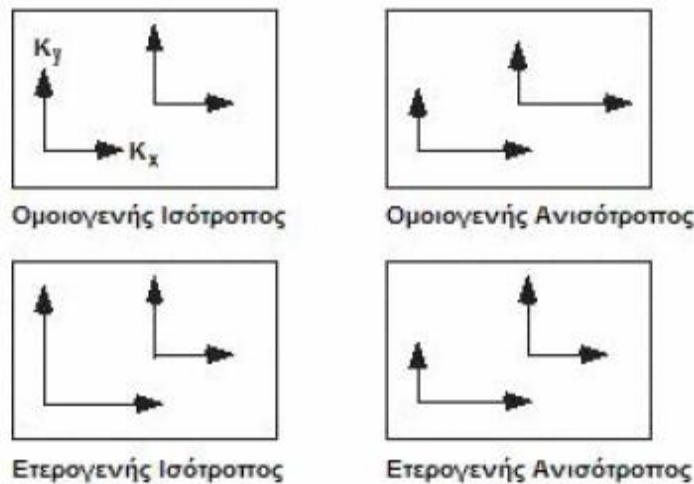
#### Ομοιογένεια και ισοτροπία

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Επίσης σε δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και στη δεύτερη περίπτωση της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας.

Συγκεκριμένα:

- Ομοιογενής χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του
- Ετερογενής χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά
- Ισότροπος χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις
- Ανισότροπος χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση

Στην εικόνα 1.6 παρουσιάζονται σχηματικά οι περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας



Εικόνα 1.6: Περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας  
(Freeze & Cherry, 1979)

### Ταχύτητα Ροής

#### Γενική μορφή του νόμου του Darcy

Λόγω του φαινομένου της ανισοτροπίας κατά την εφαρμογή του νόμου του Darcy, η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$  (Καρατζάς, 2003).

Εάν ο άξονας του συστήματος των συντεταγμένων είναι κάθετος στην διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι τότε για τις τρεις διευθύνσεις ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Στην διεύθυνση } x: \quad q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$\text{Στην διεύθυνση } y: \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (1.9)$$

$$\text{Στην διεύθυνση } z: \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.10)$$

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο νόμος του Darcy εμφανίζεται στην γενική του μορφή:

$$q_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.11)$$

$$q_y = -k_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.12)$$

$$q_z = -k_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - k_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.13)$$

Γενικά η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ένας τανυστής με εννέα όρους , ο οποίος σε μορφή πίνακα είναι:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΥΔΑΤΙΝΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑ.

#### Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης

Στην παρούσα μελέτη αντικείμενο είναι ο κάμπος Χανίων. Βρίσκεται στο Νομό Χανίων και καταλαμβάνει την περιοχή από την πόλη των Χανίων και δυτικότερα, έως και τη λεκάνη του Κερίτη. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής είναι 35.4° έως 35.5 Βόρειο Γεωγραφικό πλάτος και 23.8° έως 24.1 Ανατολικά του 1<sup>ου</sup> μεσημβρινού Γεωγραφικό Μήκος. Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στην Περιφέρεια Κρήτης. Ο Νομός Χανίων είναι το δυτικότερο τμήμα της νήσου Κρήτης με έκταση 2376 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 150387 κατοίκων (απογραφή 2001). Συνορεύει ανατολικά με το Νομό Ρεθύμνης, ενώ βρέχεται στις τρεις υπόλοιπες πλευρές του από τη Μεσόγειο θάλασσα, το Κρητικό πέλαγος και το Λιβυκό. Στην εικόνα 2.1 φαίνεται ο Νομός Χανίων μέσω δορυφορικής απεικόνισης.



Εικόνα 2.1: Δορυφορική απεικόνιση Νομού Χανίων (Πηγή: Google Earth Pro)

Η ακτογραμμή του Νομού εκτείνεται σε μήκος 350 χιλιομέτρων, ενώ στην ορεινή περιοχή δεσπόζει η οροσειρά των Λευκών Ορέων, εκτεινόμενη από το δυτικό έως το ανατολικό άκρο του Νομού, με μεγάλα οροπέδια και κορυφές σε ύψη π.χ. 1080μ (Ομαλός).

Ο Νομός Χανίων έχει μόνιμο πληθυσμό 156.585 κατοίκους (Απογραφή 2011, ΕΛΣΤΑΤ), με την ύδρευση του νομού να απαιτεί περίπου 11·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος νερού. Εκτός όμως από τον μόνιμο πληθυσμό, λόγω του υψηλού τουρισμού (42.706 κλίνες στο νομό, ΕΟΤ 2003), η κάλυψη των αναγκών του σε νερό είναι αρκετά υψηλές, με την ποσότητα που απαιτείται να ανέρχεται περίπου σε 4,5·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος.

Οι υδρολογικές συνθήκες καθορίζονται στο νομό από μερικούς βασικούς παράγοντες, π.χ. ύψος βροχής, κλίσεις εδάφους, θερμοκρασία κ.α. Σημαντικός όμως παράγων είναι η γεωλογία του, και η τεκτονική του δομή.

Πίνακας 2.1: Γενικά στοιχεία νομού Χανίων (Βοζινάκης, Κουγιάννη, 2004)

Μέγεθος	Τιμή
Συνολική Έκταση (στρέμματα)	2.320.000
Συνολική Γεωργική Γη (στρέμματα)	600.000
Συνολική Αρδευόμενη Έκταση (στρέμματα)	258.000
Υδατικές ανάγκες αρδευόμενης έκτασης ( $10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ )	130
Υδατικές ανάγκες έκτασης δυνάμενης να αρδευτεί ( $10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ )	300
Διαθέσιμο Υδατικό Δυναμικό ( $10^9 \text{ m}^3/\text{έτος}$ )	1,1
Πλεόνασμα ( $10^9 \text{ m}^3/\text{έτος}$ )	0,97

Η περιοχή μελέτης είναι ευρύτερη του κάμπου Χανίων, καθώς καταλαμβάνει το βορειοδυτικό τμήμα του Νομού, από τη Δυτική ακτή έως τη Σούδα, και από τη βόρεια ακτή έως και τον Αλικιανό, τον Φουρνέ και το Θέρισσο. Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης απεικονίζεται στην εικόνα 2.2 παρακάτω:



Εικόνα 2.2: Η περιοχή μελέτης, εικονιζόμενη εντός του μαύρου πολυγώνου.

Ο λόγος που η περιοχή μελέτης εκτείνεται σε τόσο μεγάλη έκταση γύρω από τον κάμπο Χανίων είναι για να γίνει πληρέστερη περιγραφή της περιοχής, με την ένταξη πολλών γεωτρήσεων που υπάρχουν στο βόρειο κομμάτι του νομού.

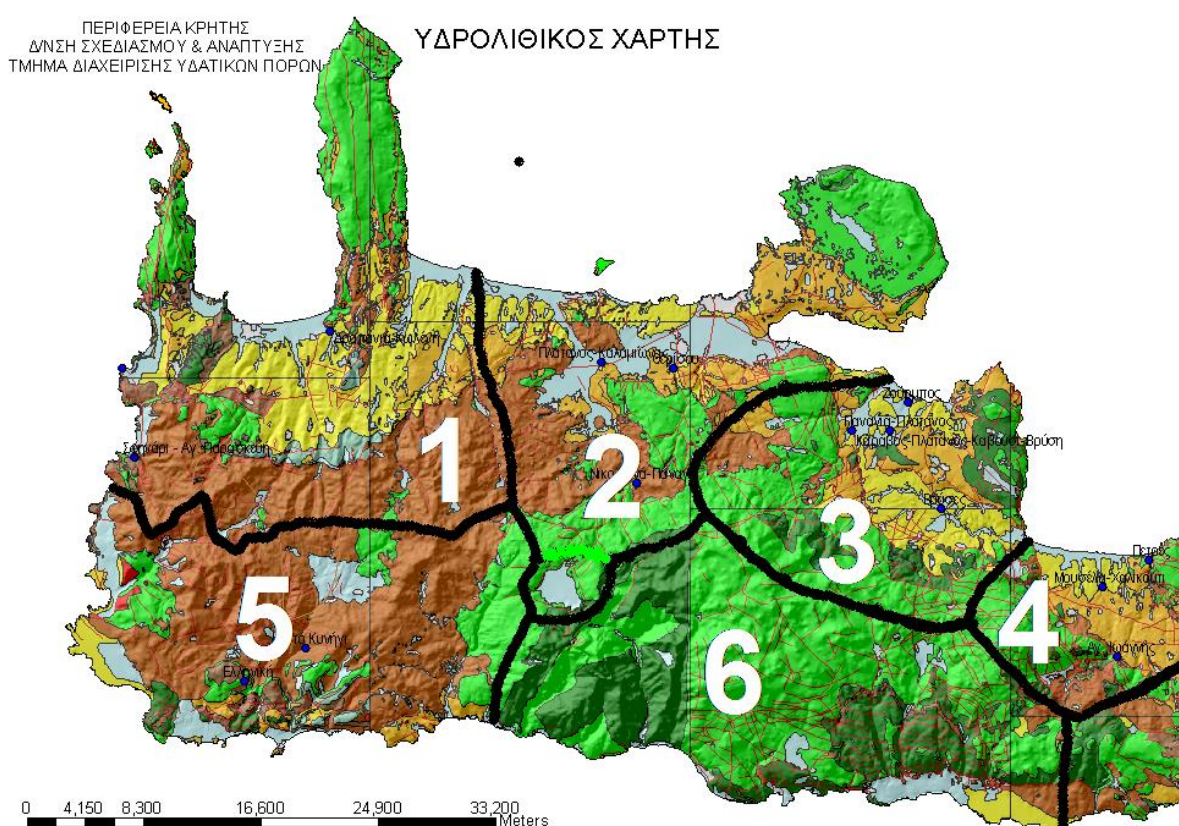


## Υδατικό Δυναμικό της Περιοχής Μελέτης

Στο νομό Χανίων υπάρχουν πολλά ανεξάρτητα συστήματα υδατικών πόρων, με μερικά από αυτά να έχουν μόνο μια πηγή τροφοδοσίας και ένα σημείο κατανάλωσης, π.χ. μικρά χωριά. Το σύστημα υδατικών πόρων στην περιοχή μελέτης είναι το πιο περίπλοκο και το πιο μεγάλο στο νομό με διαφορά, καθώς περιλαμβάνει πολλές πηγές τροφοδοσίας, πολλά σημεία κατανάλωσης και πολλές εναλλακτικές διαδρομές μεταφοράς νερού από τις πηγές στα σημεία κατανάλωσης. Περιλαμβάνονται επίσης εδώ πολλά σημαντικά τεχνικά έργα, όπως η τεχνητή λίμνη της Αγυιάς, ενώ προβλέπεται η κατασκευή έργων για το σκοπό αυτό.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων εξυπηρετείται από το υδατικό σύστημα του βόρειου τμήματος του Νομού Χανίων, όπως επίσης ο μεγαλύτερος αριθμός τουριστών φιλοξενείται στο κομμάτι αυτό.

Ο νομός χωρίζεται σε έξι λεκάνες απορροής, όπως φαίνεται στον παρακάτω χάρτη (εικόνα 2.3):



Εικόνα 2.3: Λεκάνες Απορροής Νομού Χανίων (Βοζινάκης, Κουγιάννη, 2004)

1. Λεκάνη Ταυρωνίτη Κολένη
2. Λεκάνη Κερίτη
3. Λεκάνη Στύλου, Αρμένων, Ζούρμπου, Βρύσες
4. Λεκάνη Κουρνά, Γεωργιούπολης
5. Λεκάνη Πελεκανιώτη, Σαρακινιώτη, Κακοδικιανού, Χρυσосκαλλίτισας, Αγίας Ειρήνης
6. Λεκάνη ορεινού όγκου Λευκών Ορέων, Φραγκοκαστέλλου

Στην περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται παραπάνω, εντάσσονται οι λεκάνες απορροής Ταυρωνίτη Κολένη, του Κερίτη, και ένα μικρό κομμάτι της λεκάνης Στύλου-Αρμένων-Ζούρμπου Βρυσσών. Παρακάτω παρατίθενται σημαντικά χαρακτηριστικά των λεκανών αυτών:

### **Λεκάνη Ταυρωνίτη - Κολένι**

Η λεκάνη βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα του νομού. Το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης είναι  $80 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ . Τα  $60 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  είναι του Ταυρωνίτη, τα  $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  του Κολενίου. Κύριο υδρολογικό χαρακτηριστικό της λεκάνης του Ταυρωνίτη είναι οι επιφανειακές απορροές. Ο Ταυρωνίτης έχει τρεις παραπόταμους (Ντεριανό, Σεμπρωνιότη, Ρουματιανό). Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή μεταξύ των οικισμών Βουκολιές και Ταυρωνίτη σχηματίζεται φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας, μικρού βάθους (10-15m). Τροφοδοτείται από τις επιφανειακές απορροές του ποταμού Ταυρωνίτη. Έχει σαν υπόβαθρο τις μάργες του νεογενούς, και αξιοποιείται με φρέατα εξυπηρετώντας τοπικές ανάγκες, κυρίως άρδευσης. Ο φρεάτιος ορίζοντας, κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζει πτώση στις στάθμες του, λόγω της αποστράγγισής του και του περιορισμού, έως και μηδενισμού της τροφοδοσίας του από τις επιφανειακές απορροές. Δέχεται δε, το όποιο ρυπαντικό φορτίο της επιφανειακής απορροής της λεκάνης. Σε μεγαλύτερο βάθος υπάρχει δεύτερος υδροφόρος ορίζοντας, στις νεογενείς αποθέσεις. Το νερό του βαθύτερου ορίζοντα είναι ποιοτικά υποβαθμισμένο με θειικά ιόντα λόγω της ύπαρξης φακών γύψου εβαποριτικής προέλευσης. Η ύδρευση της περιοχής είναι προβληματική. Η άρδευση γίνεται με μεταφορά νερού από τον Κερίτη (πηγές Αγυιάς). Στις Β-Δ παρυφές της λεκάνης Ταυρωνίτη στους οικισμούς Επισκοπή έως Κολυμβάρι, αναπτύσσονται ανεξάρτητες, ασθενείς υπόγειες υδροφορίες, στο νεογενές υπόβαθρο της περιοχής. Η ελαφρώς αυξημένη περιεκτικότητα του νερού σε θειικά άλατα, οφείλεται και εδώ, στην παρουσία γύψου εντός των νεογενών αποθέσεων.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης του Κολενίου είναι μικτά. Χαρακτηρίζεται από: 1. Επιφανειακές απορροές (χείμαρροι Τυφλός, Κακοπέρατος, Καμαριανός) και 2. Υπόγειες υδροφορίες σε δύο διαφορετικά υψομετρικά επίπεδα. Έτσι υπάρχει μια υπόγεια λεκάνη στα 70m απόλυτο υψόμετρο (πηγές Καψιανιανά, γεωτρήσεις Τοπόλια, Ρόκας, Σφακοπηγάδι, Κουκουνάρας, Πολυρήνεια, Γρά, Κερά κ.α.) και μια δεύτερη στα 14m απόλυτο υψόμετρο (πηγές και γεωτρήσεις Κολενίου, γεωτρήσεις Ποταμίδας, Βουλγάρω, Μουρί κ.α.). Υπάρχει υδραυλική σχέση μεταξύ των δύο υδροφοριών. Η πρώτη τροφοδοτεί τη δεύτερη μετά την υπόγεια υπερχείλιση της, και η δεύτερη απορρέει τον κύριο όγκο του νερού της μέσω των πηγών Κολενίου (Υδρογεωλογική μελέτη Κάμπου Χανίων). Στο δυτικό τμήμα της περιοχής (Λουσακιές, Γραμβούσα, Πλάτανος, Σφηνάρι) υπάρχει ανεξάρτητος υπόγειος υδροκρίτης ο οποίος οριοθετεί υπόγεια λεκάνη μικρής δυναμικότητας, με απορροές προς τα δυτικά. Η παραπάνω λεκάνη παρουσιάζει προβλήματα υφαλμύρισης στην παραλιακή ζώνη. Τροφοδοτεί με νερό τις γεωτρήσεις της περιοχής, και τις υφάλμυρες πηγές στη θέση Ποταμός, στην παραλιακή ζώνη (υψόμετρο θάλασσας), δυτικά του οικισμού Πλάτανος (Στοιχεία: Δ/νση Εγγείων Βελ/σεων & Υ.Π. Χανίων, και Βοζινάκης και Κουγιάννη 2004).

### **Λεκάνη Κερίτη**

Η λεκάνη βρίσκεται στο βόρειο - κεντρικό τμήμα του νομού. Δια μέσου αυτής απορρέει σημαντικός όγκος νερού του καρστικού συστήματος των Λευκών Ορέων ( $140-150 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ , υδρολογική μελέτη Κάμπου Χανίων). Κύρια υδρολογικά χαρακτηριστικά της είναι:

Α. Οι καρστικές πηγές Μεσκλών (Κεφαλοβρύσια, Παναγιά, Νικολιανά ) Η μέση ετήσια απορροή είναι πλέον των  $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού (υδρ. στοιχεία νήσου Κρήτης). Εμφανίζονται σε απόλυτο υψόμετρο 210m. Το υδρογράφημα των πηγών δείχνει τη γρήγορη απορροή με πλημμυρικές παροχές που ελαχιστοποιούνται τους καλοκαιρινούς μήνες. Η μέση παροχή έτους είναι  $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ . Η μέση παροχή Μαρτίου είναι  $7200 \text{ m}^3/\text{h}$  και η μέση παροχή Σεπτεμβρίου  $650 \text{ m}^3/\text{h}$ . Από τις

παραπάνω πηγές εξυπηρετούνται με νερό ο Τ.Ο.Ε.Β. Μεσκλών, ο Τ.Ο.Ε.Β. Φουρνέ, ο Ο.Α.ΔΥ.Κ., ο Δήμος Χανίων, ο Δήμος Μουσούρων κ.α.

Β. Οι καρστικές πηγές υπερχείλισης της Αγυιάς (Καλαμιώνας, Πλάτανος, Κολύμπα) Εμφανίζονται σε 40m απόλυτο υψόμετρο, στον οικισμό Αγυιά. Το ετήσιο ισοζύγιο των πηγών υπερβαίνει τα  $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ , και αποτελεί το ρυθμιστικό απόθεμα τους. Η ετήσια διακύμανση (αυξομείωση) στις στάθμες νερού στην καρστική λεκάνη τροφοδοσίας τους είναι της τάξεως των 3-4 m. Η μέση παροχή έτους των πηγών είναι  $7600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Η μέση παροχή Μάρτη είναι  $9000 \text{ m}^3/\text{h}$  και η μέση παροχή Σεπτέμβρη είναι  $6600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Το υδρογράφημα των πηγών δείχνει μικρές διακυμάνσεις των παροχών μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού. Οι σταθερές παροχές των πηγών σε ετήσια βάση υποδηλώνουν ότι οι πηγές εκφορτίζουν νερό, ακόμη και την περίοδο του θέρους. Τα υδρολογικά αυτά στοιχεία μαρτυρούν ότι υπάρχει μεγάλος όγκος νερού σε μόνιμο απόθεμα. Ο όγκος του μόνιμου αποθέματος δεν είναι γνωστός. Εκτιμάται σε αρκετές δεκάδες εκατομμύρια  $\text{m}^3$  νερού. Από τις πηγές αξιοποιούνται περί τα  $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  (όγκος θερινής εκροής). Από αυτά το 50% λαμβάνεται από τα σημεία εκροής των πηγών και το υπόλοιπο 50% από την υπόγεια καρστική λεκάνη, ανάντη των πηγών (περιοχή Μυλωνιανά, Φουρνέ). Οι πηγές του Καλαμιώνα, με ετήσιο ισοζύγιο περίπου  $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ , παρουσιάζουν ποιοτική επιβάρυνση με θειικά ιόντα. Η αναρίθμηση των πηγών μπορεί να προσφέρει επί πλέον, περί τα  $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  από το ρυθμιστικό απόθεμα τους (Υδρογεωλογική μελέτη Κάμπου Χανίων). Από τις πηγές εξυπηρετούνται οι Τ.Ο.Ε.Β. Βαρυπέτρου, Αγυιάς/Κολυμβαρίου, Πλατανιά/Ταυρωνίτη, ο Ο.Α.ΔΥ.Κ, ο Δήμος Χανίων, ο Σύνδεσμος μείζονος περιφέρειας Χανίων, ο Δήμος Θερίσου, ο Δήμος Πλατανιά, ο Δήμος Νέας Κυδωνιάς κ.α. Η λίμνη της Αγυιάς είναι τεχνητή λίμνη, η οποία κατασκευάστηκε από τη Δ.Ε.Η. για την ανύψωση της στάθμης των εκροών νερού μετά την υπερχείλιση τους από την υπόγεια δεξαμενή των πηγών Αγυιάς. Ο σκοπός κατασκευής της ήταν υδροηλεκτρικός. Η λίμνη βρίσκεται Βορειοδυτικά των πηγών. Είναι αποθήκη ύδατος μετά την εκροή των πηγών, χωρητικότητας περίπου  $350.000 \text{ m}^3$  νερού. Η λίμνη δεν επηρεάζει τη λειτουργία των καρστικών πηγών. Επηρεάζεται όμως, από την αυξομείωση της στάθμης του καρστικού υδροφορέα. Η λίμνη αποτελεί σημαντικό υδροβιότοπο και είναι ανακηρυγμένη προστατευόμενη περιοχή. Τα προβλήματα επάρκειας νερού που προκύπτουν στη λίμνη τους θερινούς μήνες είναι διαχειριστικά και όχι ουσιαστικά.

#### Γ. Οι καρστικές πηγές Κουφού

Οι πηγές βρίσκονται στη θέση Βλυχάδες του Δήμου Μουσούρων. Εμφανίζονται σε 50 m απόλυτο υψόμετρο. Οι πηγές είναι αναριθμησμένες με: 1. Γεωτρήσεις στην περιοχή Βλυχάδες (Τ.Ο.Ε.Β. Αλικιανού, Κουφού, Βατολλάκου και 2. Γεωτρήσεις του Δήμου Μουσούρων από την ευρύτερη λεκάνη τροφοδοσίας της (Ψαθογγιάνος, Αποθήκες, Μανωλιόπουλο). Η συνολική αντλούμενη ποσότητα/έτος είναι πλέον των  $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  νερού, κυρίως για αρδευτική χρήση. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνεται κατά 2-3 m την περίοδο της λειτουργίας των γεωτρήσεων (αρδευτική περίοδο) και αναπληρώνεται άμεσα με την παύση των αντλήσεων. Το στοιχείο αυτό μαρτυρεί ότι είναι δυνατή η αύξηση της αντλούμενης ποσότητας νερού διότι δεν έχουν παρατηρηθεί έως τώρα, μόνιμες απώλειες υδραυλικού φορτίου. Πιθανότατα οι πηγές έχουν υδραυλική επικοινωνία με τις πηγές του Καλαμιώνα της



Αγυιάς (λόγω της χημικής συγγένειας, και υδραυλικής σχέσης που παρουσιάζουν). Οι ενδείξεις αυτές πρέπει να τεκμηριωθούν με ιχνηθετήσεις, ή με κάποια άλλη μέθοδο.  
Δ. Καρστικές πηγές Αναβάλλοντα

Οι πηγές βρίσκονται στις βορειοανατολικές παρυφές της λεκάνης Κερίτη, βόρεια του οικισμού Θέρισος. Εκφορτίζουν σε υψόμετρο 100 m με μέσο υδατικό ισοζύγιο  $10 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/έτος. Οι πηγές είναι περιοδικές, και έχουν απορροή από το μήνα Δεκέμβριο έως και τον Ιούνιο. Η απορροή του νερού γίνεται μέσω του ρέματος Κλαδισού στις δυτικές παρυφές της πόλεως των Χανίων. Από το σύστημα των πηγών υδρεύεται ο Δήμος Θερίσου.

Ε. Προσχωσινενής λεκάνη Αλικιανού, Κουφού, Βατολλάκου, Σκινέ

Πρόκειται για μια εσωτερική προσχωματική λεκάνη, η οποία λειτουργεί σαν ενδιάμεση δεξαμενή ύδατος στο υδρολογικό σύστημα του Κερίτη. Το βάθος των προσχώσεων (τεταρτογενείς αποθέσεις) διαφέρει από σημείο σε σημείο και κυμαίνεται από λίγα μέτρα έως 150 m βάθος. Το γεωλογικό υπόβαθρο δεν είναι απολύτως διαπιστωμένο. Πιθανολογούνται οι σχιστόλιθοι. Τοπικά, ιδίως στην περιοχή βόρεια του Αλικιανού, το υπόβαθρο είναι καρστικό και τροφοδοτεί υπό πίεση την προσχωματική λεκάνη με νερό. Στην τροφοδοσία της υπολεκάνης συμβάλλουν και οι επιφανειακές απορροές του Κερίτη ποταμού. Η στάθμη του νερού στον υδροφορέα είναι στα λίγα μέτρα βάθους και στα 50 m απόλυτο υψόμετρο. Η αντλούμενη ποσότητα νερού είναι περί τα 1000 m<sup>3</sup>/h ή  $4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/έτος, συμπεριλαμβανόμενης και της ύδρευσης. Η πτώση της στάθμης κατά την άντληση είναι της τάξεως των λίγων μέτρων βάθους, με άμεσες επαναφορές, υποδηλώνοντας την υδατική ικανότητα του υδροφορέα (Δ.Ε.Β.). Τοπικά το νερό στον υδροφορέα παρουσιάζεται να έχει αυξημένη περιεκτικότητα σε Νιτρικά άλατα, πιθανότατα από τη χρήση των λιπασμάτων στις καλλιέργειες της περιοχής.

Στ. Προσχωσινενής λεκάνη του Κάμπου Χανίων

Βρίσκεται στο βορειοανατολικό τμήμα του Κερίτη. Πρόκειται για λεκάνη με νεογενείς αποθέσεις και τεταρτογενείς προσχώσεις. Αποτελείται από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες, αργίλους, χάλικες. Η υδροφορία της συνίσταται σε ένα φρεάτιο ορίζοντα μικρού βάθους, και σε ένα βαθύτερο νεογενούς σύστασης (Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, η υδροφορία των οποίων πολλές φορές είναι υπό πίεση). Οι μέσες στάθμες είναι λίγα μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Υπάρχουν στην περιοχή περί τις 40 γεωτρήσεις, πολλές ανενεργές, με παροχές από 30 έως 80 m<sup>3</sup>/h. Η συνολική αντλούμενη ποσότητα νερού δεν είναι γνωστή. Η περιοχή αρδεύεται και με μεταφορά νερού από την Αγυιά. Η λεκάνη βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα, με επιβάρυνση ιόντων χλωρίου στην παραλιακή ζώνη, όχι όμως και στο εσωτερικό της. Η τροφοδοσία της λεκάνης γίνεται από μεταγγίσεις ύδατος του καρστικού συστήματος των ασβεστόλιθων, νότια της λεκάνης. Η πιθανότητα υπόγειας υδραυλικής επικοινωνίας του Κερίτη με την υπολεκάνη του Κάμπου Χανίων δεν μπορεί να αποκλεισθεί.

### **Λεκάνη Στύλου, Αρμένων, Ζούρμπου, Βρύσες**

Η λεκάνη βρίσκεται στο βόρειο κεντρικό τμήμα του νομού Χανίων. Πρόκειται για μία καρστική λεκάνη, η οποία στο βόρειο τμήμα της έχει υποστεί τεκτονικό βύθισμα. Αυτό με τη σειρά του έχει καλυφθεί από νεογενείς αποθέσεις. Δια μέσου της λεκάνης αυτής απορρέει ένας

σημαντικός όγκος νερού ( $160 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ ) του καρστικού συστήματος των Λευκών Ορέων. Κύρια υδρολογικά χαρακτηριστικά είναι:

**Α. Καρστικές Πηγές Στύλου**

Από τις πηγές απορρέουν περίπου  $80 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$  νερού, με μεγάλες διακυμάνσεις στις παροχές τους μεταξύ θέρους και χειμώνα, εμφανίζονται σε 17m απόλυτο υψόμετρο. Περί τα  $70 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού απορρέουν το οκτάμηνο Νοέμβρη - Ιούνη και  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  το τετράμηνο Ιουλίου - Οκτωβρίου. Πρόκειται για μια ομάδα πηγών, με τις σπουδαιότερες στη θέση Κάραβος και Καβούσι (συνεχούς λειτουργίας). Η πηγή στη θέση Βρυσέ εμφανίζεται μόνο τη χειμερινή περίοδο. Οι πηγές πιθανότατα, διαθέτουν εκτός του ρυθμιστικού τους αποθέματος και μόνιμο απόθεμα νερού. Υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις, (γεωτρήσεις Σαμωνά, Μαχαιρών, Νιό Χωριό κ.α.). Η εμφάνιση των πηγών οφείλεται στην ανάσχεση της υπόγειας απορροής του νερού του καρστικού υδροφορέα, από την τεκτονική επαφή τους με τις μάργες του νεογενούς. Η λειτουργία των πηγών, χαρακτηρίζεται αφ' ενός από άμεσο επηρεασμό από τη βροχόπτωση (ταχύτατη εκφόρτιση υπόγειας απορροής), αλλά και από τη χρονική υστέρηση (δίαιτα εκφόρτισης). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι πηγές τροφοδοτούνται από δυο γεωλογικούς σχηματισμούς με διαφορετικά υδραυλικά χαρακτηριστικά: τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (με ταχύτατη εκφόρτιση), οι οποίοι επικάθονται των καρστικών σχηματισμών με τεκτονική επαφή και το παλαιότερο καρστικό συγκρότημα των ασβεστόλιθων. Οι πηγές απορρέουν μέσω του ποταμού Κουιάρη.

**Β. Πηγές Αναβρετής**

Πρόκειται για περιοδικές πηγές, οι οποίες εμφανίζονται μόνο το χειμώνα στις παρυφές του οικισμού Νιό Χωριό σε απόλυτο υψόμετρο 24 m. Δεν είναι γνωστά περισσότερα υδρολογικά στοιχεία της πηγής.

**Γ. Πηγές Αρμένων**

Ισοζύγιο πηγών περί τα  $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού/έτος. Τα  $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού, εκρέουν το οκτάμηνο Νοέμβρη - Ιούνη και  $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  το τετράμηνο Ιούλη - Οκτώβρη. Οι σπουδαιότερες είναι στις θέσεις Πλάτανος, Μύλων και Παναγιάς. Η λειτουργία των πηγών ομοιάζει με εκείνη των πηγών Στύλου. Οι πηγές εκρέουν σε απόλυτο υψόμετρο 18m και το νερό απορρέει μέσω του ποταμού Μεσοποταμιά στον οικισμό Καλύβες. Περισσότερα υδρολογικά στοιχεία των πηγών δεν είναι γνωστά.

**Δ. Πηγές Ελαιονώρας η Ζούρμπου**

Ισοζύγιο πηγών  $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  νερού/έτος. Κατανέμεται ισομερώς καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με πολύ μικρές διακυμάνσεις στην παροχή τους. Το νερό των πηγών είναι βεβαρημένο με ιόντα χλωρίου ( $280 \text{ ppm}$  χλωριόντων) δεδομένου του χαμηλού υψομέτρου (1-2 m) και της μικρής απόστασης των πηγών από τη θάλασσα.

**Ε. Οι υφάλμυρες πηγές των Βλυχάδων**

Οι πηγές βρίσκονται στον Κουιάρη ποταμό, σε απόσταση περίπου 1000 m από τις εκβολές του. Το νερό των πηγών είναι με αυξημένα χλωριόντα ( $1000 \text{ ppm}$ ) και συμβάλουν στον Κουιάρη επιβαρύνοντας τον στην κατάντη απορροή του.

**Στ. Πηγές Καλαμίου**

Οι πηγές βρίσκονται στις δυτικές παρυφές της λεκάνης, δυτικά του οικισμού Καλάμι. Η εκροή τους γίνεται σε απόλυτο υψόμετρο 1 m και παράκτια. Η περιεκτικότητά τους σε χλωριόντα είναι σταθερή στα  $280 \text{ ppm}$ . και χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή τους.

**Ζ. Σχηματισμός Νεογενών αποθέσεων**

Πρόκειται για εσωτερική λεκάνη με χαμηλές στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα στα 7 m απόλυτο υψόμετρο. Η τροφοδοσία της γίνεται από διαφυγές νερού του καρστικού συστήματος και από τις επιφανειακές απορροές της λεκάνης. Ο μεγάλος αριθμός πηγών, σε μια σχετικά περιορισμένη ζώνη, οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στις στάθμες των γεωτρήσεων στην περιοχή, τα υδρογραφήματα των πηγών, τα διαφορετικά υψόμετρα εκροής των πηγών, δηλώνουν την παρουσία υπόγειων υπολεκανών στην απόληξη της κύριας καρστικής λεκάνης. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται πιθανότατα στον έντονο τεκτονισμό της περιοχής. Στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης, στην περιοχή του Δήμου Βάμου, η υδροφορία παρουσιάζει αυξημένα ιόντα χλωρίου. Η ζώνη υφαλμύρινσης περιορίζεται ανατολικά της περιοχής των πηγών Ζούρμπου, των γεωτρήσεων του Δ. Βάμου, στο Καλαμίτση και την Κάινα. Αντίθετα οι γεωτρήσεις στο δυτικό τμήμα, Νιό Χωριό, Μαχαιροί Ράμνη, Πεμόνια και άλλες, παρά τη μακροχρόνια λειτουργία τους, ουδεμία επιβάρυνση χλωριόντων παρουσιάζουν.

#### Η. Κεραμιανός χείμαρρος

Πρόκειται για χείμαρρο με κύριο χαρακτηριστικό τις επιφανειακές απορροές οι οποίες πολλές φορές είναι πλημμυρικές, με συνέπεια συχνά να δημιουργούνται στις κατάντη περιοχές πλημμυρικά φαινόμενα.

#### Θ. Υπολεκάνη Βρύσσης

Πρόκειται για ανεξάρτητη καρστική λεκάνη, της οποίας ο υπόγειος υδροκρίτης παροχετεύει τα νερά στη θέση Μπούτακα, 3 Km νότια του χωριού Βρύσσης και σε υψόμετρο περί τα 150 m. Το μέσο ετήσιο ισοζύγιο είναι περί τα  $26 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> νερού/έτος. Οι πηγές είναι περιοδικές και οι παροχές τους σχεδόν μηδενίζονται στο τετράμηνο Ιούλη - Οκτώβρη. Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης υπάρχει υπόγειος καρστικός υδροφόρος ορίζοντας, από τον οποίο αντλούν νερό οι γεωτρήσεις στις Βρύσσης, Φιλίππου, Βαβες, Εμπρόσνιερο, Αλικάμπος, Νίππος κ.α. με παροχές νερού από 60 έως 80 m<sup>3</sup>/h. Ο συνολικός όγκος αντλούμενου νερού είναι περί τις  $2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> κυρίως την αρδευτική περίοδο. Από τον υδροφορέα αυτό γίνεται και μεταφορά νερού στο Δήμο Σφακίων, στον οικισμό Ασκούφου. (Βοζινάκης, Κουγιάννη 2004).

## Γεωλογία

Η γεωλογία του κάμπου Χανίων παρουσιάζει μια λεπιδοειδή διάταξη των γεωλογικών σχηματισμών και φάσεων. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ημιτεταμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους, δολομίτες, με παρεμβολές σχιστόλιθων και ένα αλλόχθονο σύστημα απωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Συγκεκριμένα, στην περιοχή μελέτης συναντώνται οι παρακάτω σχηματισμοί:

Αυτόχθονη Σειρά – Ιόνιος Ζώνη: Εδώ απαντώνται ενότητες πλακωδών ασβεστόλιθων, σχιστόλιθοι, και ασβεστόλιθοι έως μάρμαρα και δολομίτες. Οι σχηματισμοί αυτοί καλύπτουν σχετικά μικρές εκτάσεις στο νότιο κομμάτι της περιοχής μελέτης, με τους ασβεστόλιθους και τα μάρμαρα να εμφανίζονται και νότια – νοτιοδυτικά, στα Παλαιά Ρούματα. (Λιονής – Περλέρος, 2001)

Αλλόχθονες Σειρές: Οι αλλόχθονες σειρές παρουσιάζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην περιοχή μελέτης, και απαντώνται διάφορα τεκτονικά καλύμματα. Τα τεκτονικά αυτά καλύμματα αναλύονται παρακάτω.

*Τεκτονικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου:* Αποτελεί το κατώτερο τεκτονικό κάλυμμα της Κρήτης και βρίσκεται απωθημένο στην αυτόχθονη σειρά των λεπτοπλακωδών κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Εμφανίζει μεγάλη εξάπλωση στη Δυτική Κρήτη και αναπτύσσεται στο μεγαλύτερο μέρος των Λευκών Ορέων. Στην περιοχή μελέτης αναπτύσσεται από νότια της Αγυιάς και του Θερισιανού φαραγγιού, μέχρι δυτικά του Ομαλού, με μικρές εμφανίσεις νότια του Σκινέ, στο Κουφό και στην περιοχή Ντερέ.

*Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών:* Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους, κροκαλοπαγή, ποικίλης σύστασης (π.χ. σερικιτικούς-χλωριτικούς, μαρμαρυγιακούς, χαλαζιακούς με σερική και αιματίτη, γραφιτικούς-μαρμαρυγιακούς). Η μεταμόρφωση έγινε σε συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής έως μέση θερμοκρασίας HP/LT (SEIDEL, 1978). Καλύπτει την μισή περίπου περιοχή μελέτης, με κύρια εμφάνιση στην νοτιοδυτική περιοχή, περιλαμβάνοντας όλη την έκταση από τη νότια πλευρά των Λευκών Ορέων. Ο αδιαπέρατος χαρακτήρας των φυλλιτών χαλαζιτών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση επιμέρους υδρογεωλογικών λεκανών είτε ως υπόβαθρο αυτών προκειμένου για τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης είτε παρεμποδίζοντας την πλευρική διακίνηση υπογείων νερών άλλων ανθρακικών ενοτήτων (Τρυπάλι).

*Τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Τρίπολης:* Το τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Τρίπολης συναντάται απωθημένο είτε απευθείας πάνω στο Πλακώδεις ασβεστόλιθους της Ιονίου ζώνης (εκτός ορίων μελέτης), είτε πάνω σε υπολείμματα της φυλλιτικής – χαλαζιτικής σειράς με αποτέλεσμα να παρουσιάζει έντονο κερματισμό στη βάση του. Περιλαμβάνει σχηματισμούς φλύσχη, ανθρακικών Τρίπολης, καθώς και ραβδούχα στρώματα. Οι σχηματισμοί της Ζώνης Τρίπολης στην περιοχή μελέτης παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη στην ανατολική περίμετρο, με εξάπλωση και εκτός περιοχής των ορίων μελέτης, ανατολικότερα. Επίσης σημαντική εμφάνιση των σχηματισμών ζώνης Τρίπολης σημειώνεται νότια και νοτιοανατολικά των Λουσακιών, ενώ μικρότερες εμφανίσεις σημειώνονται νότια του Πλατανιά και βόρεια του Κουφού και στα Ραβδούχα. Βόρεια της Καλυβιανής στο βορειοδυτικό τμήμα της έκτασης του γεωλογικού χάρτη, οι σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, εξαπλώνονται και βορειότερα – εκτός χάρτη – στο ακρωτήριο Βούξα, το οποίο οριοθετεί δυτικά τον κόλπο Κισσάμου. Τέλος, πολύ μικρές εμφανίσεις σημειώνονται στην περιοχή της Ποταμίδας και της Επισκοπής.

*Τεκτονικό κάλυμμα ζώνης Πίνδου:* Στους σχηματισμούς της Ζώνης Πίνδου απαντάται φλύσχη, στρώματα μετάβασης, ασβεστόλιθοι, σχιστοκερατόλιθοι, ενώ στις κατώτερες ασβεστολιθικές ενστρώσεις συναντώνται Calpionelles και επικρατούν τα ακτινόζωα. Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζονται στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη στην περιοχή Κισσάμου – Πλάτανου καθώς και βορειοανατολικά του Κωλένη. Μικρότερες εμφανίσεις σημειώνονται στην δυτική περίμετρο.

Νεογενείς σχηματισμοί: Στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης απαντώνται νεογενείς σχηματισμοί που αποτελούνται από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους, μαργαϊκούς ψαμμίτες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, αγριλομάργες με διαστρώσεις άμμου και ιλύος και παρεμβολές γύψων, που δομούν το βόρειο τμήμα της νεογενούς λεκάνης Μηθύμνης. Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από Πλειοκαινικές αποθέσεις (PI), Μειοκαινικές αποθέσεις (M) και Λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων.

Τέλος, έχουμε τεταρτογενείς σχηματισμούς, που αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν αλλουβιακές αποθέσεις, αποθέσεις ερυθρογής, πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων, ποτάμια αναβαθμίδα, κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, καθώς και θαλάσσια αναβαθμίδα. Οι τεταρτογενείς αυτοί σχηματισμοί (πλην των κορηματικών σχηματισμών) αναπτύσσονται στις κυρίως πεδινές εκτάσεις του κάμπου Χανίων, του Κερίτη, του Ταυρωνίτη και στην παράκτια ζώνη μεταξύ Κερίτη και Κολυμπαρίου, του κόλπου Κισσάμου καθώς και στις κοίτες και εκβολές των χειμάρρων. (Λιονής, Περλέρος, 2001)





## Κλιματολογικές – Μετεωρολογικές συνθήκες

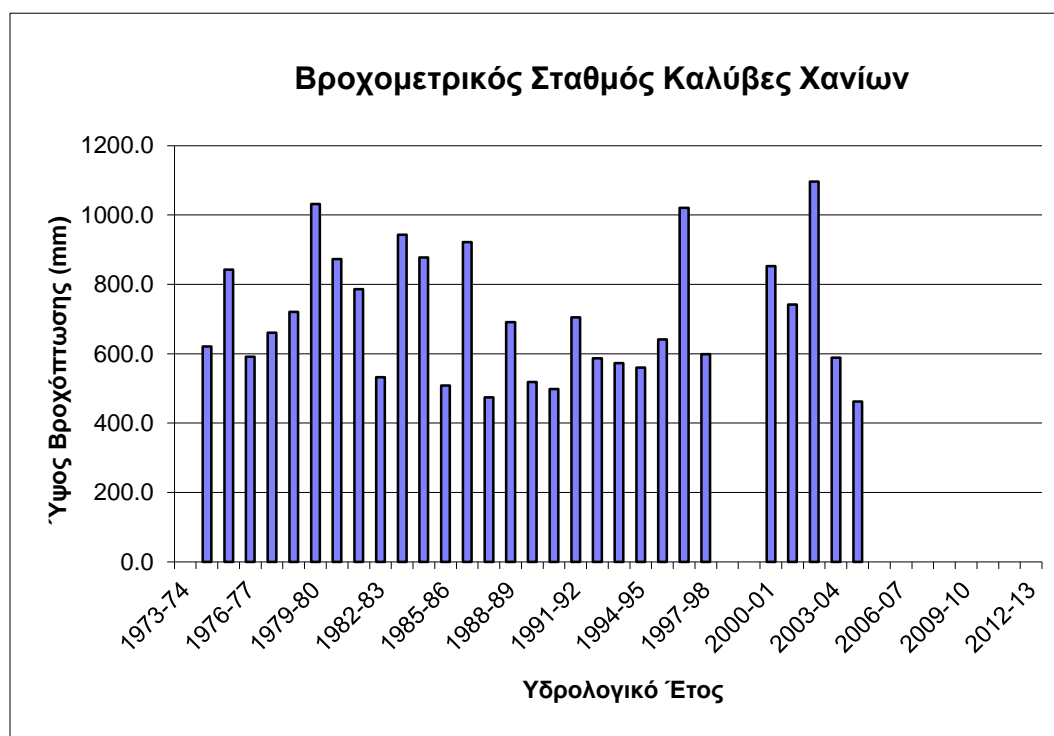
Η περιοχή μελέτης γενικότερα χαρακτηρίζεται από μεσογειακό εύκρατο κλίμα που προσεγγίζει κλίματα με υψηλότερες θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα είναι ένας μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και του ερημοειδούς Μεσογειακού, με τη νοτιοανατολική Κρήτη να υπάγεται κυρίως στο τελευταίο.

Κυριότερα χαρακτηριστικά του κλίματος είναι η ηπιότητα και η γλυκύτητα, με την ψυχρή περίοδο να είναι ήπια λόγω της συχνής έλευσης θερμών και υγρών αερίων μαζών από τα νοτιοδυτικά.

Η περιοχή μελέτης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα βιοκλιματικών ορόφων, με μεγάλες διακυμάνσεις από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από τα ορεινά προς τα πεδινά. Οι πεδινές και ημιορεινές περιοχές του νομού Χανίων ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με ήπιο προς θερμό χειμώνα, ενώ ένα πολύ μικρό μέρος των ορεινών περιοχών του ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με δριμύ χειμώνα. Η βλάστηση της παραλιακής ζώνης ολόκληρης της Κρήτης μέχρι και μερικά χιλιόμετρα από την ακτή περιλαμβάνει θερμομεσογειακές διαπλάσεις (Oleo Ceratonia) Ανατολικής Μεσογείου.

### Βροχόπτωση

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, επειδή δεν υπήρχαν πρόσφατες μετρήσεις για το βόρειο κομμάτι του νομού Χανίων, έγινε χρήση του σταθμού στις Καλύβες Χανίων, για την περίοδο από τον Απρίλιο 1998 έως τον Απρίλιο 2000, με τα δεδομένα της Περιφέρειας Κρήτης, όπως φαίνονται στην εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5: Στοιχεία βροχόπτωσης (Πηγή: Περιφέρεια Κρήτης)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, υπάρχουν ελλείψεις στα δεδομένα, ακριβώς στην περίοδο μελέτης. Έγινε συμπλήρωση λαμβάνοντας υπόψιν την ετήσια βροχόπτωση αλλά και το μέσο όρο βροχόπτωσης για τους συγκεκριμένους μήνες. Η παραπάνω βροχόπτωση



λήφθηκε υπόψιν για το σύνολο της περιοχής, κι αυτό γιατί υπάρχει μεγάλη ομοιογένεια στην περιοχή, οπότε τα δεδομένα θεωρήθηκαν αρκετά για την περίπτωση της παρούσας εργασίας.

### Θερμοκρασία

Αν και η θερμοκρασία της περιοχής μελέτης δεν ήταν απαραίτητη για τις ανάγκες μοντελοποίησης της ροής υπογείων υδάτων με το μοντέλο PTC, ωστόσο λάβαμε δεδομένα ώστε να έχουμε πληρέστερη εικόνα της περιοχής. Τα δεδομένα που λάβαμε είναι από τον αντιπροσωπευτικό σταθμό του Αλικιανού.

Πίνακας 2.2: Δεδομένα θερμοκρασίας

Σταθμός	Μέση ετήσια θερμοκρασία (°C)	Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία (°C)	Ετήσιο θερμομετρικό εύρος (°C)
Αλικιανός	16.96	8	26	18

Περαιτέρω πρέπει να αναφέρουμε ότι από θερμοκρασιακής άποψης το κλίμα της Κρήτης θεωρείται προνομιούχο και αυτό έχει να κάνει με την κεντρική θέση της νήσου στην ανατολική Μεσόγειο. Ο χειμώνας αρχίζει συνήθως κατά τα μέσα Δεκεμβρίου και είναι ήπιος, με τον ψυχρότερο μήνα να είναι ο Φεβρουάριος, με μικρή όμως διαφορά από τον Ιανουάριο. Θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Ιούλιος, με μέση υπερετήσια θερμοκρασία περίπου 25°C.

Στα ορεινά έχουμε χαμηλότερες μέσες θερμοκρασίες, εντονότερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις και ειδικότερα για τους χειμερινούς μήνες η διαφορά με τα πεδινά είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Εν τέλει, οδηγούμαστε στα εξής συμπεράσματα:

- Η πεδινή ζώνη της Κρήτης αποτελεί κλιματικά μια μετάβαση από το μεσογειακό προς το ημιερημικό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από μικρό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιο χειμώνα και ξηρή περίοδο μεγάλης διάρκειας. Το θέρος, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των Ετησιών ανέμων είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από τον Ιούνιο μέχρι το Σεπτέμβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Στην περιοχή αυτή δεν παρατηρείται ποτέ παγετός και η θερμοκρασία σπάνια πέφτει κάτω από τους 0°C, με ήπιες θερμοκρασιακές αποκλίσεις.
- Η ορεινή ζώνη της Κρήτης εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις, μέση ετήσια θερμοκρασία 2-3 °C χαμηλότερη από την πεδινή ζώνη. Η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα (Ιούλιος) είναι στα επίπεδα της μέσης θερμοκρασίας του θερμότερου μήνα των πεδινών σταθμών, η μέση όμως θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα (Φεβρουάριος) είναι περί τους 3°C χαμηλότερη. (Λιονής και Περλέρος, 2001)

### Υγρασία

Η μέγιστη ατμοσφαιρική σχετική υγρασία στην Κρήτη παρουσιάζεται τον Δεκέμβριο και η ελάχιστη τον Ιούλιο, με ελάχιστες τιμές σχετικής υγρασίας 48.90% και μέγιστες τιμές 72% στη Σούδα. Στη νότια Κρήτη παρουσιάζεται μεγαλύτερη διακύμανση της υγρασίας απ' ότι στη βόρεια. Οι χαμηλές μέσες σχετικές υγρασίες το καλοκαίρι, παρά τις υψηλές θερμοκρασίες, οδηγούν σε ευχάριστο θέρος χωρίς συνθήκες δυσφορίας, γεγονός σημαντικό για τις τουριστικές ζώνες. (Λιονής και Περλέρος, 2001)



### **Άνεμοι**

Τα ανεμολογικά στοιχεία που ελήφθησαν από την ΕΜΥ είναι ετήσια, σε Beaufort και τομείς 45°. Καθ' όλη τη διάρκεια του έτους επικρατούν κυρίως οι βόρειοι και οι βορειοδυτικοί άνεμοι, με τη νηνεμία να καλύπτει ετήσιο ποσοστό της τάξης του 20% στους πεδινούς σταθμούς, ενώ στους ορεινούς η νηνεμία φτάνει το 30%. Στη δυτική Κρήτη παρουσιάζεται μικρότερη διακύμανση της έντασης των ανέμων, με μέγιστη μέση μηνιαία ένταση ανέμων περίπου 4m/s, σημαντικά χαμηλότερη από την ανατολική Κρήτη, με τιμές έως και 6,8m/s. (Λιονής και Περλέρος, 2001)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ: ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE

#### Μοντελοποίηση Υπογείων Υδάτων

Η μελέτη του περιβάλλοντος γενικότερα και η εύρεση λύσεων σε καθημερινά προβλήματα προϋποθέτει πρώτα μια βαθιά και ακριβή κατανόηση της υπάρχουσας κατάστασης. Εδώ καθίσταται σαφής η χρησιμότητα των μοντέλων. Τα μοντέλα είναι μια περιγραφή ή αναλογία, που χρησιμοποιείται για την καλύτερη απεικόνιση μιας κατάστασης, που δεν μπορεί να απεικονιστεί ακριβώς.

Από τον παραπάνω ορισμό μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η μοντελοποίηση είναι η διαδικασία με την οποία σχεδιάζουμε και υλοποιούμε μοντέλα. Τα μοντέλα μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας εκφράσεις, σχέδια, φυσικά μοντέλα υπό κλίμακα, υπολογιστικά προγράμματα ή μαθηματικές εξισώσεις. Στην παρούσα περίπτωση γίνεται χρήση υπολογιστικού προγράμματος που χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις.

Τα μοντέλα της υπόγειας ροής του νερού διαχωρίζονται σε φυσικά (αναλογικά), και σε μαθηματικά μοντέλα. Στα φυσικά μοντέλα γίνεται προσομοίωση της ροής απ' ευθείας, σε εργαστήρια όπου εισάγονται σε ειδικές στήλες ποσότητες εδάφους με τέτοιο τρόπο ώστε να εξομοιώνουν τις συνθήκες στην περιοχή μελέτης, και κατόπιν υπόκειται σε μετρήσεις.

Στα μαθηματικά μοντέλα γίνεται προσεγγιστική προσομοίωση, μέσω μαθηματικών εξισώσεων που περιγράφουν τις αντίστοιχες διεργασίες. Λόγω των εξισώσεων αυτών μπορεί να γίνει αριθμητική ή αναλυτική λύση, καθώς και χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα αναλυτικά μοντέλα απαιτούν όμως σε μεγάλο βαθμό απλοποίηση για να μπορέσουν να επιλυθούν και η λύση να μπορεί να εφαρμοστεί. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως εργαλεία για την κατανόηση και ταξινόμηση της υπόγειας ροής, και όχι για ακριβή αναπαράσταση των συνθηκών. Τα αριθμητικά μοντέλα απ' την άλλη μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε σταθερές συνθήκες, όσο και σε μεταβατικές συνθήκες σε τρεις διαστάσεις σε ετερογενή μέσα, με περίπλοκες οριακές συνθήκες και πολυάριθμους κόμβους. Αυτή η ευχρηστία των αριθμητικών μοντέλων τους επιτρέπει να εφαρμόζονται τόσο σε μικρές περιοχές, όσο και σε ευρύτερες γεωγραφικές εκτάσεις. Δεν μειώνουν τη σημασία των αναλυτικών μοντέλων, και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση τους, όμως ενίοτε χρειάζεται μια πιο περίπλοκη και λεπτομερής αναπαράσταση της περιοχής μελέτης, πράγμα που είναι πλέον δυνατόν χάρη στην ολοένα και αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ στη διάθεσή μας, αλλά και στην εξέλιξη των προγραμμάτων και των μεθόδων προγραμματισμού.

Παρατίθενται παρακάτω στον πίνακα 3.1 συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

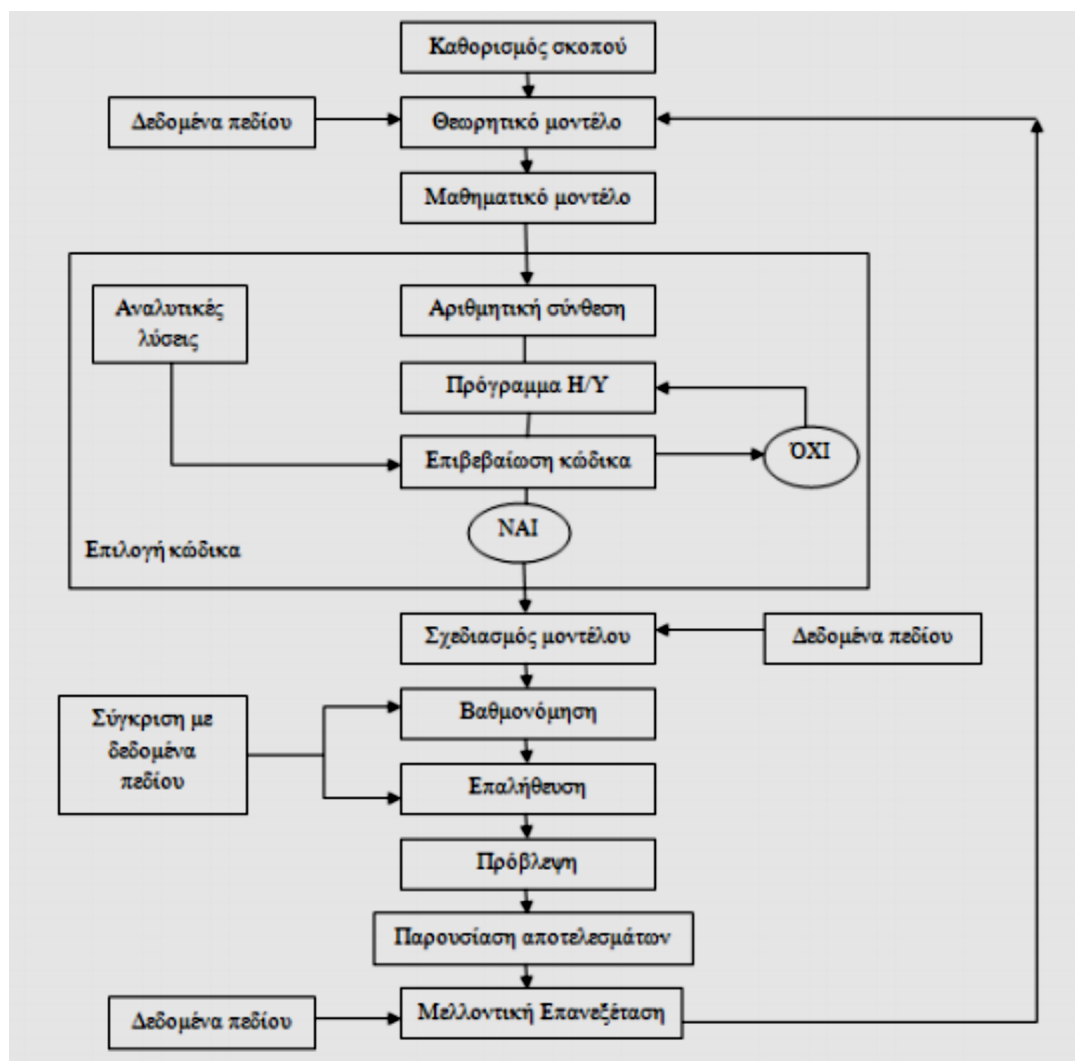
Αναλυτικά μοντέλα	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποδοτικά όταν τα δεδομένα του συστήματος είναι σποραδικά ή αβέβαια	Περιορισμένα σε συγκεκριμένες ιδεατές συνθήκες με απλή γεωμετρία
Συμφέρουν οικονομικά	Μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα σε προβλήματα πεδίου με σύνθετες οριακές συνθήκες
Εφαρμόσιμα για αρχικές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

Πίνακας 3.1: Είδη μοντέλων και ιδιότητές τους.

Σύμφωνα με τους Anderson και Woessner, υπάρχει μία συγκεκριμένη διαδικασία που ακολουθείται με την σειρά όπως παρουσιάζεται παρακάτω (Anderson and Woessner, 1992):

- Καθορισμός του σκοπού του μοντέλου.
- Σχηματισμός ενός θεωρητικού μοντέλου.
- Επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρονικού κώδικα και των αντίστοιχων εξισώσεων που διέπουν την κατάσταση που θα εξεταστεί.
- Σχεδιασμός του μοντέλου .

- Βαθμονόμηση.
- Ανάλυση ευαισθησίας της βαθμονόμησης του μοντέλου.
- Επαλήθευση του μοντέλου.
- Πρόβλεψη.
- Πρόβλεψη για την ανάλυση της ευαισθησίας.
- Παρουσίαση των αποτελεσμάτων.
- Περαιτέρω ανάλυση με νέα δεδομένα πεδίου για το μέλλον.
- Επανασχεδιασμός του μοντέλου με χρήση των αποτελεσμάτων από την προαναφερθείσα ανάλυση.



Εικόνα 3.1: Πρωτόκολλο μοντελοποίησης υπόγειας ροής (Anderson and Woessner, 1992)

## **Το μοντέλο PTC μέσω του προγράμματος ArgusONE**

### **Το πρόγραμμα ArgusONE**

Για την υλοποίηση του μοντέλου PTC έγινε χρήση του προγράμματος ArgusONE ως βάση. Το ArgusONE είναι ένα προχωρημένο γραφικό πρόγραμμα επεξεργασίας, που παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης με μοντέλα υπόγειας ροής, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και διαγράμμάτων ροής. Ουσιαστικά λοιπόν πρόκειται για μια ενοποιημένη λύση μοντελοποίησης για όλα τα προβλήματα ροής υπόγειων υδάτων. Με την πρωτότυπη τεχνολογία Plug-In Extension (PIE) δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προσαρμόσει το πρόγραμμα ως ένα γραφικό περιβάλλον εργασίας για τα μοντέλα του. Ως αποτέλεσμα πολλοί οργανισμοί και εταιρείες κάνουν χρήση του ArgusONE για τις ανάγκες μοντελοποίησής τους, έχοντας προσαρμόσει το πρόγραμμα με αρχεία προσαρμογής Plug Ins. Τέτοια δημοφιλή Plug Ins είναι τα εξής:

MODFLOW – Ground-Water Flow Modeling

MOC3D – Solute Transport Modeling

MODPATH – Particle Pathlines for MODFLOW

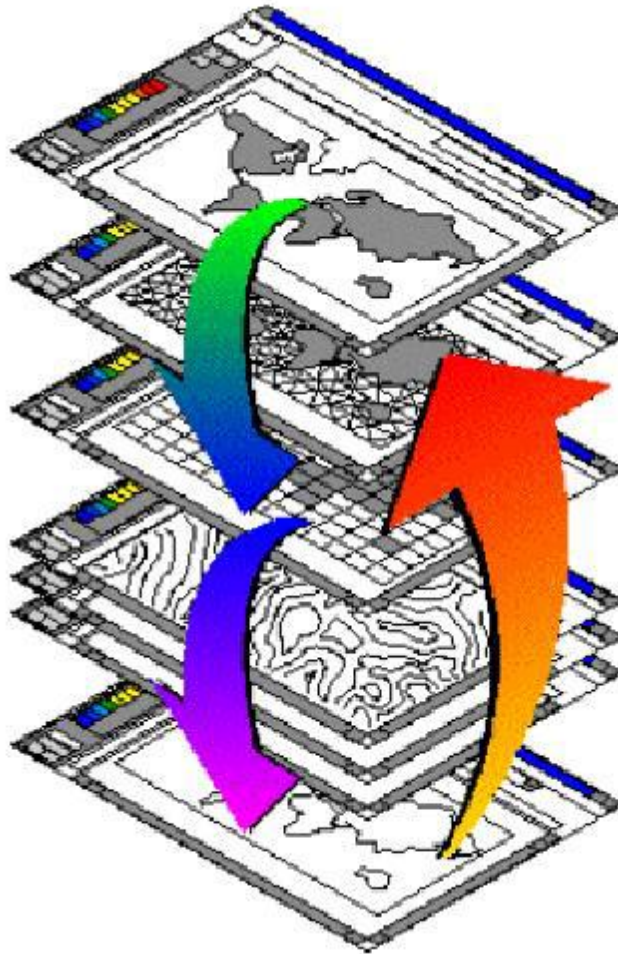
SUTRA – Saturated/Unsaturated Flow and Heat/Solute Transport

PTC – Princeton Flow and Transport Code

Subterranean Research Inc. Geostatistics Packages

ARC/INFO and ArcView Interfaces

Το ArgusONE δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει πολλά επίπεδα δεδομένων (layers), όπως επίπεδα περιγράμματος περιοχής μελέτης (domain outline layers), επίπεδα πλέγματος (mesh layers) τόσο σε τριγωνική όσο και σε τετράπλευρη μορφή, αλλά και επίπεδα πληροφοριών ΓΠΣ (GIS information layers), τα οποία παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες μοντελοποίησης στο χρήστη.



Εικόνα 3.2: Τα πολλαπλά επίπεδα του ArgusONE (ArgusONE user's guide)

### Το μοντέλο PTC

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία έγινε χρήση του μοντέλου PTC ή Princeton Flow and Transport Code, που είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων. Αρχικά αναπτύχθηκε με τη χρήση γλώσσας FORTRAN, για χρήση σε περιβάλλον DOS, όμως η εξέλιξη των υπολογιστών και των λειτουργικών συστημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος μέσω του προγράμματος ArgusONE, το επονομαζόμενο PTC PIE, το οποίο διευκολύνει την εισαγωγή δεδομένων αλλά και την τελική απεικόνιση.

### **Βασικές Εξισώσεις του PTC**

Το PTC κάνει χρήση ενός συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων για την αναπαράσταση ροής υπόγειου ύδατος, συναρτήσει του υδραυλικού ύψους  $h$ ,

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

της ταχύτητας των υπογείων υδάτων στις 3 κατευθύνσεις x,y,z

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3.3)$$

$$V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.4)$$

και της συγκέντρωσης ρύπων που περιγράφει τη μεταφορά ρύπων στις 3 κατευθύνσεις

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) + \lambda c - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) \\ & = 0 \varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{q} \cdot \nabla c - \nabla \cdot (\mathbf{D} \cdot \nabla c) - Q(c - c_0) + R_c = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων προκύπτει από το νόμο του Darcy και την αρχή διατήρησης της μάζας. Για την επίλυσή τους το μοντέλο ακολουθεί μια συγκεκριμένη σειρά: αρχικά επιλύει ως προς το υδραυλικό ύψος h, έπειτα ως προς τις ταχύτητες V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub> και V<sub>z</sub>, και τέλος επιλύει ως προς τη συγκέντρωση ρύπου c (Babu et al, 2002).

Η βασική εξίσωση την οποία χρησιμοποιεί το PTC για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ενός συστήματος ροής υπογείων υδάτων είναι η ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ & - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

και

$$Q = \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) \quad (3.7)$$

Όπου:

h = το υδραυλικό ύψος (m)

K<sub>xx</sub> = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x (m/d)

K<sub>yy</sub> = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y (m/d)

K<sub>zz</sub> = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση z (m/d)

S = Ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας (m<sup>-1</sup>)

Q<sub>i</sub> = ο όρος της πηγής ή της γεώτρησης στη θέση i (m<sup>3</sup>/d)

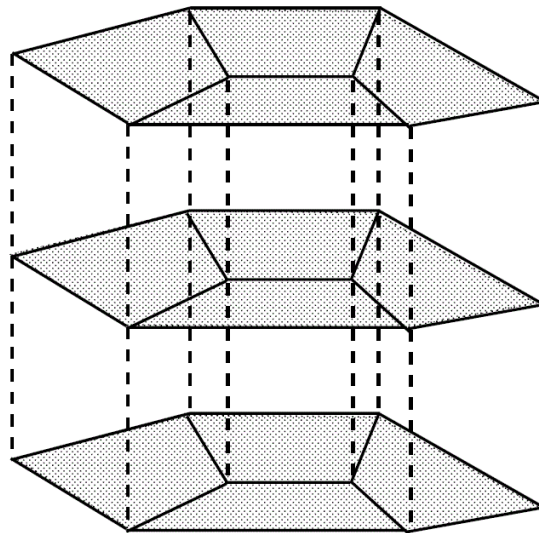
δ = η συνάρτηση Dirac

r = ο αριθμός των σημείων των πηγαδιών ή των γεωτρήσεων.

Στο PTC χρησιμοποιούνται οι βασικές μονάδες μήκους, μάζας και χρόνου και δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της υλοποίησης του μοντέλου. Το PTC επιλύει την παραπάνω βασική εξίσωση με τη χρήση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (Babu et al. 2002).

#### Διαδικασία – Αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Κατά τη διαδικασία επίλυσης των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων, το PTC κάνει χρήση αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση πολύπλοκων φυσικών συστημάτων. Λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας των τρισδιάστατων εξισώσεων, το PTC χρησιμοποιεί ένα προσαρμοσμένο διαχωριστικό αλγόριθμο ο οποίος απλοποιεί και μειώνει τον όγκο επίλυσης άρα και τον υπολογιστικό χρόνο και την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται. Η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος εξηγείται ως εξής: χωρίζει το σύστημα σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα μέσα στα οποία γίνεται διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων, πετυχαίνοντας έτσι ακριβέστερη απεικόνιση ακανόνιστων περιοχών. Έπειτα γίνεται σύνδεση των στρωμάτων αυτών κάθετα με μία διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Το υβρίδιο αυτό καθορίζει τη δυνατότητα της διαδικασίας διαχωρισμού μέσω του συνδυασμού πεπερασμένων διαφορών, αλλά και πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση των οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων, τοποθετημένων το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας τον διαχωρισμό τριών διαστάσεων.

Η διαδικασία επίλυσης κατόπιν χωρίζεται σε 2 βήματα ανά επανάληψη. Στο πρώτο βήμα επιλύονται οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων, ανεξάρτητα από τις κάθετες εξισώσεις, οι οποίες επιλύονται στο δεύτερο βήμα (Babu et al. 2002).



### Boundary Conditions – Οριακές συνθήκες

Στο μοντέλο PTC έχουμε τρεις τύπους οριακών συνθηκών της εξίσωσης ροής υπόγειου ύδατος, οι οποίες είναι:

- α) Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος)
- β) Neumann (καθορισμένη ροή)
- γ) τρίτου τύπου (διαρροές)

Η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενική ροή. Αυτό προϋποθέτει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές. Με την επιλογή εναλλακτικών οριακών συνθηκών μέσα στο πεδίο μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

#### 1<sup>ο</sup> είδος: Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος (Prescribed Head)

Οι οριακές συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους καθορίζονται με τον προσδιορισμό κόμβων και των τιμών υδραυλικού ύψους που αντιστοιχούν στους κόμβους αυτούς. Ο κώδικας αυτόματα καθορίζει τον πίνακα των κόμβων με τους αντίστοιχους συντελεστές τους, οι οποίοι είναι οι σταθεροί όροι.

#### 2<sup>ο</sup> είδος: Καθορισμένη Ροή (Specified Gradients or Fluxes)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα απλό μέσο προσδιορισμού οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής, με εφαρμογή του θεωρήματος του Green. Ο χρήστης τελικά χρειάζεται μόνο να προσδιορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή σε ένα όριο. Ροές λόγω άντλησης εισάγονται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο, δηλαδή τον προσδιορισμό ροής σε κόμβο. Για να διευκολύνει την εισαγωγή ομοιόμορφης παρείσφρησης ο κώδικας επιτρέπει την κομβική ροή παρείσφρησης. Η χωρική ενσωμάτωση για τον προσδιορισμό ογκομετρικής ροής πραγματοποιείται αυτόματα από το μοντέλο.

#### 3<sup>ο</sup> είδος: Προσδιορισμένη Διαρροή (Specified Leakage)

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με την αντικατάσταση της στάθμης σε ένα κόμβο με τον όρο αγωγιμότητας διαρροής. Ο όρος αυτός ενσωματώνεται σε μια επιφάνεια και αναπαριστά κάθετη διαρροή. Ωστόσο με τον κατάλληλο προσδιορισμό της σταθεράς  $k_L$ , μπορεί να προσδιοριστεί διαρροή σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (Babu et al., 2002).

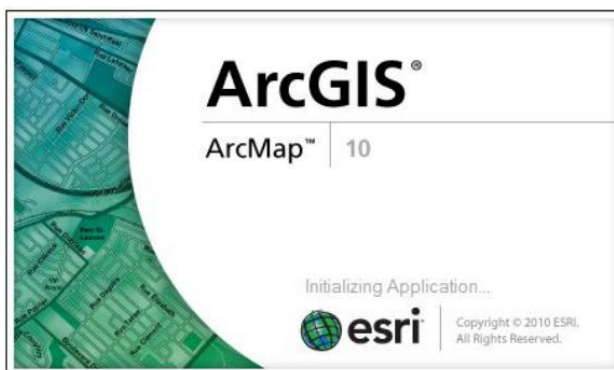
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.

#### Το λογισμικό ArcGIS και η χρήση στην παρούσα εργασία.

Για την παρούσα εργασία υπήρξε ανάγκη χρήσης ψηφιοποιημένων χαρτών για την καταγραφή και τον προσδιορισμό των γεωτρήσεων, της μορφολογίας του εδάφους και των χαρακτηριστικών του υπεδάφους, όπως υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες. Σε μικρότερα πεδία μελέτης δεν είναι απαραίτητη η εκτεταμένη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS), όμως στην παρούσα μελέτη, επειδή πρόκειται για μια μεγάλη περιοχή και υπάρχουν πολυάριθμες γεωτρήσεις, καθίσταται απαραίτητη η χρήση GIS για την προετοιμασία των δεδομένων πριν την εισαγωγή τους στο ArgusONE. Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό ArcGIS.

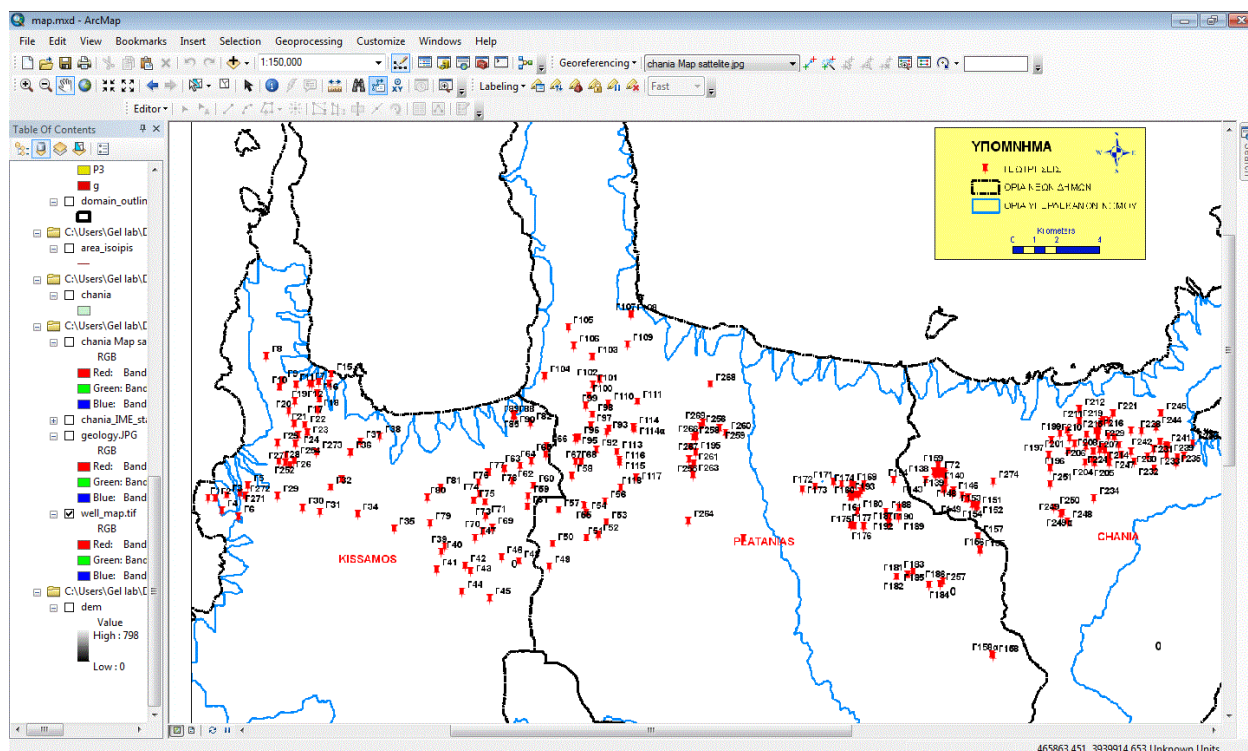
Το ArcGIS Desktop αποτελεί μια σουίτα εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα ArcMap, ArcCatalog και ArcToolbox. Με συνδυαστική χρήση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια χρειαστεί όσον αφορά τη δημιουργία και την επεξεργασία χαρτών GIS, είτε απλή είτε πολυσύνθετη, όπως χαρτογράφηση, γεωγραφική ανάλυση, επεξεργασία και σύνθεση δεδομένων, διαχείριση δεδομένων, απεικόνιση και γεωανάλυση. (esri.com, accessed on 13/05/16)



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

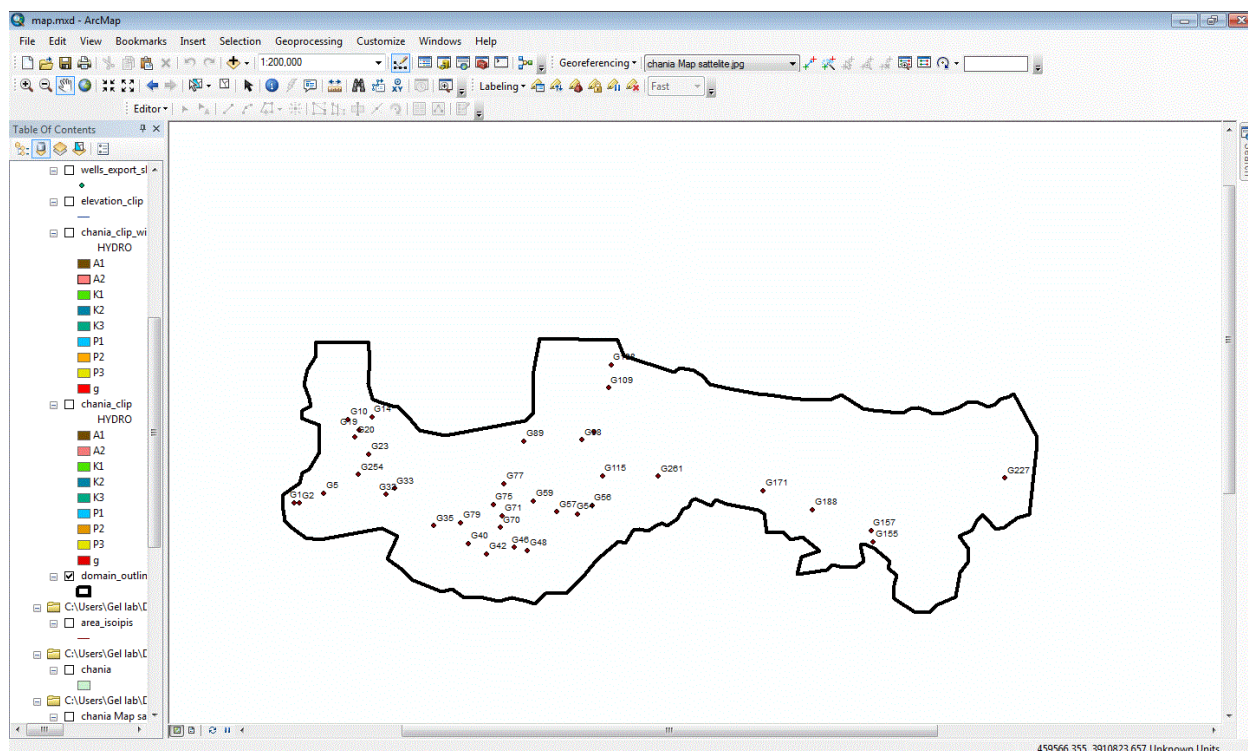
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε αρχεία shape file για την ομαδοποίηση των δεδομένων και την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Τα αρχεία shape file είναι ένα ευρέως διαδεδομένο πρότυπο και ομαδοποιούνται σε 3 ή και περισσότερα αρχεία, τα οποία και είναι αλληλεξαρτώμενα. (ArcGIS Handbook, Univ. of Maryland,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

Τα αρχικά δεδομένα των γεωτρήσεων αποτελούνταν κυρίως από δεδομένα στάθμης, αλλά δεν υπήρχε πίνακας με τις συντεταγμένες τους, ούτε κάποιο αρχείο shape file. Το μόνο που υπήρχε για τον χωρικό προσδιορισμό τους ήταν ένας χάρτης από τη μελέτη των Λιονή και Περγέρου (2001). Η λύση ήταν η ψηφιοποίηση του χάρτη και εισαγωγή του στο ArcGIS.



Εικόνα 4.1: Ο ψηφιοποιημένος χάρτης γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης

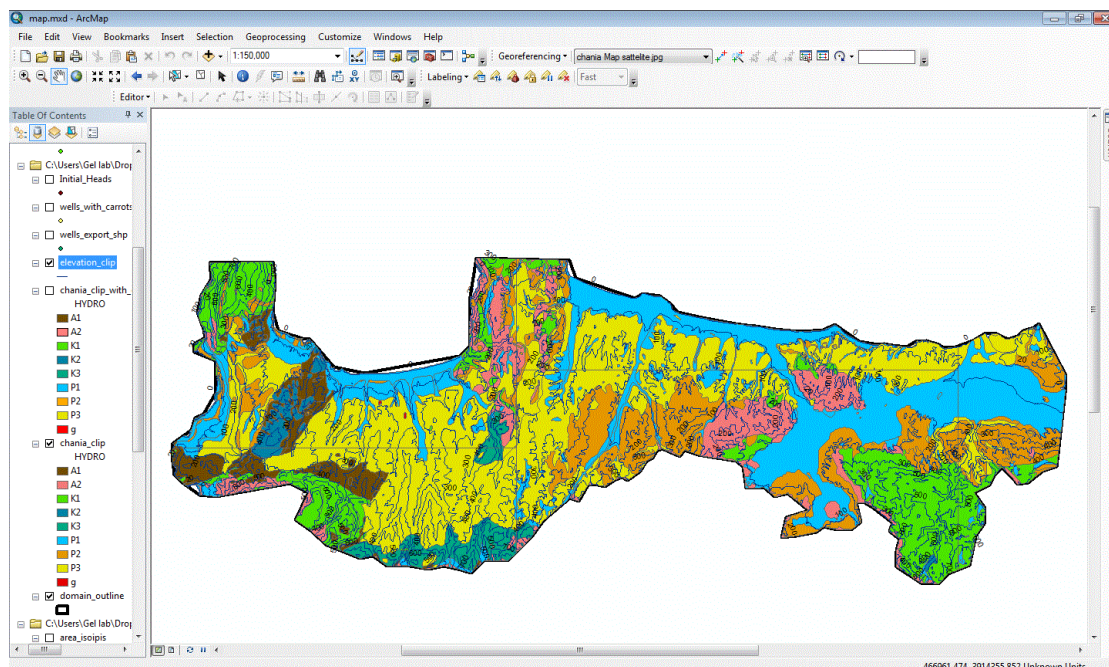
Μετά την ψηφιοποίηση, δημιουργήθηκαν αρχεία shape file των γεωτρήσεων με δεδομένα στάθμης και άντλησης.



Εικόνα 4.2: Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης με τις γεωτρήσεις.



Επίσης, εισάχθηκε αρχείο shape file με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής και με τις ισοϋψείς καμπύλες, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι οι ισοϋψείς αργότερα διορθώθηκαν για να ανταποκρίνονται στην προσαρμογή που έγινε για το μοντέλο.



Εικόνα 4.3: Οι γεωλογικοί σχηματισμοί και οι ισοϋψείς καμπύλες.

Έχοντας δημιουργήσει τα αρχεία shape file, γίνεται έπειτα επεξεργασία του πίνακα ιδιοτήτων του κάθε αρχείου, ώστε να προστεθούν οι αντίστοιχες τιμές και ποσότητες. Ο πίνακας ιδιοτήτων (attribute table) φαίνεται στην εικόνα 4.4.

FID	Shape *	code	x	y	carrot_	Depth	Q	Altitude	Corr_Alt	InitHApr98	InitHOct98	InitHApr
0	Point	G1	460070.507	3924112.301	y	60	-1200	57.23	157.23	105.7	102.81	1
1	Point	G2	460411.088	3924096.46	y	50	-1200	52.85	152.85	106.02	103.2	1
2	Point	G5	461900.14	3924714.258	y	57	-1680	52.74	152.74	109.42	0	
3	Point	G10	463373.351	3929181.413	y	130	-720	129.71	229.71	117.41	112.18	1
4	Point	G14	464844.069	3929337.012	y	120	-720	23.79	123.79	102.95	105.46	1
5	Point	G19	464052.02	3928544.963	y	150	-1200	110.32	210.32	111.29	111.99	1
6	Point	G20	463804.505	3928109.336	y	130	-720	124.61	224.61	113.14	113.13	1
7	Point	G32	465882.321	3924624.321	y	116	-2160	188.65	288.65	245.43	245.43	2
8	Point	G33	466210.353	3924993.944	y	116	-2160	180.71	280.71	228.39	242.55	1
9	Point	G35	466096.585	3922705.979	y	160	-1200	193.17	293.17	195.72	194.34	2
10	Point	G40	470754.601	3921639.353	y	130	-1680	176.83	276.83	237.81	234.4	2
11	Point	G42	471852.909	3921005.714	y	100	-1440	96.11	196.11	193.55	188.46	1
12	Point	G46	473532.052	3921396.458	y	272	-1200	120.37	220.37	188.87	178.88	1
13	Point	G48	474324.101	3921195.806	y	220	-2880	234.51	334.51	207.69	211.45	
14	Point	G54	477405.171	3923428.328	y	150	-1560	235.95	335.95	309.1	319.51	3
15	Point	G56	478283.817	3923943.687	y	350	-912	164.18	264.18	217.28	217.2	2
16	Point	G57	476129.444	3923563.504	y	220	-720	180.1	280.1	138.99	136.91	1
17	Point	G59	474726.99	3924214.04	y	160	-1440	216.99	316.99	297.52	293.01	2
18	Point	G70	472680.805	3922605.301	y	165	-720	67.12	167.12	117.36	113.76	1
19	Point	G71	472793.452	3923303.712	y	140	-2040	66.24	166.24	118.07	114.55	
20	Point	G75	472246.489	3924001.184	y	96	-2400	52.96	152.96	117.31	115.48	1
21	Point	G77	472905.473	3925268.462	y	167	-3360	105.07	205.07	114.72	109.97	1
22	Point	G89	474111.734	3927884.346	y	44	-8400	113.96	113.96	112.37	109.6	
23	Point	G98	477683.451	3927948.753	y	145	-2400	174.89	274.89	200.73	205.74	2
24	Point	G108	479449.963	3932532.855	y	136	-2400	69.27	169.27	144.36	107.89	1
25	Point	G109	479289.751	3931130.278	y	150	-2400	122.13	222.13	148.37	148.62	1
26	Point	G110	478410.556	3926446.876	y	130	-720	137.34	237.34	131.84	153.67	
27	Point	G115	478932.785	3925754.451	y	97	-960	135.39	235.39	176.25	164.3	2

Εικόνα 4.4: Πίνακας ιδιοτήτων του shape file Initial Heads.shp που δημιουργήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων στάθμης στο PTC.

Αποθηκεύοντας τον παραπάνω πίνακα, πλέον το αρχείο shape file περιέχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζονται από το PTC, σε μορφή που μπορεί να εισαχθεί εύκολα στο μοντέλο, και με σωστή αντιστοίχιση των δεδομένων αυτών με τις γεωτρήσεις. Εδώ λοιπόν φαίνεται η χρησιμότητα της χρήσης του λογισμικού ArcGIS για την προετοιμασία των

δεδομένων. Η παραπάνω εισαγωγή δεδομένων πραγματοποιείται για όλα τα δεδομένα που χρειάζονται αντιστοίχιση με σημεία ή πολύγωνα, όπως στην περίπτωση των γεωλογικών σχηματισμών.

### **Το γραφικό περιβάλλον του PTC, μέσα από το ArgusONE.**

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ArgusONE 4.2.0.w σε συνδυασμό με το μοντέλο Princeton Transport Code (PTC). Το πρόγραμμα ArgusONE δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, ενώ μέσω των διαφόρων εργαλείων που διαθέτει (modules) επιτρέπει στο χρήστη να χρησιμοποιεί ψηφιοποιημένους χάρτες από Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) για δεδομένα εισαγωγής. Επίσης, μπορεί να δημιουργήσει αυτόματα πλέγμα, και να αντιστοιχήσει μεταβλητές τόσο σε ολόκληρο το πλέγμα, όσο και σε συγκεκριμένα στοιχεία ή κόμβους του πλέγματος, μέσω των διαφόρων στρωμάτων (layers) που δημιουργεί. Τέλος, τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε μορφή που είναι συμβατή με κάθε πρόγραμμα αριθμητικού κώδικα.

Για το συσχετισμό διαφόρων μεταβλητών είτε στο πλέγμα, ή σε συγκεκριμένα στοιχεία ή κόμβους, το ArgusONE κάνει χρήση επιπέδων ή Layers. Υπάρχουν διάφοροι τύποι layers, ανάλογα με τα δεδομένα που περιέχουν, και οι τύποι αυτοί είναι:

- I) Domain. Πρόκειται για βασικό στοιχείο του προγράμματος, το οποίο καθορίζει την περιοχή μελέτης.
- II) Mesh. Το επίπεδο του πλέγματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μεταβλητών.
- III) Grid. Επίπεδα πληροφοριών σε μορφή τετραγώνων (blocks).
- IV) Information. Τα επίπεδα αυτά χρησιμοποιούνται για το συσχετισμό μεταβλητών με τα πλέγματα. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός πολλαπλών μεταβλητών σε ένα επίπεδο πληροφοριών.
- V) Maps. Χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών στο ArgusONE. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να απομονώσει το περίγραμμα της περιοχής μελέτης, ή απλά να χρησιμοποιήσει το χάρτη για αναφορά. Επίσης οι χάρτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία γραφικών διαφόρων ειδών, ακόμα και τρισδιάστατων.
- VI) Data. Χρησιμεύουν στην εισαγωγή δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί από άλλα προγράμματα (στην προκειμένη περίπτωση το PTC) στο ArgusONE. Τα δεδομένα αυτά έχουν ποικίλες χρήσεις, όπως τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων από τα εξαγόμενα δεδομένα του PTC.

Τα layers μπορούν να δημιουργηθούν αλλά και να διαγραφούν από το χρήστη, ενώ μπορούν να αποθηκευτούν συνολικά σε ένα αρχείο, ως αρχείο .mtb. Εάν αποθηκευτεί το περιβάλλον σε αρχείο .mtb, ο χρήστης δεν χρειάζεται πλέον τα υπόλοιπα αρχεία που έχει εισάγει, και μπορεί να τρέξει το πρόγραμμα σε οποιοδήποτε άλλο υπολογιστή, επιτρέποντας έτσι την εύκολη μεταφορά του μοντέλου. (Olivares, 2002).

Το PTC έχει τροποποιηθεί πλέον και λειτουργεί ως προσθήκη (PIE) στο βασικό πρόγραμμα ArgusONE. Έτσι, εγκαθιστά τις εντολές επιλογών στο μενού PIEs και λειτουργεί ως πίνακας ελέγχου για τη δημιουργία νέων σχεδίων PTC, την επεξεργασία των παραμέτρων ήδη υπάρχοντων αρχείων PTC και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του PTC.

Τα επίπεδα που δημιουργούνται όταν αρχίζει ένα νέο σχέδιο PTC είναι τα παρακάτω:

- PTC Domain Outline: Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για τον ορισμό της περιοχής μελέτης. Ουσιαστικά είναι μια γραφική αναπαράσταση σε ένα επίπεδο της επιφάνειας που θα εξεταστεί. Γενικά είναι ένα κλειστό πολύγωνο, που προσομοιάζει τον πραγματικό χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος.
  - PTC Mesh Density: Η πυκνότητα χρησιμοποιείται για να ορίσει το επιθυμητό μέσο μήκος της πλευράς των στοιχείων του πλέγματος, όταν αυτό δημιουργείται αυτόματα από το πρόγραμμα.
  - PTC Mesh: Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του πλέγματος, τριγωνικού ή τετραγωνικού ανάλογα με την επιλογή που έγινε κατά την δημιουργία του σχεδίου PTC.
  - PTC Data: Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων από εξωτερικά προγράμματα στο ArgusONE.
  - Maps: Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών.
  - PTC Output Graphs: Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία γραφικών για τα υδραυλικά ύψη και για τις συγκεντρώσεις από το επίπεδο PTC Data.
  - Rain: Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της διήθησης της βροχής στο ανώτερο στρώμα.
  - Bottom Elevation: Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του υψομέτρου στο κατώτερο στρώμα.
- Εκτός από τα επίπεδα που ήδη αναφέρθηκαν, δημιουργούνται και τα παρακάτω επίπεδα τα οποία περιέχουν πληροφορίες και σχετίζονται με τον αριθμό των στρωμάτων που έχουμε ορίσει. Κάποια από αυτά τα στρώματα που αναφέρονται στις οριακές συνθήκες περιέχουν μεταβλητές που σχετίζονται με τις διάφορες χρονικές περιόδους μελέτης. Για κάθε γεωλογικό στρώμα δημιουργούνται τα παρακάτω επίπεδα:
- Elevation L1: Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του υψομέτρου του στρώματος.
  - Conductivity L1: Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας. Περιέχει τρεις μεταβλητές, μια για κάθε διεύθυνση: xConductivity L1, yConductivity L1, and zConductivity L1.
  - Initial Heads L1: Αρχικές συνθήκες για την ροή (υδραυλικά ύψη).
  - Storativity L1: Αποθηκευτικότητα.
  - BC Flow L1: Οριακές συνθήκες για την ροή. Αυτό το επίπεδο περιέχει δύο ή περισσότερες μεταβλητές: BC Type L1 και BC Stress[j]. Ο δείκτης j σχετίζεται με τον αριθμό των χρονικών περιόδων μελέτης. Η μεταβλητή BC Type μπορεί να έχει την τιμή 1 ή 2, όπου το 1 αντιπροσωπεύει οριακή συνθήκη τύπου 1 (Dirichlet), δηλαδή σταθερό υδραυλικό ύψος και το 2 οριακή συνθήκη τύπου 2, δηλαδή σταθερή ροή.
  - Dispersivity L1: Διασπορά. Περιέχει τρεις μεταβλητές, μια για κάθε διεύθυνση: xDispersivity L1, yDispersivity L1, zDispersivityL1.
  - Porosity L1: Πορώδες.
  - Adsorption L1: Προσρόφηση. Περιέχει τρεις μεταβλητές: alpha, beta και gamma.
  - Initial Concentration L1: Αρχικές συνθήκες μεταφοράς ρύπου (συγκεντρώσεις).
  - BC Transport L1: Οριακές συνθήκες για την μεταφορά ρύπου. Αυτό το επίπεδο περιέχει δύο ή περισσότερες μεταβλητές: BC Type L1 και BC Stress[j]. Ο δείκτης j σχετίζεται με τον αριθμό των χρονικών περιόδων μελέτης. Η μεταβλητή BC Type μπορεί να πάρει τιμή 1 ή 2, όπου με 1 αντιπροσωπεύει οριακή συνθήκη τύπου 1 δηλαδή συγκεκριμένη τιμή συγκέντρωσης σε κάποιον κόμβο (Dirichlet) και με 2 σταθερή συγκέντρωση του ρύπου στο εισερχόμενο νερό.
  - BC Leakage L1: Οριακές συνθήκες για διαρροή. Αυτό το επίπεδο έχει τρεις μεταβλητές: Reference\_h\_L1, Conductance\_L1, Reference\_c\_L1.

Τέλος δημιουργούνται δύο ακόμη επίπεδα. Αυτά τα επίπεδα εμφανίζονται στο τέλος της λίστας των επιπέδων και δεν επηρεάζονται από τον αριθμό των γεωλογικών στρωμάτων που έχουν οριστεί:

- PTC xvelocities: Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της Vx συνιστώσας της ταχύτητας που προσδιορίστηκε από το PTC στην περιοχή μελέτης.
- PTC yvelocities: Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της Vy συνιστώσας της ταχύτητας που προσδιορίστηκε από το PTC στην περιοχή μελέτης

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, τα βήματα για την εισαγωγή δεδομένων στο PTC και την αξιολόγηση του μοντέλου συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Εκκίνηση του ArgusONE, κι επιλογή New PTC Project από το μενού PIEs.
- 2) Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, δίνεται στο χρήστη πληθώρα επιλογών. Οι κυριότερες είναι ο τύπος του πλέγματος (τριγωνικό ή τετραγωνικό), και ο αριθμός των γεωλογικών στρωμάτων (layers) του μοντέλου.
- 3) Στην επόμενη καρτέλα επιλέγονται οι παράμετροι ελέγχου, όπως το μέγεθος και ο αριθμός των χρονικών βημάτων, καθώς και επιλέγεται από το χρήστη εάν θα υπολογιστεί και η μεταφορά ρύπων, η ταχύτητα και η ροή. Μετά την επιλογή των παραπάνω, κλείνει το παράθυρο και επιστρέφει στο κεντρικό παράθυρο του ArgusONE.
- 4) Έχοντας δημιουργήσει τη βάση του μοντέλου, ο χρήστης εισάγει πλέον δεδομένα στα κατάλληλα επίπεδα πληροφοριών (layers), είτε χειροκίνητα, εισάγοντας τις κατάλληλες τιμές εάν υπάρχει ομοιογένεια στο επίπεδο, είτε χειροκίνητα σχεδιάζοντας σχήματα. Επίσης, μπορεί να γίνει χρήση αρχείων κειμένου (text files), αρχείων DXF και αρχείων shapefile SHP. Τέλος, γίνεται προσδιορισμός της επιθυμητής πυκνότητας του πλέγματος.
- 5) Δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Στο layer ptc mesh γίνεται χρήση του μαγικού ραβδιού, και το πρόγραμμα λαμβάνοντας υπόψιν την επιθυμητή πυκνότητα, το περίγραμμα και τα σημεία που έχουμε εισάγει δημιουργεί το πλέγμα. Γίνεται κατόπιν έλεγχος τα σημεία όπου έχουμε άντληση ή εισαγωγή νερού να είναι πάνω σε κόμβο.
- 6) Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία του πλέγματος, πρέπει να γίνει βελτιστοποίηση της αρίθμησης των κόμβων για μείωση του χρόνου εκτέλεσης και του φόρτου στον επεξεργαστή, επιλέγοντας από το μενού Special την επιλογή renumber, και φροντίζοντας να είναι επιλεγμένη η επιλογή Optimize Bandwidth. Τέλος, επιλέγοντας το layer PTC Mesh, επιλέγουμε PIEs -> run PTC, και το πρόγραμμα ξεκινά την προσομοίωση.

## **Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο PTC**

Η εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο PTC έγινε μέσω του προγράμματος ArgusONE, και τις επεκτάσεις του μοντέλου PTC PIE. Οι μονάδες μέτρησης είναι οι ίδιες σε όλα τα πεδία. Για το μήκος χρησιμοποιήσαμε μέτρα (m), για το χρόνο ημέρες (d). Όπου είχαμε άλλες μονάδες, μετατράπηκαν στις προαναφερθείσες. Επίσης, για λόγους συμβατότητας με το ArgusONE, φροντίσαμε τα αρχεία shp που δημιουργήθηκαν εκ των προτέρων στη σουίτα λογισμικού ArcGIS, και πιο συγκεκριμένα τα πεδία στους αντίστοιχους πίνακες ιδιοτήτων των αρχείων αυτών να είναι της μορφής double (μεταβλητές διπλής ακρίβειας), η ακρίβεια πήρε την τιμή 14 και η κλίμακα την τιμή 7. Αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό να ισχύει σε όλα τα αρχεία



shapefile ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια των δεδομένων κατά την μεταφορά τους στο ArgusONE.

#### 1) Αρχικές ρυθμίσεις

Εκκινώντας το πρόγραμμα, επιλέγουμε από το μενού PTEs την επιλογή New PTC Project. Κατά την επιλογή αυτή εμφανίζεται το παράθυρο που προσδιορίζει τις αρχικές παραμέτρους του μοντέλου (PTC Configuration):

PTC Configuration

General | Stresses

Project title: Chania Plain PTC

Mesh type  
☒ Triangular  
☐ Quadrilateral

Physical properties  
Molecular diffusion: 0.0001  
Upstream weight: 1

☐ Biodegradation  
Dissolved phase: 0.5  
Sorbed phase: 1

☒ Use water table  
Number of iterations for watertable: 50  
Convergence criterion: 0.0001

☐ Radioactive decay  
Radioactive decay: 0  
Steady state criterion: 0.001

Number of layers: 3

Layer number
1
2
3

Insert Layer  
Delete Layer

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

OK Cancel

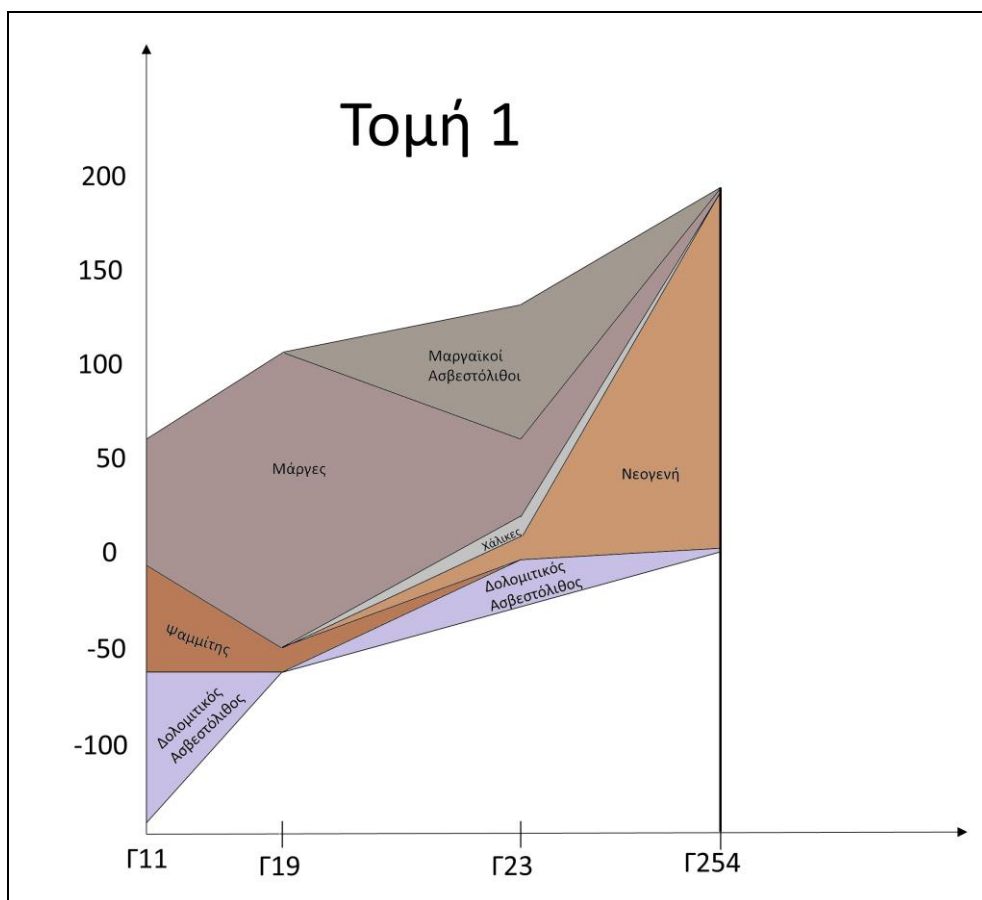
Εικόνα 4.5: Η πρώτη καρτέλα του παραθύρου PTC configuration.

Για να προσδιοριστεί ο αριθμός των επιπέδων, έπρεπε πρώτα να δημιουργηθούν τομές στο πεδίο μελέτης για να ληφθεί πιο ολοκληρωμένη εικόνα του υπεδάφους. Έτσι, προσδιορίστηκαν 6 τομές, οι τρεις από βορρά προς νότο και οι υπόλοιπες από δύση προς ανατολή.

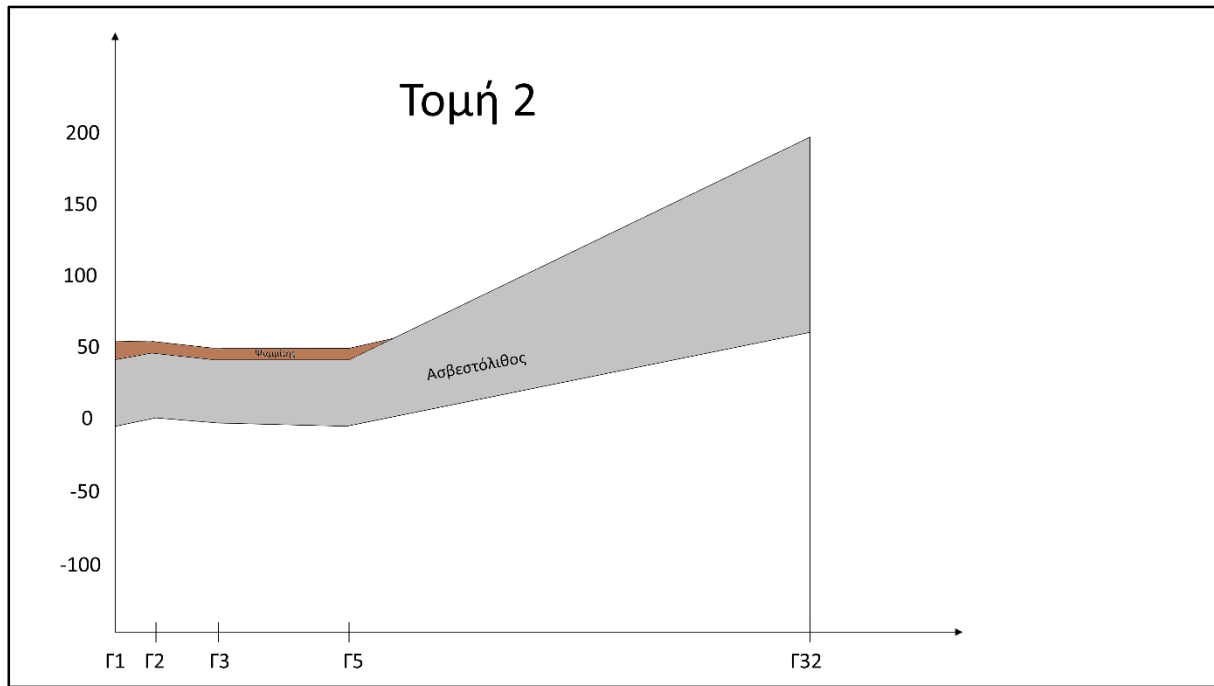


Εικόνα 4.6: Οι γεωλογικές τομές στο πεδίο μελέτης

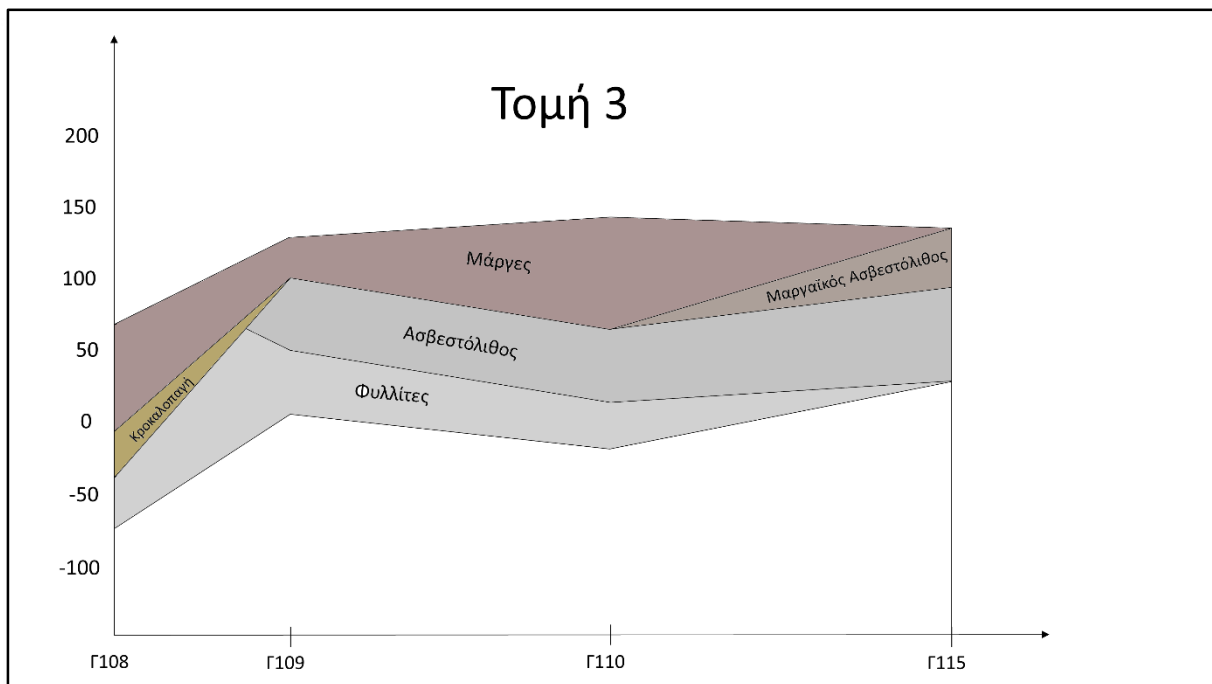
Οι παραπάνω τομές δημιουργήθηκαν λαμβάνοντας υπόψιν τα υπάρχοντα δεδομένα, και συγκεκριμένα για ποιες γεωτρήσεις υπήρχαν τομές. Κατόπιν, έχοντας τα στοιχεία αυτά, δημιουργήθηκαν γραφικές αναπαραστάσεις των τομών αυτών.



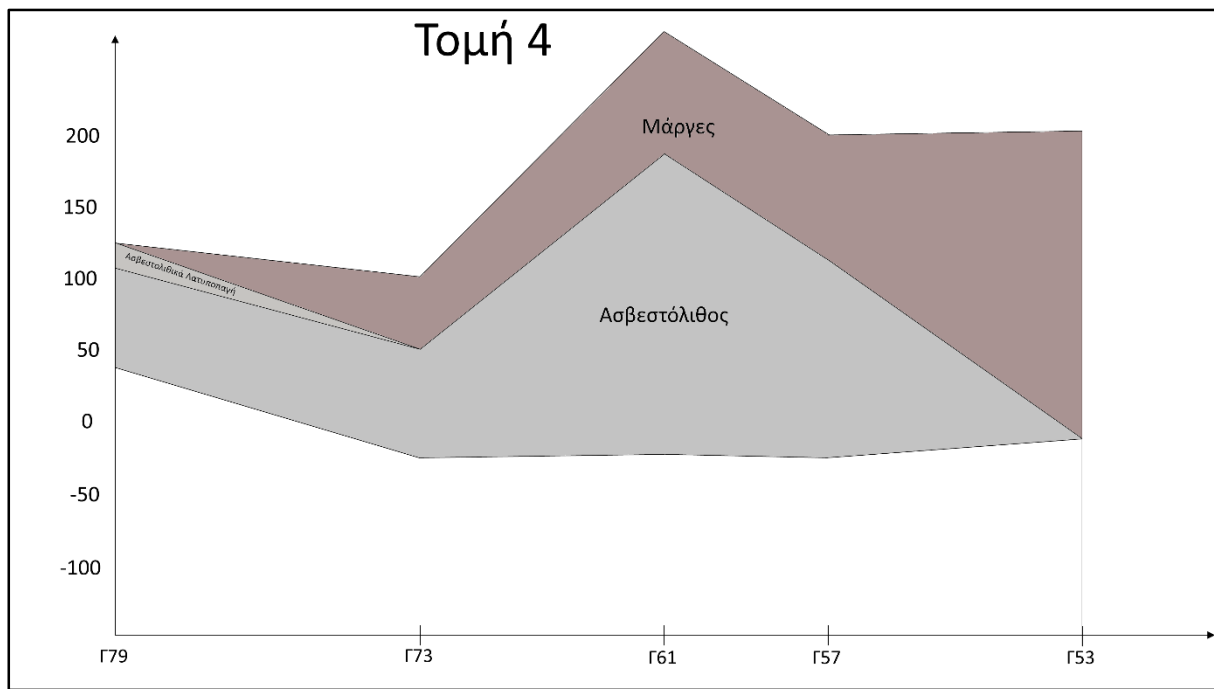
Εικόνα 4.7: Τομή 1 (Βόρεια -> Νότια)



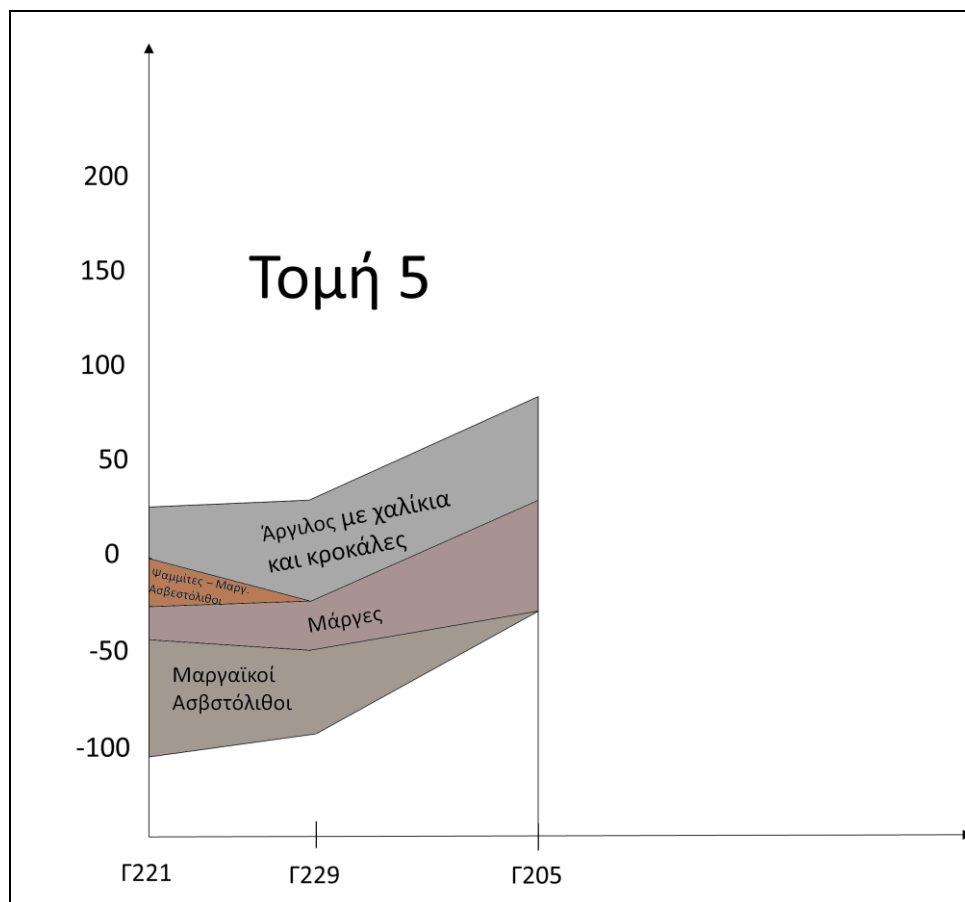
Εικόνα 4.8: Τομή 2: (Δυτικά -> Ανατολικά)



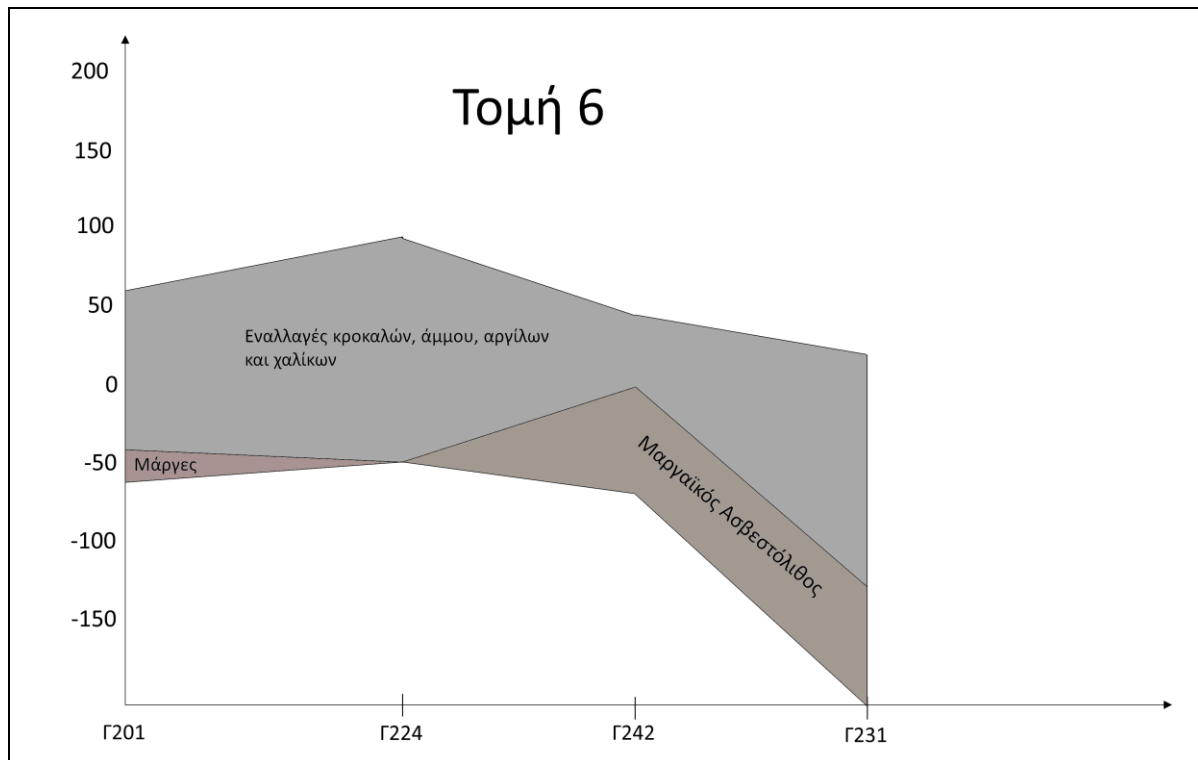
Εικόνα 4.9: Τομή 3 (Βόρεια -> Νότια)



Εικόνα 4.10: Τομή 4 (Δυτικά -> Ανατολικά)



Εικόνα 4.11: Τομή 5 (Βόρεια -> Νότια)



Εικόνα 4.12: Τομή 6 (Δυτικά -> Ανατολικά)

Η αναγκαιότητα διαχωρισμού σε τρία στρώματα έγκειται στο ότι στον Νομό Χανίων υπάρχουν μεγάλα στρώματα ασβεστόλιθου στα μεγαλύτερα βάθη του υπεδάφους, με μεγάλα υπερκείμενα στρώματα μαργών. Το τρίτο στρώμα είναι το επιφανειακό και αναπαριστά τους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στο νομό Χανίων. Στο τρίτο στρώμα έχουμε μεγάλη διαφοροποίηση γεωλογικών σχηματισμών ακριβώς επειδή τα ποσοστά μαργών και ασβεστόλιθου είναι πολύ μικρότερα απ' ότι στα μεγαλύτερα βάθη. Έτσι, το υπέδαφος διαχωρίστηκε σε 3 στρώματα στο πεδίο Number of Layers.

Επίσης, επιλέχθηκε τριγωνικό αντί τετραεδρικού πλέγματος, λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειάς του.

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω μεταβλητών κι επιλογών, προχωρούμε στη δεύτερη καρτέλα, όπου καθορίζεται το χρονικό βήμα και οι ιδιότητες αυτού (stress).



PTC Configuration

General Stresses

Stress	Flow	Velocity	Transport	Length
1	1	1	1	180
2	1	1	1	180
3	1	1	1	180
4	1	1	1	180

Insert Modify Delete

General control

☒ Do flow  
☒ Do velocity  
☒ Do transport  
☒ Use memory  
☒ Do mass balance

Time control

Total number of time steps: 40  
No. of flow time-steps reset: 20  
No. of flow time-steps no-change: 1  
No. of conc. time-steps per flow: 2  
Time-step multiplier: 1.5  
Total time: 180

Graphs control

Time step of first flow output: 1  
Output period flow: 5  
Time step of first conc. output: 5  
Output period conc.: 5

Number of stress periods: 4  
Total simulation time: 720

Graphics filenames for heads: heads  
Graphics filenames for concentrations: concs

OK Cancel

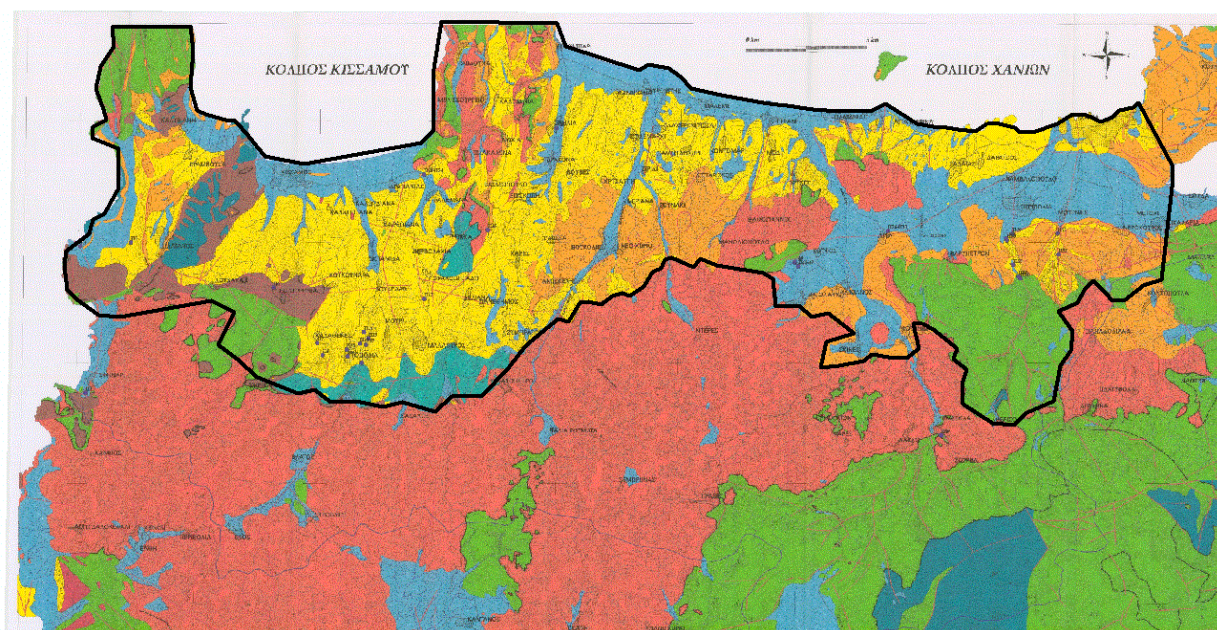
Εικόνα 4.13: Η καρτέλα stresses του παραθύρου PTC configuration.

Εισήχθησαν 4 χρονικά βήματα – stresses, λόγω των δεδομένων που είχαμε. Τα δεδομένα καλύπτουν χρονικές περιόδους από τον Απρίλιο του 1998 έως και τον Απρίλιο του 2000. Επίσης, τα βροχομετρικά δεδομένα υποδείκνυαν δύο περιόδους ανά έτος: μία ξηρή και μία υγρή, πράγμα που επιβάλλει τη δημιουργία ξεχωριστού stress για κάθε περίοδο.

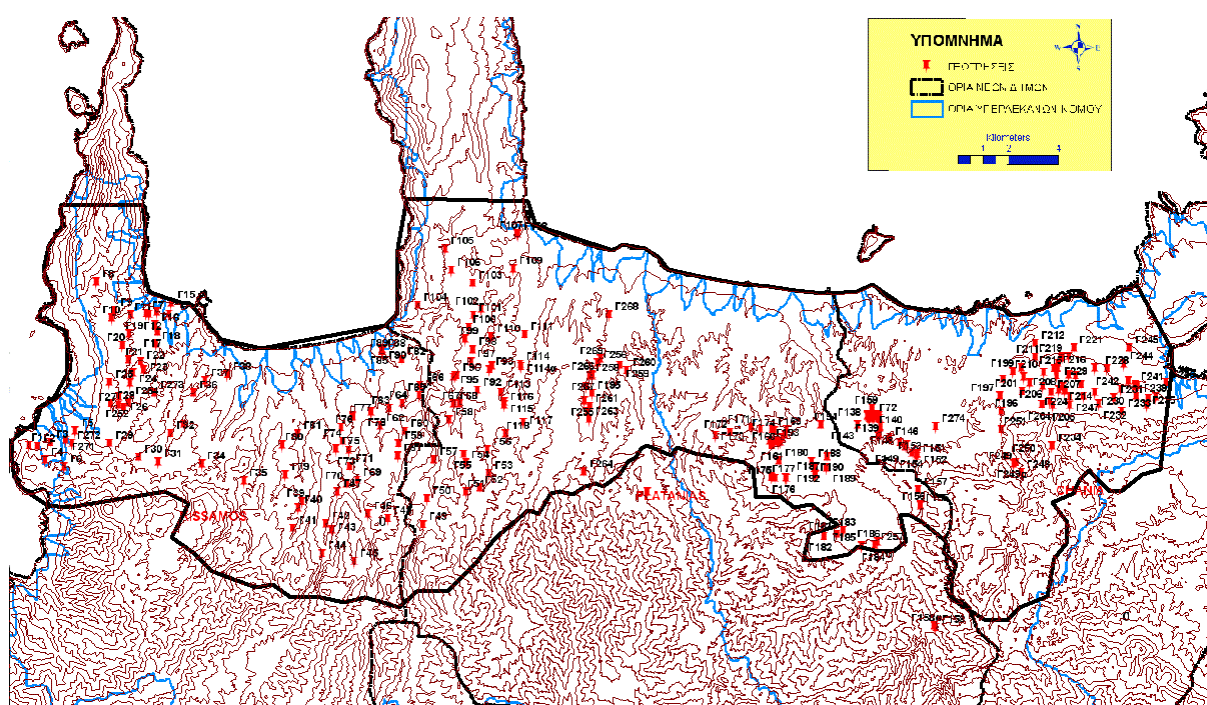
## 2) Εισαγωγή κύριων δεδομένων

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή του PTC Domain Outline, δηλαδή ουσιαστικά του πολυγώνου που προσδιορίζει την περιοχή μελέτης. Το πολύγωνο αυτό δημιουργήθηκε στο ArcGIS, περιμετρικά της περιοχής μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογία της περιοχής μελέτης (εικόνα 4.14) και στη συνέχεια αποθηκεύτηκε σε μορφή shapefile (.shp). Το αρχείο αυτό έπειτα εισάχθηκε στο layer PTC Domain Outline, επιλέγοντας File -> Import PTC Domain Outline -> Import Shape file...





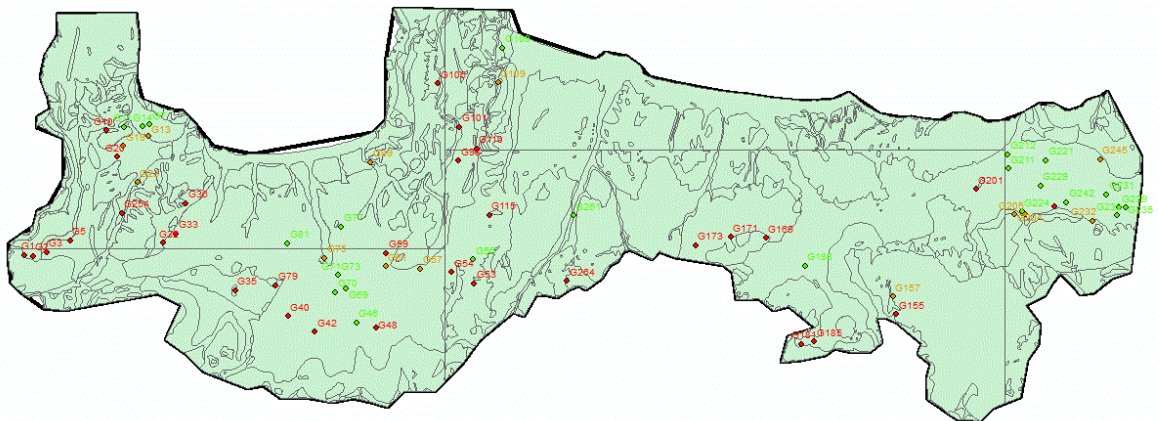
Εικόνα 4.14: Γεωλογικός Χάρτης του Ν. Χανίων και το πολύγωνο της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.15: Χάρτης των γεωτρήσεων με το πολύγωνο της περιοχής μελέτης.

Αφού έγινε εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων, δημιουργήθηκε ένα αρχείο shape file που περιγράφει τη γεωλογία της περιοχής, την υδραυλική αγωγιμότητα κάθε σχηματισμού και το πορώδες του, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη γεωλογία του ανώτερου στρώματος L3, καθώς για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης τα L1 και L2 θεωρήθηκαν ομοιογενή, με το L1 να αποτελείται από ασβεστόλιθο και το L2 από μάρμες.





Εικόνα 4.16: Χάρτης με πολύγωνα γεωλογικών σχηματισμών, και σημειακές απεικονίσεις γεωτρήσεων.

Κατόπιν εισήχθησαν τα δεδομένα για το υψόμετρο στα επίπεδα Elevation L1, L2 και L3, καθώς και το κατώτατο υψόμετρο (Bottom Elevation), με το τελευταίο να είναι 0. Αφού θεωρήσαμε τα 2 κατώτερα στρώματα ομοιογενή, θεωρήσαμε και σταθερό πάχος, άρα και το ύψος τους είναι σταθερό. Το υψόμετρο του L1 προσδιορίστηκε στα 50m, ενώ του L2 στα 80m. Για το L3 δημιουργήθηκε επίσης αρχείο shape file με ισοϋψείς καμπύλες.

Επόμενη παράμετρος είναι τα αρχικά υδραυλικά ύψη, τα οποία εισάγονται στο επίπεδο Initial Heads L1, L2 και L3. Στην προκειμένη περίπτωση, λόγω του αριθμού των γεωτρήσεων, δημιουργήσαμε αρχείο shape file με όλες τις γεωτρήσεις και το υδραυλικό ύψος του νερού. Έπειτα εισήχθησαν τα δεδομένα αυτά και στα 3 επίπεδα Initial Heads.

Μια ακόμα παράμετρος που εισάχθηκε είναι η βροχή. Το μέγεθος αυτό αναφέρεται όχι στη βροχόπτωση, αλλά στη διήθηση λόγω βροχόπτωσης, γι' αυτό θεωρούμε ποσοστό διήθησης 25% επί του μεγέθους βροχόπτωσης. Τα δεδομένα βροχόπτωσης λήφθηκαν από τη βάση μετεωρολογικών δεδομένων της Περιφέρειας Κρήτης για το μετεωρολογικό σταθμό στις Καλύβες και παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1 .

Πίνακας 4.1: Δεδομένα βροχόπτωσης (πηγή: Περιφέρεια Κρήτης)

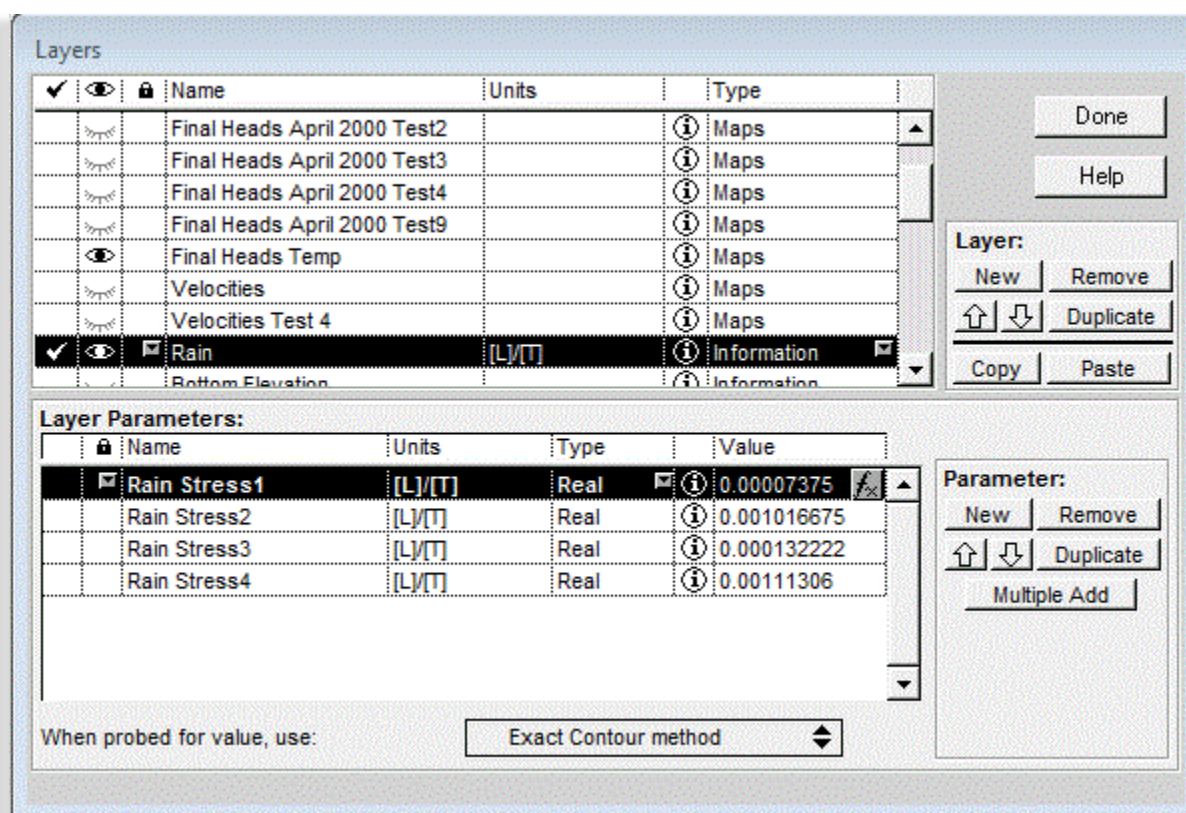
Stress 1	ΑΠΡ. 98	ΜΑΙ. 98	ΙΟΥΝ. 98	ΙΟΥΛ. 98	ΑΥΓ 98	ΣΕΠ. 98	Stress Total	Stress Average per day	Final Number
mm	17.5	35.6	0	0	0	0	53.1	0.295	
m	0.0175	0.0356	0	0	0	0	0.0531	0.000295	0.00007375

Stress 2	ΟΚΤ. 98	ΝΟΕ. 98	ΔΕΚ. 98	ΙΑΝ. 99	ΦΕΒ. 99	ΜΑΡ. 99	Stress Total	Stress Average per day	Final Number
mm	44.8	88.1	260.2	135.8029	112.403	90.7	732.0059715	4.0667	
m	0.0448	0.0881	0.2602	0.135803	0.112403	0.0907	0.732005971	0.004067	0.001016675

Stress 3	ΑΠΡ. 99	ΜΑΙ. 99	ΙΟΥΝ. 99	ΙΟΥΛ. 99	ΑΥΓ 99	ΣΕΠ. 99	Stress Total	Stress Average per day	Final Number
mm	34.5	12.2	5.1	0.5	1.2	41.7	95.2	0.528889	
m	0.0345	0.0122	0.0051	0.0005	0.0012	0.0417	0.0952	0.000529	0.000132222

Stress 4	ΟΚΤ. 99	ΝΟΕ. 99	ΔΕΚ. 99	ΙΑΝ. 00	ΦΕΒ. 00	ΜΑΡ. 00	Stress Total	Stress Average per day	Final Number
mm	0	152	225.8	220.5	112.403	90.7	801.4030303	4.452239	
m	0	0.152	0.2258	0.2205	0.112403	0.0907	0.80140303	0.004452	0.00111306

Αφού έχει προσδιοριστεί το μέγεθος διήθησης για κάθε χρονική περίοδο (stress), γίνεται εισαγωγή στο παράθυρο layers, στην επιλογή Rain (εικόνα 4.17).



Εικόνα 4.17: Εισαγωγή δεδομένων βροχής στο PTC.

### Οριακές Συνθήκες

Για τον υπολογισμό και την εκτέλεση του μοντέλου καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός οριακών συνθηκών. Αυτές εισάγονται στα layers BC Flow L1, L2 και L3.

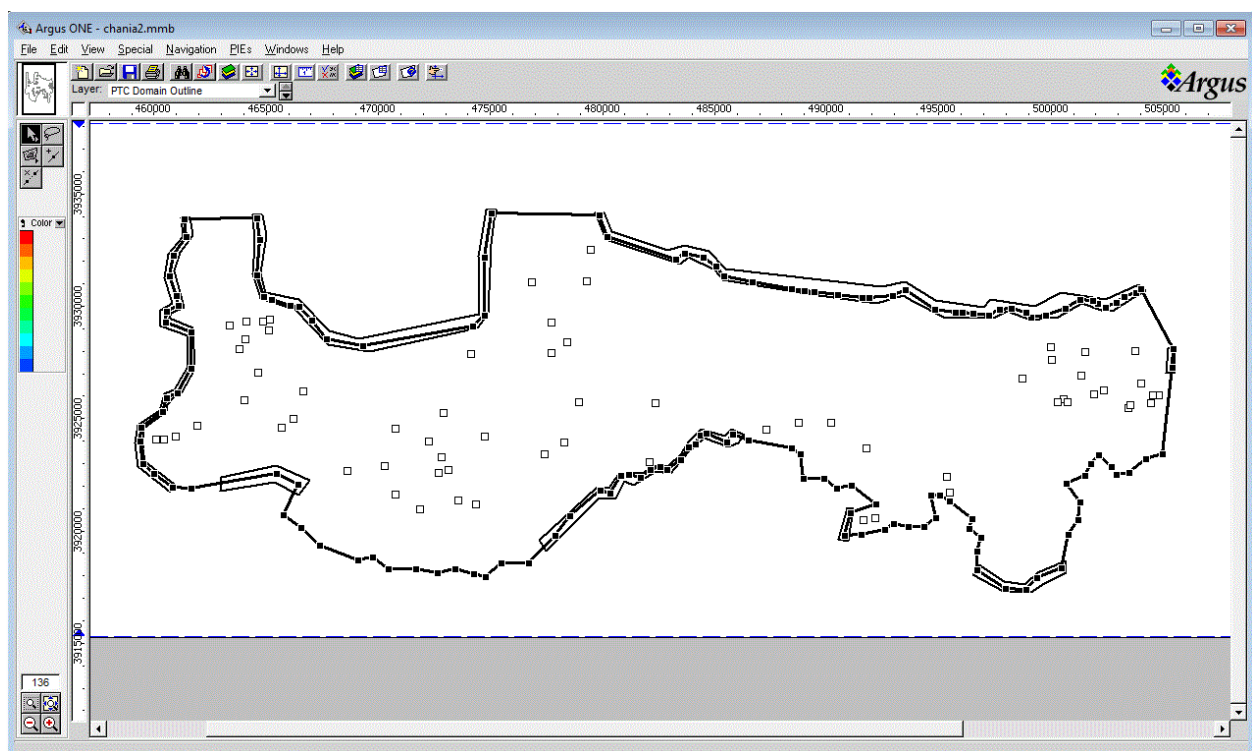
Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούμε είναι 2 τύπων: 1<sup>ου</sup> τύπου (σταθερό υδραυλικό ύψος) και 2<sup>ου</sup> τύπου (σταθερή ροή).

1<sup>ου</sup> Τύπου: Οι οριακές συνθήκες πρώτου τύπου στην παρούσα μελέτη είναι η στάθμη της θάλασσας. Λόγω του υπεδάφους και του βάθους του υδροφορέα, θεωρούμε ως υψόμετρο της θάλασσας τα 100m, για τις ανάγκες του μοντέλου. Τα υψόμετρα στα αντίστοιχα layers

έχουν τροποποιηθεί αντίστοιχα, προσθέτοντας 100μ στις τιμές. Για τον χωρικό προσδιορισμό των οριακών συνθηκών, επιλέγουμε το layer BC Flow L1, και σχεδιάζουμε ένα πολύγωνο στα άκρα της περιοχής μελέτης όπου υπάρχει θάλασσα, προσέχοντας να τέμνουμε μόνο μία σειρά τριγώνων του πλέγματος. Το πολύγωνο αυτό έπειτα αντιγράφεται και στα υπόλοιπα layers.

2<sup>ου</sup> τύπου: Οι οριακές συνθήκες δεύτερου τύπου στην παρούσα μελέτη είναι οι αντλούμενες γεωτρήσεις, καθώς και κάποια πολύγωνα που αναπαριστούν τη ροή νερού από το υπέδαφος, προερχόμενο έξω από το πεδίο μελέτης. Για τα πολύγωνα αυτά ακολουθήσαμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με τις οριακές συνθήκες πρώτου τύπου για τη θάλασσα, σχεδιάζοντας πολύγωνα λαμβάνοντας υπόψιν το υπέδαφος και τη διαπερατότητά του. Τα πολύγωνα αυτά αντιγράφηκαν και στα υπόλοιπα επίπεδα οριακών συνθηκών.

Και τα 2 είδη οριακών συνθηκών απεικονίζονται σχηματικά στην εικόνα 4.18.



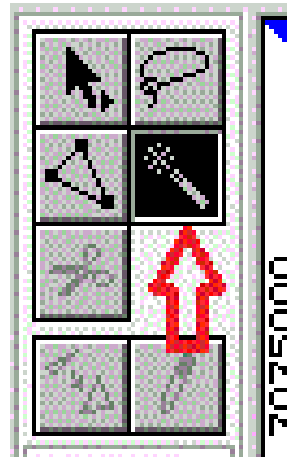
Εικόνα 4.18: Απεικόνιση των οριακών συνθηκών στο πεδίο μελέτης

Οι γεωτρήσεις κατανεμήθηκαν ανάλογα με το επίπεδο από το οποίο αντλούν, και τοποθετήθηκαν στα αντίστοιχα επίπεδα. Πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές άντλησης εδώ παίρνουν αρνητικό πρόσημο, διότι «αφαιρούν» νερό από το πεδίο μελέτης, ενώ οι οριακές συνθήκες έχουν θετική τιμή.

#### Σχεδιασμός Πλέγματος - PTC Mesh

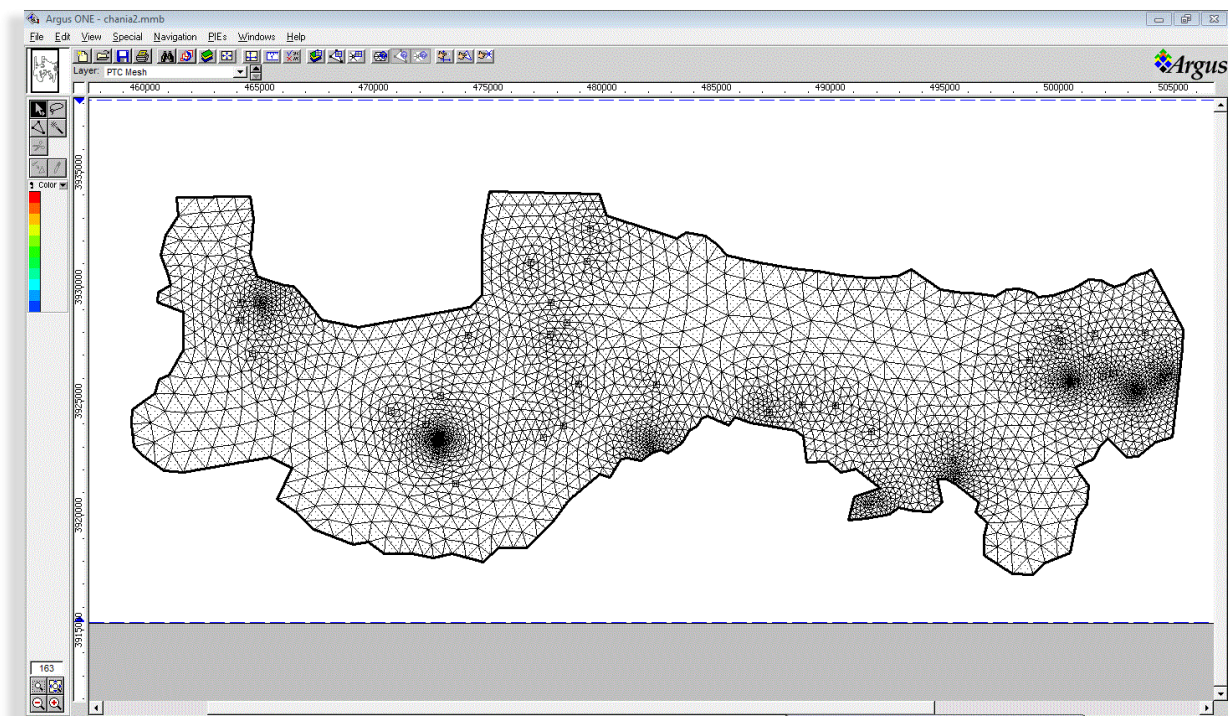
Ο σχεδιασμός του πλέγματος είναι το τελικό βήμα πριν την εκτέλεση του προγράμματος. Πρέπει να φροντίσουμε οι γεωτρήσεις μας να αντιγραφούν στο επίπεδο Domain Outline, ώστε το ArgusONE να τις λάβει υπόψη του κατά τη δημιουργία του πλέγματος και να σχεδιάσει κόμβο ακριβώς επάνω τους. Έτσι λοιπόν γίνεται αντιγραφή των γεωτρήσεων από τα επίπεδα BC Flow και επικολλώνται στο PTC Domain Outline. Ορίζεται πυκνότητα 1000 για το περίγραμμα και 250 για τις γεωτρήσεις, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έπειτα, επιλέγεται το επίπεδο PTC Mesh, και όντας ενεργό, επιλέγεται το «μαγικό ραβδί».





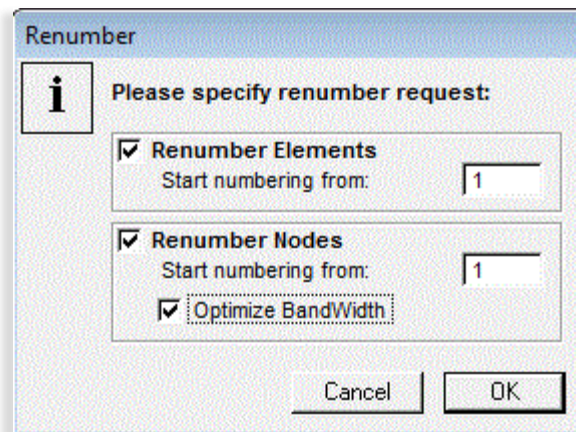
Εικόνα 4.19: Εργαλείο δημιουργίας πλέγματος.

Με το «μαγικό ραβδί» επιλεγμένο, κάνουμε κλικ μέσα στο πεδίο μελέτης, και το ArgusONE δημιουργεί το πλέγμα, το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 4.20.



Εικόνα 4.20: Το πλέγμα που δημιουργεί το PTC για την εκτέλεση του μοντέλου.

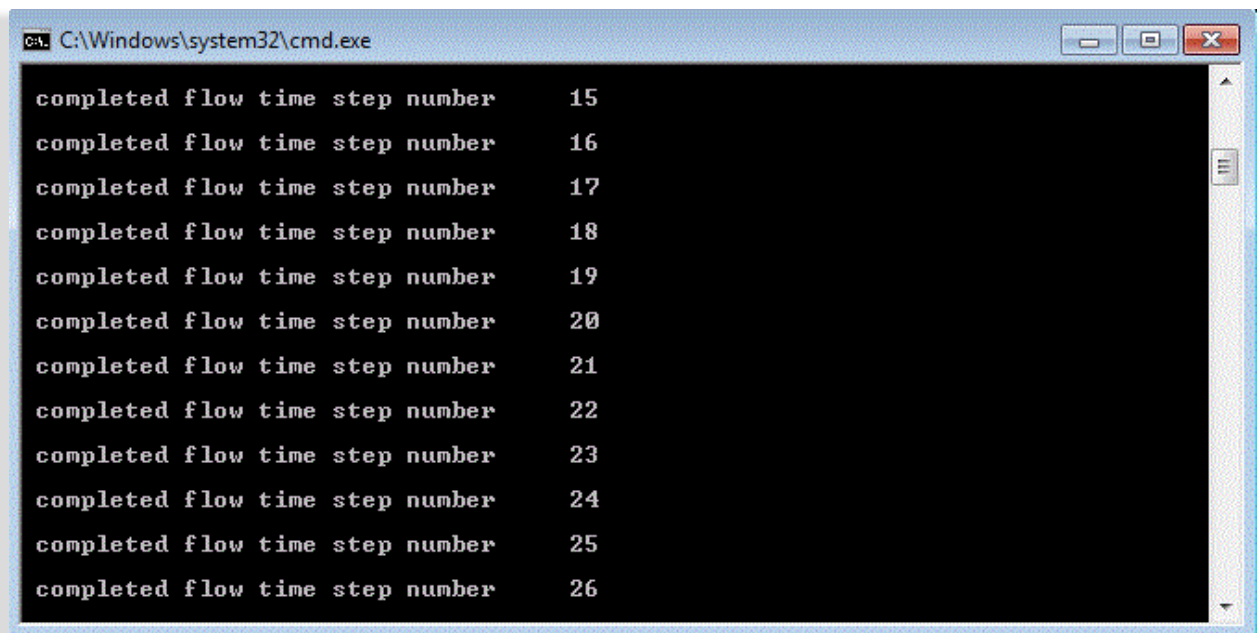
Στην προκειμένη περίπτωση δημιουργήθηκαν περίπου 6200 κόμβοι. Καθίσταται λοιπόν αναγκαία η σωστή αρίθμηση τους από το πρόγραμμα, για διευκόλυνση της επεξεργασίας, που επιτυγχάνεται με την επιλογή *renumber*, προσέχοντας να είναι επιλεγμένη η επιλογή *Optimize Bandwidth*.



Εικόνα 4.21: Επαναρίθμηση και βελτιστοποίηση εύρους

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο μεγάλος αριθμός των κόμβων καθιστά αναγκαίο το renumber, καθώς είναι πρακτικά αδύνατη η εκτέλεση του μοντέλου χωρίς αυτό.

Κατόπιν, αφού ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία της επαναρίθμησης, μπορεί πλέον να εκτελεστεί το PTC. Αυτό γίνεται επιλέγοντας ως ενεργό επίπεδο το PTC Mesh, μετά από το μενού PIEs επιλέγεται το Run PTC. Εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου όπου ζητείται ο προσδιορισμός του φακέλου εξαγωγής και το όνομα των αρχείων εξαγωγής. Το PTC κάνει χρήση του ονόματος αυτού για την ονομασία πολλαπλών αρχείων εξαγωγής. Κατόπιν, επιλέγοντας OK, το ArgusONE εξάγει τις πληροφορίες σε προσωρινά αρχεία, τα οποία μετά χρησιμοποιεί το PTC για εκτέλεση. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η σύντομη διαδικασία, εκτελείται το PTC σε παράθυρο MS-DOS.

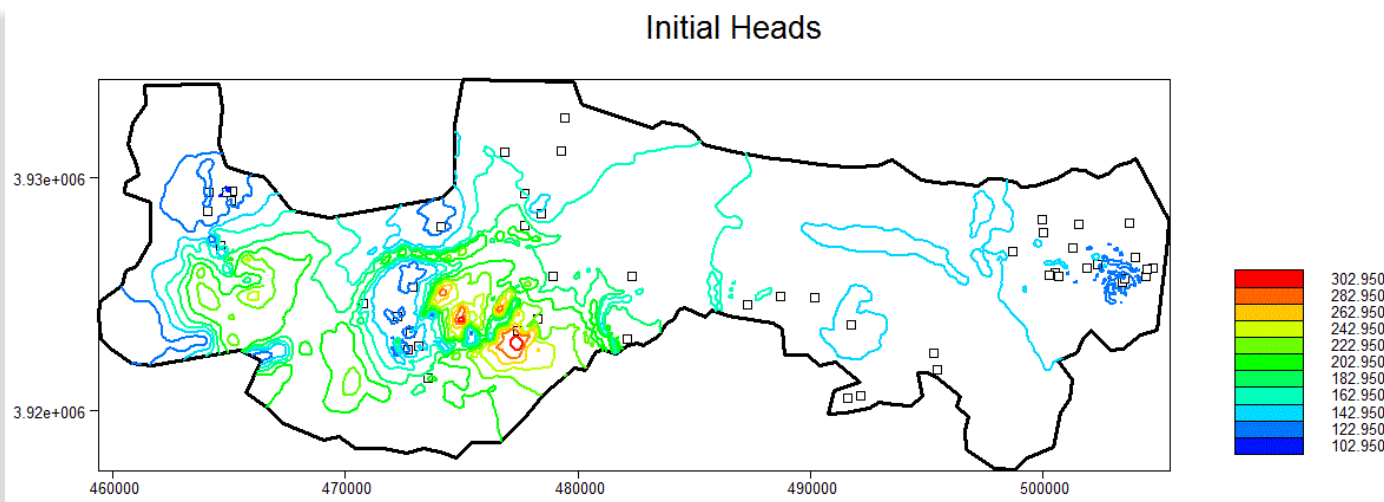


Εικόνα 4.22: Το παράθυρο εκτέλεσης του PTC.

## Βαθμονόμηση

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιείται ένα πλήθος επαναλήψεων του μοντέλου, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον στόχο της ανάλυσης, την πολυπλοκότητα του συστήματος το οποίο εξετάζεται και από τη διάρκεια της χρονικής περιόδου κατά την οποία υπάρχουν δεδομένα. Βασικά επιλέγεται μία συγκεκριμένη χρονική περίοδος και τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτήν χρησιμοποιούνται προς βελτίωση των αρχικών εκτιμήσεων. Οι εκτιμήσεις αυτές αφορούν τις εισροές και τις εκροές, τον καθορισμό των οριακών συνθηκών και τις ιδιότητες του υδροφορέα. Η βαθμονόμηση φτάνει στο τέλος της όταν επιτευχθεί μια ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου (Karanth, 1987).

Στην παρούσα μελέτη η βαθμονόμηση έγινε με βάση τα δεδομένα που έχουμε από τη μελέτη των Λιονή και Περλέρου (2001) για τον κάμπο Χανίων. Πιο συγκεκριμένα, λήφθηκαν τα δεδομένα στάθμης από τον Απρίλιο του 1998 ως αρχικές τιμές, για τις γεωτρήσεις που υπάρχουν δεδομένα για όλες τις περιόδους. Απορρίφθηκαν γεωτρήσεις για τις οποίες δεν υπάρχουν πλήρη δεδομένα στάθμης. Παρακάτω παρατίθενται διάγραμμα με τα αρχικά υδραυλικά ύψη, με δεδομένα από τον Απρίλιο του 1998 (εικόνα 4.23).



Εικόνα 4.23: Διάγραμμα αρχικών υδραυλικών υψών

Έπειτα εκτελέστηκε το PTC με τα αρχικά αυτά δεδομένα, για χρονικό διάστημα 2 ετών, χωρίζοντας το κάθε έτος σε υγρή (χειμερινή) και ξηρή (καλοκαιρινή) περίοδο, με την υγρή από Οκτώβριο έως και Μάρτιο και την ξηρή από Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο.

Κατόπιν, εισήχθησαν τα αποτελέσματα από τα αρχεία που δημιουργήσε το PTC στο ArgusONE, στο επίπεδο PTC data. Μετά την εισαγωγή, κι έχοντας εισάγει τα ονόματα των γεωτρήσεων, μπορούμε να δούμε το τελικό υδραυλικό ύψος της κάθε γεώτρησης, απλά πηγαίνοντας το ποντίκι ακριβώς πάνω από την γεώτρηση.

Βρίσκοντας την τιμή του υδραυλικού ύψους, έγινε καταγραφή όλων των τιμών και συγκρίθηκαν με τα καταγεγραμμένα υδραυλικά ύψη από τα δεδομένα καταγραφής της μελέτης των Λιονή και Περλέρου (2001). Κατόπιν, για την ακρίβεια του μοντέλου υπολογίστηκε το Root Mean Square Error (RMSE), ακολουθώντας τον τύπο 4.1:



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}$$

(4.1)

Όπου:

$n$  = Ο αριθμός των σημείων (γεωτρήσεων)

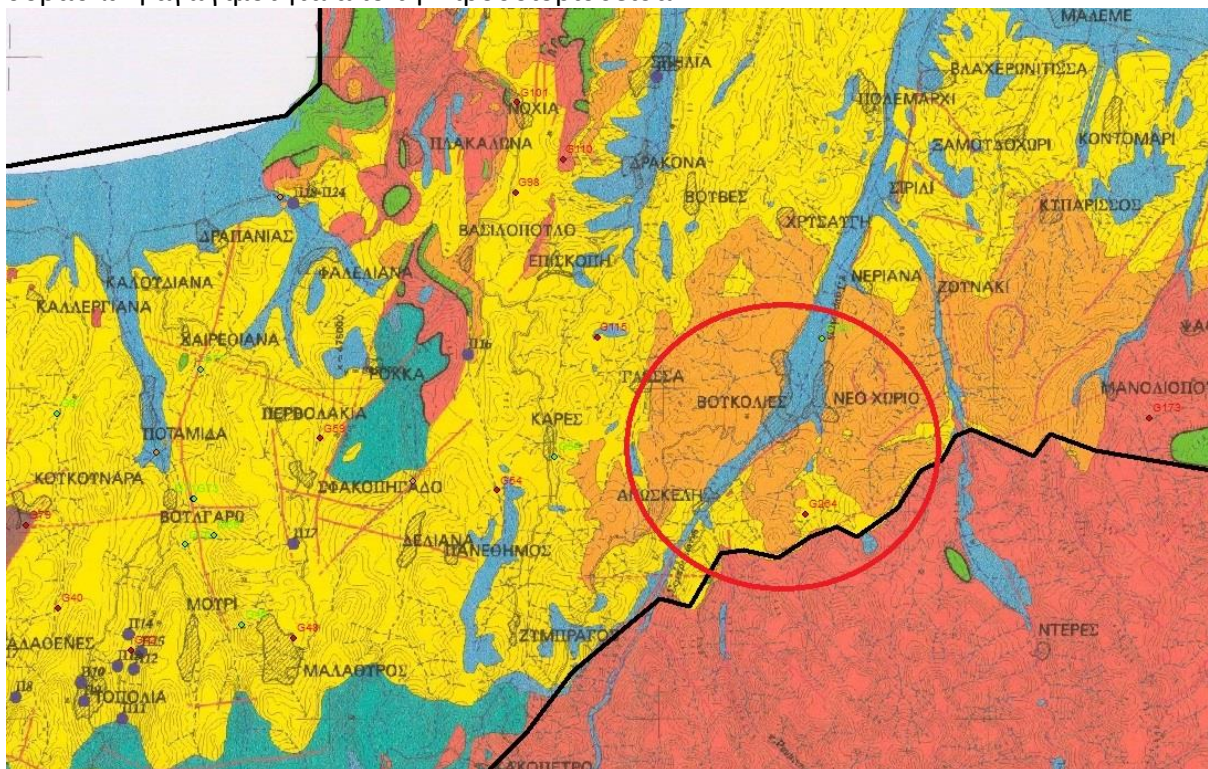
$y_j$  = δεδομένο καταγραφής (πραγματικό)

$\hat{y}_j$  = δεδομένα μοντέλου (υπολογισμένο)

Είναι επιθυμητό το αποτέλεσμα να είναι κοντά στο 0, για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, έπειτα από την εκτέλεση του μοντέλου, διαπιστώθηκε ότι κάποιες γεωτρήσεις δεν συνέπιπταν με τα αναμενόμενα αποτελέσματα, με αποτέλεσμα να υπάρχει αυξημένο ολικό σφάλμα, πράγμα μη αποδεκτό. Η εξήγηση για την απόκλιση αυτή είναι ότι οι γεωτρήσεις αυτές αντλούν από άλλο υδροφορέα από τον μελετώμενο, πράγμα σχετικά αναμενόμενο λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής μελέτης, αλλά και των ποικίλων γεωλογικών σχηματισμών που επιτρέπουν το σχηματισμό πολλαπλών υπόγειων υδροφορέων. Ο νομός Χανίων έχει πολυάριθμους υδροφορείς οι οποίοι για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας συνυπολογίστηκαν ως ένας, κυρίως λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής μελέτης. Δεδομένου των παραπάνω, είναι αναμενόμενο κάποιες γεωτρήσεις να αντλούν από περιορισμένους ή ανεξάρτητους υδροφορείς, που δεν επηρεάζονται από το υπόλοιπο πεδίο.

Εκτός την αφαίρεση των γεωτρήσεων αυτών, διαπιστώθηκε χαμηλότερο υδραυλικό ύψος από το μετρούμενο στην περιοχή των Βουκολιών, η οποία περιοχή απεικονίζεται στην εικόνα 4.24. Όπως διαπιστώθηκε έπειτα από προσεκτικότερη ανάλυση, η αιτία ήταν χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα από την προσδιορισθείσα.

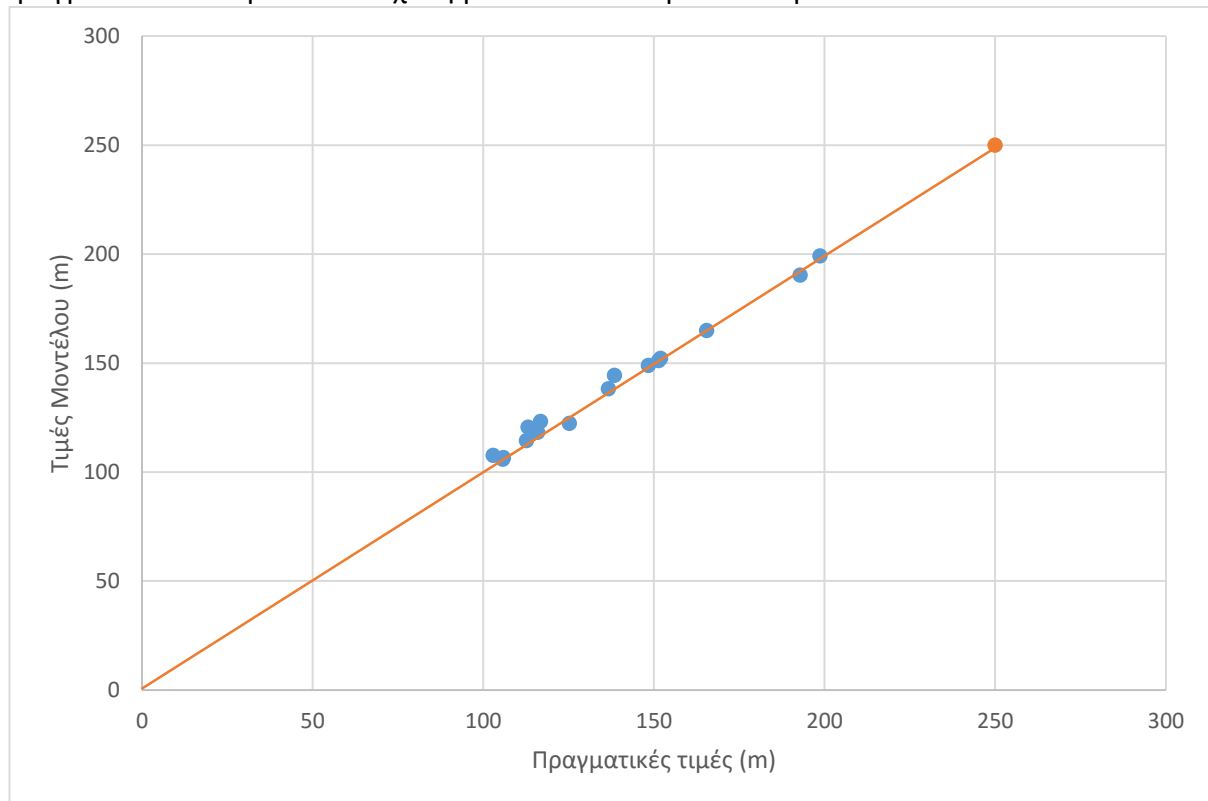


Εικόνα 4.24: Περιοχή χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας



Έτσι, στα πετρώματα αυξήθηκε η υδραυλική αγωγιμότητα μέχρι τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν τις μετρούμενες στάθμες. Στο πέτρωμα τύπου Π2 η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας αυξήθηκε από 0.15 σε 20 m/day, τιμή μέσα στο αποδεκτό εύρος για το συγκεκριμένο πέτρωμα. Επίσης, στο διπλανό πέτρωμα τύπου Π3 η υδραυλική αγωγιμότητα αυξήθηκε από 0.015 σε 5 m/day, που είναι σημαντική αύξηση, αλλά πάλι μέσα στα προσδιοριζόμενα όρια του τύπου πετρώματος.

Με τις παραπάνω αλλαγές τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης πλησιάζουν τα μετρούμενα δεδομένα στάθμης τόσο ώστε το RMSE είναι σε αποδεκτή τιμή. Η τιμή του RMSE που υπολογίστηκε είναι 3.38. Στο παρακάτω διάγραμμα έχει γίνει απεικόνιση των πραγματικών δεδομένων σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Εικόνα 4.25: Σχηματική απεικόνιση των πραγματικών τιμών στάθμης σε σχέση με τις τιμές του μοντέλου.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι τα σημεία βρίσκονται κοντά στην ευθεία των 45 μοιρών, πράγμα που καταδεικνύει την ευστοχία του μοντέλου έπειτα από την αφαίρεση των προβληματικών γεωτρήσεων και τη διόρθωση της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

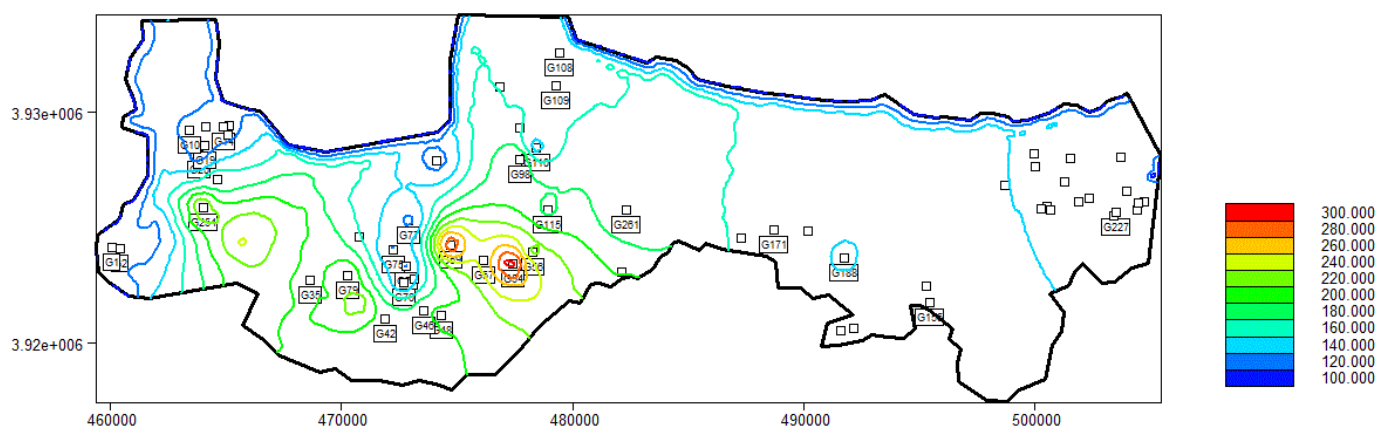
### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρώσει τη βαθμονόμηση και την ανάλυση ευαισθησίας, οδηγούμαστε στα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Το μοντέλο εκτελέστηκε για χρονικό διάστημα 2 ετών, με το κάθε έτος να χωρίζεται σε 2 χρονικές περιόδους, χειμερινή και καλοκαιρινή.

#### Θερινή Περίοδος (Απρίλιος – Σεπτέμβριος)

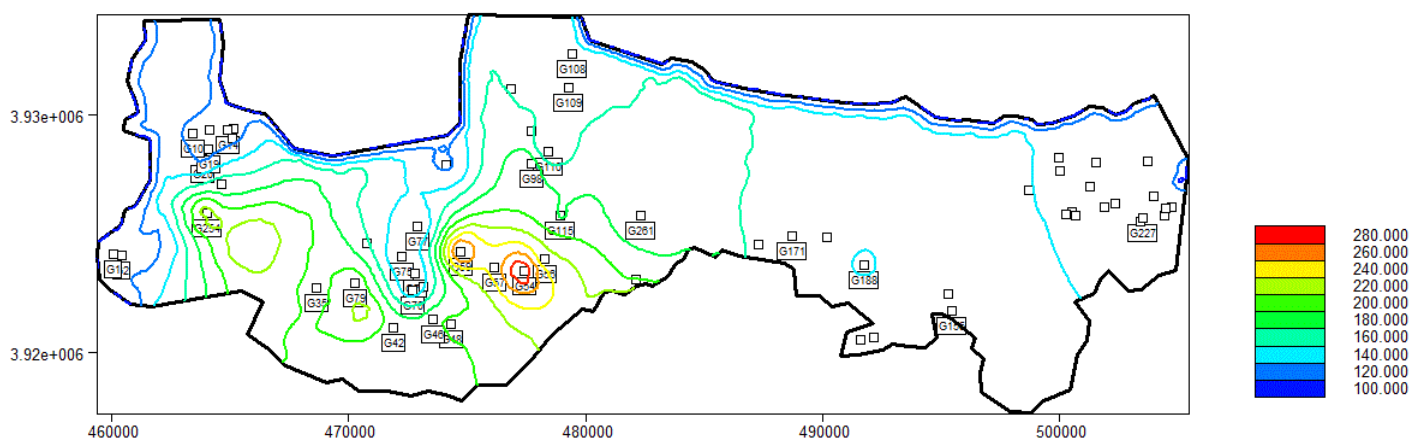
Κατά την καλοκαιρινή περίοδο παρατηρούνται οι παρακάτω γραμμές υδραυλικού ύψους (εικόνες 5.1 και 5.2):

#### Stress 1 Heads



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα υδραυλικών υψών 1<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

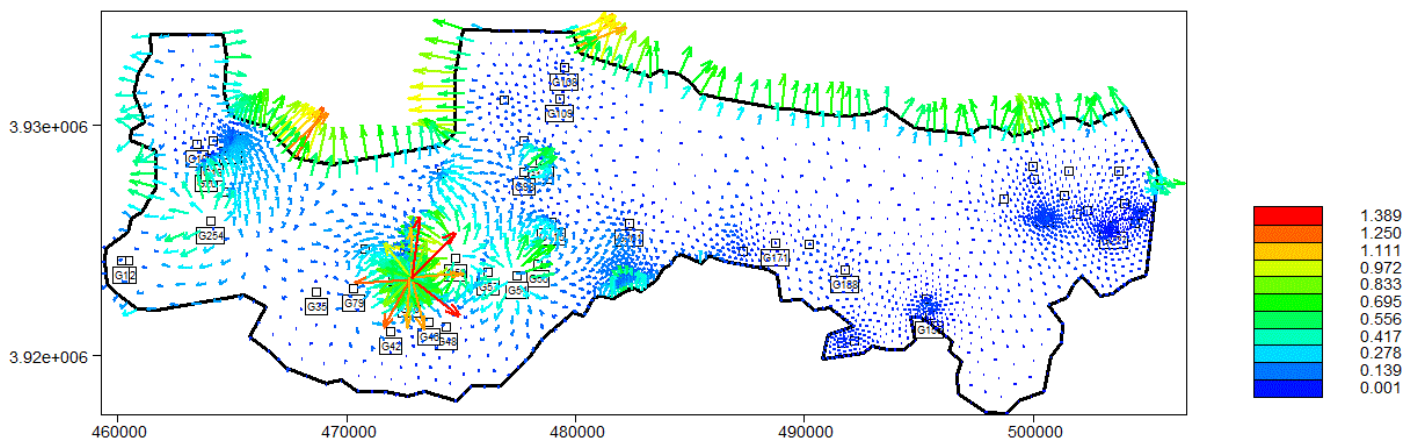
#### Stress 3 Heads



Εικόνα 5.2: Διάγραμμα υδραυλικών υψών 3<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

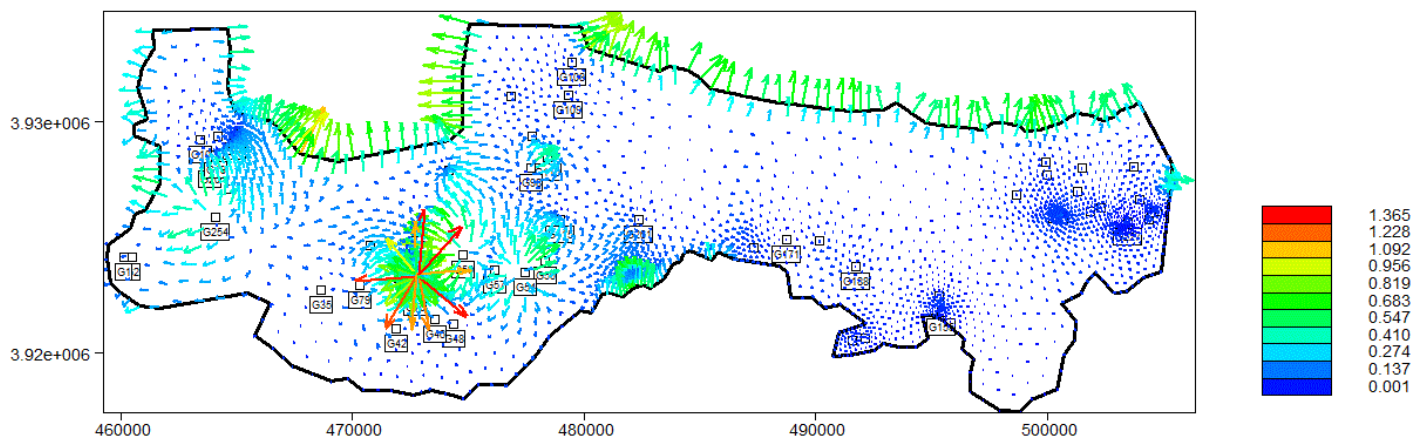
Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη με τα αρχικά, βλέπουμε ότι έχουν προσεγγιστεί ικανοποιητικά, με περαιτέρω εξομάλυνση των υδραυλικών γραμμών. Συγκεκριμένα, οι υψηλότερες στάθμες παρατηρούνται στις γεωτρήσεις Γ59 και Γ54, ενώ οι χαμηλότερες στάθμες στις γεωτρήσεις που βρίσκονται στο Καστέλλι Κισσάμου, Γ10, Γ14, Γ19 και Γ20. Οι ταχύτητες ροής παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα 5.3 και 5.4:

### Stress 1 Velocities



Εικόνα 5.3: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής 1<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

### Stress 3 Velocities



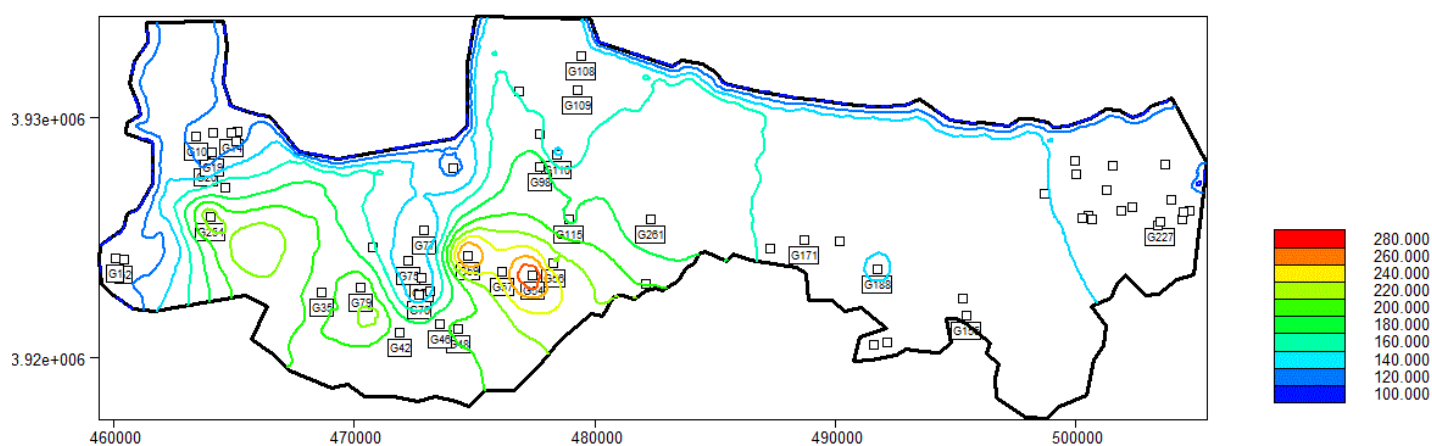
Εικόνα 5.4: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής 3<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

Παρατηρείται ομαλή ροή από τα ορεινά προς τη θάλασσα, όπως αναμενόταν, και υπάρχει έντονη εκφόρτιση στη θάλασσα. Συγκεκριμένα την θερινή περίοδο παρατηρείται αυξημένη ροή προς τα δυτικό κομμάτι του νομού, νοτιοανατολικά από το Καστέλλι, πράγμα που δεν παρατηρείται τη χειμερινή περίοδο. Αυτό έχει να κάνει με πτώση των υδραυλικών υψών στη γύρω περιοχή λόγω αντλήσεων, με συνέπεια την αύξηση της ροής για αναπλήρωση του αντλούμενου ύδατος.

### Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος – Μάρτιος)

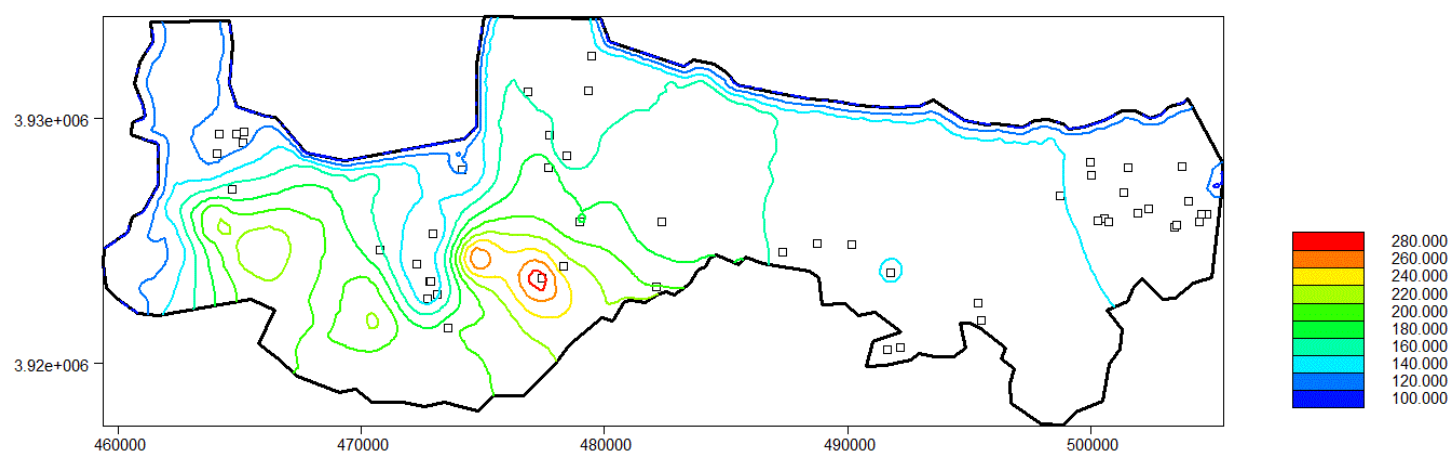
Κατά την χειμερινή περίοδο παρατηρούνται οι παρακάτω γραμμές υδραυλικού ύψους (εικόνες 5.5 και 5.6):

## Stress 2 Heads



Εικόνα 5.5: Διάγραμμα υδραυλικών υψών 2<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

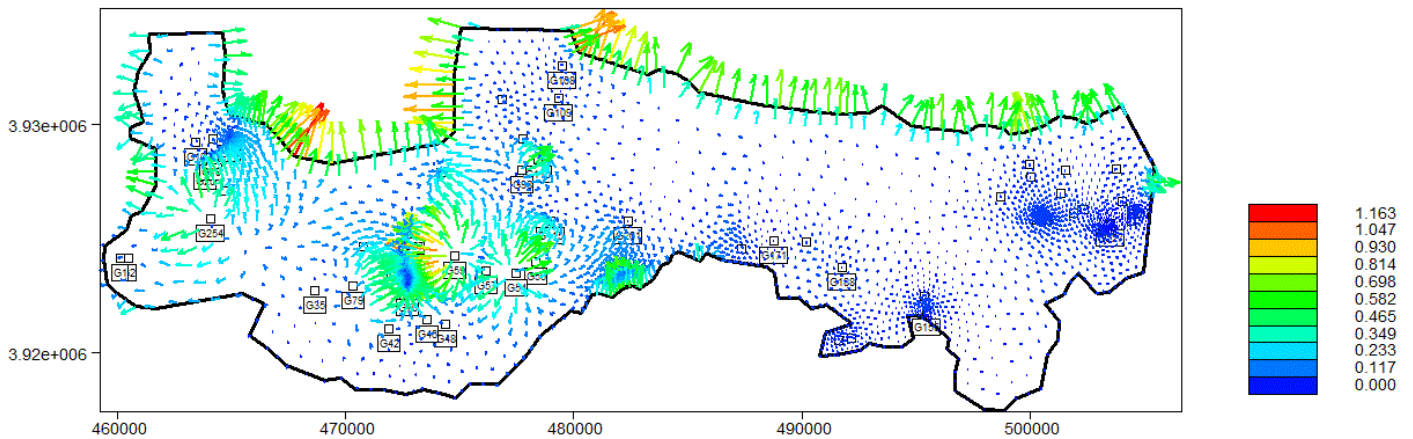
## Heads



Εικόνα 5.6: Διάγραμμα υδραυλικών υψών 4<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

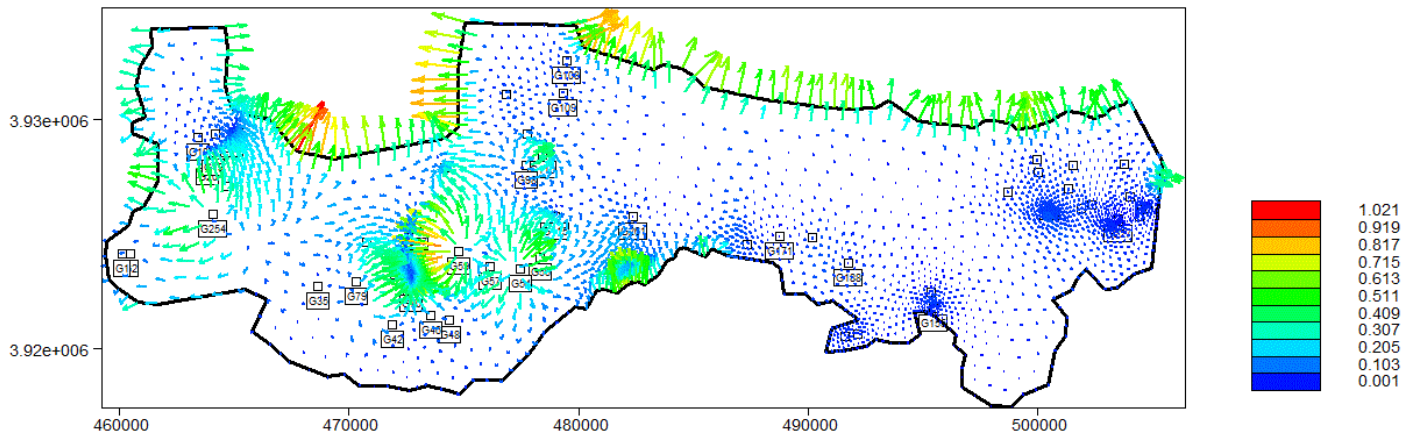
Το χειμώνα δεν έχουμε μεγάλη διαφοροποίηση στις στάθμες από τη θερινή περίοδο, εκτός από το σημείο που παρατηρήθηκε μεγαλύτερη ροή κατά τη θερινή περίοδο, στο οποίο στη χειμερινή έχουμε χαμηλότερη ροή, ακριβώς λόγω των πολύ χαμηλότερων αντλήσεων κατά την περίοδο εκείνη. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα ταχυτήτων 5.7 και 5.8.

### Stress 2 Velocities



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής 2<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

### Stress 4 Velocities



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής 4<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου

Εκτός από το παραπάνω, η εκφόρτιση στη θάλασσα συνεχίζει στα ίδια επίπεδα με την καλοκαιρινή περίοδο. Τα σημεία που παρατηρείται η υψηλότερη και χαμηλότερη στάθμη είναι τα ίδια, με μικρή απόκλιση από την καλοκαιρινή περίοδο. Στο υπόλοιπο κομμάτι της περιοχής μελέτης παρατηρείται χαμηλή κινητικότητα του ύδατος, ενώ γενικότερα παρουσιάζεται ανομοιογένεια της κυκλοφορίας του νερού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ - SENSITIVITY ANALYSIS

Οι σύγχρονοι υπολογιστικοί κώδικες που εξομοιώνουν φυσικά φαινόμενα συνήθως έχουν ως δεδομένα εισαγωγής ένα υψηλό αριθμό αριθμητικών παραμέτρων και φυσικών μεταβλητών, και επίσης εξάγουν ως αποτελέσματα εξισώσεις ή ποσότητες. Η ανάλυση ευαισθησίας ή αλλιώς sensitivity analysis είναι ένα ανεκτίμητο εργαλείο στη διάθεση του δημιουργού του μοντέλου. Οι πιο πρόσφατες μέθοδοι λαμβάνουν υπόψιν όλο το φάσμα διαφοροποιήσεων του μοντέλου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στη βαθμονόμηση και στην επιβεβαίωση του μοντέλου.

Στην παρούσα εργασία έχοντας κατασκευάσει υπολογιστικό μοντέλο για τον Κάμπο Χανίων με χρήση του PTC, λάβαμε δεδομένα στάθμης ως αποτέλεσμα εκτέλεσης του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορά το πόσο επηρεάζονται οι στάθμες αυτές από την αλλαγή κάποιων βασικών παραμέτρων εισόδου. Οι παράμετροι αυτοί που εξετάστηκαν ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα, οι τιμές των οριακών συνθηκών ροής, και τέλος οι τιμές άντλησης. Κάθε παράμετρος διαφοροποιήθηκε κατά 10 και 20%, τόσο αρνητικά όσο και θετικά. Έτσι χρειάστηκε να εκτελεστεί το μοντέλο 12 φορές επιπλέον για την ανάλυση ευαισθησίας, ακολουθώντας τα παρακάτω:

Επανάληψη 1: Υδραυλική Αγωγιμότητα +10%

Επανάληψη 2: Υδραυλική Αγωγιμότητα -10%

Επανάληψη 3: Υδραυλική Αγωγιμότητα +20%

Επανάληψη 4: Υδραυλική Αγωγιμότητα -20%

Επανάληψη 5: Οριακές Συνθήκες Ροής +10%

Επανάληψη 6: Οριακές Συνθήκες Ροής -10%

Επανάληψη 7: Οριακές Συνθήκες Ροής +20%

Επανάληψη 8: Οριακές Συνθήκες Ροής -20%

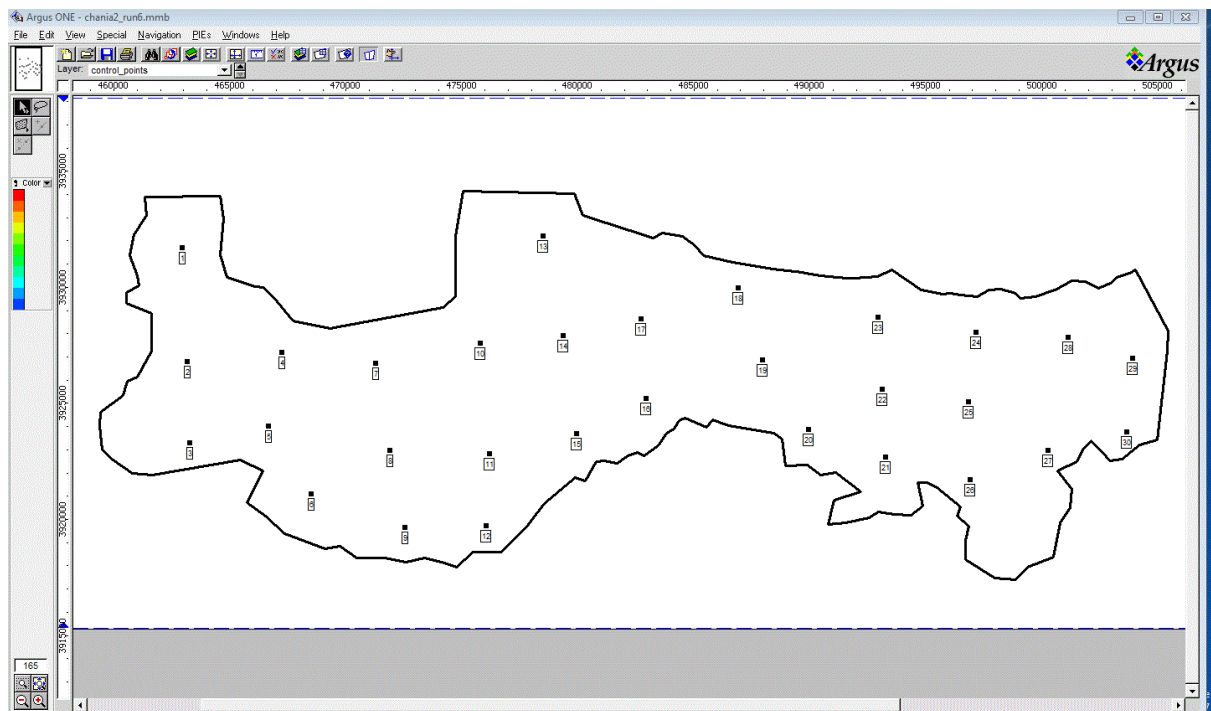
Επανάληψη 9: Παροχές Άντλησης +10%

Επανάληψη 10: Παροχές Άντλησης -10%

Επανάληψη 11: Παροχές Άντλησης +20%

Επανάληψη 12: Παροχές Άντλησης -20%

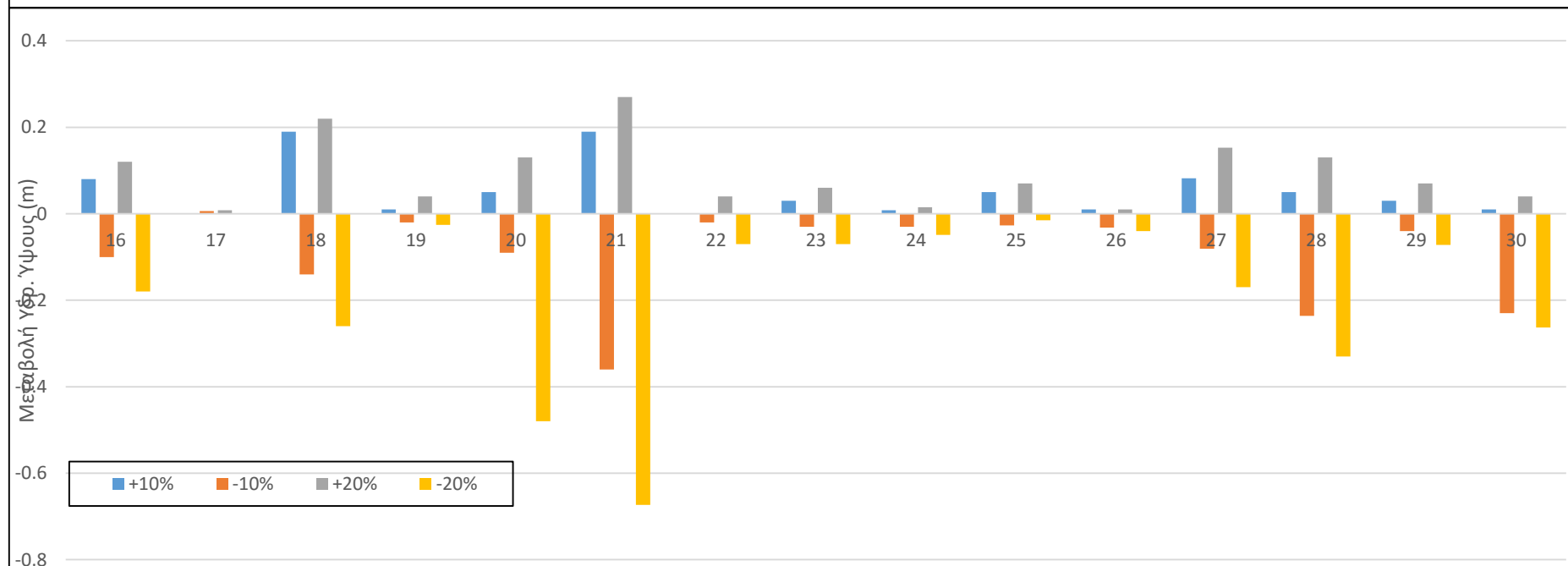
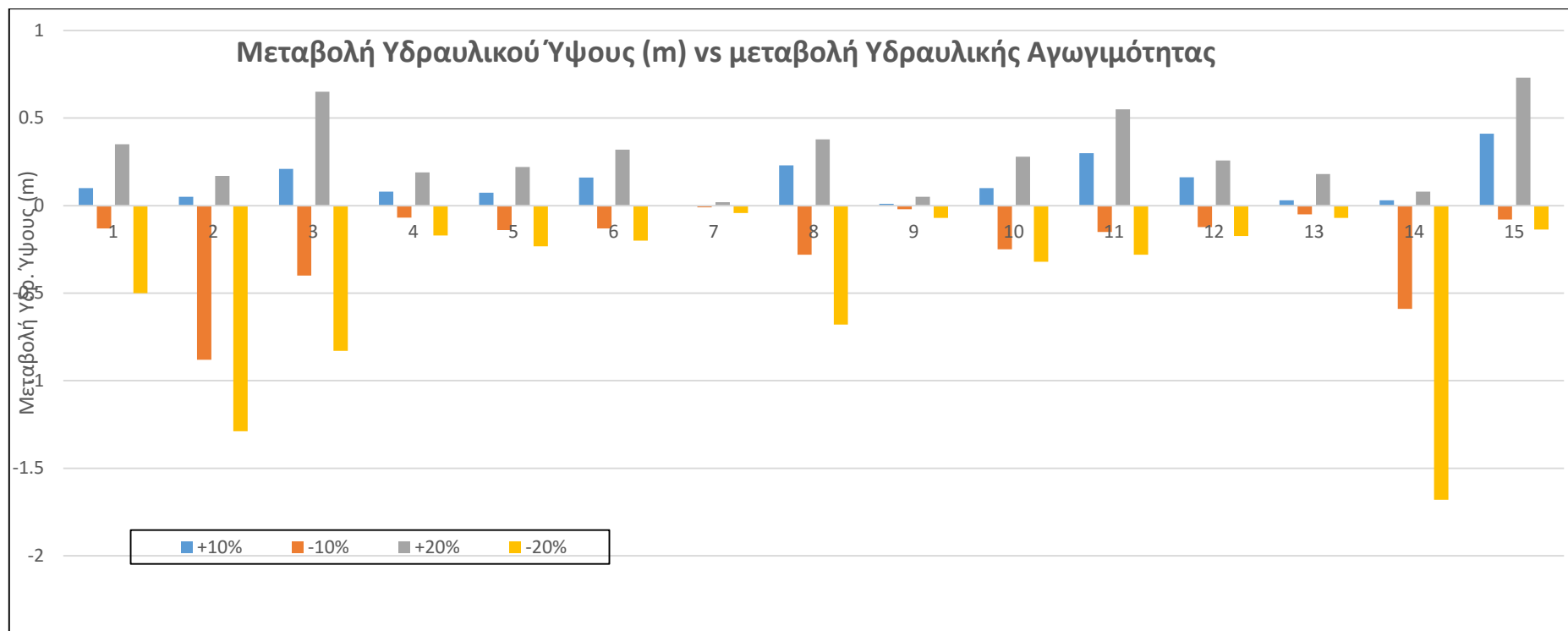
Έχοντας τον παραπάνω οδηγό, δημιουργήθηκαν 30 σημεία ελέγχου στην περιοχή μελέτης, διασκορπισμένα εξίσου σε όλη την περιοχή. Τα σημεία αυτά ήταν τα ίδια και για τις 12 επαναλήψεις, και δημιουργήθηκαν στο ArcGIS σε αρχείο shapefile. Έπειτα εισάχθηκαν στο ArgusONE ως ξεχωριστό επίπεδο πληροφοριών.



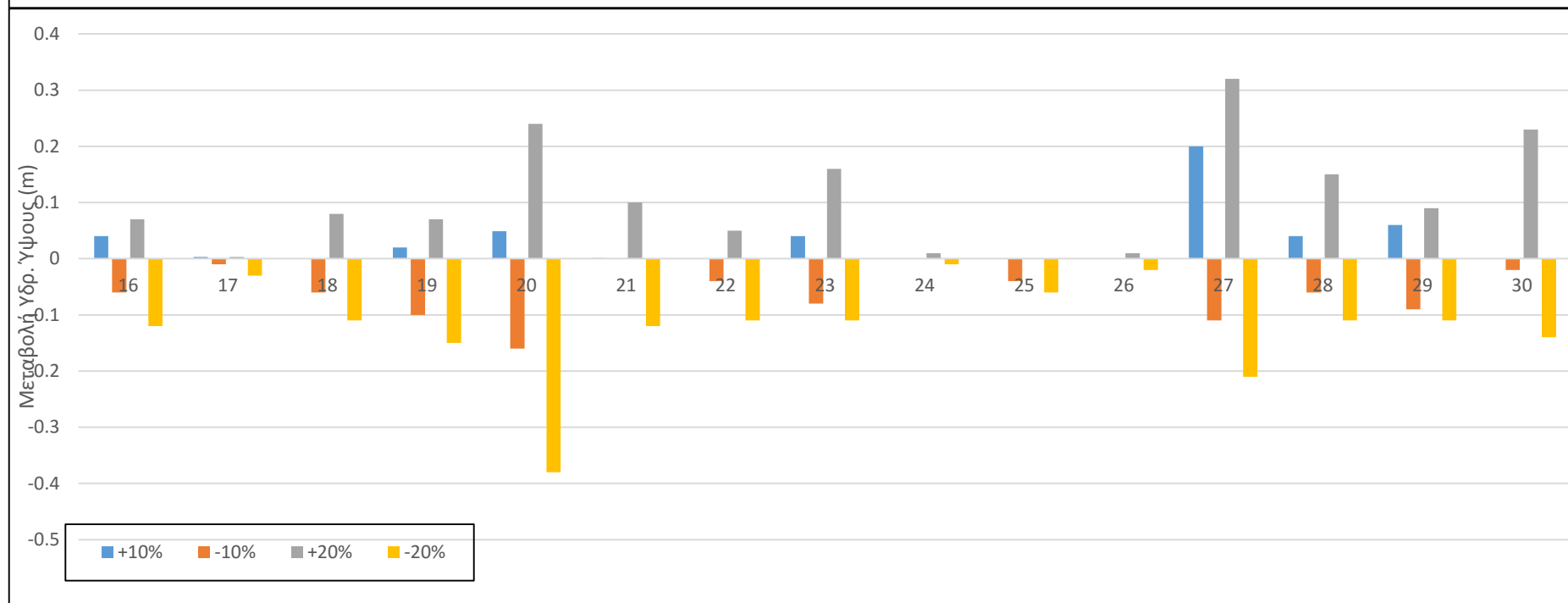
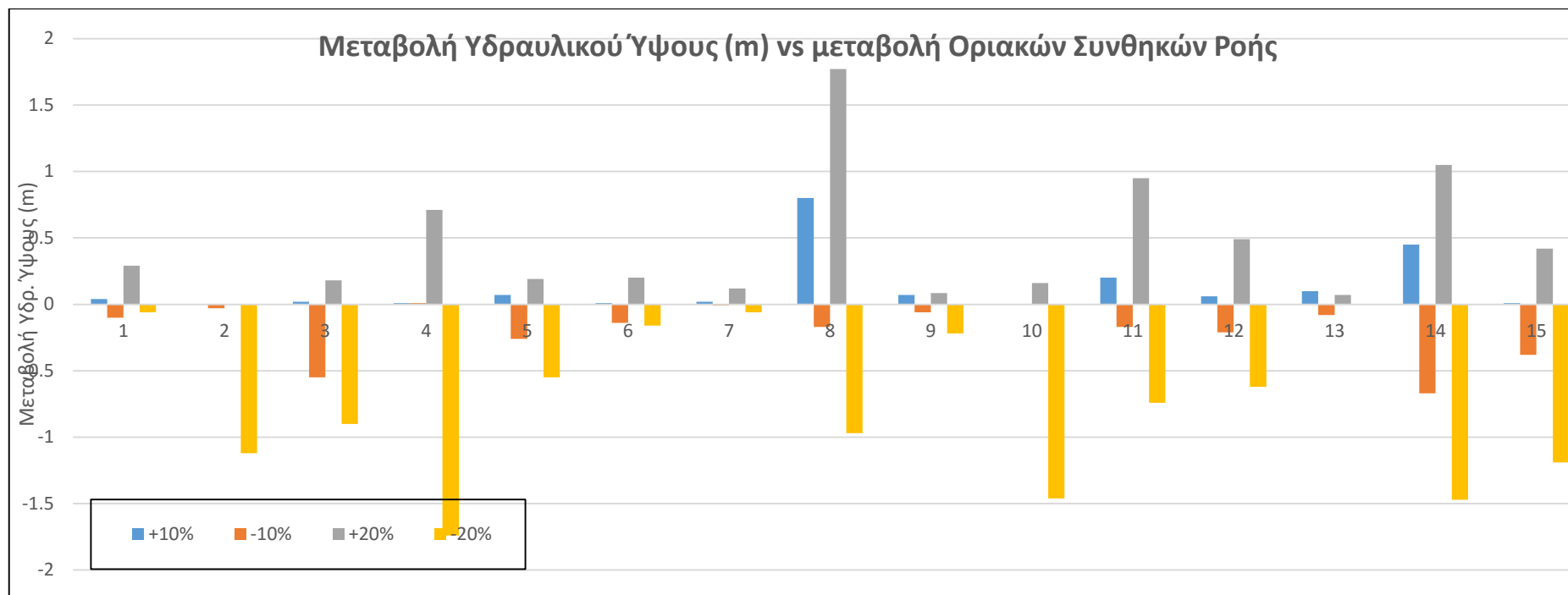
Εικόνα 6.1: Τα σημεία ελέγχου για την ανάλυση ευαισθησίας

Κατόπιν, μετά την εκτέλεση του μοντέλου, τα αποτελέσματα στάθμης εισήχθησαν στο επίπεδο PTC Data, και η στάθμη κάθε σημείου ελέγχου καταγράφηκε.

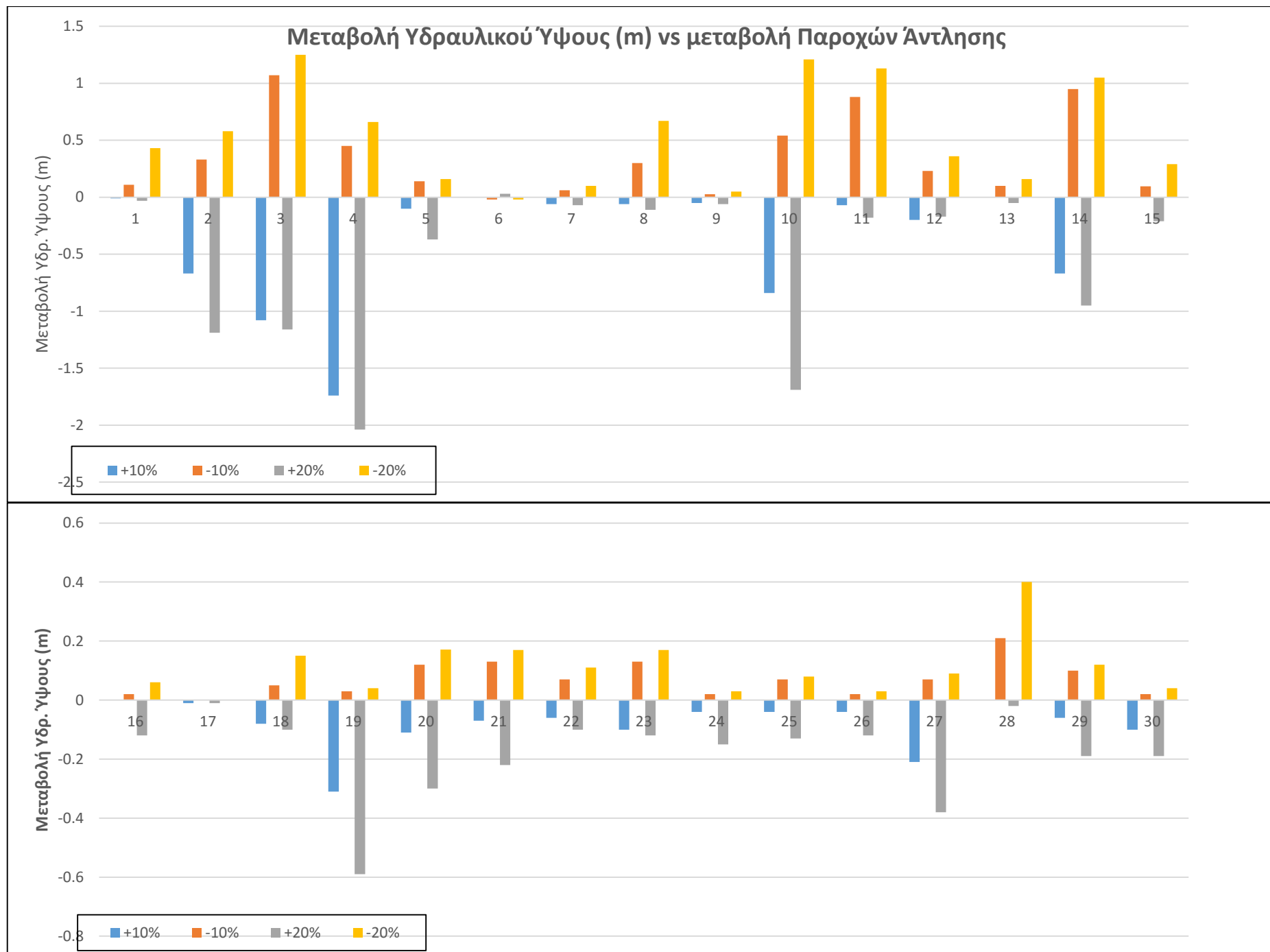




Εικόνα 6.2: Μεταβολή Υδραυλικού Ύψους (m) σε συνάρτηση με μεταβολή Υδραυλικής Αγωγιμότητας



Εικόνα 6.3: Μεταβολή Υδραυλικού Ύψους (m) σε συνάρτηση με μεταβολή Οριακών Συνθηκών Ροής



Εικόνα 6.4: Μεταβολή Υδραυλικού Ύψους (m) σε συνάρτηση με μεταβολή Παροχών Άντλησης

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρούμε πως οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούνται με τη μεταβολή των παροχών άντλησης. Η μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών συνθηκών ροής είχαν μικρότερη επιρροή. Κάποια σημεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση από άλλα, κι αυτό οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα:

α) Μεταβολή Υδραυλικής αγωγιμότητας: Η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας του υπεδάφους προκαλεί και τη μείωση της στάθμης στα σημεία ελέγχου. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την περίοδο μελέτης οι αντλούμενες γεωτρήσεις συνεχίζουν και αφαιρούν νερό από τον υδροφόρο. Με την υδραυλική αγωγιμότητα να μειώνεται, μειώνονται και οι ταχύτητες του νερού και άρα το εισερχόμενο νερό δεν αναπληρώνει τη στάθμη αρκετά γρήγορα. Το αντίθετο συμβαίνει με την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Μεγαλύτερες διακυμάνσεις παρατηρούνται στα σημεία ελέγχου που βρίσκονται πιο κοντά σε αντλούμενες γεωτρήσεις τα οποία είναι τα σημεία 2, 3, 8, 14, 20, 21, 28 και 30. Επίσης στο σημείο ελέγχου 18 παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της στάθμης με αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, κι αυτό διότι βρίσκεται πιο κοντά στη θάλασσα, οπότε με την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας θαλασσινό νερό εισέρχεται και ανεβάζει το υδραυλικό ύψος.

β) Μεταβολή Οριακών Συνθηκών Ροής: Με τη μεταβολή των οριακών συνθηκών ροής παρατηρείται παρόμοια τάση με την μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας, σε λίγο μεγαλύτερο βαθμό. Τα σημεία που παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση είναι αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στις περιοχές που έχουν οριστεί οι οριακές συνθήκες, ενώ αυτά που είναι σε μεγαλύτερη απόσταση παρουσιάζουν μικρότερη διακύμανση. Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος που τρέχει το μοντέλο, μη δίνοντας χρονικό περιθώριο για εξομάλυνση της ροής σε όλο το πεδίο μελέτης.

γ) Μεταβολή παροχών άντλησης: Η μεταβολή των παροχών άντλησης είχε ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διακύμανση από τις 3 παραμέτρους που εξετάστηκαν, όχι όμως σε πολύ μεγάλο βαθμό. Με τη μείωση της παροχής άντλησης υπήρξε άνοδος της στάθμης των σημείων ελέγχου, ενώ με την αύξηση παρουσιάστηκε μείωση της στάθμης. Ειδικότερα, μεγαλύτερη διαφορά παρουσιάζεται στα σημεία ελέγχου που βρίσκονται κοντά σε γεωτρήσεις, και ακόμα περισσότερο σε αυτά που βρίσκονται στο πεδίο επιρροής πολλαπλών γεωτρήσεων, όπως αναμενόταν. Τέτοια σημεία είναι τα 2, 3, 4, 10, 11, 14, 19, 20 και 27.

Γενικότερα, τα αποτελέσματα του ελέγχου ευαισθησίας παρουσίασαν την αναμενόμενη τάση, με τις στάθμες να επηρεάζονται διαφορετικά για κάθε παράμετρο. Λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος για το οποίο εκτελέστηκε το μοντέλο, οι διακυμάνσεις στη στάθμη παρατηρήθηκαν αρκετά πιο έντονες κοντά στην πηγή της μεταβολής, ενώ εάν το μοντέλο εκτελούνταν για περισσότερα χρόνια, θα υπήρχε κατά πάσα πιθανότητα μεγαλύτερη μεταβολή στο σύνολο της περιοχής μελέτης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μοντελοποίηση της ροής υπογείων υδάτων με χρήση του μοντέλου Princeton Transport Code (PTC), καθώς και τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφόρησης με το πρόγραμμα ArcGIS. Το χρονικό διάστημα της μοντελοποίησης είναι 2 έτη, και συγκεκριμένα από τον Απρίλιο του 1998 έως τον Απρίλιο του 2000, με δεδομένα από την Υδρογεωλογική Μελέτου του Κάμπου Χανίων του 2001.

Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα που λήφθηκαν και από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης παρατηρείται χαμηλή κινητικότητα του νερού και σε πολλά σημεία σχεδόν καθόλου κίνησή του. Στα σημεία που έχουν δημιουργηθεί οι γεωτρήσεις παρατηρείται αυξημένο υδραυλικό ύψος, επιβεβαιώνοντας ως σωστές τις επιλογές των σημείων για τη διάνοιξή τους και τη χρήση τους για άρδευση. Επίσης, υπήρξε μικρή διαφοροποίηση των υδραυλικών υψών από τη χειμερινή στην καλοκαιρινή περίοδο, παρά την αυξημένη διήθηση το χειμώνα λόγω βροχόπτωσης στον υδροφορέα. Αυτό οφείλεται εν μέρει και στο μικρό χρονικό διάστημα εκτέλεσης του μοντέλου, αλλά και στην μεγάλη έκταση της περιοχής μελέτης, καθώς για καλύτερα αποτελέσματα προσομοίωσης απαιτούνται περισσότερα δεδομένα για μια μεγαλύτερη περιοχή.

Παρατηρείται μικρή κινητικότητα του νερού στα δυτικά του νομού, νότια της πόλης των Χανίων και του Πλατανιά, πράγμα αναμενόμενο εν μέρει τόσο λόγω έλλειψης γεωτρήσεων στην περιοχή, όσο και μικρής κλίσης του εδάφους, με αποτέλεσμα τη μικρή διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο υπόγειο νερό και τη θάλασσα.

Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης υπήρξαν ορισμένες ασυμφωνίες. Συγκεκριμένα, στη νότια περιοχή του πεδίου μελέτης, οι γεωτρήσεις Γ54, Γ57 και Γ59 παρουσίασαν σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τις μετρηθείσες τιμές στάθμης, πράγμα που παρατηρήθηκε επίσης και στις γεωτρήσεις Γ70, Γ71, Γ75, Γ77 και Γ79, σε πολύ μικρότερο όμως βαθμό. Η εξήγηση για την μη αναμενόμενη αυτή συμπεριφορά είναι η ύπαρξη περισσότερων υδροφορέων σε μη διαπερατούς γεωλογικούς σχηματισμούς, πράγμα που δεν συνάδει με την υπόθεση του ενιαίου υδροφορέα στην επικράτεια της περιοχής μελέτης. Έτσι, κατά τη βαθμονόμηση οι γεωτρήσεις αυτές εξαιρέθηκαν, με το τελικό αποτέλεσμα να συνάδει με τα δεδομένα απογραφής.

Στον κάμπο Χανίων υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων, με την πλειοψηφία να χρησιμοποιούνται για σκοπούς άρδευσης. Αν και έχει γίνει απογραφή τους, δεν έχει γίνει επαρκής καταγραφή ούτε των δεδομένων στάθμης, ούτε έχουν γίνει γεωλογικές τομές στις γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχει ελλιπής πληροφόρηση για την συνολική κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή για το χρονικό διάστημα μελέτης.

Τέλος, από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, δίνεται η δυνατότητα στον παρατηρητή να γνωρίζει σε ποιο βάθος πρέπει να γίνει εκσκαφή για μια γεώτρηση, ανάλογα με την περιοχή. Μπορεί επίσης να εξετασθούν οι όποιες επιπτώσεις μπορεί να έχει η διάνοιξη μιας καινούριας γεώτρησης σε μια περιοχή, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπεράντλησης σε συγκεκριμένες περιοχές ή ακόμα και υφαλμύρισης σε περιοχές κοντά στη θάλασσα. Για παράδειγμα, στην περιοχή που βρίσκονται οι γεωτρήσεις Γ10, Γ14, Γ19, Γ20 η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα είναι αρκετά χαμηλή. Η προσθήκη μίας ή και περισσότερων γεωτρήσεων άντλησης θα μείωνε περαιτέρω τη στάθμη, με αποτέλεσμα την παρείσφρηση θαλασσινού νερού και τελικά να υπάρχει υφαλμύριση του υδροφορέα, όπως ακριβώς έχει συμβεί στην περιοχή της πόλης του Ηρακλείου. Αυτός άλλωστε είναι και ένας σημαντικός σκοπός και παράλληλα πρακτική εφαρμογή των μοντέλων ροής υπογείων υδάτων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

- Αθανασάκης Εμμ., Μεταπτυχιακή Εργασία με θέμα: «Διαχείριση του Υδατικού συστήματος του Βόρειου τμήματος του Νομού Χανίων με χρήση Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2008.
- Αντωνόπουλος Β., Ποιότητα Νερού και Ρύπανση Υδατικών Πόρων, Τμήμα Γεωπονίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2001
- Βοζινάκης Κ., Κουγιάννη Στ. «Υδατικοί Πόροι Νομού Χανίων και Διαχείρισή τους, Χανιά, 2004
- Καρατζάς, Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.
- Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999
- Νικολαΐδης Ν., Καρατζάς Γ., Κουσουρήs Θ., Κουργιαλάς Ν., Σταμάτη Φ., Μωραΐτης Δ., Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις λεκάνες απορροής των ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά, 2010
- Τάτσης Λ., Κοινοτική Νομοθεσία για την Προστασία και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007
- Τζώρτζη, Αικατερίνη Κ., Μεταπτυχιακή Εργασία με θέμα: «Η Βιολογική Γεωργία και η επίδρασή της στους Υδατικούς Πόρους», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2009

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

- Anderson, Mary P, Woessner, William W. and Hunt, Randall J., Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press, 2<sup>nd</sup> edition, August 2015
- Babu, D.K, Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld, D.P. and Stothoff, S.A., Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows, argusone.com, August 2002
- Bear, Jacob and Verrujit, Arnold, Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1987.

- Gleick, P. H., Water resources In Encyclopedia of Climate and Weather, vol. 2, Oxford University Press, New York, , 1996.
- Introduction to GIS Using ArcGIS Desktop 10, University of Maryland Library, 2012
- Karanth K.R., Groundwater Assessment Development and Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Delhi, 1987

### Διαδικτυακές Πηγές

- <http://water.usgs.gov/edu/propertyyou.html> (Accessed on 02-03-2016)
- <http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html> (Accessed on 02-03-2016)
- <http://www.sfu.ca/~vdabbagh/Chap1-modeling.pdf> (Accessed on 23-03-2016)
- [http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/cpp\\_vb6\\_vba\\_vcpp\\_doc/shared/desktop/get\\_started/what\\_is\\_dtop.htm](http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/cpp_vb6_vba_vcpp_doc/shared/desktop/get_started/what_is_dtop.htm)
- [http://www.argusone.com/pub/OnLineDocs/ArgusONE\\_UsersGuide.pdf](http://www.argusone.com/pub/OnLineDocs/ArgusONE_UsersGuide.pdf)
- [http://www.scisoftware.com/products/argus\\_details/argus\\_details.html](http://www.scisoftware.com/products/argus_details/argus_details.html)
- [http://www.argusone.com/pub/PTC\\_Files/Ptctutor.pdf](http://www.argusone.com/pub/PTC_Files/Ptctutor.pdf)
- Επιμελητήριο Χανίων, <http://www.chania-cci.gr/website/el/chania/morfologia-geografica>
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832008002299>