

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
“ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ
ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ”



ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΠΟΚΟΡΩΝΑ ΧΑΝΙΩΝ – ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ



ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ Ε. ΠΑΠΑΔΟΓΙΩΡΓΑΚΗ

Εξεταστική επιτροπή

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

ΧΑΝΙΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2019

Για τους αγαπημένους μου

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνέβαλαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της.

Ιδιαίτέρως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου διατριβής Καθηγητή Καρατζά Γεώργιο για τη σωστή καθοδήγηση και τη συνεχή υποστήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η βοήθειά του ήταν πολύτιμη και ήταν πάντα διαθέσιμος σε ό,τι τον χρειάστηκα, όχι μόνο για την εκπόνηση της διπλωματικής διατριβής, αλλά και σε όλη την πορεία του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών.

Ευχαριστώ πολύ τον Καθηγητή Νικολαΐδη Νικόλαο για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, για τις γνώσεις που μου μετέδωσε στα μαθήματά του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών και φυσικά για την αντίστοιχη στήριξη που είχα στα προπτυχιακά μου έτη. Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ και τον Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για την παραχώρηση υδρογεωλογικών δεδομένων και τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ και τα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου, τον Δρ. Τριχάκη Ιωάννη και τον Γκούμα Χρήστο για την πολύτιμη βοήθειά και τις συμβουλές τους σε θέματα λογισμικού. Επίσης, ευχαριστώ τον κύριο Μακρυνάκη Γεώργιο από την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Αποκορώνου για την παροχή δεδομένων των υπό μελέτη γεωτρήσεων.

Τέλος, ευχαριστώ τις καλές φίλες και συμφοιτήτριες, Σαρχάνη Σοφία και Αγγέλη Ιωάννα για τη στήριξή τους στα εύκολα και στα δύσκολα της κοινής μας πορείας, και φυσικά την οικογένεια και τους αγαπημένους μου που είναι δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή έγινε προσομοίωση της υπόγειας σε ορισμένη περιοχή του Δήμου Αποκορώνου Χανίων για τα υδρολογικά έτη 2015 - 2017 και ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου PTC με τέσσερα σενάρια κλιματικής αλλαγής. Ο κώδικας PTC αποτελεί ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο έχει ως στόχο την προσομοίωση της υπόγειας ροής και των υπόγειων ρύπων. Στόχος της διατριβής είναι να επιτευχθεί μια ικανοποιητική προσομοίωση των υδρολογικών στοιχείων των υπόγειων υδάτων της περιοχής για την καλύτερη κατανόηση του όγκου εισροών και απορροών από τους υπόγειους υδροφορείς, καθώς η εν λόγω περιοχή είναι σημαντικού οικονομικού και ιδιαίτερα τουριστικού ενδιαφέροντος.

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται 20 km ανατολικά της πόλης των Χανίων και συνορεύει νότια με το δήμο Σφακίων και ανατολικά με το νομό Ρεθύμνου. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 162 km² και καλύπτει ένα μέρος του Δήμου Αποκορώνου, πιο συγκεκριμένα τα χωριά των Αρμένων, Πλάκας, Γαβαλοχωρίου, Βάμου, Κεφαλά, Βρυσών, Εμπρόσνερου και Αλικάμπου.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες και εξισώσεις που αφορούν στα υπόγεια ύδατα και στη μοντελοποίηση τους, καθώς επίσης γίνεται και μία αναφορά στην κλιματική αλλαγή και στις επιπτώσεις που έχει στους υπόγειους υδροφορείς. Περιγράφεται αναλυτικά η περιοχή που μελετήθηκε και παρουσιάζονται στοιχεία για την τοποθεσία, την υδρογεωλογία, τις πηγές, τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά, τη γεωμορφολογία και τη χλωρίδα της. Εν συνεχεία, περιγράφεται η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων και η βαθμονόμηση που έγινε στο μοντέλο PTC. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διαδικασία της προσομοίωσης και από τα σενάρια κλιματικής αλλαγής και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν.

Βασικό συμπέρασμα από την προσομοίωση που έγινε είναι ότι αν και η περιοχή τροφοδοτείται από εισροές από τα Λευκά Όρη και από πηγές που υπάρχουν στην περιοχή, τα υδατικά αποθέματα στους υπόγειους υδροφορείς διατηρούνται σε σχετικά μόνιμη κατάσταση, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα σημαντικές εναλλαγές των υπόγειων υδάτων. Το υπέδαφος αποτελείται κατά βάση από αδιαπέρατα πετρώματα γι' αυτό και δεν

είναι έντονα διακριτές οι αλλαγές που επιφέρει ένα ενδεχόμενο σενάριο μεταβολής των αντλήσεων ή των εισροών ύδατος στην περιοχή.

Abstract

This Diploma Thesis describes the simulation of the underground flow in a certain area of Municipality of Apokoronas for the hydrological years 2015-2017 and examines four climate change scenarios. The aim of this thesis is to achieve an accurate simulation of the groundwater flow of the area for a better understanding of the water balance of the aquifers under study, as this area is of considerable economic and especially tourist interest.

The ARGUS ONE software in combination with the PTC code (Princeton Transport Code) was applied. The PTC code is a three-dimensional finite element and finite difference groundwater flow and contaminant transport simulator.

The study area is located 20 km east of the city of Chania and borders the south with the municipality of Sfakia and east with the Prefecture of Rethymnon. It occupies an area of about 162 km² and covers a part of the Municipality of Apokoronas, more specifically the villages of Armeni, Plaka, Gavalohori, Vamos, Kefalas, Vrysson, Embrosneros and Alikambos.

The first part of the thesis presents general information and governing equations of the groundwater modeling, as well as a quick reference to the climate change and its impact on the groundwater aquifers. It presents the spatial data of the study area, the hydrogeology, the climatic characteristics (precipitation and temperature), and the flora. The model was calibrated using flow data obtained from 20 wells, one rainfall station, the hydraulic conductivity and the porosity of the aquifer. After a detailed calibration of the model the obtained model results have shown a good agreement between simulated and measured values. The final model performance was evaluated using several statistical parameters, such as the RMSE, NSE, RSR and PBIAS.

The main conclusion from the simulation is that the White Mountains are the main source of groundwater supplies in the area providing the aquifers with significant amount of water and the underground water supplies to remain at steady state. There are no particularly high groundwater levels and speeds. The subsoil consists mainly of impermeable rocks.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	3
Abstract	5
Σκοπός	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1. Υπόγειοι υδατικοί πόροι	11
1.2. Κατανομή υπόγειου νερού – Υδροφορείς	12
1.3. Υπόγειοι υδροφορείς	14
1.4. Εδαφικές παράμετροι που επηρεάζουν την κίνηση των υπόγειων υδάτων	14
1.4.3. Διήθηση – Διηθητικότητα	18
1.4.4. Υδραυλική αγωγιμότητα - Ειδική διαπερατότητα	21
1.4.5. Μεταβιβασιμότητα	21
1.4.7. Ισοτροπία και Ομοιογένεια	22
1.4.8. Τάση-Συμπιεστότητα-Καθίζηση	23
1.5. Ταχύτητα Ροής	24
1.6. Ποιότητα υπογείων υδάτων	25
1.8. Κλιματική αλλαγή και αίτια	29
1.8.1. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής	30
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	32
2.1. Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης	32
2.2. Λεκάνη Στύλου, Αρμένων, Ζούρμπου, Βρύσες	33
2.3. Υδρογεωλογία	37
2.4. Γεωμορφολογία	43
2.5. Κλιματικά – μετεωρολογικά χαρακτηριστικά	44
2.6. Βροχοπτώσεις	45
2.7. Θερμοκρασία	46
2.8. Χλωρίδα	47
3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	47
3.2. Το μοντέλο Argus ONE	52

3.3.	Ο κώδικας PTC	52
4.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	58
4.1.	Εξισώσεις του PTC.....	58
4.2.	Εισαγωγή δεδομένων στο PTC.....	59
4.3.	Οριακές συνθήκες.....	67
4.4.	Σχεδιασμός Πλέγματος - PTC Mesh	68
5.	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ	71
5.1.	Ποσοτικοί Δείκτες	75
5.2.	Αποτελέσματα με στατιστικούς δείκτες	78
5.3.	Αποτελέσματα με τα γραφήματα του μοντέλου	79
6.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	87
6.1.	Αποτελέσματα σεναρίων κλιματικής αλλαγής.....	89
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
8.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99
8.1.	Ελληνική βιβλιογραφία.....	99
8.2.	Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	103
8.3.	Άρθρα από τον τύπο	107
8.4.	Διαδικτυακές πηγές	107

Πίνακες

Πίνακας 1. Εύρος πορώδους για διάφορα υλικά (Freeze & Cherry, 1979).....	15
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Freeze & Cherry, 1979)	17
Πίνακας 3. Ταξινόμηση της ταχύτητας διήθησης (Πηγή: Nikolov, 1983 , από Galawezh B. Bapeer et al., 2010).....	20
Πίνακας 4. Βροχομετρικά δεδομένα πρώτης περιόδου (wet stress)	65
Πίνακας 5. Βροχομετρικά δεδομένα δεύτερης περιόδου (dry stress)	65
Πίνακας 6. Βροχομετρικά δεδομένα τρίτης περιόδου (wet stress)	65
Πίνακας 7. Βροχομετρικά δεδομένα τέταρτης περιόδου (dry stress).....	65
Πίνακας 8. Τελικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στο μοντέλο	72
Πίνακας 9. Όρια στατιστικών δεικτών RSR, NSE, PBIAS (Moriassi et al., 2007)	77
Πίνακας 10. Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας (τεσσάρων σεναρίων)	96

Γραφήματα

Γράφημα 1. Μεταβολή της διηθητικότητας σε σχέση με το χρόνο (Πηγή: civilonline2010.blogspot.com)	18
Γράφημα 2. Κατανομή της υγρασίας στο εδαφικό προφίλ κατά την διάρκεια της διήθησης (Παπαζαφειρίου, 1999)	19
Γράφημα 3. Βροχομετρικά δεδομένα σταθμού Βρυσών Αποκορώνου (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο)	45
Γράφημα 4. Δεδομένα θερμοκρασίας σταθμού Βρυσών Αποκορώνου(Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο).....	46
Γράφημα 5. Γραφική απεικόνιση των πραγματικών τιμών στάθμης σε σχέση με τις τιμές του μοντέλου	79
Γράφημα 6. Συγκριτικό γράφημα 1 ^{ου} και 2 ^{ου} σεναρίου σε σχέση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.....	91
Γράφημα 7. Συγκριτικό γράφημα 3 ^{ου} και 4 ^{ου} σεναρίου σε σχέση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης.....	94
Γράφημα 8. Συγκριτικό γράφημα με όλα τα σεναρία και τα αποτελέσματα μοντελοποίησης	95

Χάρτες

Χάρτης 1. Δορυφορική απεικόνιση ευρύτερης περιοχής Αποκόρωνας Χανίων (Πηγή: Google Earth Pro)	33
Χάρτης 2. Λεκάνες Απορροής Ποταμού (Πηγή: Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη- Θερίσου και Κουιλάρη, Χανιά. Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).	36
Χάρτης 3. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πηγή: Παυλάκη., «Τεχνικές Γεωλογικές συνθήκες στο Ν.Χανίων», 2008)	39
Χάρτης 4. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με χρήση GIS (Πηγή: Διαχειριστικό σχέδιο Κρήτης 2015)	43
Χάρτης 5. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ισοϋψείς καμπύλες με χρήση GIS (Πηγή: Διαχειριστικό σχέδιο Κρήτης 2015).....	44
Χάρτης 6. Γεωλογικοί σχηματισμοί και κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης	64

Εικόνες

Εικόνα 1. Η κατανομή του υπόγειου νερού. Πηγή: Π. Λατινόπουλος 1986,σελ.15.....	13
Εικόνα 2. Ισοτροπία και ομοιογένεια (Freeze & Cherry, 1979).....	24
Εικόνα 3.Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μοντελοποίησης (Πηγή: M.P. Anderson W. W. Woessner. Applied Groundwater Modeling Simulation of FLOW and Advective, Academic Press, 2002)	51
Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση των οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al., 2002).	56
Εικόνα 5.Αρχικές ρυθμίσεις PTC configuration	59
Εικόνα 6.Τομή Α (Γεωτρήσεις 12-7-5-4-14-1).....	60
Εικόνα 7.Τομή Β (Γεωτρήσεις 10, 17, 7, 5)	60
Εικόνα 8. Κατεύθυνση τομής Α και Β.....	61
Εικόνα 9. Συγκεντρωτικές γεωτρήσεις περιοχής με τα βάθη τους	61
Εικόνα 10. Αρχικές ρυθμίσεις PTC sonfiguration	62
Εικόνα 11. Χάρτης ισοϋψών στο PTC	63
Εικόνα 12. Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων	66
Εικόνα 13. Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων στο σταθμό VRISSES.....	66
Εικόνα 14. Γεωτρήσεις περιοχής μελέτης και οριοθέτηση της στάθμης της θάλασσας	68
Εικόνα 15. Πλέγμα PTC Mesh	69
Εικόνα 16. Αρίθμηση στοιχείων και κόμβων.....	70
Εικόνα 17. Παράθυρο MS-DOS κατά τη διάρκεια τρεξίματος του μοντέλου	70
Εικόνα 18. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 1	73
Εικόνα 19. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 2	73
Εικόνα 20. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 3	74
Εικόνα 21. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 4	74
Εικόνα 22. Αποτελέσματα μοντέλου για την πρώτη περίοδο (wet stress).....	80
Εικόνα 23. Αποτελέσματα μοντέλου για τη δεύτερη περίοδο (dry stress).....	80
Εικόνα 24. Αποτελέσματα μοντέλου για την τρίτη περίοδο (wet stress)	81
Εικόνα 25. Αποτελέσματα μοντέλου για την τέταρτη περίοδο (dry stress).....	81
Εικόνα 26. Πραγματικά δεδομένα στάθμης.....	82
Εικόνα 27. Πραγματικά δεδομένα ταχυτήτων ροής υπόγειων υδάτων.....	83
Εικόνα 28. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την πρώτη περίοδο.....	84
Εικόνα 29. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για τη δεύτερη περίοδο.....	84
Εικόνα 30. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την τρίτη περίοδο	85
Εικόνα 31. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την τέταρτη περίοδο.....	86
Εικόνα 32. Επιπλέον σημεία παρακολούθησης	88
Εικόνα 33. Αποτελέσματα στάθμης για το 1ο σενάριο	89
Εικόνα 34. Αποτελέσματα στάθμης για το 2ο σενάριο	90
Εικόνα 35. Αποτελέσματα στάθμης για το 3ο σενάριο	92
Εικόνα 36.Αποτελέσματα στάθμης για το 4ο σενάριο.....	93

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος σε ένα ορισμένο κομμάτι της περιοχής του Αποκόρωνα Χανίων κατά την περίοδο των υδρολογικών ετών 2015 – 2017 και ο έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου μέσω τεσσάρων εναλλακτικών σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Η προσομοίωση έγινε 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. Στόχος είναι η επιτυχής προσομοίωση του υδάτινου συστήματος, με μία ικανοποιητική βαθμονόμηση του μοντέλου και η διερεύνηση των περιπτώσεων για τέσσερα πιθανά σενάρια κλιματικής αλλαγής.

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τη λεκάνη απορροής Στύλου - Αρμένων - Ζούρμπου - Βρύσες και τροφοδοτείται κατά κύριο λόγο από τα Λευκά Όρη. Η ύπαρξη ορισμένων ρηγμάτων, σε συνδυασμό με τη γεωλογία και το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής την καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα ως προς την προσομοίωσή της. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσομοίωση μόνο της ροής του ύδατος, και όχι μεταφοράς ρύπων. Μετά τη δημιουργία του μοντέλου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και κατόπιν έγινε ο έλεγχος ευαισθησίας του με τα τέσσερα πιθανά σενάρια κλιματικής αλλαγής, τα οποία αφορούν στις μεταβολές των εισροών ύδατος και των αντλήσεων από τις γεωτρήσεις της περιοχής. Η βαθμονόμηση αφορούσε στις τιμές στάθμης του μοντέλου, συγκρινόμενες με τις μετρούμενες τιμές για τα υδρολογικά έτη 2015 - 2017. Τέλος, μετά το πέρας της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε έλεγχος ευαισθησίας του μοντέλου, σε σχέση με δύο βασικές παραμέτρους: πρώτον τις εισροές ύδατος μεταβάλλοντας τις τιμές των οριακών συνθηκών ροής (2^{ου} τύπου) και τις βροχοπτώσεις και δεύτερον μεταβάλλοντας τις παροχές άντλησης των γεωτρήσεων στο πεδίο. Οι μεταβολές αυτές έγιναν τόσο μεμονωμένα η καθεμιά όσο και οι δύο ταυτόχρονα προκειμένου να εξεταστούν τα σενάρια της κλιματικής αλλαγής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό συγκαταλέγεται στους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη και ταυτόχρονα αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για τη διατήρηση της ζωής (Bobba et al., 2000). Είτε σε υγρή, είτε σε στερεή μορφή καλύπτει το 75% της επιφάνειας της γης. Πρακτικά, υπάρχει παντού, από το εσωτερικό του βραχώδους φλοιού της γης, μέχρι και το εσωτερικό των κυττάρων του ανθρώπινου σώματος (Nasa.gov, 2007). Η γη ξεχωρίζει ανάμεσα στους υπόλοιπους πλανήτες του ηλιακού συστήματος, λόγω των τεράστιων αποθεμάτων νερού που διαθέτει, στους ωκεανούς, στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος (Peter H. Gleick et al., 1999).

Παρά την ύπαρξη των τεράστιων ποσοτήτων ύδατος, η διαθεσιμότητα του είναι πεπερασμένη και η κατανομή του στο χώρο και στον χρόνο είναι άνιση. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε σήμερα στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως, είναι η συνεχής υποβάθμιση των υδατικών πόρων, αλλά και η συνεχής έλλειψη των υδατικών αποθεμάτων (Γιαννιού, 2012). Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι η ανάπτυξη και η ραγδαία εξέλιξη ενός ιδιαίτερου κλάδου των τεχνικών επιστημών που αναφέρεται ως διαχείριση υδατικών πόρων (Γ.Τσακίρης και άλλοι, 2013).

1.1. Υπόγειοι υδατικοί πόροι

Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη εκτιμάται γύρω στα 1360 κυβικά χιλιόμετρα. Από το σύνολο αυτό, τα υπόγεια νερά που ο όγκος τους είναι περίπου $8 \times 10^6 \text{ Km}^3$, αποτελούν ένα μικρό ποσοστό ίσο με 0,61 % του συνολικού νερού στον πλανήτη. Ο όγκος όμως αυτός των υπογείων νερών αντιστοιχεί στο 98 % του εκμεταλλεύσιμου πόρου σε υγρή κατάσταση, καθώς το νερό των ποταμών και των λιμνών είναι μικρότερο από 0,03 % του συνολικού όγκου. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ήμισυ περίπου των υπόγειων νερών βρίσκεται σε τόσο μεγάλα βάθη που δεν επιτρέπουν τη χρήση τους, τόσο εξαιτίας της χαμηλής ποιότητάς τους όσο και της εξαιρετικά μεγάλης απαιτούμενης δαπάνης άντλησης (Γ. Τσακίρης και άλλοι, 2013).

Η ανανέωση σημαντικού μέρους του συνολικού όγκου των εκμεταλλεύσιμων υπογείων νερών γίνεται με τη διήθηση των νερών των κατακρημνισμάτων, ενώ από την άλλη μεριά ένα μεγάλο τμήμα τους χάνεται καθώς εκφορτίζεται στους ωκεανούς και τις θάλασσες (Γ.Τσακίρης, και άλλοι, 2013). Μικρό ποσοστό των υπογείων υδάτων είναι μαγματικής (ή κοσμικής) προέλευσης που εισέρχονται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο.

Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά κινείται αργά σε αποστάσεις έως ότου επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με εξάτμιση και διαπνοή των φυτών. Την ηλικία του νερού αποτελεί ο χρόνος παραμονής του στο υπέδαφος και η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με φυσικά ραδιοϊσότοπα, κυρίως το τρίτιο (^3H) και τον άνθρακα -14 (^{14}C) (Κ. Βουδούρης και άλλοι, 2016).

Στις περιπτώσεις που το νερό «υπακούει» στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία χαρακτηρίζεται ως «βαρυτικό νερό», ενώ όταν δεν υπακούει στους νόμους βαρύτητας και δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία χαρακτηρίζεται ως «νερό κατακράτησης».

1.2. Κατανομή υπόγειου νερού – Υδροφορείς

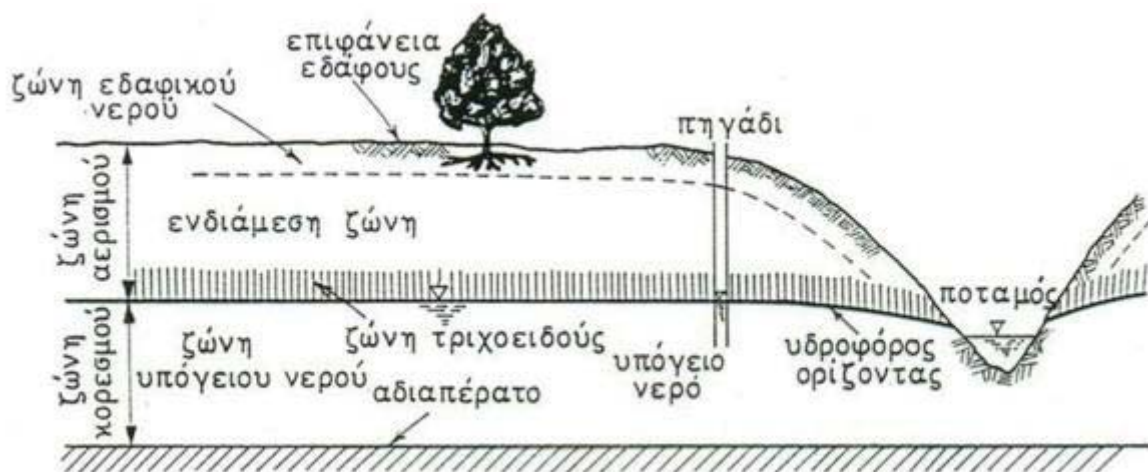
Το υπόγειο νερό είναι αποθηκευμένο ή κινείται μέσα στα διάκενα των εδαφών ή των πετρωμάτων. Κατά τη διήθηση του νερού στα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους, ένα μέρος του δεσμεύεται από τους κόκκους του εδάφους, συνιστώντας την ακόρεστη ζώνη (ζώνη αερισμού), με τους πόρους να αποτελούνται από νερό και αέρα. Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί την πρώτη γραμμή άμυνας» για τα ελεύθερα υδροφόρα στρώματα, επειδή βρίσκεται σε στρατηγική θέση μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και της υπόγειας στάθμης καθώς και λόγω της δυναμικής που έχει στη μείωση και στην εξασθένιση ρύπων. Επομένως ο κίνδυνος για την ρύπανση ενός υπόγειου υδροφορέα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ακόρεστης ζώνης.

Η ροή στην ακόρεστη ζώνη έχει ως κύρια συνιστώσα την κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση).

Επιπλέον, η ακόρεστη ζώνη περιλαμβάνει δύο 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.

Προχωρώντας προς τα κάτω, συναντάται η κορεσμένη ζώνη, στην οποία όλοι οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από νερό, ακόμα και οι ρωγμές των πετρωμάτων. Εφόσον υπάρχει το άνω όριο της ζώνης κορεσμού, αυτό καλείται υδροφόρος ή (φρεάτιος) ορίζοντας ή αλλιώς ελεύθερη επιφάνεια (του υπόγειου νερού).

Η βασική διαφορά στην κίνηση του νερού μέσα στις δύο ζώνες είναι ότι στη μεν ακόρεστη ζώνη γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ενώ στην κορεσμένη κατά την οριζόντια (Γ.Τσακίρης και άλλοι, 2013).



Εικόνα 1. Η κατανομή του υπόγειου νερού. Πηγή: Π. Λατινόπουλος 1986,σελ.15.

1.3. Υπόγειοι υδροφορείς

Υδροφορείς (aquifers) είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και οι οποίοι προμηθεύουν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις και πηγές (Καρατζάς, 2003). Ο εμπλουτισμός των υδροφορέων μπορεί να επιτευχθεί φυσικά (με τη βροχή και τα επιφανειακά ύδατα) ή τεχνητά. Το νερό μπορεί να παραμείνει στους υπόγειους υδροφορείς για πάρα πολλά χρόνια μέχρι και χιλιετίες, πριν βγει στην επιφάνεια, για αυτό και οι υδροφορείς χαρακτηρίζονται ως ταμειυτήρες μεγάλης διάρκειας.

Βασικό κριτήριο για μια γενική ταξινόμηση των υδροφορέων αποτελεί η γεωλογική δομή, οι τοπικές υδραυλικές συνθήκες και κυρίως αν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια του νερού ή όχι. Εάν υπάρχει, λοιπόν ελεύθερη επιφάνεια τότε ο υδροφορέας ονομάζεται ελεύθερος (ή φρεάτιος), ενώ όταν το νερό βρίσκεται υπό πίεση κάτω από αδιαπέρατους σχηματισμούς τότε έχουμε την περίπτωση του περιορισμένου (ή υπό πίεση) υδροφορέα. Στις περιπτώσεις που η στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα βρίσκεται υψηλότερα και από την επιφάνεια του εδάφους, τότε ο υδροφορέας λέγεται αρτεσιανός.

1.4. Εδαφικές παράμετροι που επηρεάζουν την κίνηση των υπόγειων υδάτων

1.4.1. Πορώδες

Το πορώδες εκφράζει το εκατοστιαίο ποσοστό του όγκου του εδάφους σε φυσική κατάσταση που καταλαμβάνεται από την υγρή και αέρια φάση. Το πορώδες υπολογίζεται από το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων προς το συνολικό όγκο του πετρώματος/εδάφους σύμφωνα με τον τύπο:

$$n = \frac{V_v}{V_{ολ}}$$

Όπου

n: Πορώδες

V_v : Όγκος των κενών

V_{OL} : 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):

Μη διαστρωματοποιημένα υλικά %	
Χαλίκια	25-35
Άμμος	25-45
Ιλύς	35-50
Πηλός	45-55
Άμμος και Χαλίκια	20-30
Διαστρωματοποιημένα υλικά %	
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

Πίνακας 1. Εύρος πορώδους για διάφορα υλικά (Freeze & Cherry, 1979)

Το πορώδες είναι εκείνο που συμβάλλει στην κυκλοφορία του ρευστού μέσα στους σχηματισμούς του εδάφους. Το ενεργό πορώδες διαφέρει από το πορώδες καθώς λαμβάνει υπόψη το ποσοστό των πόρων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους και δεν είναι και διαθέσιμα για την ροή. Ορίζεται δηλαδή ως ο λόγος των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας

ή της υδροστατικής πίεσης προς το συνολικό όγκο του σχηματισμού (Κ. Βουδούρης, 2016).

Το ενεργό πορώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n_e = \frac{V_\gamma}{V_0}$$

Όπου

n_e : Ενεργό πορώδες

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

V_0 : Συνολικός όγκος του δείγματος

1.4.2. Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα ή υδροπερατότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία κινείται το νερό εντός του πορώδους μέσου και εξαρτάται, τόσο από τις ιδιότητες του μέσου, όσο και από τις ιδιότητες του ρευστού (Βουδούρης, 2009).

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. Για μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή, η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy είναι:

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

Όπου,

Q : Παροχή

A : Επιφάνεια

K : Υδραυλική αγωγιμότητα

Δh: Απώλεια φορτίου- Υδραυλική κλίση

L: Μήκος της στήλης

q: Ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή

Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση 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).

Ανάλογα με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως :

- Πολύ υδροπερατοί όταν $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί όταν $10^{-9} < k$
- Πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s

Στον πίνακα (Πίνακας 2) που ακολουθεί φαίνονται οι τυπικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους εδάφους:

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}

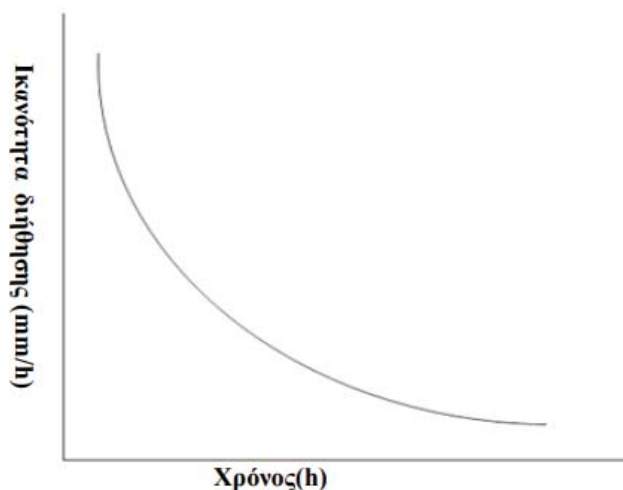
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Freeze & Cherry, 1979)

1.4.3. Διήθηση – Διηθητικότητα

Με τον όρο διήθηση εννοούμε τον ρυθμό με τον οποίο διεισδύει το νερό στο έδαφος. Επηρεάζεται από την τριχοειδή δράση, ειδικά στα αρχικά στάδια της διήθησης και από τη δύναμη της βαρύτητας. Υπολογίζεται σε ίντσες ή χιλιοστά νερού που διεισδύουν στο έδαφος σε χρονικό διάστημα μιας ώρας (in/h ή mm/h) (Rajeh Alhassoun et al, 2009).

Αρχικά το νερό διεισδύει στο έδαφος και στη συνέχεια διηθείται στα βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι τη φυσική υγρασία που δημιουργείται ή προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες (Μωυσιάδης, 2009). Εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας, από την δομή, την μηχανική σύσταση, την ομοιογένεια σε βάθος και την αρχική υγρασία του εδάφους.

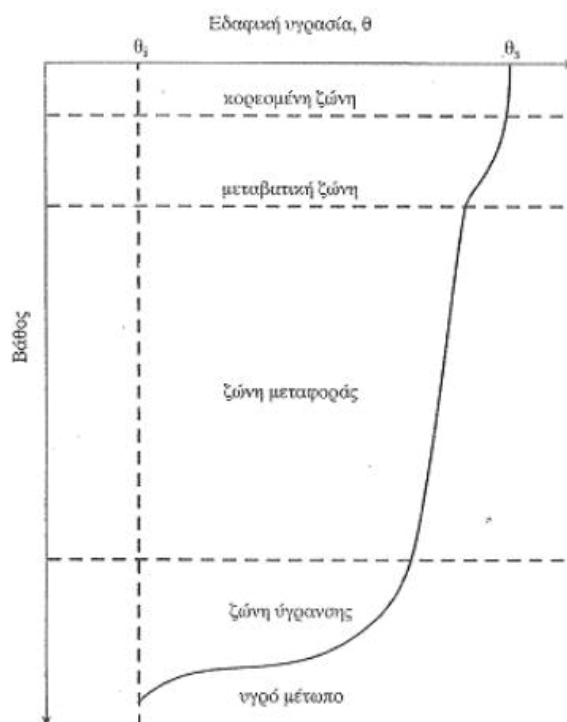
Η ταχύτητα με την οποία το νερό διηθείται στο έδαφος (δηλαδή η διηθητικότητα του f) ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου (Παπαζαφειρίου, 1999). Η ελάττωση της διηθητικότητας με το χρόνο οφείλεται στη προοδευτική μείωση της υδραυλικής κλίσης στην επιφάνεια του εδάφους και σε άλλους παράγοντες, όπως η στεγανοποίηση και η δημιουργία κρούστας στην επιφάνεια (Παπαζαφειρίου, 1999). Όταν αυτό συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα η διηθητικότητα φτάνει μια τιμή f_c , την οποία και διατηρεί (Παπαζαφειρίου, 1999).



Γράφημα 1. Μεταβολή της διηθητικότητας σε σχέση με το χρόνο (Πηγή: civilonline2010.blogspot.com)

Ο ρυθμός της διήθησης δεν είναι ο ίδιος κατά την διάρκεια διείσδυσης του νερού στο έδαφος. Σύμφωνα με τους Bodman και Coleman (1943) το προφίλ του εδαφικού νερού διαιρείται σε τέσσερις ζώνες (Γράφημα 2) (Παπαζαφειρίου, 1999):

- Η κορεσμένη ζώνη που εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι ≤ 1.5 cm
- Η μεταβατική ζώνη, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η απότομη μείωση της εδαφικής υγρασίας και εκτείνεται από το κάτω όριο της κορεσμένης ζώνης μέχρι τη ζώνη μεταφοράς
- Η ζώνη μεταφοράς, με ένα σταθερό ποσοστό υγρασίας, η οποία συνεχώς επιμηκύνεται κατά τη διάρκεια της διήθησης.
- Η ζώνη ύγρανσης που βρίσκεται κάτω από τη ζώνη μεταφοράς, η οποία διατηρεί ένα σχεδόν σταθερό σχήμα κατά τη διάρκεια της διήθησης και καταλήγει στο υγρό μέτωπο ή μέτωπο προσπέλασης που είναι το ορατό όριο της διείσδυσης του νερού στο έδαφος.



Γράφημα 2. Κατανομή της υγρασίας στο εδαφικό προφίλ κατά την διάρκεια της διήθησης (Παπαζαφειρίου, 1999)

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:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$$

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

Σύμφωνα με τον Nikolov et al., 1983 η ταχύτητα διήθησης μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορους τύπους σύμφωνα με τον Πίνακα 3.

Ταχύτητα διήθησης	Τύπος
> 160 mm/hour	Ταχεία (R)
60 – 160 mm/hour	Μέτρια – Ταχεία (M – R)
20 – 60 mm/hour	Μέτρια (M)
5 – 20 mm/hour	Αργή – Μέτρια (S – M)
1.2 – 5 mm/hour	Αργή (S)
< 1.2	Πολύ αργή

Πίνακας 3. Ταξινόμηση της ταχύτητας διήθησης (Πηγή: Nikolov, 1983 , από Galawezh B. Bapeer et al., 2010)

1.4.4. Υδραυλική αγωγιμότητα - Ειδική διαπερατότητα

Ως ειδική ή απόλυτη διαπερατότητα (specific or absolute permeability) ορίζεται η ικανότητα του πορώδους μέσου να επιτρέπει σε ένα ρευστό να ρέει μέσω των πόρων του. Η Ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου που δίνεται από τον τύπο:

$k=Cd^2$ Όπου C: σταθερά που παίρνει τιμές από 40 (πολύ λεπτή άμμος) έως 150 (αδρομερής άμμος)

d: ενεργή διάμετρος

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:

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

Όπου

K: Υδραυλική αγωγιμότητα

κ: Ειδική διαπερατότητα

ρ = Πυκνότητα ρευστού

μ = Δυναμικό ιξώδες ρευστού

g = Επιτάχυνση βαρύτητας

1.4.5. Μεταβιβασιμότητα

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:

$$T=Kb$$

Όπου:

K: Υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους

b: Κορεσμένο βάθος του υδροφορέα

1.4.6. Αποθηκευτικότητα

Ως συντελεστής εναποθήκευσης ή αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) είναι ο όγκος νερού που μπορεί να απελευθερωθεί ή αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφορέα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\Delta V}{A \Delta h}$$

Όπου:

ΔV : είναι ο όγκος νερού που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A, εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης (ή αύξησης) του φορτίου Δh .

1.4.7. Ισοτροπία και Ομοιογένεια

Ισοτροπία (isotropy) είναι η ιδιότητα του εδάφους, σύμφωνα με την οποία μια ανυσματική ιδιότητα (υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβαστικότητα) έχει την ίδια τιμή σε όλες τις διευθύνσεις. Ένα έδαφος μπορεί να είναι ισότροπο ως προς μια ιδιότητα και ανισότροπο σε μια άλλη.

Ομοιογένεια (homogeneity) είναι η ιδιότητα του εδάφους, σύμφωνα με την οποία μια ανυσματική ιδιότητα έχει την ίδια τιμή σε παράλληλες διευθύνσεις. Αν η ιδιότητα δεν είναι ανυσματική (π.χ. πορώδες) τότε το έδαφος είναι ομογενές ως προς την ιδιότητα αυτή, αν έχει παντού την ίδια τιμή.

1.4.8. Τάση-Συμπιεστότητα-Καθίζηση

Τάση (P) είναι ο λόγος της δύναμης (F) ανά μονάδα επιφάνειας (A): $P=F/A$ με μονάδα μέτρησης το Pascal ($Pa=N/m^2$). Η τάση μπορεί να είναι:

Ορθή ή κανονική (συμπιεστική ή εφελκυστική) όταν εξασκείται κάθετα στην επιφάνεια του εδαφικού σχηματισμού ή του πετρώματος με φορά την επιφάνεια (συμπιεστική ή θλιπτική τάση) ή με φορά αντίθετη (εφελκυστική τάση).

Διατμητική όταν εξασκείται παράλληλα στην επιφάνεια.

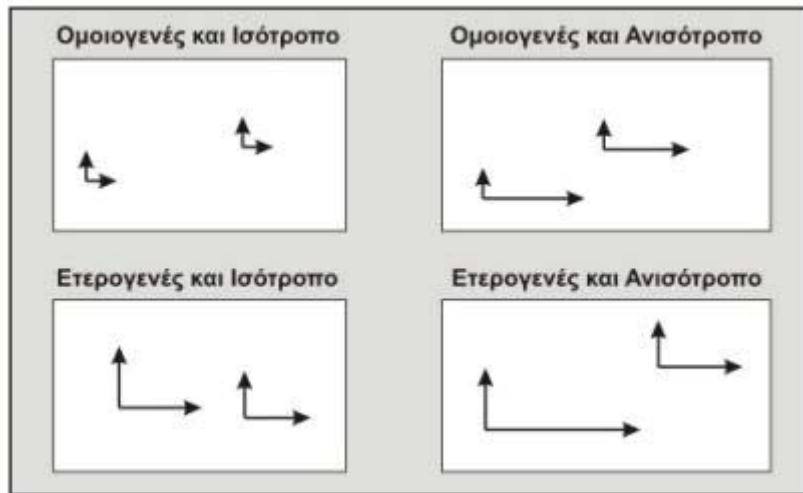
Στο υλικό επέρχεται παραμόρφωση, υπό την επίδραση συμπιεστικής δύναμης, η οποία μπορεί να είναι:

- Ελαστική παραμόρφωση των κόκκων
- Πλαστική παραμόρφωση όταν η τάση υπερβεί μία τιμή, οπότε επέρχεται θραύση των κόκκων στα σημεία επαφής και μόνιμη παραμόρφωση
- Ολίσθηση των κόκκων με αποτέλεσμα τη μείωση των διακένων και την αύξηση της πυκνότητας

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



Εικόνα 2. Ισοτροπία και ομοιογένεια (Freeze & Cherry, 1979)

1.5. Ταχύτητα Ροής

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα ανισότροπα εδάφη προέρχονται από στρωματοποιημένα εδάφη, στα οποία το πάχος της κάθε στρώσης τείνει στο μηδέν και η μεταβολή του συντελεστή σχετικής διαπερατότητας από στρώση σε στρώση είναι συνεχής. Σ' αυτά τα εδάφη εμφανίζονται δύο χαρακτηριστικές κάθετες διευθύνσεις, η παράλληλη και η κάθετη προς τις στρώσεις, κατά τις οποίες ο συντελεστής σχετικής διαπερατότητας παίρνει η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του αντίστοιχα. Οι κατευθύνσεις αυτές ονομάζονται κύριες.

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

Στην διεύθυνση x:
$$q_x = -K_x \frac{dh}{\theta x}$$

Στην διεύθυνση y:
$$q_y = -K_y \frac{dh}{\theta y}$$

Στην διεύθυνση z:
$$z = -K_z \frac{dh}{\theta z}$$

1.6. Ποιότητα υπογείων υδάτων

Η ποιότητα του υπόγειου νερού αναφέρεται στη χημική του σύσταση, με τα διαλυμένα και αιωρούμενα υλικά. Η διαμόρφωση της σύστασης της ποιότητας του νερού είναι αποτέλεσμα φυσικών διαδικασιών και ανθρώπινης παρέμβασης, είτε με απευθείας εισαγωγή χημικών και βιολογικών ουσιών στα υπόγεια νερά, είτε έμμεσα επεμβαίνοντας στις φυσικές διαδικασίες που επηρεάζουν το σύστημα των υπόγειων νερών (π.χ. εισροή θαλασσινού νερού). Η χημική σύσταση του φυσικού υπόγειου νερού εξαρτάται μόνο από φυσικές διαδικασίες και είναι αποτέλεσμα της υδρογεωλογικής και γεωχημικής ιστορίας του. Η κυριότερη αιτία της μεταβολής της ποιότητας του υπόγειου νερού είναι η σκόπιμη ή τυχαία απόρριψη των στερεών και υγρών αποβλήτων κάτω από την επιφάνεια ή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους.

Οι παράμετροι της ποιότητας των υπογείων υδάτων είναι:

- ❖ Φυσικοχημικές παράμετροι όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα, pH, θολότητα, θερμοκρασία, που συνήθως μετρώνται επί τόπου
- ❖ Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο BOD και χημικά απαιτούμενο οξυγόνο COD
- ❖ Κύρια ιόντα (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃, HNO₃, NO₃, NO₂, NH₄)
- ❖ Βαρέα μέταλλα πχ Cr, Pb, Cd, Hg, Ni
- ❖ Οργανικές ουσίες
- ❖ Φυτοφάρμακα
- ❖ Επιπρόσθετες παράμετροι πχ B, I, F, Br

Ανάλογα με τις ιδιότητες τους τα χαρακτηριστικά του νερού διακρίνονται σε φυσικά, χημικά και βιολογικά. Στις φυσικές παραμέτρους περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του νερού που αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος με τις αισθήσεις του, την όραση, την αφή, τη γεύση και την οσμή. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα αιωρούμενα στερεά, η θερμοκρασία, το χρώμα, η γεύση και η οσμή. Η θερμοκρασία ελέγχει την ανάπτυξη όλων των μορφών της υδρόβιας ζωής, τη διαλυτότητα και την καταβύθιση των ανόργανων και οργανικών ουσιών. Το χρώμα επηρεάζει τη βιολογική δραστηριότητα των μικροοργανισμών και τη διείσδυση του ηλιακού φωτός. στη μάζα του νερού και είναι επίσης δείκτης της

παρουσίας ανεπιθύμητων διαλυμένων και αιωρούμενων ουσιών. Η γεύση και η οσμή είναι σημαντικοί δείκτες των ανεπιθύμητων ουσιών.

Στις χημικές ουσίες περιλαμβάνονται το pH, η αλκαλικότητα, η σκληρότητα, οι χημικές ουσίες που διαλύονται στο νερό, όπως τα ολικά διαλυμένα στερεά, τα μέταλλα, οι οργανικές ουσίες και τα θρεπτικά στοιχεία.

Στις βιολογικές παραμέτρους περιλαμβάνονται τα βακτήρια, οι μύκητες, τα φύκη, τα φυτά και τα ζώα. Τα βακτήρια και οι μύκητες έχουν παρόμοια δράση στην αποικοδόμηση των οργανικών υλικών στο νερό. Τα φύκη σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσουν λόγω της ετεροτροφίας τους, έλλειψη οξυγόνου και προβλήματα γεύσης, οσμών και να μεταβάλλουν την αισθητική κατάσταση του νερού (Σέντας, 2007).

1.7. Πηγές και διαδικασίες ρύπανσης υπόγειων νερών

Το νερό, είτε προέρχεται από τις βροχοπτώσεις ή από τα υγρά απόβλητα που εφαρμόζονται στο έδαφος είναι ο κύριος παράγοντας μεταφοράς ουσιών μέσα στο έδαφος.

Η ταφή των στερεών αποβλήτων (χωματερές από σκουπίδια οικισμών και στερεών αποβλήτων βιομηχανιών) μπορεί να αποτελέσει αιτία υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων νερών λόγω της έκπλυσης που προκαλεί το νερό που διέρχεται από τη μάζα των αποβλήτων. Τα εκπλύματα (leachates) αποτελούνται από το νερό που κατά την κίνησή του δια μέσου της μάζας των στερεών αποβλήτων εμπλουτίζεται με ρύπους και τα παράγωγα της αποικοδόμησης των αποβλήτων με τις χημικές και βιοχημικές αντιδράσεις (Αντωνόπουλος, 2001). Η ρύπανση των υδάτων οφείλεται σε τοξικές οργανικές ή ανόργανες ουσίες, σε οργανική ύλη και τα προϊόντα αποσύνθεσής της, σε άλατα αζώτου ή φωσφόρου κλπ (Χατζήμπιρος, 2007).

Η άρδευση σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά και εναπόθεση των ανόργανων ενώσεων και αλάτων στην ακόρεστη ζώνη. Λόγω της εξατμισοδιαπνοής, αυξάνει η συγκέντρωση των αλάτων στο εδαφικό νερό με αποτέλεσμα το νερό που διηθείται βαθιά να περιέχει διαλυμένα άλατα σε συγκεντρώσεις δύο και τρεις φορές μεγαλύτερες από αυτές του εφαρμοζόμενου νερού. Στα διαπερατά εδάφη, η περίσσεια νερού που περνά τη ζώνη παρασέρνει τα διαλυμένα υλικά (ιδιαίτερα τα ιόντα χλωρίου, θειικών, νιτρικών και νατρίου) στα υπόγεια νερά. Η επαναχρησιμοποίηση και

ανακύκλωση του νερού για άρδευση είναι μία σοβαρή διαδικασία συσσώρευσης των αλάτων στα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά (Αντωνόπουλος, 2001).

Τα υπόγεια νερά είναι πολύ ευαίσθητα στη ρύπανση διότι έχουν περιορισμένη ικανότητα αυτοκαθαρισμού. Η κατάληξη γεωργικών απορροών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης νιτρικών αλάτων με αποτέλεσμα τα υπόγεια νερά να γίνονται τοξικά για τον άνθρωπο και τους ζωικούς οργανισμούς (Χατζήμπιρος, 2007). Με την εφαρμογή των λιπασμάτων στο έδαφος, που συνήθως περιέχουν ανόργανα στοιχεία, προκαλείται αύξηση των λιπασματικών στοιχείων στο εδαφικό διάλυμα. Ποιοτικά οι πιο επιβλαβείς ρύποι για την υγεία του ανθρώπου, από τη γεωργία, είναι τα νιτρικά ιόντα, τα οποία με μεγάλη ευκολία μεταφέρονται με το νερό που διηθείται βαθιά δια μέσου της ακόρεστης ζώνης του εδάφους και της υπόγειας ροής στους υπόγειους υδροφορείς. Η άρδευση και η εφαρμογή των λιπασμάτων ανόργανου αζώτου φαίνεται ότι συντελούν στην ταχύτατη αύξηση των νιτρικών σε πολλές αγροτικές περιοχές. Αλλά αύξησή τους μπορεί να παρατηρηθεί και σε μη αρδευόμενες περιοχές με οργανικά εδάφη. Σ' αυτή την περίπτωση τα νιτρικά απελευθερώνονται κατά την ανοργανοποίηση των φυτικών υπολειμμάτων και των ζωικών αποβλήτων που ενσωματώνονται στο έδαφος. Τα στερεά απόβλητα (κοπριάς) των ζώων είναι επίσης σημαντικές πηγές νιτρικών και διαλυμένων αλάτων (Αντωνόπουλος, 2001).

Τα φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη γεωργία για την προστασία των καλλιεργειών από τα έντομα (εντομοκτόνα), μύκητες (μυκητοκτόνα) και βακτήρια (βακτηριοκτόνα) και την καταπολέμηση των ζιζανίων (ζιζανιοκτόνα) αποτελούν σημαντικό κίνδυνο ρύπανσης των υπογείων νερών. Παρ' ότι οι οργανικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σαν φυτοφάρμακα είναι ταχείας αποικοδόμησης, σημαντικές ποσότητες αυτών και των προϊόντων της διάσπασής τους έχουν καταγραφεί στα υπόγεια νερά. Σημαντικό ρόλο για τη σοβαρότητα της ρύπανσης από τα αγροχημικά αποτελεί η τοξικότητα, η ποσότητα και ο χρόνος παραμονής της ουσίας στο έδαφος καθώς και ο τρόπος εφαρμογής τους στο έδαφος (Αντωνόπουλος, 2001).

Οι πιο σπουδαίοι μικροοργανισμοί στα υπόγεια νερά είναι τα παθογόνα βακτήρια, οι μύκητες και διάφορα άλλα παράσιτα. Τα σοβαρότερα προβλήματα υγείας που προκαλούνται από τους μικροοργανισμούς του υπόγειου νερού είναι ο τύφος, η χολέρα και η ηπατίτιδα. Οι πηγές των μικροοργανισμών είναι τα ανθρώπινα και ζωικά λύματα και

απόβλητα. Η ρύπανση των υπόγειων νερών προκαλείται από την εδάφια διάθεση των λυμάτων των σταθμών επεξεργασίας αστικών λυμάτων και σηπτικών δεξαμενών, τις εκπλύσεις από τους σκουπιδότοπους, και τις ποικίλες γεωργικές πρακτικές, όπως η διάθεση στο έδαφος της ζωικής κόπρου για οργανική λίπανση (Αντωνόπουλος, 2001).

Τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά (non-aqueous phase liquids NAPLs), είναι ρύποι, που η παρουσία τους στην ακόρεστη ζώνη παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Τα υγρά αυτά εμφανίζουν μία χωριστή υγρά φάση στο υδάτινο περιβάλλον. Γενικά τα NAPLs είναι υγρά τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από του νερού. Διακρίνονται σε LNAPLs που είναι τα μη αναμίξιμα με το νερό υγρά με πυκνότητα μικρότερη από το νερό και σε DNAPLs που έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από το νερό. Παράδειγμα ελαφρότερων από το νερό είναι τα υγρά καύσιμα των υδρογονανθράκων, όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο θέρμανσης, η κηροζίνη.

Τα LNAPLs δημιουργούν συχνά προβλήματα ρύπανσης που σχετίζονται με την έκλυση διαφόρων πετρελαιοειδών στο έδαφος, στο υπέδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Τα προϊόντα αυτά είναι συνήθως σύνθετα μίγματα οργανικών ενώσεων, οι οποίες έχουν διαφορετικές διαλυτότητες στο νερό. Ορισμένα συστατικά (πχ αιθέρες, αλκοόλες) χαρακτηρίζονται από υψηλές διαλυτότητες, ενώ άλλα (πχ βενζόλιο, τουόλιο, αιθυλοβενζόλιο) από χαμηλές διαλυτότητες (Newell, 1995). Στα DNAPLs περιλαμβάνονται οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες όπως οι τετραχλωράνθρακες, το 1,1,1 τριχλωροαιθάνιο, οι χλωροφαινόλες, τα χλωροβενζόλια, τα τετραχλωροαιθυλένια και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs).

Η σημασία των NAPLs στα υπόγεια νερά οφείλεται στην εμμονή τους κάτω από το έδαφος και την ικανότητα που έχουν να ρυπαίνουν μεγάλους όγκους νερού λόγω της μικρής δυνατότητας απομάκρυνσής του. Η μετακίνηση των ουσιών αυτών στο έδαφος εξαρτάται από την ποσότητα που ελευθερώνεται στο έδαφος, τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους και τη δομή του εδάφους δια μέσου του οποίου μετακινούνται.

Η μεταβολή της υδραυλικής ισορροπίας λόγω της άντλησης και υπεράντλησης των υπόγειων νερών είναι η αιτία για την εισροή νερών χαμηλής ποιότητας, υφάλμυρων ή εμπλουτισμένων με ιχνοστοιχεία και βαριά μέταλλα από διπλανούς, επάλληλους υδροφορείς και από τη θάλασσα είναι η αιτία της υφαλμύρησης των παραθαλάσσιων υδροφορέων (Αντωνόπουλος, 2001).

1.8. Κλιματική αλλαγή και αίτια

Η κλιματική αλλαγή είναι μία από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές απειλές που αντιμετωπίζει ο πλανήτης σήμερα. Η Σύμβαση-Πλαίσιο του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή, UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), ορίζει την κλιματική αλλαγή, στο άρθρο 1, ως «μια αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα και που μεταβάλλει τη σύνθεση της ατμόσφαιρας του πλανήτη και η οποία έχει παρατηρηθεί από τη φυσική μεταβολή του κλίματος κατά την διάρκεια συγκρίσιμων χρονικών περιόδων».

Το κλίμα της γης έχει υποστεί πολλές μεταβολές κατά το παρελθόν. Κάποιες από αυτές μπορούν να θεωρηθούν ως αποτέλεσμα μεμονωμένων ακραίων γεγονότων, οπότε και το μέγεθος της μεταβολής ήταν μεγάλο και συντελούνταν απότομα, σε βάθος μερικών δεκαετιών. Σε άλλες περιπτώσεις διαπιστώνεται η ύπαρξη περιοδικότητας στις κλιματικές αλλαγές με περιόδους που ποικίλουν σε κλίμακα μεγέθους από μερικές χιλιάδες έως και μερικά εκατομμύρια έτη. Τα αίτια τους ήταν κυρίως φυσικά φαινόμενα όπως η μετάπτωση της γήινης τροχιάς γύρω από τον ήλιο, αλλαγές της κλίσης του άξονα περιστροφής της γης, μεταβολές της ηλιακής και της ηφαιστειακής δραστηριότητας, μετάπτωση των ηπείρων της γης κλπ. Η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος όμως εκδηλώνεται και απότομα, δηλαδή σε μικρές, σχετικά, χρονικές κλίμακες (της τάξης των αιώνων) (Λυκούδης Σ., et al 2005 Κλιματική αλλαγή στον Ελλαδικό χώρο).

Από τη βιομηχανική επανάσταση κι έπειτα, εκτός από τα φυσικά αίτια στην αλλαγή του κλίματος συντέλεσαν και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Τέτοια παραδείγματα αιτιών είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου (καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο), η αλλαγή της συμπεριφοράς της επιφάνειας της γης ή και του συστήματος γη-ατμόσφαιρα στο να απορροφά ή να αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία (π.χ μεταβολή ενός παρθένου δάσους σε καλλιεργήσιμη έκταση) και τέλος οι εκπομπές διαφόρων ρύπων (πχ αιωρούμενων σωματιδίων, αεροζόλ) που αντανακλούν ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας και οδηγούν σε μείωση της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια της γης.

Επιπλέον, μετά τη δεκαετία του 1950 κι έπειτα, έχουμε μία ραγδαία αύξηση σε μία σειρά από παράγοντες όπως ο πληθυσμός της γης, η χρήση νερού και λιπασμάτων, η κατανάλωση χαρτιού, ο αριθμός των αυτοκινήτων και των κινητών τηλεφώνων κλπ. Όλες οι παραπάνω δράσεις που έχουν αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες, για να γίνουν χρειάζονται ενέργεια, η οποία σημαίνει κατανάλωση θερμοκηπικών αερίων και παραγωγή ρυπογόνων ενώσεων στην ατμόσφαιρα.

1.8.1. Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής

Σύμφωνα με νέα επιστημονική μελέτη του Κέντρου Ερευνών της Κομισιόν, η Ελλάδα είναι ανάμεσα στις χώρες που προβλέπεται ότι θα αντιμετωπίσουν αυξημένες ελλείψεις νερού. Ανάλογα προβλήματα αναμένεται να αντιμετωπίσουν και οι Ισπανία, Ιταλία, Κύπρος και Τουρκία. Οι ερευνητές προβλέπουν σημαντικές μειώσεις στην αναπλήρωση του υδροφόρου ορίζοντα ιδίως για την Ελλάδα -ετήσια απώλεια της τάξης των 810 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων νερού- αλλά και την Ισπανία και την Πορτογαλία, κάτι που σημαίνει μειωμένη διαθεσιμότητα νερού για άρδευση γεωργικών καλλιεργειών, άρα και μειωμένη διαθεσιμότητα τροφίμων.

Σύμφωνα με έρευνα την οποία παρουσιάζει το ΑΠΕ, οι επιστήμονες εκτιμούν ότι ενώ από τη μία θα υπάρχουν αυξημένες πλημμύρες, από την άλλη θα επιδεινώνεται η λειψυδρία, ιδίως τα καλοκαίρια. Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επηρεάσει την κατακρήμνιση και την εξατμισοδιαπνοή και συνεπώς μεταβλητές όπως η διαθεσιμότητα ύδατος σε τοπικό επίπεδο και σε εποχιακή κλίμακα και οι ποτάμιες απορρίψεις (Arnell et al., 2011). Οι συνέπειες οφείλονται κυρίως στην κλιματική αλλαγή (σε ποσοστό 80 ως 90%) κι έπειτα σε άλλους παράγοντες, όπως η χρήση της γης και του νερού (10% ως 20%).

Η αυξανόμενη ξηρασία στον ευρωπαϊκό νότο θα οδηγήσει σε ολοένα μεγαλύτερη έλλειψη νερού και σε μειωμένα υδάτινα αποθέματα για τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια σε μεσογειακές χώρες όπως η Ελλάδα. Αυτό θα έχει ως συνέπεια, εκτός από τη γεωργία και τα τρόφιμα, να επηρεασθούν αρνητικά επίσης οι τομείς της παραγωγής ενέργειας, της βιοπικιοιλότητας και των μεταφορών.

Μια ανασκόπηση σε μελέτες και σενάρια κλιματικής αλλαγής δείχνει ότι οι τάσεις που παρατηρήθηκαν πρόσφατα και οι προβολές από τα κλιματικά μοντέλα κάνουν λόγο

για μια ισχυρή ευαισθησία σε αλλαγή του υδρολογικού καθεστώτος, μια αυξανόμενη γενική έλλειψη υδάτινων πόρων με συνακόλουθες απειλές για τη διαθεσιμότητα και τη διαχείριση του νερού (Ludwig et al. 2011).

Βάση της έρευνας του καθηγητή Asis Sarma του Πανεπιστημίου της Νέας Νότιας Ουαλίας της Αυστραλίας επιβεβαιώνεται το παράδοξο: τα αποθέματα νερού συρρικνώνονται, ενώ η κλιματική αλλαγή προκαλεί πιο έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες. Η αιτία είναι ότι η άνοδος της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερη ξηρασία του εδάφους, ιδίως σε περιοχές ήδη ξηρές.

Την παραπάνω έρευνα έρχεται να επιβεβαιώσει η κατάσταση στο νησί της Κρήτης, όπου η ανάλυση των κλιματικών μοντέλων δείχνει ότι οι βροχοπτώσεις στο νησί είναι λιγότερο συχνές, αλλά πιο έντονες και η ξηρασία είναι πιθανό να γίνει συχνότερη και σοβαρότερη (Koutroulis et al., 2010, 2011, Tsanis et al., 2011). Οι συρρίκνωση των περιόδων των βροχοπτώσεων και οι μετατοπίσεις εποχικότητας θα μπορούσαν να επηρεάσουν σοβαρά τα αποθέματα υδατικών πόρων με σημαντική μείωση της διαθεσιμότητας νερού με ευρείες συνέπειες για τις τοπικές κοινωνίες και τα οικοσυστήματα. Ενδεικτικό είναι ότι κατά την τελευταία δεκαετία το νησί της Κρήτης αντιμετώπισε αυξημένο αριθμό ξηρασιών (Koutroulis et al., 2011).

Η ταχεία ανάπτυξη της Κρήτης τα τελευταία 30 χρόνια έχει ασκήσει ισχυρές πιέσεις σε πολλούς φυσικούς πόρους. Η αστικοποίηση και η ανάπτυξη της γεωργίας και του τουρισμού έχουν ισχυρό αντίκτυπο σχετικά με τους υδάτινους πόρους του νησιού αυξάνοντας ουσιαστικά τη ζήτηση νερού. Η χρήση νερού στην Κρήτη αυξήθηκε μετά την επέκταση των αρδευόμενων εκτάσεων κατά πάνω από 55% κατά την περίοδο 1985-2000 (Donta et al, 2005).

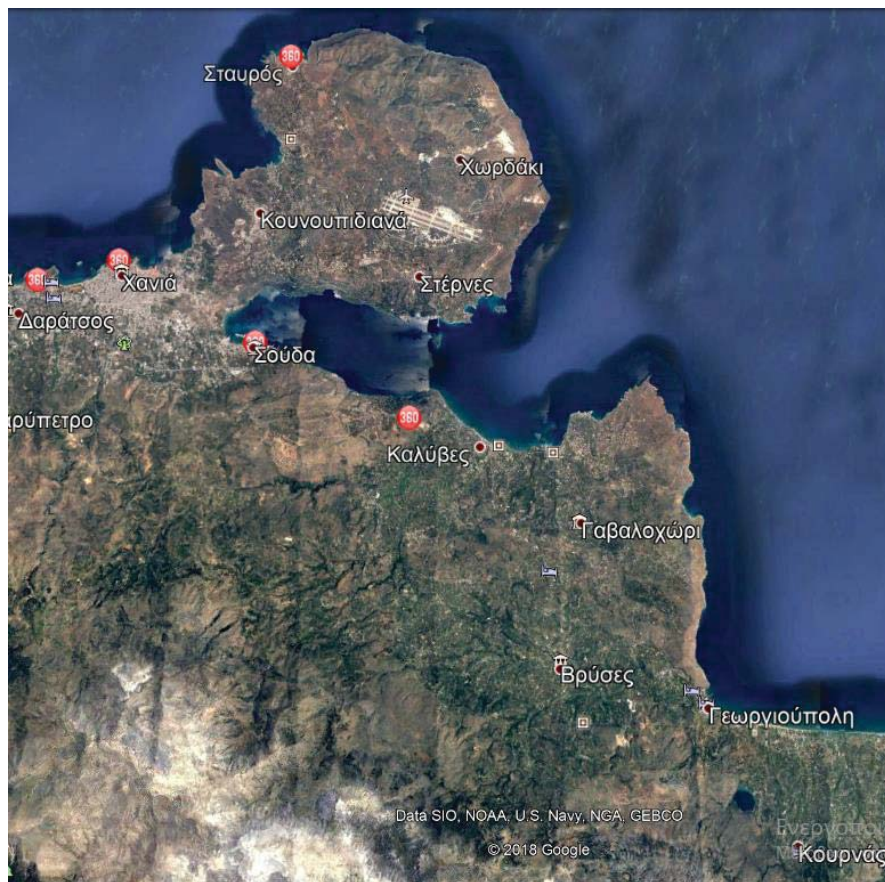
Το κύριο συμπέρασμα είναι ξεκάθαρο. Η θέρμανση του κλίματος είναι πέρα από κάθε αμφιβολία και αυτό οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα. Η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή κρίνεται επιτακτική με έμφαση στην αντιμετώπιση των ολοένα και πιο σοβαρών προβλημάτων ύδατος μέσω της χρήσης ολοκληρωμένων στρατηγικών πολιτικών.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1. Περιγραφή της Περιοχής Μελέτης

Η περιοχή μελέτης ευρίσκεται 20 km ανατολικά της πόλης των Χανίων και συνορεύει νότια με το δήμο Σφακίων και ανατολικά με το νομό Ρεθύμνου. Καταλαμβάνει έκταση περίπου 162 km² και καλύπτει ένα μέρος του Δήμου Αποκορώνου, πιο συγκεκριμένα τα χωριά των Αρμένων, Πλάκας, Γαβαλοχωρίου, Βάμου, Κεφαλά, Βρυσών, Εμπρόσνερου και Αλικάμπου. Η ακτογραμμή της περιοχής μελέτης είναι περίπου 53 km. Όπως φαίνεται και στο Χάρτη 1 εκτείνεται από τους πρόποδες των Λευκών Ορέων μέχρι την παράκτια ζώνη και από την ανατολική πλευρά συνορεύει με το Ν. Ρεθύμνης.

Γενικά, βάσει των απογραφών του 1991, 2001, 2011 ο πληθυσμός αυξάνεται και σύμφωνα με τα στοιχεία της απογραφής ΕΛΣΤΑΤ 2011, η έκταση του Δήμου είναι 323.13 Km² και ο πληθυσμός του 12.807 κάτοικοι.



Χάρτης 1. Δορυφορική απεικόνιση ευρύτερης περιοχής Αποκόρωνα Χανίων (Πηγή: Google Earth Pro)

2.2. Λεκάνη Στύλου, Αρμένων, Ζούρμπου, Βρύσες

Στο υδροφόρο σύστημα της περιοχής μελέτης απορρέουν οι πηγές του Στύλου, των Αρμένων, του Ζούρμου και των Βρυσών. Η τροφοδοσία των πηγών αυτών προέρχεται από το καρστικό ασβεστολιθικό σύστημα των Λευκών Ορέων και στην περιοχή μελέτης έχουν καταγραφεί κύρια και δευτερεύοντα γεωλογικά ρήγματα. Μέσο των παραπάνω ρηγμάτων η υπόγεια ροή, σε αρκετές περιπτώσεις, εκφορτίζεται στις διάφορες πηγές της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Κοντά στις πηγές που εκφορτίζονται στην περιοχή μελέτης το βάθος του νερού είναι 1.0 – 1.5 m, όμως υπάρχουν κατά μήκος της κοίτης του Κοιλιάρη τμήματα με 2.5 m βάθος, ενώ πριν από την εκβολή του το βάθος αυξάνεται απότομα στα 5 m και μειώνεται προοδευτικά μέχρι την εκβολή, όπου φτάνει τα

0.5 m (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010). Οι κυριότερες πηγές που βρίσκονται στην περιοχή είναι οι εξής:

A. Πηγές Στύλου

Οι πηγές του Στύλου αναβλύζουν στα +17 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και η εμφάνισή τους οφείλεται στην παρεμπόδιση της ροής του υπόγειου νερού του καρστικού υδροφορέα από τις μαργαϊκές (νεογενείς) αποθέσεις (εξαιτίας της τεκτονικής επαφής). Οι πηγές του Στύλου θεωρούνται ως τα βασικότερα σημεία εκφόρτισης του καρστικού συστήματος του Δυτικού Αποκόρωνα και μια από τις κυριότερες πηγές τροφοδοσίας του ποταμού Κοιλιάρη. Βάση μετρήσεων της Υπηρεσίας Εγγείων Βελτιώσεων του Νομού Χανίων η μέση ετήσια εκφόρτιση είναι $85 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και 90 % αυτής αντιστοιχεί στην περίοδο Νοεμβρίου-Ιουνίου. Το καλοκαίρι που δεν υπάρχουν βροχοπτώσεις και η τροφοδοσία του συστήματος με νερό είναι πρακτικά μηδενική ο υδροφορέας βρίσκεται σε καθεστώς συνεχούς αποφόρτισης που παρακολουθείται μέσω της παροχής της πηγής (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).

B. Πηγές Αναβρετής

Πρόκειται για περιοδικές πηγές, οι οποίες εμφανίζονται μόνο το χειμώνα στις παρυφές του οικισμού Νιό Χωριό σε απόλυτο υψόμετρο 24 m. Αποτελούν προσωρινές πηγές αφού η ροή τους διακόπτεται το θέρος. Οι πηγές Αναβρέτης τροφοδοτούν της πηγές του Στύλου και τα νερά καταλήγουν στον ποταμό Κοιλιάρη (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).

Γ. Πηγές Αρμένων

Πρόκειται για μια ομάδα πηγών που βρίσκεται στο χωριό Αρμένοι. Οι σπουδαιότερες πηγές είναι στις θέσεις Παναγιά, Πλάτανος, Πηγαδάκι. Η λειτουργία των πηγών μοιάζει με εκείνη των πηγών Στύλου. Οι πηγές Αρμένων εκφορτίζονται στο Μεσοπόταμο. Η επιφανειακή απορροή του Μεσοποτάμου εξαρτάται από τα νερά των μόνιμων πηγών Αρμένων. Η λειτουργία των πηγών ομοιάζει με εκείνη των πηγών Στύλου. Οι πηγές εκρέουν σε απόλυτο υψόμετρο +18m και το νερό απορρέει μέσω του ποταμού Μεσοπόταμου στον οικισμό Καλύβες. Η Μέση ετήσια εκφόρτιση των πηγών είναι $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ και 81% αυτής εντοπίζεται τους μήνες Νοεμβρίου-Ιουνίου (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).

Δ. Πηγές Ελαιονώρας η Ζούρμπου

Το ισοζύγιο πηγών κατανέμεται ισομερώς καθ' όλη την διάρκεια του έτους, με πολύ μικρές διακυμάνσεις στην παροχή τους. Το νερό των πηγών είναι βεβαρυμένο με ιόντα χλωρίου (280 ppm χλωριόντων) δεδομένου του χαμηλού υψομέτρου (1-2 m) και της μικρής απόστασης των πηγών από τη θάλασσα. Η Μέση ετήσια εκφόρτιση των πηγών είναι $30 \cdot 10^6$ m³ και 70% αυτής εντοπίζεται τους μήνες Νοεμβρίου-Ιουνίου (Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).

Ε. Οι υφάλμυρες πηγές των Βλυχάδων

Οι πηγές βρίσκονται στον Κοιλιάρη ποταμό, σε απόσταση περίπου 1000 m από τις εκβολές του. Το νερό των πηγών είναι με αυξημένα χλωριόντα (1000 ppm) και συμβάλουν στον Κοιλιάρη 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 ppm. και χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή τους (Βοζινάκης, Κουγιάννη, 2004).

Ζ. 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.

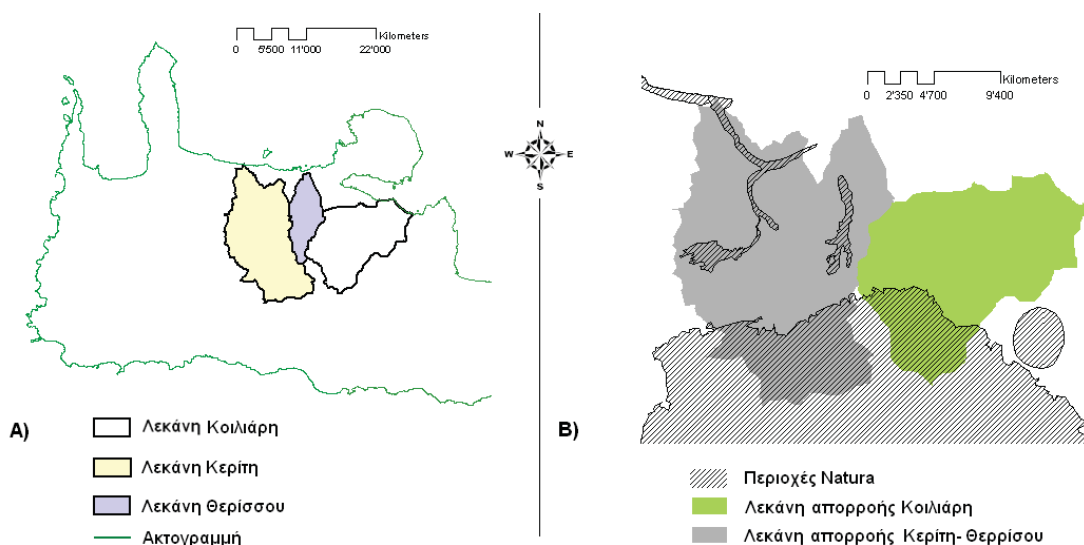
Η. Υπολεκάνη Βρύσες

Πρόκειται για ανεξάρτητη καρστική λεκάνη, της οποίας ο υπόγειος υδροκρίτης παροχετεύει τα νερά στη θέση Μπούτακα, 3 Km νότια του χωριού Βρύσες και σε υψόμετρο περί τα 150 m. Το μέσο ετήσιο ισοζύγιο είναι περί τα $26 \cdot 10^6$ m³ 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 Βρύσες, Φιλλίπου, Βαβες, Εμπρόσνιερο, Αλικάμπος, Νίππος κ.α. με παροχές νερού από 60 έως 80 m³/h. Ο συνολικός όγκος αντλούμενου νερού είναι περί τις 2x10⁶ m³ κυρίως την αρδευτική περίοδο. Από τον υδροφορέα αυτό γίνεται και μεταφορά νερού στο Δήμο Σφακίων, στον οικισμό Ασκήφου. (Βοζινάκης, Κουγιάννη, 2004).

Βάση του Προσχέδιου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης, η χημική και ποσοτική κατάσταση των υπόγειων υδάτων της περιοχής χαρακτηρίζεται «καλή». Οι κύριες πιέσεις που ασκούνται στον υδροφορέα προέρχονται από την άντληση που γίνεται την κάλυψη γεωργικών αναγκών, κυρίως από τα ελαιοτριβεία της περιοχής και όπως αναφέρεται στο Προσχέδιο Διαχείρισης κρίνεται απαραίτητη η λήψη συμπληρωματικών μέτρων αποκατάστασης, καθώς παρατηρούνται φαινόμενα τοπικής και φυσικής υφαλμύρισης.

Ακολουθεί ο Χάρτης 2 με τις λεκάνες απορροής Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη βρίσκονται στα κεντρικά και ανατολικά του βόρειου τμήματος του Ν. Χανίων.



Χάρτης 2. Λεκάνες Απορροής Ποταμού (Πηγή: *Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κοιλιάρη, Χανιά*. Νικολαΐδης, Καρατζάς, 2010).

2.3. Υδρογεωλογία

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μία ενδιαφέρουσα και πολύπλοκη γεωλογική δομή. Καθώς οι χάρτες του ΙΓΜΕ παρουσιάζουν μια αδυναμία γεωλογικής ενοποίησης λόγω γεωλογικής ασυμβατότητας μεταξύ τους στο σημείο των περιοχών Δράπανος και Κεφαλάς, ως γεωλογικό υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκε ο Γεωλογικός Χάρτης Παυλάκη Αικ., «Τεχνικές Γεωλογικές συνθήκες στο Ν.Χανίων», Διδακτορική Διατριβή, 2008. Ο εν λόγω χάρτης παρέχει την απαιτούμενη επιστημονική πιστότητα και είναι συμβατός με τις νέες επιστημονικές απόψεις της γεωλογικής δομής της περιοχής. Στην περιοχή υπάρχουν τα εξής στρώματα και γεωλογικοί σχηματισμοί:

Στο κεντρικό και βόριο παραθαλάσσιο τμήμα της περιοχής μελέτης συναντώνται μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κροκαλοπαγή και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι των νεογενών σχηματισμών που φιλοξενούν επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου έως μικρού δυναμικού.

Σε μικρότερη συχνότητα στο κεντρικό και βοριοδυτικό μέρος της περιοχής μελέτης απαντώνται κοκκώδεις κυρίως αποθέσεις κυμαινόμενης υδροπερατότητας. Πρόκειται για αλλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, πλευρικά κορήματα και οι κώνους κορημάτων (όταν υπάρχει σημαντική εξάπλωση). Συνιστούν έναν επιφανειακό μανδύα ο οποίος καλύπτει τις κοίτες των ρεμάτων, ποταμών, τμήματα εσωτερικών λεκανών και την παράκτια ζώνη. Κοντά στη θάλασσα ο υδροφορέας σε αυτό το σημείο πιθανότατα να έχει υποστεί υποβάθμιση εξαιτίας της υφαλμύρισης.

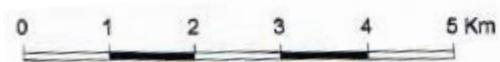
Σε μεγάλη έκταση στο κεντρικό και βόριο παραθαλάσσιο μέρος της περιοχής απαντώνται πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός του νεογενούς. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη ασθενών υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστολίθων. Κατά θέσεις στις νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία, όμως υποβαθμισμένη εξαιτίας των θειικών ιόντων.

Στο βοριοανατολικό κομμάτι της περιοχής επίσης απαντώνται κατά τμήματα σε 3 σημεία ισχυρά τεκτονισμένοι και καρστικοποιημένοι ανθρακικοί σχηματισμοί που

περιλαμβάνουν στους ανώτερους ορίζοντες, αδρομερή ανθρακικά κροκαλολατυτοπαγή και ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους - δολομιτικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη υδροπερατότητα στην περιοχή. Στους κατώτερους ορίζοντες, ισχυρά ανακρυσταλλωμένους πλακώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους και δολομίτες.

Στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, προς τους πρόποδες των Λευκών Ορέων και στα βόρεια και ανατολικά της περιοχής σε μεγάλα συναντώνται πλακώδεις ασβεστόλιθοι και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ιουρασικής - Ηωκαινικής ηλικίας. Πρόκειται για ισχυρά ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, στρωματώδεις, διαρρηγμένους, αναπτυσσόμενους σε χαρακτηριστική μορφή "πάγκων".

Τέλος, σε πολύ λίγα σημεία διάσπαρτα στην περιοχή μελέτης υπάρχουν μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα διαφόρων ζωνών και καλυμμάτων.



Χάρτης 3. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (Πηγή: Παυλάκη., «Τεχνικές Γεωλογικές συνθήκες στο Ν.Χανίων», 2008)

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

I. ΧΑΛΑΡΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ (F=18.1%)



ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($K > 10^{-5}$ m/sec)

(F= 6,7%)

Αλλουβιακές αποθέσεις. Τεταρτογενές (al) [2,35x10 < K < 3,48x10]. Περιλαμβάνουν τις αλλουβιακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς (al), οι οποίες αντιπροσωπεύονται από χαλαρά υλικά, τα οποία αποτελούνται κυρίως από άμμους και ποικίλου μεγέθους κροκαλολατύπες με μικρή περιεκτικότητα αργίλου. Συνιστούν ένα επιφανειακό μανδύα ο οποίος καλύπτει τις κοίτες ρεμάτων, ποταμών, τμήματα εσωτερικών λεκανών και την παράκτια ζώνη. Η κίνηση του νερού γίνεται μέσω του πρωτογενούς πορώδους.



ΗΜΙΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($10^{-8} < K < 10^{-5}$ m/sec)

(F= 5,9%)

Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων με ή χωρίς αργιλικό υλικό. Τεταρτογενές (sc-cs)

Διλλουβιακές αποθέσεις (dl). Πρόκειται κυρίως για ερυθρές ποτάμιες και χειμαρρώδεις αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από αναμεμειγμένα χαλαρά υλικά κροκαλολατυπών, χαλίκων, αργίλων και άμμων.

Κροκαλολατυποπαγείς σχηματισμοί με χαλαζιτικά κλαστικά στοιχεία. Κ. Μειόκαινο (Me). Πρόκειται για καστανέρυθρους χαλαρούς σχηματισμούς οι οποίοι αποτελούνται από φυλλιτικές και χαλαζιτικές κροκαλολατύπες αναμεμειγμένες με αργιλομαργαϊκό υλικό.



ΥΔΑΤΟΣΤΕΓΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($K < 10^{-8}$ m/sec)

(F= 5,5%)

Αργιλοϊλίες των αλλουβιακών αποθέσεων (al). [4,70x10 < K < 1,89x10].

Ερυθρογή του Τεταρτογενούς (Ter). Πρόκειται για την ερυθρή άργιλο, που είναι προϊόν καρστικής διάβρωσης ανθρακικών πετρωμάτων και αποτίθεται σε επιφάνειες οροπεδίων, δολινών και στα ανοίγματα των ρωγματώσεων και των εγκοιλοδομών. Έχει σημαντικές εμφανίσεις στην περιοχή Ακρωτηρίου Χανίων.

Μάργες χαλάρες του Πλειόκαινου (Plm) και της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς του Μειοκαινού (Ms). [9,32x10⁻⁹ < K < 1,02x10⁻⁸].

II. ΒΡΑΧΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

(F=81,9%)



ΥΔΡΟΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($K > 10^{-6}$ m/sec)

(F=36,9%)

Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρίπολης. Τριαδικό - Ηώκαινο (Ktr) [5,27x10⁻⁴ < K < 8,00x10⁻⁴]

Αποτελούνται από παχυστρωματώδεις, σνακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους και δολομίτες έντονα τεκτονισμένους και κατά θέσεις λατυποπαγείς και καρστικοποιημένους.

Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρυπαλίου. Τριαδικό - Ιουρασικό (Trip) [6,05x10⁻³ < K < 7,77x10⁻³].

Αποτελούνται από ισχυρά τεκτονισμένους και καρστικοποιημένους ανθρακικούς σχηματισμούς που περιλαμβάνουν : Στους ανώτερους ορίζοντες, αδρομερή ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή και

ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους - δολομιτικούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη υδροπερατότητα στην περιοχή. Στους κατώτερους ορίζοντες, ισχυρά ανακρυσταλλωμένους πλακώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους και δολομίτες.

Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι της ομώνυμης ενότητας. Αν. Τριαδικό-Ηώκαινο (Pk) $[6,16 \times 10^{-5} < K < 2,93 \times 10^{-3}]$

Πρόκειται για ισχυρά ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, στρωματώδεις, διαρρηγμένους, αναπτυσσόμενους σε χαρακτηριστική μορφή "πάγκων".



ΗΜΙΠΕΡΑΤΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($10^{-9} < K < 10^{-6}$ m/sec)

(F= 8,9%)

Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Αν. Μειοκαίνου - Κ. Πλειοκαίνου (Mk-Plk) καθώς και των Πλειοκαινικών ιζημάτων (Plm) $[4,41 \times 10^{-7} < K < 2,49 \times 10^{-6}]$.

Κροκαλολατυποπαγείς σχηματισμοί με ασβεστολιθικές κροκάλες. Κ.-Μ. Μειόκαινο (Mbr) $[K=8,45 \times 10^{-7}]$.

Πρόκειται περί συμπαγών σχηματισμών κροκαλολατυποπαγών, οι οποίοι αποτελούνται από ασβεστολιθικές κροκάλες και λατύπες που συνδέονται με ψαμμιτομαργαϊκό ή ανθρακικό υλικό.

Ασβεστόλιθοι Πίνδου. Ανώτερο Κρητιδικό (KPi). Πρόκειται για τεκτονισμένους πλακώδεις ασβεστολίθους με κονδύλους και ενστρώσεις υπόλευκων και μαύρων ασβεστολίθων και ερυθρόλευκων σχιστολίθων.



ΥΔΑΤΟΣΤΕΓΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ($K \leq 10^{-9}$ m/sec)

(F=36,1%)

Συνεκτικές Μάργες των Μειοκαινικών (Ms) και Πλειοκαινικών ιζημάτων (Plm)

Φλύσξης Πίνδου. Παλαιοκαίνο (fp2). Αποτελείται από αργιλικούς σχιστόλιθους και ψαμμίτες με περιορισμένες εμφανίσεις στο δυτικό τμήμα Ν. Χανίων.

Πρώτος Φλύσξης Πίνδου. Κρητιδικό (fp1). Αποτελείται από εναλλαγές λεπτοστρωσιγενών αργιλομαργαϊκών σχιστολίθων, κερατολίθων και ερυθρών μαργών.

Φλύσξης Τριπόλεως. Αν. Ηώκαινο – Ολιγόκαινο (ft). Αποτελείται από καστανόφαιους αργιλικούς σχιστόλιθους και ψαμμίτες, οι οποίοι περιέχουν φακούς τεφρών ασβεστολίθων.

Φυλλίτες - Χαλαζίτες της ομώνυμης ενότητας. Πέρμιο -Τριαδικό (Ph) $[9,23 \times 10^{-10} < K < 2,41 \times 10^{-8}]$. Αποτελούνται από εναλλαγές στρώσεων φυλλιτών, χαλαζιτών και σχιστολίθων. Τοπικά παρουσιάζεται χαλαρός εδαφικός μανδύας από αποσθαρωμένα και κατακερματισμένα υλικά φυλλιτών - χαλαζιτών. $[2,07 \times 10^{-8} < K < 2,39 \times 10^{-5}]$.

Μεταφλύσξης Λευκών Ορέων. Ηώκαινο (fpk). Αποτελείται από πράσινους ασβεστιτικούς φυλλίτες με εξαιρετικά περιορισμένες εμφανίσεις στα Λευκά Όρη.











ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

K : Συντελεστής υδροπερατότητας σε m/sec, όπου :

[**K**]: Η τιμή του συντελεστή υδροπερατότητας, όπως προέκυψε είτε από δοκιμές εισπίεσης νερού Lefranc, Maag και Lugeon σε γεωτρήσεις είτε από αντλητικές δοκιμασίες είτε από τη στατιστική επεξεργασία της μικροτεκτονικής ανάλυσης των τεκτονικών ασυνεχειών που διατρέχουν τους βραχώδεις σχηματισμούς, σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο Kiraly.

(**K**): Εύρη τιμών του συντελεστή υδροπερατότητας, σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές.

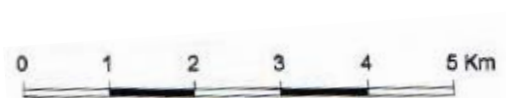
(**F**): Ποσοστό επί τοις εκατό της επιφάνειας σχηματισμού σε σχέση με τη συνολική επιφάνεια περιοχής έρευνας.

	Όριο γεωλογικών σχηματισμών
	Ζώνη επώθησης
	Τεκτονική επαφή με κανονικό ρήγμα μικρής γωνίας κλίσης
	Κανονικό έως πλαγιοκανονικό ρήγμα με εμφανή μετάπτωση
	Ζώνη διάρρηξης : μεγάλου μήκους κατακλάσεις και ρήγματα (μη επαρκώς διαπιστωμένα στο πεδίο, αλλά διαπιστωμένα ως μορφοτεκτονικές γραμμώσεις από τη συνολοξολόγηση στοιχείων επεξεργασμένων δορυφορικών εικόνων, θερμο- γραφημάτων και αεροφωτογραφιών)
	Υδρογραφικό δίκτυο
	Όριο κύριας λεκάνης απορροής
	Μεγάλη πηγή
	Μεγάλη πηγή υφάλμυρου νερού
	Υποθαλάσσια εκφόρτιση

Σημειώσεις:

- Οι αργιλοΐλεις των αλλουβιακών αποθέσεων (al), συναντώνται περιορισμένα σε τοπική κλίμακα μη χαρτογραφήσιμη
- Οι μάργες του Πλειοκαίνου (Plm) και της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς του Μειοκαίνου (Ms), συναντούνται είτε ως χαλαροί είτε ως συνεκτικοί σχηματισμοί

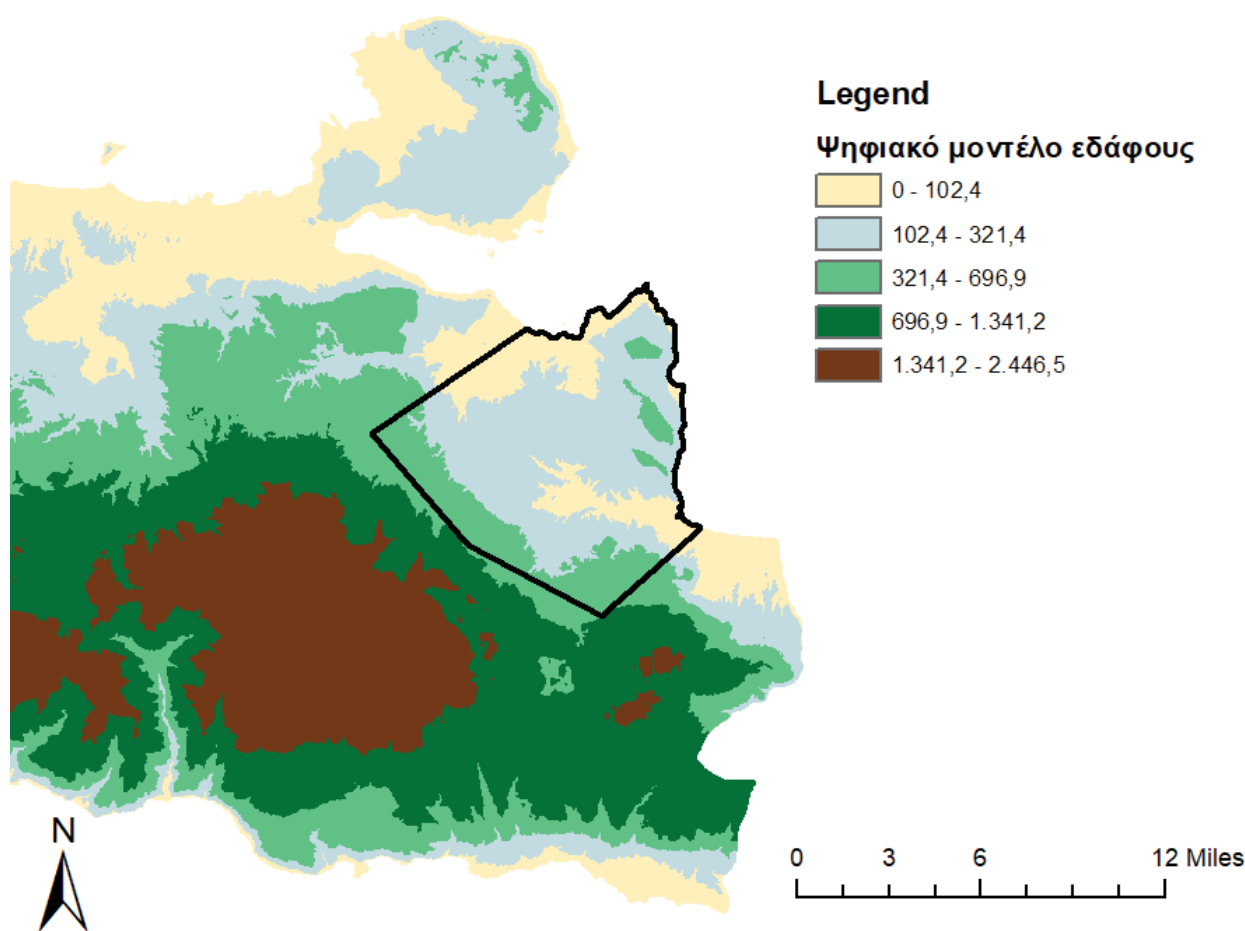
Κλίμακα 1 : 100.000



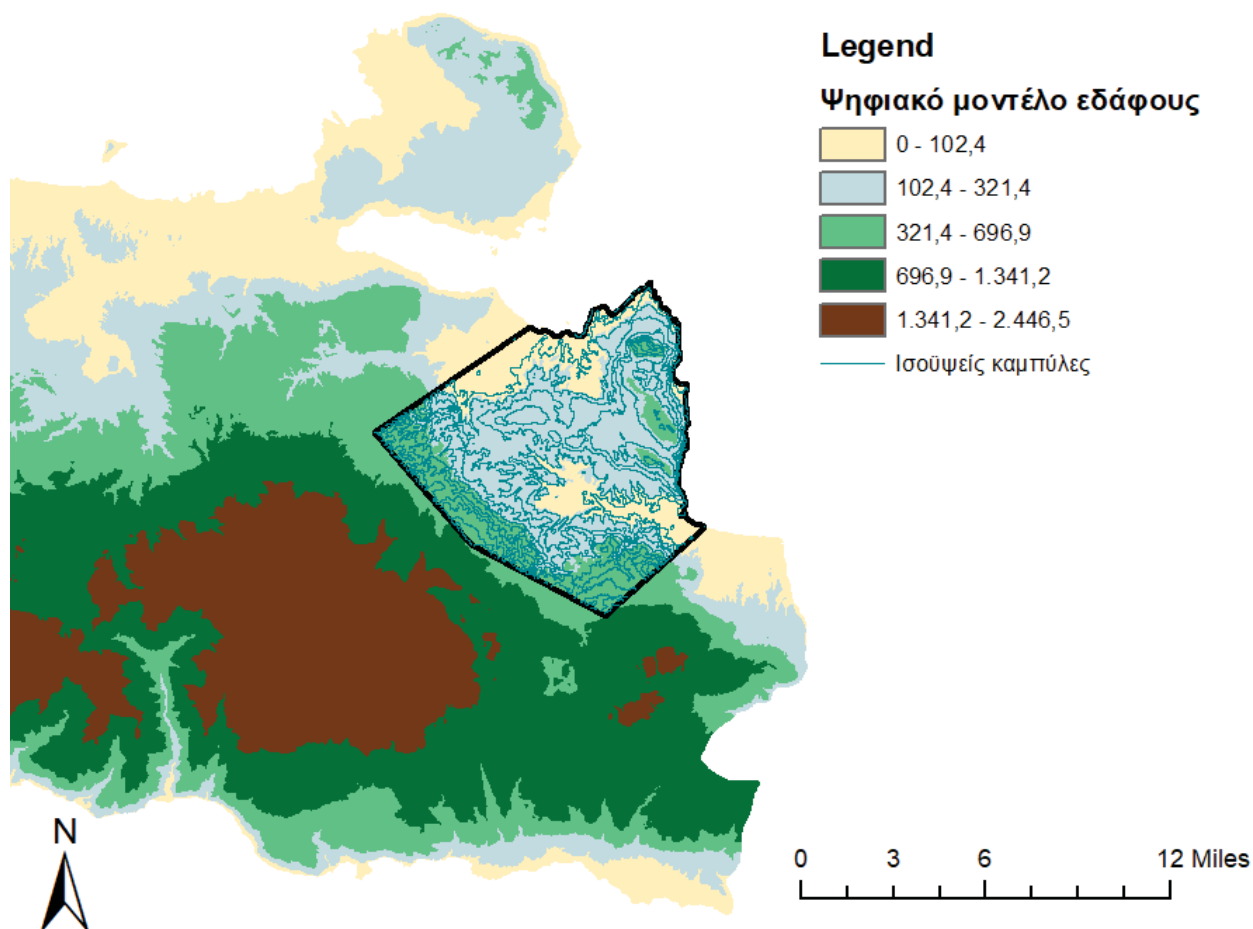
2.4. Γεωμορφολογία

Το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης ποικίλει. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μικρές τοπογραφικές κλίσεις, εκτός από την περιοχή κοντά στους πρόποδες των Λευκών Ορέων όπου εκεί η κλίση προσεγγίζει το 40%.

Το υψόμετρο παρουσιάζεται στον παρακάτω Χάρτη 4 και όπως φαίνεται τα σημεία που εμφανίζεται πιο μεγάλα υψόμετρα (300 m) συναντώνται στο βόριο τμήμα της λεκάνης στο όρος που υπάρχει δίπλα στο συνοικισμό Δράπανο και προς το νότιο-δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, καθώς πλησιάζουμε στους πρόποδες των Λευκών Ορέων (600 m).



Χάρτης 4. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με χρήση GIS (Πηγή: Διαχειριστικό σχέδιο Κρήτης 2015)



Χάρτης 5. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ισοϋψείς καμπύλες με χρήση GIS (Πηγή: Διαχειριστικό σχέδιο Κρήτης 2015)

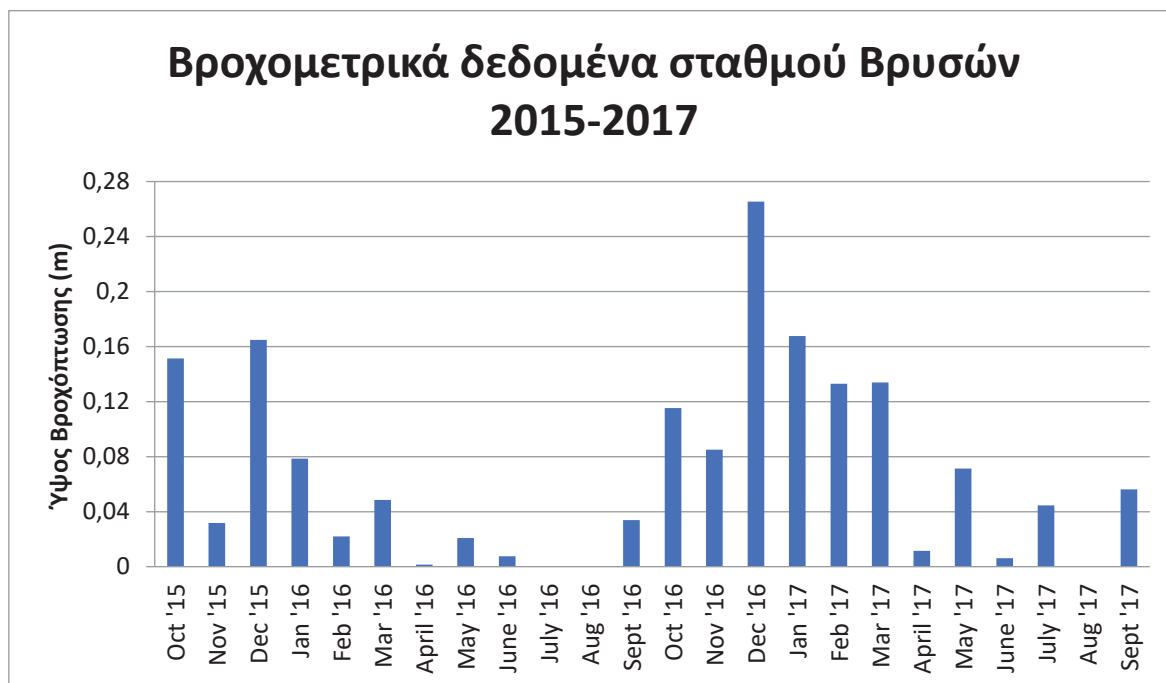
2.5. Κλιματικά – μετεωρολογικά χαρακτηριστικά

Το κλίμα της περιοχής μελέτης είναι μεσογειακό εύκρατο και χαρακτηρίζεται από ήπιους, υγρούς χειμώνες και θερμά και ξηρά καλοκαίρια με μεγάλη ηλιοφάνεια. Οι χιονοπτώσεις στην περιοχή είναι γενικά σπάνιες και το φαινόμενο συναντάται μόνο σε μεγάλα υψόμετρα. Χαρακτηριστικό του κλίματος είναι η ηπιότητα, με την ψυχρή περίοδο να είναι ήπια λόγω της συχνής έλευσης θερμών και υγρών αερίων μαζών από τα νοτιοδυτικά.

2.6. Βροχοπτώσεις

Τα βροχομετρικά στοιχεία προέρχονται από το βροχομετρικό σταθμό των Βρυσών Αποκορώνου. Οι συντεταγμένες για τον εν λόγω βροχομετρικό σταθμό σε σύστημα ΕΓΣΑ 87 είναι LAT: 35° 22' 40" N LONG: 24° 12' 06" E και το υψόμετρο 58 m.

Για τους σκοπούς τις παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του παραπάνω βροχομετρικού σταθμού και οι μετρήσεις λήφθηκαν από τη σελίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου για τα υδρολογικά έτη 2015 έως 2017, όπως παρουσιάζεται στο γράφημα 4.



Γράφημα 3. Βροχομετρικά δεδομένα σταθμού Βρυσών Αποκορώνου (Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο)

Να σημειωθεί ότι βάση της σελίδας του Εθνικού Αστεροσκοπείου για τις ημερομηνίες 1 έως 15 Δεκεμβρίου 2015 υπάρχει μία μικρή απώλεια δεδομένων σταθμού, χάθηκαν περίπου 50 mm βροχόπτωσης, τα οποία όμως λήφθηκαν υπόψιν στους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης.

2.7. Θερμοκρασία

Από το σταθμό των Βρυσών Αποκορώνου λήφθηκαν επίσης και μετεωρολογικά δεδομένα, αν και η θερμοκρασία δεν ήταν απαραίτητη για τις ανάγκες μοντελοποίησης της ροής υπόγειων υδάτων με το μοντέλο PTC. Παρακάτω απεικονίζεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία που μετρήθηκε από το σταθμό για τα υδρολογικά έτη 2015-2017.

Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 5, χαμηλότερες θερμοκρασίες το χειμώνα παρατηρούνται από το Δεκέμβριο μέχρι το Φεβρουάριο περίπου, ενώ ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μικρή διαφορά σε σχέση με τον Αύγουστο που έχει ελαφρώς χαμηλότερη θερμοκρασία. Το εύρος της θερμοκρασίας κυμαίνεται περίπου από τους 9° C τους χειμερινούς μήνες έως τους 25° C τους θερινούς.



Γράφημα 4. Δεδομένα θερμοκρασίας σταθμού Βρυσών Αποκορώνου(Πηγή: Εθνικό Αστεροσκοπείο)

2.8. Χλωρίδα

Σημαντικό ρόλο στη χλωρίδα της περιοχής παίζουν οι ελαιώνες οι οποίοι αποτελούν κ το μεγαλύτερο μέρος από τις μόνιμες καλλιέργειες των κατοίκων. Σχετικά με τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, εκτός από ελαιώνες στην περιοχή υπάρχουν και ορισμένες εκτάσεις με αμπελώνες, καθώς και αγροτικές εκτάσεις με φυσική βλάστηση.

Λόγω κλίματος, συχνή και καθόλου αμελητέα είναι επίσης και η εμφάνιση των θαμνωδών εκτάσεων και γενικότερα της σκληρόφυλλης βλάστησης, εκτάσεις που μάλλον χρησιμοποιούνται σαν βοσκοτόπια. Σε μικρότερη συχνότητα και έκταση τέλος υπάρχουν τα δάση των κωνοφόρων και τα βράχια με πολύ αραιή βλάστηση.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Τα υδρογεωλογικά μοντέλα έχουν εφαρμοστεί για τη διερεύνηση μίας ευρείας ποικιλίας υδρογεωλογικών συνθηκών (Kumar, 2002). Η εφαρμογή των μοντέλων στη μελέτη των υπόγειων υδάτων αφορά την πρόβλεψη της μεταφοράς ρύπων για αξιολόγηση κινδύνου και την εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς του πεδίου. Παρέχουν ένα ποσοτικό πλαίσιο για τη σύνθεση πληροφοριών πεδίου και τις υδρογεωλογικές διεργασίες.

Γενικά, τα μοντέλα είναι εννοιολογικές περιγραφές ή προσεγγίσεις που περιγράφουν φυσικά συστήματα που χρησιμοποιούν μαθηματικές εξισώσεις. Δεν είναι ακριβείς περιγραφές φυσικών συστημάτων ή διεργασιών (C. P. Kumar, Groundwater Flow Models). Τα μοντέλα ροής των υπόγειων υδάτων λύνουν αυτά που δεν μπορούν να παρατηρηθούν ή να μετρηθούν (Anderson et al., 2015).

Με μαθηματική εκπροσώπηση μιας απλοποιημένης έκδοσης ενός υδρογεωλογικού συστήματος, μπορούν να προβλεφθούν, να εξεταστούν και να συγκριθούν εύλογα εναλλακτικά σενάρια. Η δυνατότητα εφαρμογής ενός μοντέλου εξαρτάται από το πόσο προσεκτικά οι μαθηματικές εξισώσεις προσεγγίζουν το φυσικό σύστημα που διαμορφώνεται. Προκειμένου να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα ή η χρησιμότητα ενός μοντέλου, είναι απαραίτητο να έχουμε μια διεξοδική κατανόηση του φυσικού συστήματος και των

παραδοχών που ενσωματώνονται στην εξαγωγή των μαθηματικών εξισώσεων (C. P. Kumar, 2002).

Τα μοντέλα υπογείων υδάτων περιγράφουν τις διαδικασίες ροής και μεταφοράς υπογείων υδάτων χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις βασισμένες σε ορισμένες απλουστευτικές υποθέσεις. Αυτές οι υποθέσεις συνήθως περιλαμβάνουν την κατεύθυνση ροής, τη γεωμετρία του υδροφόρου ορίζοντα, την ετερογένεια ή την ανισοτροπία ιζημάτων ή υποστρώματος στο εσωτερικό του υδροφόρου ορίζοντα, τους μηχανισμούς μεταφοράς ρύπων και τις χημικές αντιδράσεις. Γενικά, ένα μοντέλο πρέπει να θεωρείται ως προσέγγιση και όχι ακριβής παρουσίαση των συνθηκών του πεδίου, λόγω των απλουστευτικών παραδοχών που ενσωματώνονται στις μαθηματικές εξισώσεις και της αβεβαιότητας που υπάρχει στις τιμές των δεδομένων που απαιτούνται από το μοντέλο.

Η προσομοίωση ενός συστήματος υπογείων υδάτων αφορά την κατασκευή και τη λειτουργία ενός μοντέλου, η συμπεριφορά του οποίου προϋποθέτει την εμφάνιση της πραγματικής συμπεριφοράς του υδροφόρου ορίζοντα. Το μοντέλο μπορεί να είναι φυσικό (αναλογικό) ή μαθηματικό.

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.

Ένα μαθηματικό μοντέλο είναι απλά ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφει τις φυσικές διεργασίες που είναι ενεργές στον υδροφόρο ορίζοντα. Λόγω των εξισώσεων αυτών μπορεί να γίνει αριθμητική ή αναλυτική λύση, καθώς και χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ενώ το ίδιο το μοντέλο στερείται προφανώς της λεπτομερούς πραγματικότητας του συστήματος υπογείων υδάτων. Η συμπεριφορά ενός έγκυρου μοντέλου προσεγγίζει εκείνη του υδροφόρου ορίζοντα. Τα μαθηματικά μοντέλα δίνουν είτε αναλυτικές λύσεις είτε αριθμητικές λύσεις.

Τα αναλυτικά μοντέλα απαιτούν 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 (Γ.Γκούμας, 2016).

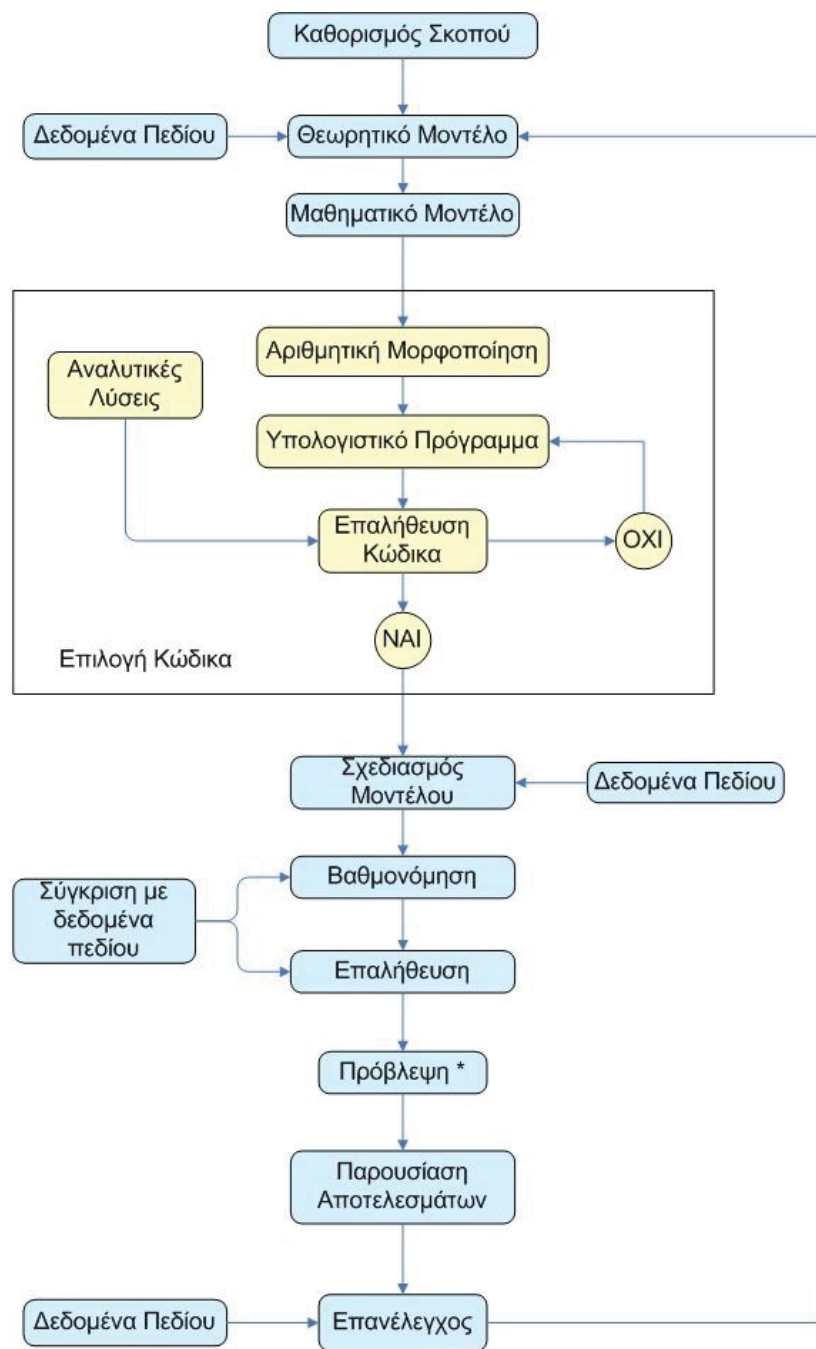
3.1. Βήματα εφαρμογής μοντέλου

Συνοπτικά, τα βήματα στον υπολογισμό πρόβλεψης μοντέλου υπόγειων υδάτων για συγκεκριμένο χώρο είναι: η συλλογή δεδομένων, η προετοιμασία δεδομένων, ο σχεδιασμός του μοντέλου, η αντιστοίχιση του ιστορικού (βαθμονόμηση), η επαλήθευση του μοντέλου, η προσομοίωση πρόβλεψης, η ανάλυση ευαισθησίας και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

1. Προσδιορισμός του σκοπού του μοντέλου. Γίνεται η επίλυση των θεμελιωδών εξισώσεων και επιλέγεται ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί.
2. Δημιουργία θεωρητικού μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο αναγνωρίζονται τα όρια και τα στοιχεία του πεδίου. Αυτά αφορούν το ισοζύγιο του νερού, τις υδρολογικές τάσεις και τις τιμές των παραμέτρων. Στο στάδιο αυτό, επιθυμητό είναι να πραγματοποιηθεί κα επίσκεψη στο πεδίο ώστε να διατηρηθεί η επαφή του χρήστη με τα πραγματικά δεδομένα.
3. Σχεδιασμός του μοντέλου. Στο στάδιο αυτό γίνεται σχεδιασμός του πλέγματος, η επιλογή των βημάτων χρόνου, ο προσδιορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών, η επιλογή τιμών για τις παραμέτρους του υδροφορέα και των υδρολογικών τάσεων.
4. Βαθμονόμηση. Πολύ βασικό είναι στάδιο της βαθμονόμησης σκοπός του οποίου είναι η ορθή αναπαράσταση των μετρούμενων στο πεδίο υδραυλικών υψών και

ρών. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση της μεθόδου της δοκιμής και σφάλματος, είτε με χρήση μίας αυτοματοποιημένης εκτίμησης των παραμέτρων του κώδικα.

5. Ανάλυση ευαισθησίας. Στο στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας γίνονται φανερές οι επιπτώσεις αβεβαιότητας του βαθμονομημένου μοντέλου. Η αβεβαιότητα διαφαίνεται στην αδυναμία καθορισμού της ακριβούς χωρικής συνεισφοράς των παραμετρικών τιμών καθώς και στον καθορισμό των οριακών συνθηκών.
6. Επαλήθευση μοντέλου. Χρήσιμο είναι να δημιουργηθεί μία επιπλέον επαλήθευση του μοντέλου με τη χρήση ενός συνόλου παραμετρικών τιμών και τάσεων με στόχο να γίνει αναπαράσταση μίας δεύτερης βάσης δεδομένων του πεδίου.
7. Πρόβλεψη. Πρόκειται για την ανταπόκριση του βαθμονομημένου συστήματος σε μελλοντικά συμβάντα. Το μοντέλο, δηλαδή, «τρέχει» για της βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων και τάσεων με εξαίρεση τις τάσεις οι οποίες αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Παρουσιάζεται και σε αυτό το στάδιο η αβεβαιότητα, καθώς λαμβάνει χώρα η μελλοντική προσομοίωση της κατάστασης του πεδίου.
8. Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης. Περιλαμβάνει το σχολιασμό του σχεδιασμού που έχει προηγηθεί και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
9. Επανελέγχος μοντέλου. Τελικό στάδιο που πραγματοποιείται αρκετά χρόνια μετά τη μοντελοποίηση. Εδώ συλλέγονται τα νέα δεδομένα του πεδίου για να καθοριστεί και να επαληθευτεί αν η πρόβλεψη που έγινε στο παρελθόν ήταν ακριβής και αν το μοντέλο είναι έγκυρο (Anderson et al., 1992).

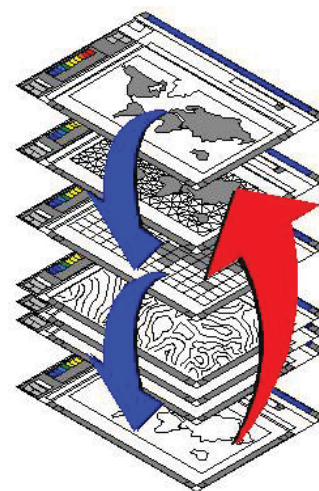


*Περιλαμβάνει ανάλυση ευαισθησίας

Εικόνα 3. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μοντελοποίησης (Πηγή: M.P. Anderson W. W. Woessner. *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective*, Academic Press, 2002)

3.2. Το μοντέλο Argus ONE

Το πρόγραμμα ARGUS ONE είναι ένα προηγμένο και ανεξάρτητο γραφικό λογισμικό, το οποίο μπορεί να συνδυαστεί με αρκετούς κώδικες μοντελοποίησης υπόγειας ροής. Γενικότερα, αποτελεί λογισμικό ανάπτυξης περιβάλλοντος και παρέχει αυτοματοποιημένα μηχανικά εργαλεία που είναι απαραίτητα στη μοντελοποίηση. 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. Οι πληροφορίες στο μοντέλο Argus ONE αποθηκεύονται σε διαφορετικά επίπεδα τα οποία ο χρήστης μπορεί να βλέπει και να επεμβαίνει, καθώς και να προχωράει στη δημιουργία νέων επιπέδων ως μαθηματικές ή λογικές σχέσεις άλλων επιπέδων.



3.3. Ο κώδικας PTC

Βασικό εργαλείο για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το μοντέλο PTC (Princeton Flow and Transport Code). Πρόκειται για ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο στοχεύει στην προσομοίωση της υπόγειας ροής και των υπόγειων ρύπων. Το PTC χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο διαχωρισμού, ώστε να επιλύει τις τρισδιάστατες εξισώσεις, μειώνοντας σημαντικά, τη δυσκολία των υπολογισμών.

Το PTC, προκειμένου να επεξεργαστεί τα δεδομένα, που αφορούν την κίνηση του υπόγειου ύδατος, χρησιμοποιεί τις ακόλουθες βασικές εξισώσεις.

➤ Εξίσωση συνέχειας (Continuity equation)

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

Όπου,

h : το υδραυλικό ύψος, [L]

K_{xx} : η υδραυλική αγωγιμότητα στη x οριζόντια διεύθυνση, [$L T^{-1}$]

K_{yy} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην y οριζόντια διεύθυνση, [$L T^{-1}$]

K_{zz} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην z κάθετη διεύθυνση, [$L T^{-1}$]

S : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, [L^{-1}]

Όπου,

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

Q_i : ο όρος εκροής/κατείσδυσης (ή απλά Q), [$L^3 T^{-1}$]

δ = η συνάρτηση Dirac

➤ **Ταχύτητα του Darcy (Darcy's velocity)**

$$V_x = -K_{xx} \frac{\theta h}{\theta x}$$

$$V_y = -K_{yy} \frac{\theta h}{\theta y}$$

$$V_z = -K_{zz} \frac{\theta h}{\theta z}$$

Όπου,

$V_{x,y,z}$: η ταχύτητα στις διευθύνσεις x, y, z , αντίστοιχα, [$L T^{-1}$]

➤ **Εξίσωση μεταφοράς μάζας (Advection – dispersion)**

$$\begin{aligned} & \frac{\theta}{\theta x} \left(D_{xx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{yy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{zz} \frac{\theta c}{\theta z} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(D_{xx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{yy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{zz} \frac{\theta c}{\theta z} \right) \\ & + \frac{\theta}{\theta z} \left(D_{xx} \frac{\theta c}{\theta x} + D_{yy} \frac{\theta c}{\theta y} + D_{zz} \frac{\theta c}{\theta z} \right) - \left(V_x \frac{\theta h}{\theta x} + V_y \frac{\theta h}{\theta y} + V_z \frac{\theta h}{\theta z} \right) + Q(c^\omega - c) \\ & - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\theta c}{\theta t} \right) = 0 \end{aligned}$$

Όπου,

D_{ij} : ο φαινόμενος συντελεστής μοριακής διασποράς, $[L^2T^{-1}]$

c : η χημική συγκέντρωση στο σημείο x, y, z , τη στιγμή t , $[ML^{-3}]$

c^ω : η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στη θέση i , $[ML^{-3}]$

Οι όροι της διασποράς που εμφανίζονται στην παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται ως εξής:

$$D_{xx} = (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2) V^{-1} + D_M$$

$$D_{yy} = (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2) V^{-1} + D_M$$

$$D_{zz} = (\alpha_V V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_L V_z^2) V^{-1} + D_M$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y V^{-1}$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) V_y V_z V^{-1}$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V) V_z V_x V^{-1}$$

θ : το πορώδες του εδάφους, $[]$

$E(c)$: η συνάρτηση χημικής προσρόφησης, $[]$ (Babu et al. 2002).

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_x , V_y και V_z , και τέλος επιλύει ως προς τη συγκέντρωση ρύπου c (Babu et al, 2002).

Η βασική εξίσωση την οποία χρησιμοποιεί το PTC για τη ροή υπογείων υδάτων είναι η ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

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

και

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

Όπου:

h = το υδραυλικό ύψος (m)

K_{xx} = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x (m/d)

K_{yy} = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y (m/d)

K_{zz} = Η υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση z (m/d)

S = Ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας (m-1)

Q_i = ο όρος της πηγής ή της γεώτρησης στη θέση i (m³/d)

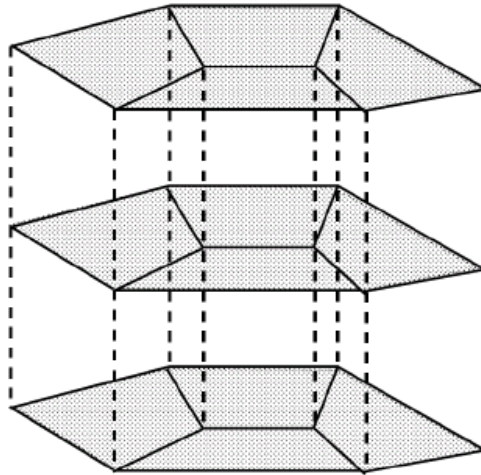
δ = η συνάρτηση Dirac

r = ο αριθμός των σημείων των πηγαδιών ή των γεωτρήσεων (Babu et al. 2002).

3.4. Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Για την επίλυση από το PTC των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων, απαιτείται η 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. Το σύστημα χωρίζεται σε σχεδόν παράλληλα

οριζόντια στρώματα μέσα στα οποία γίνεται διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να επιτευχθεί η ακριβής 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 4. Σχηματική αναπαράσταση των οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al., 2002).

Κατά τη διάρκεια μίας επανάληψης καθορισμένου χρόνου, οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα ανά επανάληψη. Στο πρώτο βήμα επιλύονται ανεξάρτητα οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων. Στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα (Babu et al., 2002).

3.5. Οριακές συνθήκες

Το PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής:

- A) Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους)
- B) Neumann (σταθερής ροής)
- Γ) Τρίτου τύπου (διαρροές)

Η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενική ροή. Αυτό προϋποθέτει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές. Η διαφορετική επιλογή είδους και τιμών για τις οριακές συνθήκες στην υπό εξέταση περιοχή, η οποία πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, επιτρέπει στο μοντέλο να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρογεωλογικές συνθήκες από τις προεπιλεγμένες (Babu et al., 1997).

1ο είδος: Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος (Prescribed Head)

Οι οριακές συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους αναφέρονται σε τιμές σταθερού υδραυλικού ύψους σε επιλεγμένους κόμβους του πλέγματος της περιοχής μελέτης.

2ο είδος: Καθορισμένη Ροή (Specified Gradients or Fluxes)

Για να οριστούν οι συνθήκες δευτέρου είδους, ο χρήστης του μοντέλου πρέπει απλά να ορίσει την ογκομετρική ροή σε επιλεγμένους κόμβους έτσι ώστε να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Επίσης, η σταθερή άντληση σε επιλεγμένους κόμβους αντιμετωπίζεται ως συνθήκη σταθερής ροής (Babu et al., 1997).

3ο είδος: Προσδιορισμένη Διαρροή (Cauchy or mixed boundary conditions)

Πρόκειται για οριακές συνθήκες ροής, οι οποίες εξαρτώνται από το υδραυλικό ύψος. Συγκεκριμένα, για μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους, υπολογίζεται η παράγωγος (flux), κατά μήκος των ορίων. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται και mixed, καθώς αποτελεί συσχετισμό των οριακών υδραυλικών υψών και των οριακών συνθηκών ροής (Anderson et al., 1992).

4. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1. Εξισώσεις του PTC

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε χρήση των ψηφιοποιημένων χαρτών τόσο για τον ακριβή προσδιορισμό της περιοχής μελέτης, όσο και για τις τοποθεσίες των γεωτρήσεων και της μορφολογίας του εδάφους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS. Το ArcGIS Desktop αποτελεί ένα εργαλείο εφαρμογών, που περιλαμβάνει τα ArcMap, ArcCatalog και ArcToolbox.

Από το ArcGIS, έγινε χρήση κυρίως του προγράμματος ArcMap και σε μικρότερη συχνότητα χρησιμοποιήθηκε και το ArcCatalog. Το ArcMap είναι το κεντρικό πρόγραμμα του ArcGIS Desktop, και χρησιμοποιείται για όλες τις εργασίες που έχουν να κάνουν με χάρτες, όπως χαρτογράφηση, ανάλυση χαρτών και επεξεργασία. Οι χάρτες απεικονίζονται στο πρόγραμμα συμπεριλαμβάνοντας ένα γεωγραφικό παράθυρο (data frame) ως βάση, με μια σειρά επιπέδων, λεζαντών, κλιμάκων και άλλων στοιχείων.

Αρχικά, έχοντας ως δεδομένες τις συντεταγμένες που διαθέταμε για κάθε γεώτρηση της ευρύτερης περιοχής έγινε ψηφιοποίηση των γεωτρήσεων. Χρησιμοποιώντας την εφαρμογή του ArcCatalog δημιουργήθηκε αρχείο shape file με την τοποθεσία της κάθε γεώτρησης. Κατόπιν, ορίστηκαν ακριβώς και τα όρια της περιοχής μελέτης προσπαθώντας να περικλείονται όσο το δυνατόν περισσότερες γεωτρήσεις. Δημιουργήθηκε το περίγραμμα (domain outline) και στη συνέχεια εξήχθη σε μορφή shapefile ώστε να γίνει μετά εισαγωγή αυτού στο PTC.

Επιπλέον, έγινε εισαγωγή των γεωλογικών σχηματισμών και των ισοϋψών της περιοχής σε μορφή shapefile. Το αρχείο dem με τις ισοϋψείς της περιοχής μελέτης στη συνέχεια μετατράπηκε σε shapefile ώστε να εισαχθεί στο PTC.

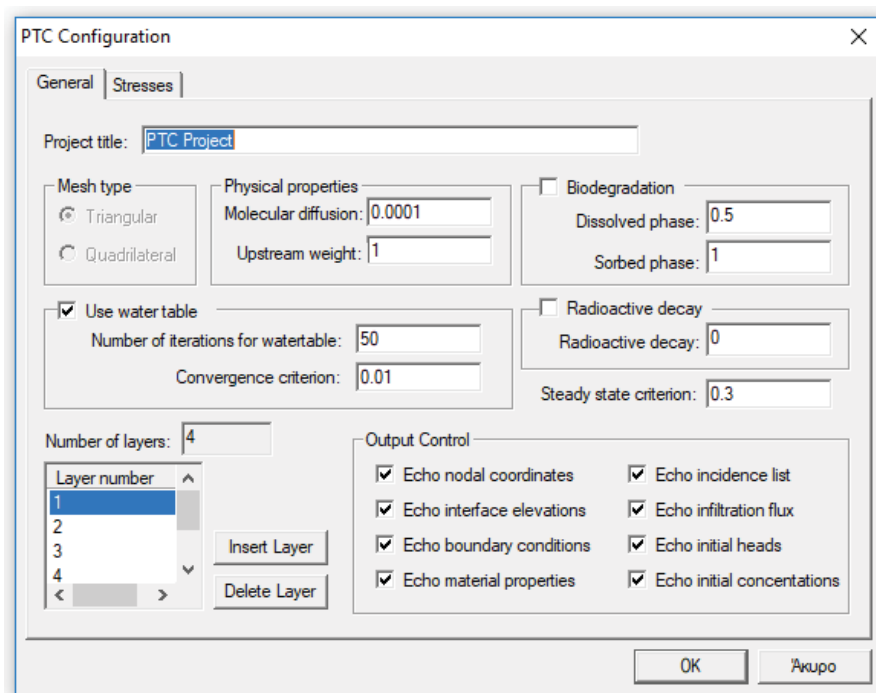
Όλα τα παραπάνω δεδομένα εισήχθησαν με μορφή shapefile στο πρόγραμμα προκειμένου να γίνει πιο εύκολη και σωστή η αντιστοίχιση των δεδομένων που αφορούν τις γεωτρήσεις, τη γεωλογία, τις ισοϋψείς και το βροχομετρικό σταθμό στο πρόγραμμα PTC.

4.2. Εισαγωγή δεδομένων στο PTC

1) Αρχικές ρυθμίσεις

Η εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο PTC έγινε μέσω του προγράμματος ArgusONE, και τις επεκτάσεις του μοντέλου PTC PIE. Ως βασικές μονάδες επιλέχθηκαν για μεν το μήκος τα μέτρα (m) για δε το χρόνο τις ημέρες (d).

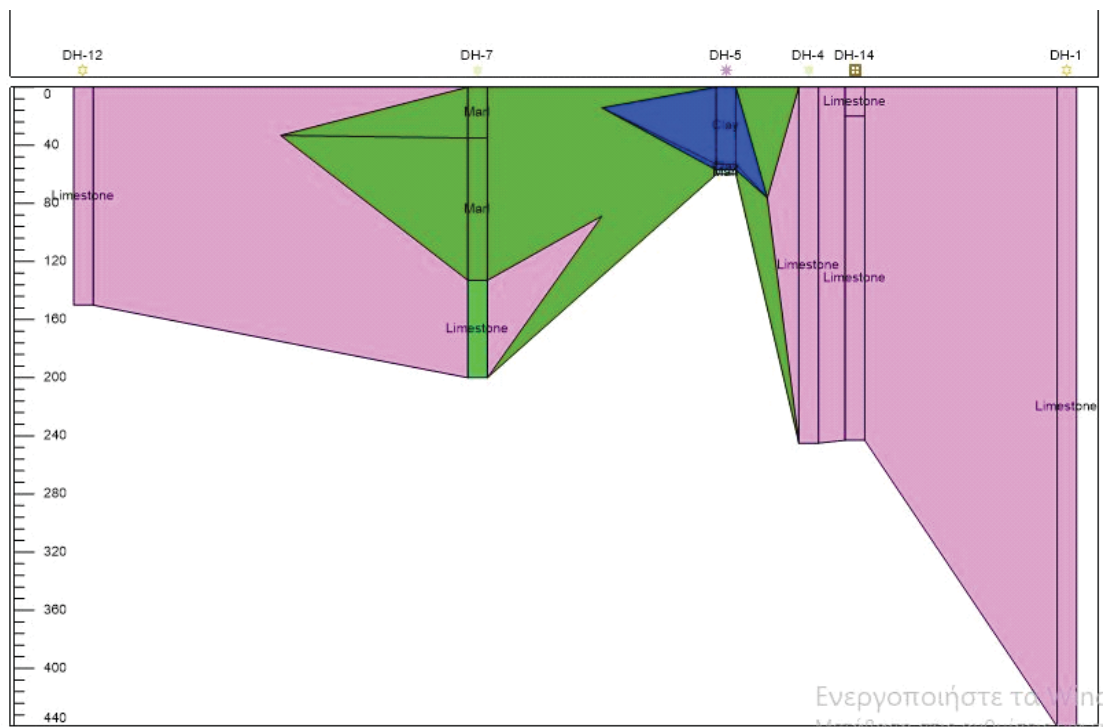
Στο αρχικό στάδιο της προσομοίωσης, από την επιλογή PIE's έγινε η επιλογή της εντολής New PTC Project οπότε και άνοιξε ο πίνακας "PTC configuration", ο οποίος αποτελείται από δύο καρτέλες, τις "General" και "Stresses". Σε αυτές τις καρτέλες ορίστηκαν βασικές παράμετροι που αφορούν τον υδροφορέα και τον κώδικα PTC.



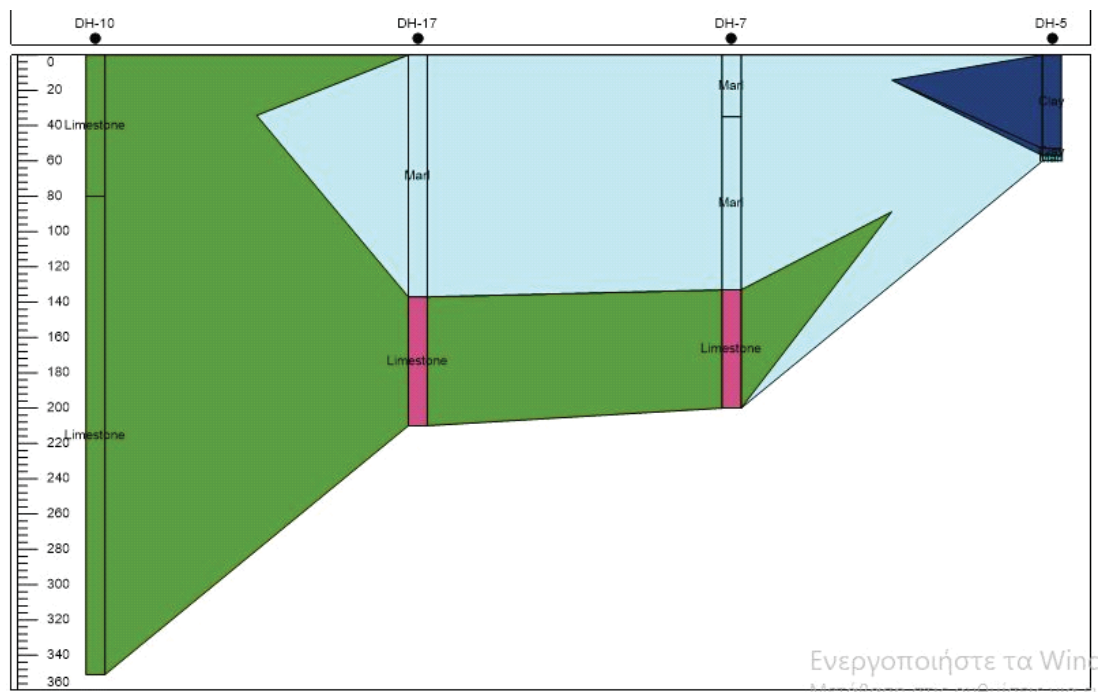
Εικόνα 5. Αρχικές ρυθμίσεις PTC configuration

Για να προσδιοριστεί ο ακριβής αριθμός των στρωμάτων (layers), δημιουργήθηκαν γεωλογικές τομές με βάση τα προφίλ των γεωτρήσεων ώστε να υπάρχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του υπεδάφους.

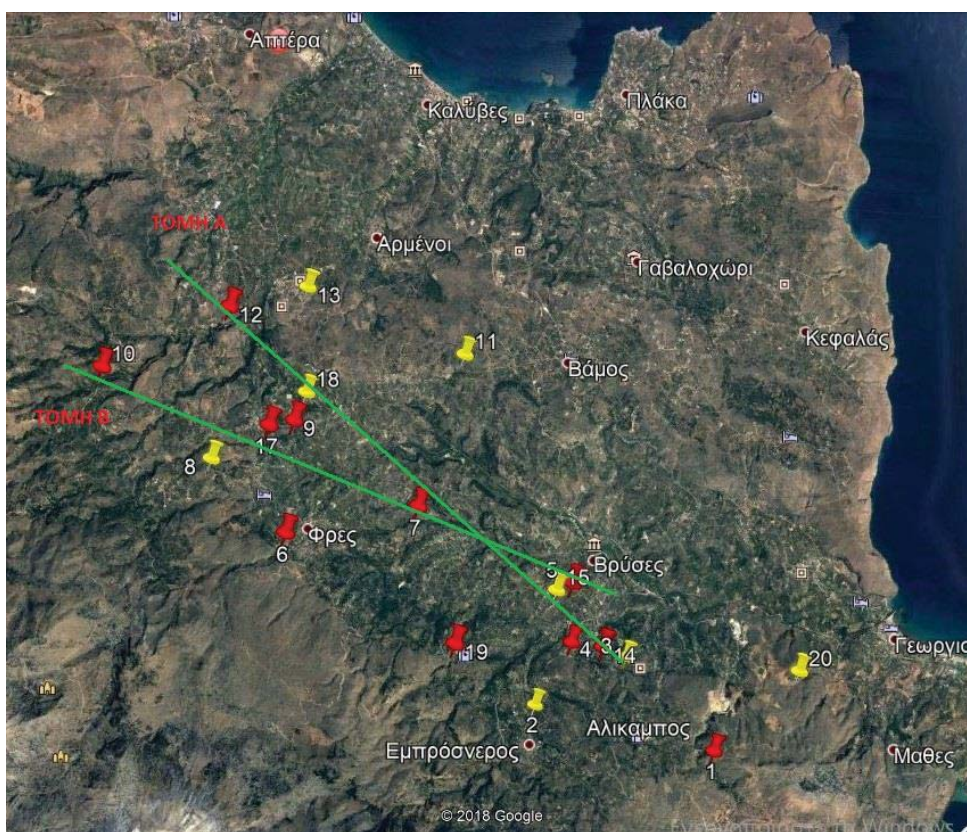
Προσδιορίστηκαν δύο τομές με κατευθύνσεις όπως φαίνεται στις παρακάτω Εικόνες 6, 7, 8 και 9.



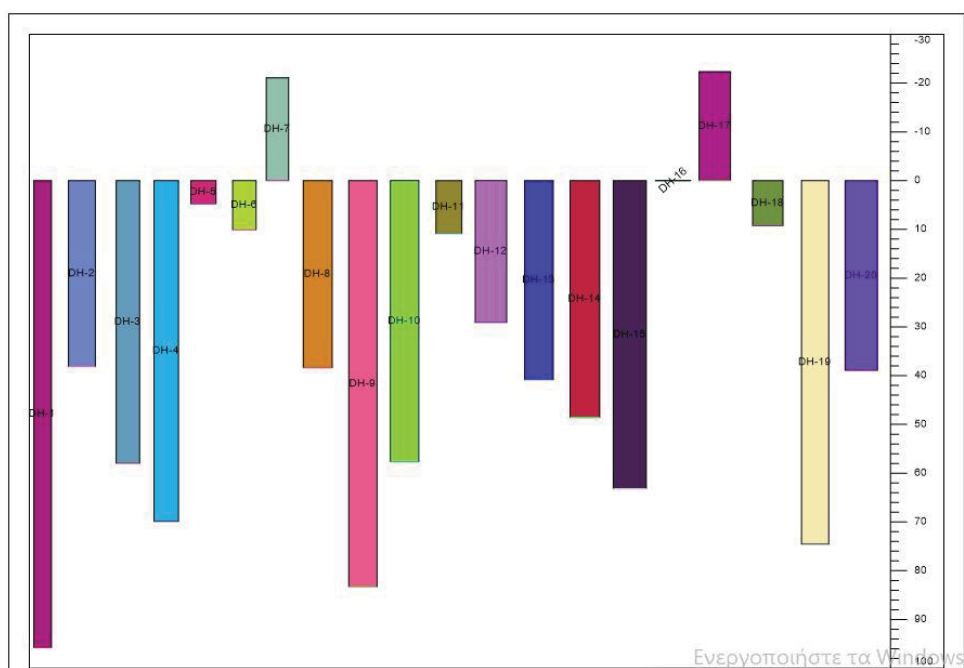
Εικόνα 6. Τομή Α (Γεωτρήσεις 12-7-5-4-14-1)



Εικόνα 7. Τομή Β (Γεωτρήσεις 10, 17, 7, 5)



Εικόνα 8. Κατεύθυνση τομής Α και Β



Εικόνα 9. Συγκεντρωτικές γεωτρήσεις περιοχής με τα βάθη τους

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

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω μεταβλητών κι επιλογών, στη δεύτερη καρτέλα (stress), καθορίζεται το χρονικό βήμα και οι ιδιότητες αυτού. Όπως φαίνεται, εισήχθησαν 4 χρονικά βήματα – stresses, τα οποία αντιστοιχούν σε υγρές και ξηρές περιόδους. Η υγρή περίοδος υπολογίστηκε για τους μήνες Οκτώβριο έως Απρίλιο (Stresses 1,3) και η ξηρή τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο (Stresses 2,4). Τα δεδομένα καλύπτουν τα υδρολογικά έτη 2015 έως 2017.

Stress	Flow	Velocity	Transport	Length
1	1	1	0	210
2	1	1	0	150
3	1	1	0	210
4	1	1	0	150

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
Total time: 210

General control

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

Graphs control

Time step of first flow output: 40
Output period flow: 40
Time step of first conc. output: 80
Output period conc.: 80

Number of stress periods: 4
Total simulation time: 720
Graphics filenames for heads: heads
Graphics filenames for concentrations: concs

OK Ακυρο

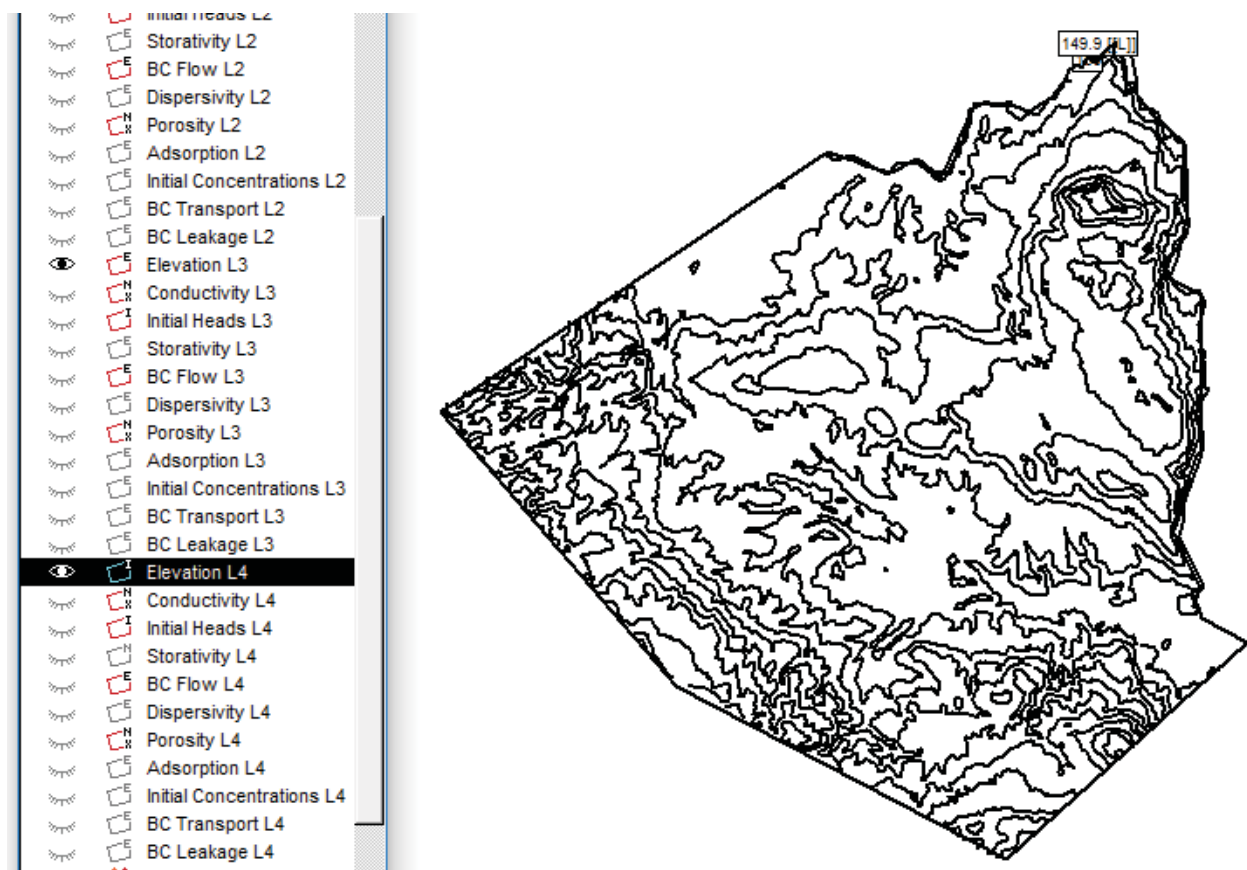
Εικόνα 10. Αρχικές ρυθμίσεις PTC sonfiguration

2) Εισαγωγή κύριων δεδομένων

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή του πολυγώνου που προσδιορίζει την περιοχή μελέτης (PTC Domain Outline). Το πολύγωνο αυτό δημιουργήθηκε στο ArcGIS, περιμετρικά της περιοχής μελέτης, λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωλογία της περιοχής μελέτης και στη συνέχεια αποθηκεύτηκε σε μορφή shapefile. Έπειτα εισάχθηκε στο layer PTC Domain

Outline, επιλέγοντας File -> Import PTC Domain Outline -> Import Shape file. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν τα υψόμετρα στα επίπεδα της περιοχής ως Elevation L1, L2, L3, L4 και το κατώτερο επίπεδο Bottom Elevation ίσο με το 0.

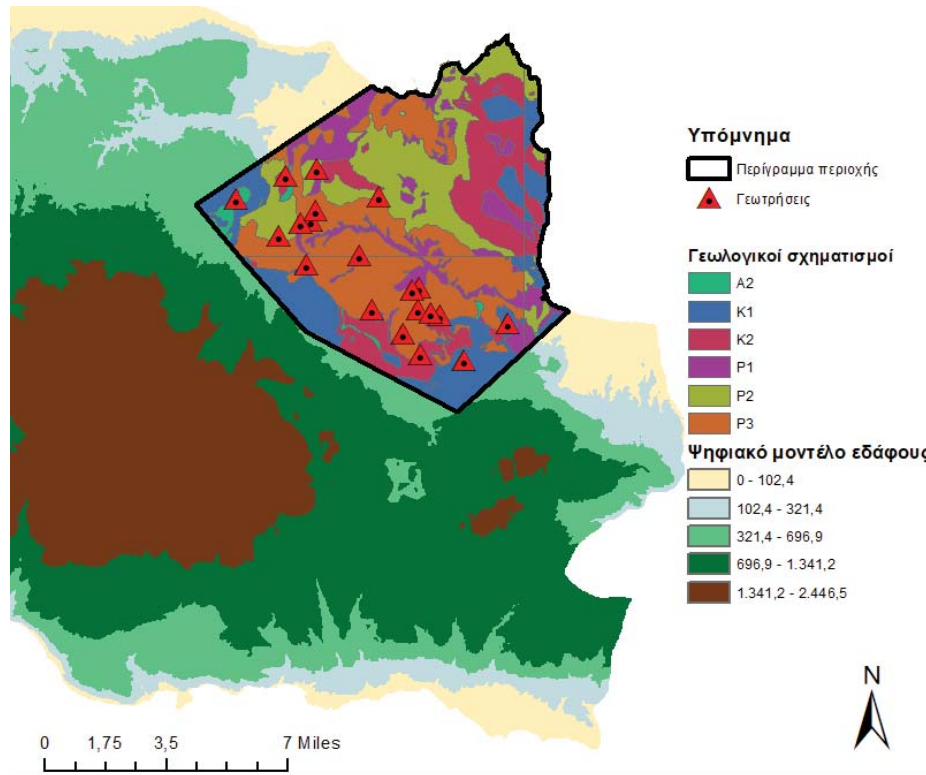
Βάση των γεωλογικών δεδομένων και αφότου εξετάσθηκαν οι τομές, έγινε διαχωρισμός σε 4 επίπεδα. Το βαθύτερο στρώμα εκτιμήθηκε να έχει πάχος 105 m και αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους. Ακολουθεί στρώμα μάργας πάχους 35 m, που επικαθεται στο προηγούμενο και ακολουθεί στρώμα αργίλου πάχους 10 m. Για όλα τα στρώματα θεωρήθηκε ότι έχουν ύψος με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα (Bottom Elevation=0m) L1= 105m, L2=140m και L3=150m.



Εικόνα 11. Χάρτης ισοϋψών στο PTC

Κατόπιν, εισήχθησαν στο μοντέλο με μορφή shapfile οι υδρογεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο contour του PTC σχηματίστηκαν τα όρια των

γεωλογικών σχηματισμών σε κάθε ένα από τα layers conductivity και porosity και δόθηκαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (m/day) για κάθε έναν γεωλογικό σχηματισμό.



Χάρτης 6. Γεωλογικοί σχηματισμοί και κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης

Επόμενη παράμετρος που εισήχθη ήταν τα αρχικά υδραυλικά ύψη, τα οποία εισάγονται στο επίπεδο Initial Heads L1, L2, L3 και L4. Στην προκειμένη περίπτωση, λόγω του αριθμού των γεωτρήσεων, δημιουργήθηκε ένα αρχείο shape file με όλες τις γεωτρήσεις ώστε να αποτυπωθεί σωστά η ακριβή τοποθεσία της κάθε μίας. Τα δεδομένα στάθμης (υδραυλικού ύψους) για τις γεωτρήσεις της περιοχής λήφθηκαν από τις τομές των γεωτρήσεων που διαθέτει η Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Αποκορώνου. Έπειτα τα υδραυλικά ύψη εισήχθησαν και στα 4 επίπεδα και αναφέρθηκαν οι τιμές των Initial Heads (m) για κάθε μία γεώτρηση.

Επιπλέον, έγινε εισαγωγή και της βροχής, όχι ως δεδομένα βροχόπτωσης, αλλά ως διήθηση λόγω των βροχοπτώσεων. Θεωρήθηκε ότι το νερό διηθείται στο έδαφος σε ποσοστό 25% επί του μεγέθους της βροχόπτωσης. Τα δεδομένα λήφθηκαν από την

ιστοσελίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για το μετεωρολογικό σταθμό των Βρυσών Αποκορώνου και παρουσιάζονται στους πίνακες 4, 5, 6 και 7.

Stress 1 (Wet)	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απριλ.
PCP (mm)	151,40	31,70	164,80	78,50	22,00	48,40	1,60
PCP (m)	0,1514	0,0317	0,1648	0,0785	0,0220	0,0484	0,0016
Total PCP (m/day)	0,0024						
Infiltration (m/day)	0,0006						

Πίνακας 4. Βροχομετρικά δεδομένα πρώτης περιόδου (wet stress)

Stress 2 (Dry)	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπτ.
PCP (mm)	20,80	7,60	0	0,20	33,80
PCP (m)	0,0208	0,0076	0	0,0002	0,0338
Total PCP (m/day)	0,00042				
Infiltration (m/day)	0,00010				

Πίνακας 5. Βροχομετρικά δεδομένα δεύτερης περιόδου (dry stress)

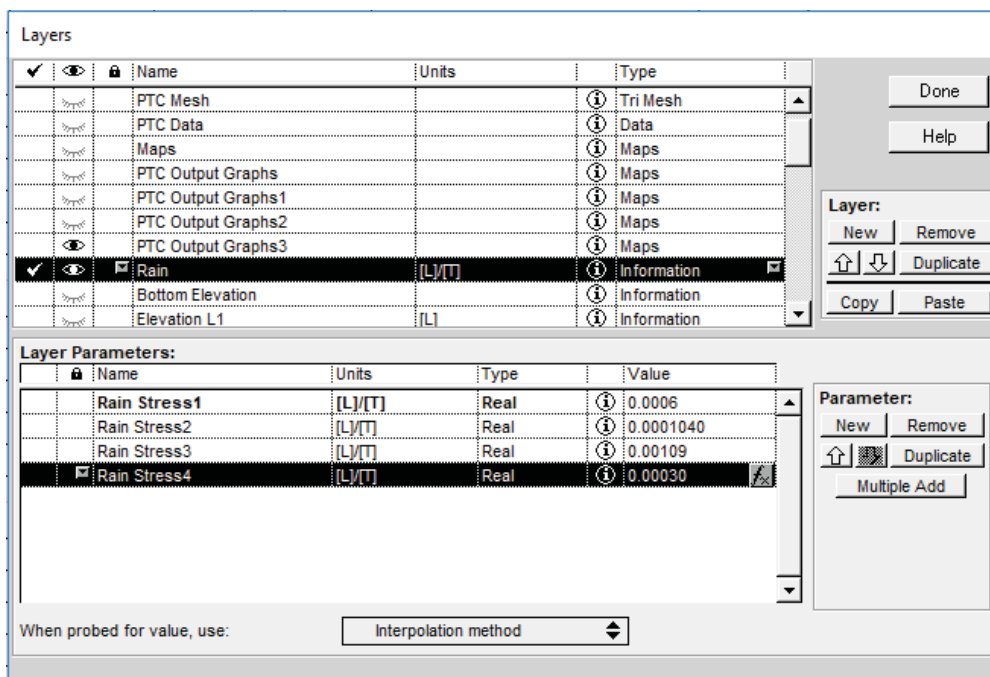
Stress 3 (Wet)	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απριλ.
PCP (mm)	115,20	85,10	265,30	167,60	133,00	134,00	11,60
PCP (m)	0,1152	0,0851	0,2653	0,1676	0,133	0,134	0,0116
Total PCP (m/day)	0,00434						
Infiltration (m/day)	0,00109						

Πίνακας 6. Βροχομετρικά δεδομένα τρίτης περιόδου (wet stress)

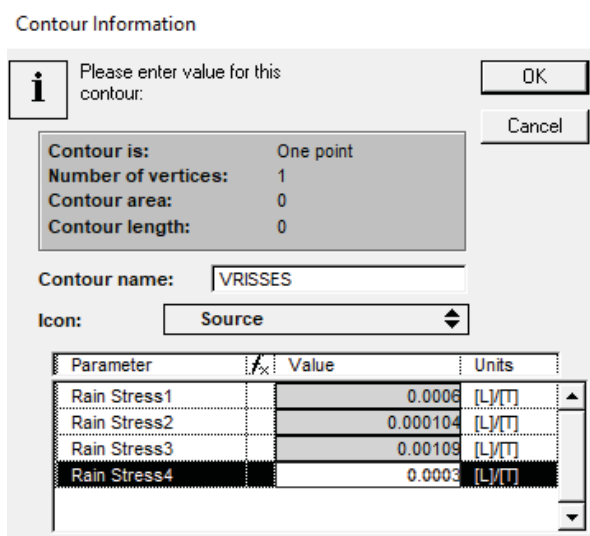
Stress 4 (Dry)	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπτ.
PCP (mm)	71,40	6,20	44,60	0	56,30
PCP (m)	0,0714	0,0062	0,0446	0	0,0563
Total PCP (m/day)	0,00119				
Infiltration (m/day)	0,00030				

Πίνακας 7. Βροχομετρικά δεδομένα τέταρτης περιόδου (dry stress)

Έπειτα ο ρυθμός διήθησης (m/day) εισάγεται στην εντολή Rain στο παράθυρο layers για την κάθε χρονική περίοδο (wet, dry stress) όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 Επιπλέον, για μεγαλύτερη ακρίβεια, τα δεδομένα της διήθησης περάστηκαν και απευθείας επάνω στο βροχομετρικό σταθμό όπως δείχνει η Εικόνα 12.



Εικόνα 12. Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων



Εικόνα 13. Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων στο σταθμό VRISSES

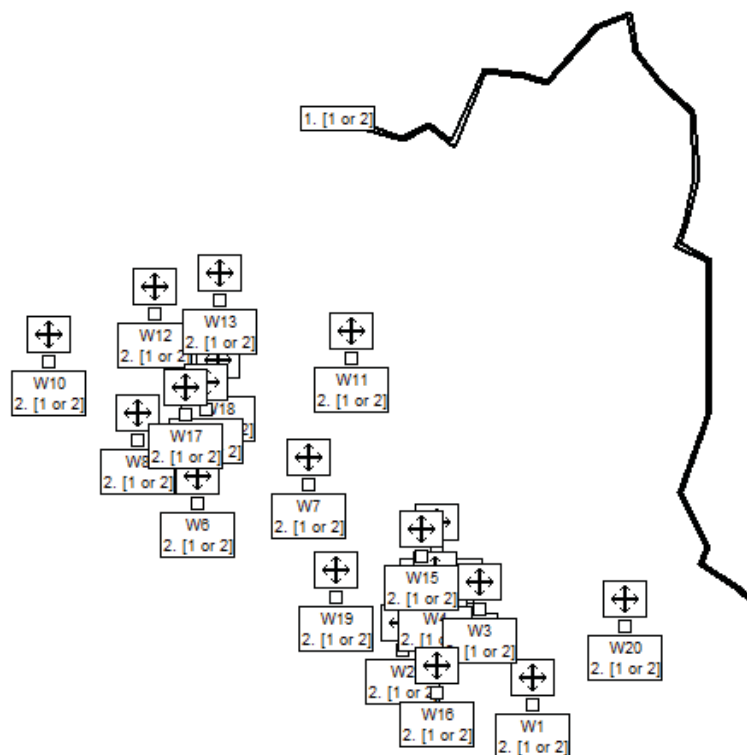
4.3. Οριακές συνθήκες

Για τον υπολογισμό και την εκτέλεση του μοντέλου καθίσταται αναγκαίος ο προσδιορισμός οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες εισάγονται στα layers BC Flow L1, L2, L3 και L4. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι οριακών συνθηκών αυτές του 1^{ου} τύπου διατηρείται σταθερό το υδραυλικό ύψος και σε αυτές του 2^{ου} τύπου διατηρείται σταθερή η ροή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως 1^{ου} είδους οριακή συνθήκη ορίστηκε η στάθμη της θάλασσας με υψόμετρο 150 m έχοντας ως επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα. Επομένως, τα υψόμετρα στα αντίστοιχα layers έχουν τροποποιηθεί αντίστοιχα, προσθέτοντας 150 m στις τιμές.

Οι οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου στην παρούσα μελέτη είναι οι αντλούμενες γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις κατανεμήθηκαν ανάλογα με το επίπεδο από το οποίο αντλούν, και τοποθετήθηκαν στα αντίστοιχα επίπεδα. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι εισήχθησαν αρνητικές τιμές εφόσον όλες οι γεωτρήσεις είναι άντλησης.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 14) παρουσιάζονται οι γεωτρήσεις σε όλα τα επίπεδα από το L1 έως το L4 και η οριακή συνθήκη 1^{ου} τύπου, δηλαδή η θάλασσα στα δεξιά της περιοχής.



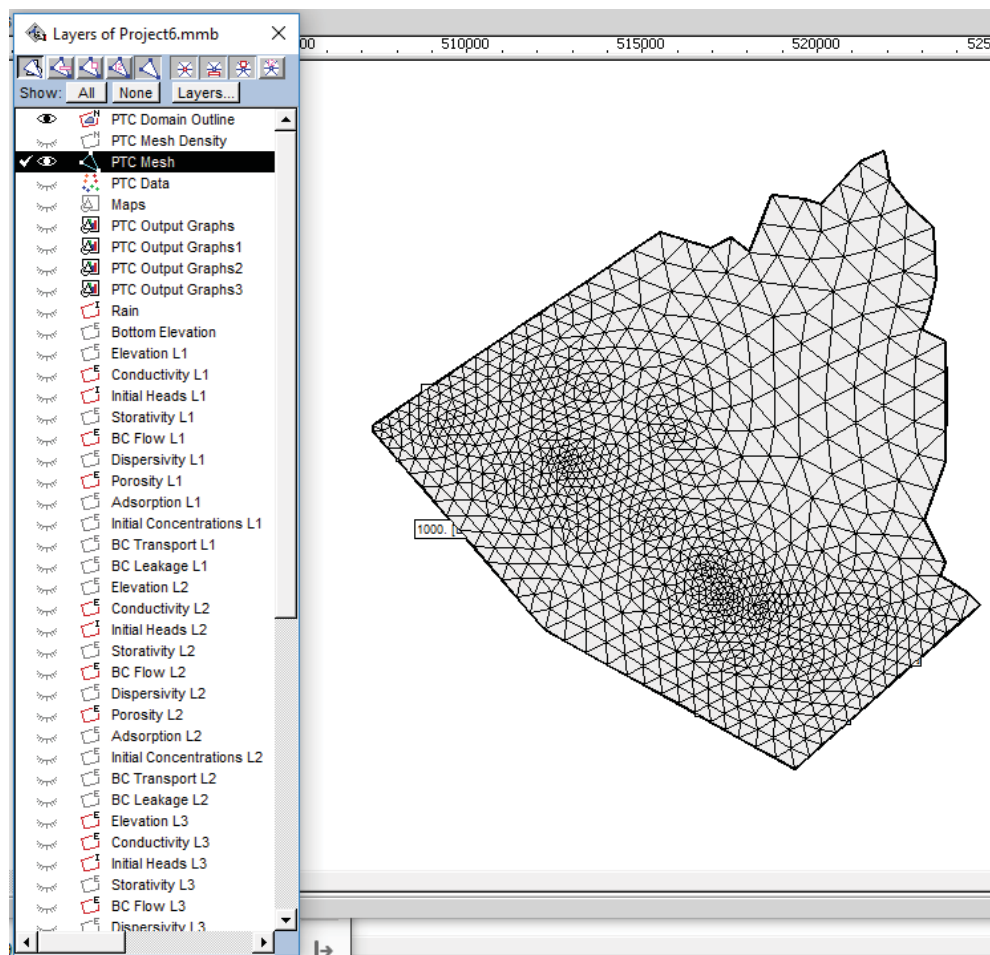
Εικόνα 14. Γεωτρήσεις περιοχής μελέτης και οριοθέτηση της στάθμης της θάλασσας

4.4. Σχεδιασμός Πλέγματος - PTC Mesh

Επόμενο βήμα πριν την εκτέλεση του προγράμματος είναι ο σχεδιασμός του πλέγματος (PTC Mesh). Βασικό σημείο είναι οι γεωτρήσεις να έχουν αντιγραφεί στο 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 20 για τις γεωτρήσεις, για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έπειτα, επιλέγεται το επίπεδο PTC Mesh, και όντας ενεργό, επιλέγεται το εργαλείο Magic Wand («μαγικό ραβδί»).

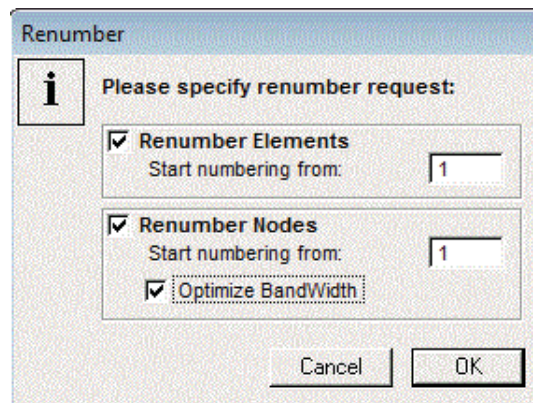


Εφόσον επιλεγθεί το παραπάνω εργαλείο με ένα κλικ μέσα στο πεδίο μελέτης, και το ArgusONE δημιουργεί το πλέγμα, όπως εμφανίζεται στην εικόνα 15.



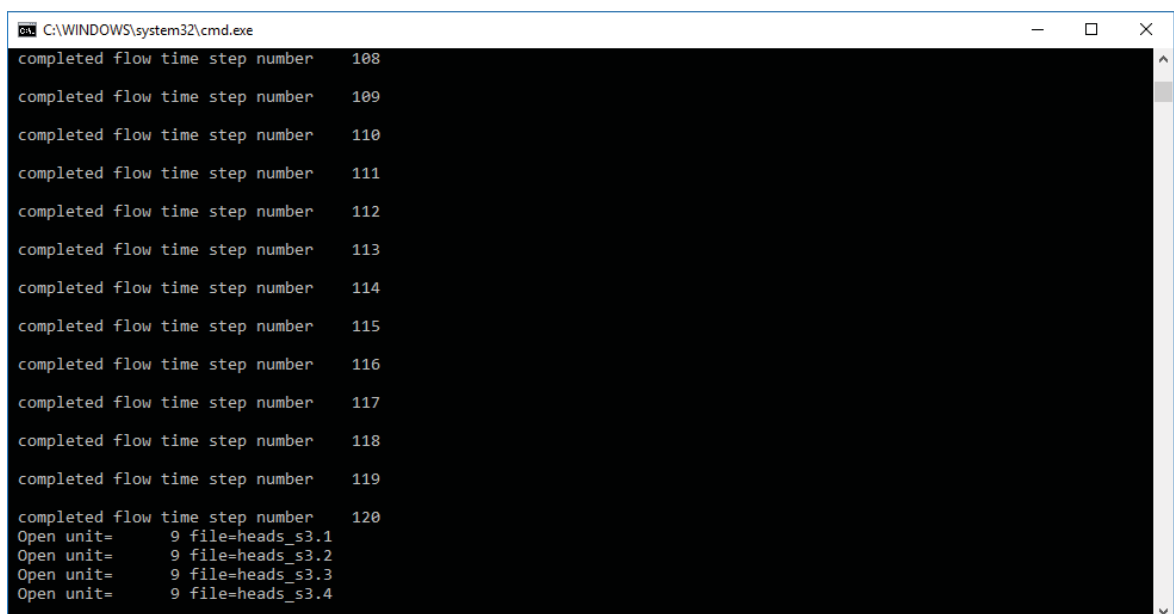
Εικόνα 15. Πλέγμα PTC Mesh

Στην προκειμένη περίπτωση δημιουργήθηκαν περίπου 950 κόμβοι. Έτσι, κρίνεται 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 16. Αρίθμηση στοιχείων και κόμβων

Τελικά, εφόσον ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία της επαναρίθμησης, μπορεί πλέον να τρέξει το μοντέλο. 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, 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 όπως φαίνεται παρακάτω (εικόνα 17).



Εικόνα 17. Παράθυρο MS-DOS κατά τη διάρκεια τρεξίματος του μοντέλου

Να σημειωθεί ότι το PTC εκτελέστηκε με τα αρχικά δεδομένα υδραυλικών υψών των 20 γεωτρήσεων, για χρονικό διάστημα 2 ετών, χωρίζοντας το κάθε έτος σε υγρή (χειμερινή) και ξηρή (καλοκαιρινή) περίοδο, με την υγρή από Οκτώβριο έως και Απρίλιο και την ξηρή από Μάιο έως και Σεπτέμβριο.

5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Η βαθμονόμηση (calibration) ενός μοντέλου επιτυγχάνεται με μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Γίνεται με τη μεταβολή των τιμών των διάφορων παραμέτρων μέχρι οι τιμές του μοντέλου και του πεδίου να συγκλίνουν ικανοποιητικά. Οι παράμετροι οι οποίες συνήθως επιλέγονται είναι εκείνες με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Επιπλέον, επιλέγονται εκείνες με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, δηλαδή παραμέτρους για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις πεδίου αλλά ούτε ικανοποιητική φυσική ερμηνεία (Aldakos, 2014).

Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε ένα πλήθος επαναλήψεων προκειμένου τα δεδομένα των υδραυλικών υψών που λήφθηκαν από την Τεχνική Υπηρεσία του Δήμου Αποκορώνου να συμφωνούν με τα εξαχθέντα αποτελέσματα από το μοντέλο. Καθώς διατέθηκαν δεδομένα για 2 υδρολογικά έτη (2015-2017) η βαθμονόμηση έγινε για τη συγκεκριμένη περίοδο και τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν προς βελτίωση των αρχικών εκτιμήσεων. Οι εκτιμήσεις αυτές αφορούν τις εισροές και τις εκροές, τον καθορισμό των οριακών συνθηκών και τις ιδιότητες των πετρωμάτων της περιοχής.

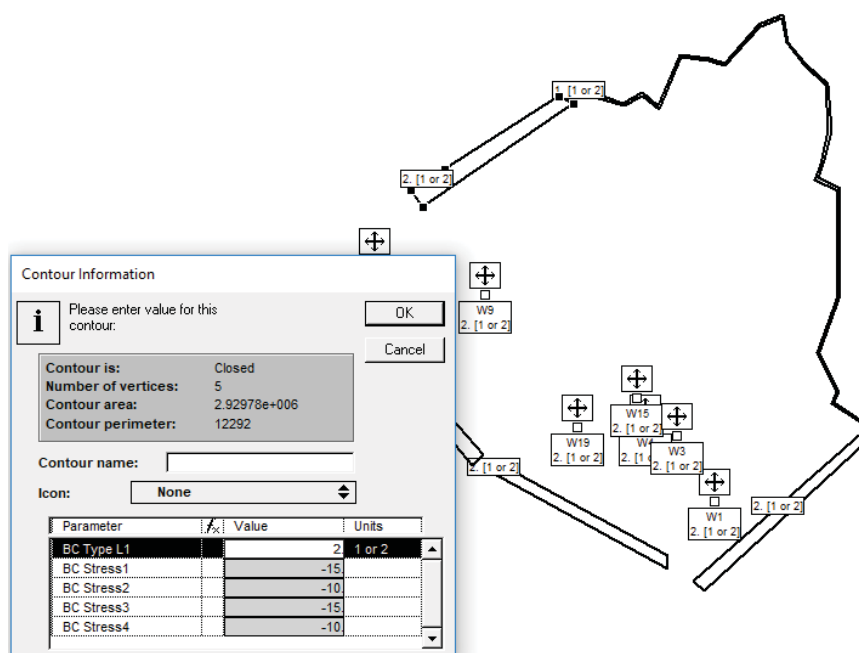
Γενικά, η βαθμονόμηση του μοντέλου δεν υπήρξε ιδιαίτερα ευθύγραμμη διαδικασία. Η διαδικασία ξεκίνησε μεταβάλλοντας ελαφρώς σε κάθε επανάληψη την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε μία κατηγορία πετρωμάτων της περιοχής μελέτης, φροντίζοντας η τιμή που θα δοθεί να είναι μέσα στο αποδεκτό εύρος για το συγκεκριμένο πέτρωμα. Για όρια των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας συμβουλευτήκαμε το Γεωλογικό Χάρτη Παυλάκη Αικ., «Τεχνικές Γεωλογικές συνθήκες στο Ν. Χανίων», Διδακτορική

Διατριβή, 2008. Οι τελικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 8.

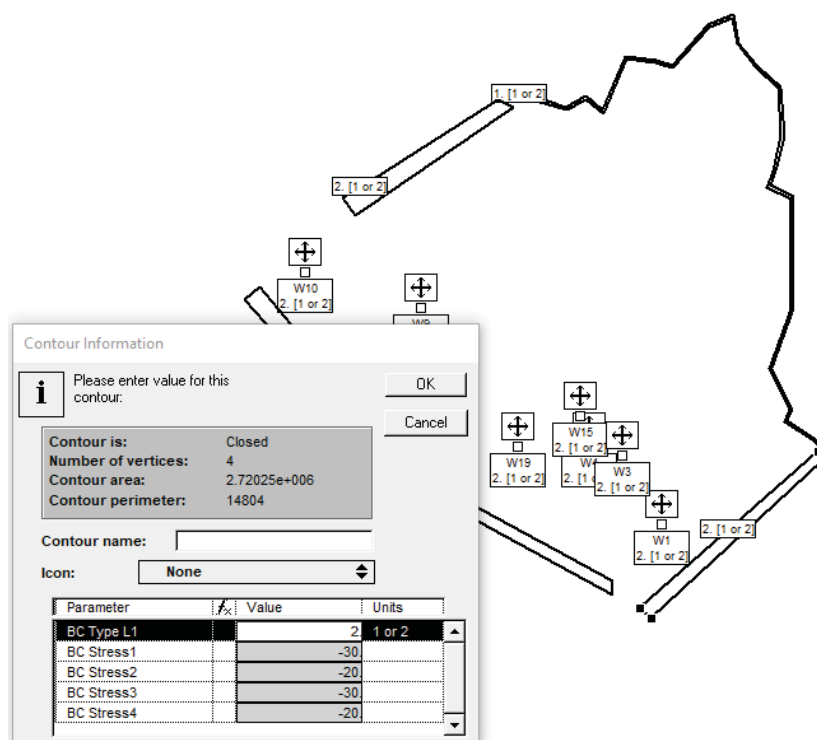
Πέτρωμα	Αγωγιμότητα Kx (m/day)	Αγωγιμότητα Ky (m/day)	Αγωγιμότητα Kz (m/day)
Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι (Αν. Μειοκαίνου – Κ. Πλειοκαίνου)	0,0864	0,0864	0,00864
Φλύσχης Πίνδου (Παλαιόκαινο)	0,864	0,864	0,0864
Πλακώδεις ασβεστόλιθοι (Αν. Τριαδικό – Ηώκαινο)	5	5	0,5
Ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρυπαλίου, Τριαδικό - Ιουρασικό	100	100	10
Αλλουβιακές αποθέσεις, ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης (κυμαινόμενης υδροπερατότητας)	8,64	8,64	0,864
Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων με ή χωρίς αργιλικό υλικό (Τεταρτογενές)	8,64	8,64	0,864

Πίνακας 8. Τελικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στο μοντέλο

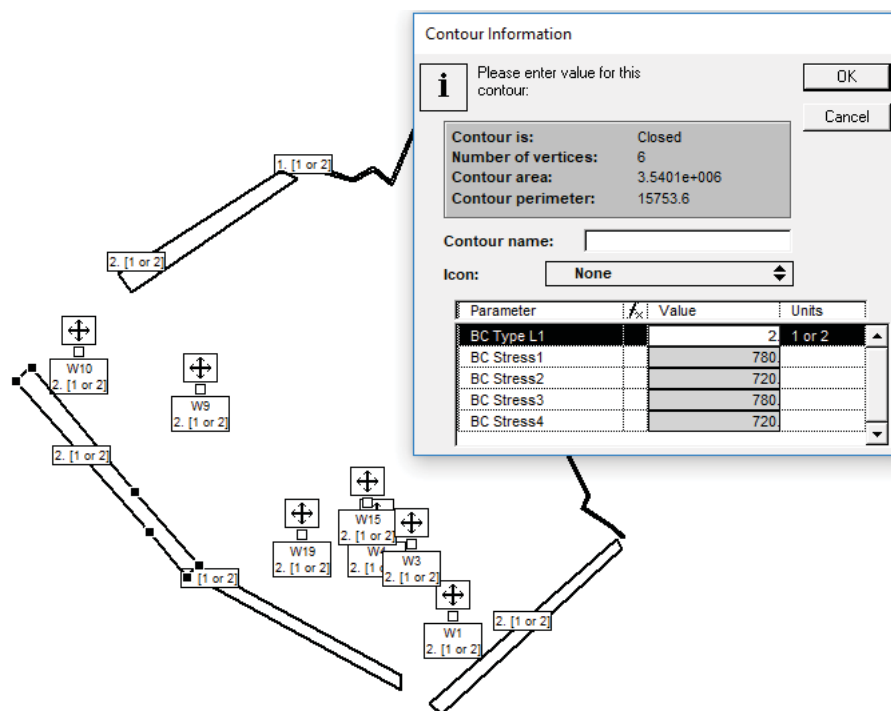
Στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι μεταβάλλοντας μόνο την υδραυλική αγωγιμότητα των πετρωμάτων δεν ήταν δυνατό να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα κι έτσι προστέθηκαν οι οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου προσδιορίζοντας εισροή ή εκροή νερού στην περιοχή μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, από τα βοριοδυτικά και από τα νοτιοανατολικά της περιοχής ορίστηκε για τις ανάγκες του μοντέλου ότι υπάρχει υπόγεια εκροή, ενώ από την περιοχή που βρίσκονται τα Λευκά Όρη υπάρχει υπόγεια εισροή. Τα πολύγωνα αυτά αντιγράφηκαν και στα υπόλοιπα επίπεδα οριακών συνθηκών. Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται αναλυτικά οι τιμές σε m³/day που δόθηκαν για τις εισροές και τις εκροές αντίστοιχα.



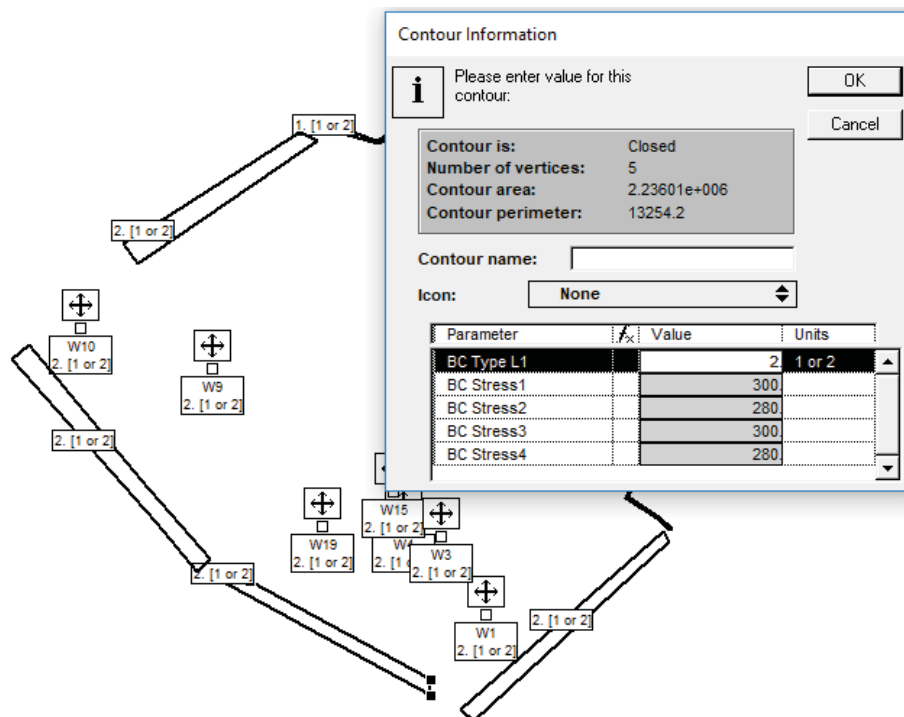
Εικόνα 18. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 1



Εικόνα 19. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 2



Εικόνα 20. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 3



Εικόνα 21. Εισαγωγή δεδομένων ροής στο layer 4

Μετά από κάθε τρέξιμο, τα αποτελέσματα εισήχθησαν 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 της Τεχνικής Υπηρεσίας του Δήμου Αποκορώνου.

5.1. Ποσοτικοί Δείκτες

Μεταξύ των διαφόρων στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση της προγνωστικής ικανότητας των μοντέλων συγκαταλέγεται ο δείκτης αποδοτικότητας Nash - Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE), η ποσοστιαία απόκλιση (Percent BIAS - PBIAS), ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE) καθώς και ο λόγος του μέσου τετραγωνικού σφάλματος προς την τυπική απόκλιση των μετρήσεων (Root Mean Square Error – Standard deviation of measured data Ratio - RSR). Οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν για τη σύγκριση των προσομοιωμένων και πραγματικών υδραυλικών υψών των γεωτρήσεων κατά τη διάρκεια των 2 υδρολογικών ετών της βαθμονόμησης.

- Δείκτης NSE

Ο δείκτης NSE είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική έκφραση που εκτιμά την σύγκλιση της προσομοιωμένης με την παρατηρημένη χρονοσειρά και εκφράζεται από την εξίσωση (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Όπου,

$Q_{sim,i}$: η προσομοιωμένη χρονοσειρά

$Q_{obs,i}$: η παρατηρημένη χρονοσειρά

$\overline{Q_{obs}}$: ο αριθμητικός μέσος όρος της παρατηρημένης χρονοσειράς

n : το μήκος της χρονοσειράς

Η βέλτιστη και ταυτόχρονα μέγιστη τιμή του δείκτη είναι η μονάδα και λαμβάνεται όταν οι παρατηρημένες τιμές ταυτίζονται πλήρως με τις προσομοιωμένες. Οι τιμές που παίρνει είναι από το $-\infty$ έως τη μονάδα και για να θεωρούνται έμπιστα τα αποτελέσματα του μοντέλου για την παροχή, πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 0.5.

- Δείκτης PBIAS

Ο δείκτης PBIAS μετρά την μέση τάση των προσομοιωμένων τιμών να είναι μεγαλύτερες ή μικρότερες απ' ότι οι αντίστοιχες παρατηρημένες και έχει την δυνατότητα να καταδεικνύει ξεκάθαρα την μικρή αποδοτικότητα ή προγνωστική ικανότητα του μοντέλου (Gupta et al., 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι το 0, με κοντινές τιμές σε αυτό να προδίδουν επιτυχή και ακριβή προσομοίωση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών και οι αρνητικές το αντίστροφο (Gupta et al., 1999). Ο δείκτης έχει τη μορφή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$PBIAS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i}) \cdot 100\%}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i})}$$

Όπου,

Q_{sim} : η προσομοιωμένη χρονοσειρά

Q_{obs} : η παρατηρημένη χρονοσειρά

Για να θεωρηθεί βαθμονομημένο το μοντέλο, πρέπει η απόλυτη τιμή του δείκτη να είναι μικρότερη του 25 (Gupta et al., 1999).

- Δείκτες RMSE και PSR

Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα (RMSE) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους στατιστικούς δείκτες με τις μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου (Moriasi et al., 2007). Ωστόσο, οι τιμές που υπολογίζει η στατιστική αυτή φόρμουλα εξαρτώνται από την κλίμακα των μεγεθών στα οποία αναφέρεται, οπότε σε συνδυασμό με τον δείκτη RSR (Singh et al. 2004) γίνεται η αξιολόγηση του μοντέλου. Ο δείκτης RSR μεταβάλλεται από την τιμή 0, η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική τιμή του RMSE ή μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση, έως μία μεγάλη θετική τιμή. Όσο μικρότερο είναι το RSR, τόσο μικρότερο το RMSE, και επομένως τόσο καλύτερη η προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Η σχέση για τον υπολογισμό τους είναι:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2} \right]}{\left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}{n}} \right]}$$

Για να είναι αποδεκτές οι προσομοιώσεις του μοντέλου για τη ροή των υπόγειων υδάτων, πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του 0.7 (Moriasi et al., 2007).

Συνοψίζοντας, τα επιτρεπτά όρια των δεικτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 9:

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS
Very good	0.00 ≤ RSR ≤ 0.50	0.75 < NSE ≤ 1.00	PBIAS < ±10
Good	0.50 < RSR ≤ 0.60	0.60 < NSE ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15
Satisfactory	0.60 < RSR ≤ 0.70	0.65 < NSE ≤ 0.50	±15 ≤ PBIAS < ±25
Unsatisfactory	RSR > 0.70	NSE < 0.50	±25 ≤ PBIAS

Πίνακας 9. Όρια στατιστικών δεικτών RSR, NSE, PBIAS (Moriasi et al., 2007)

5.2. Αποτελέσματα με στατιστικούς δείκτες

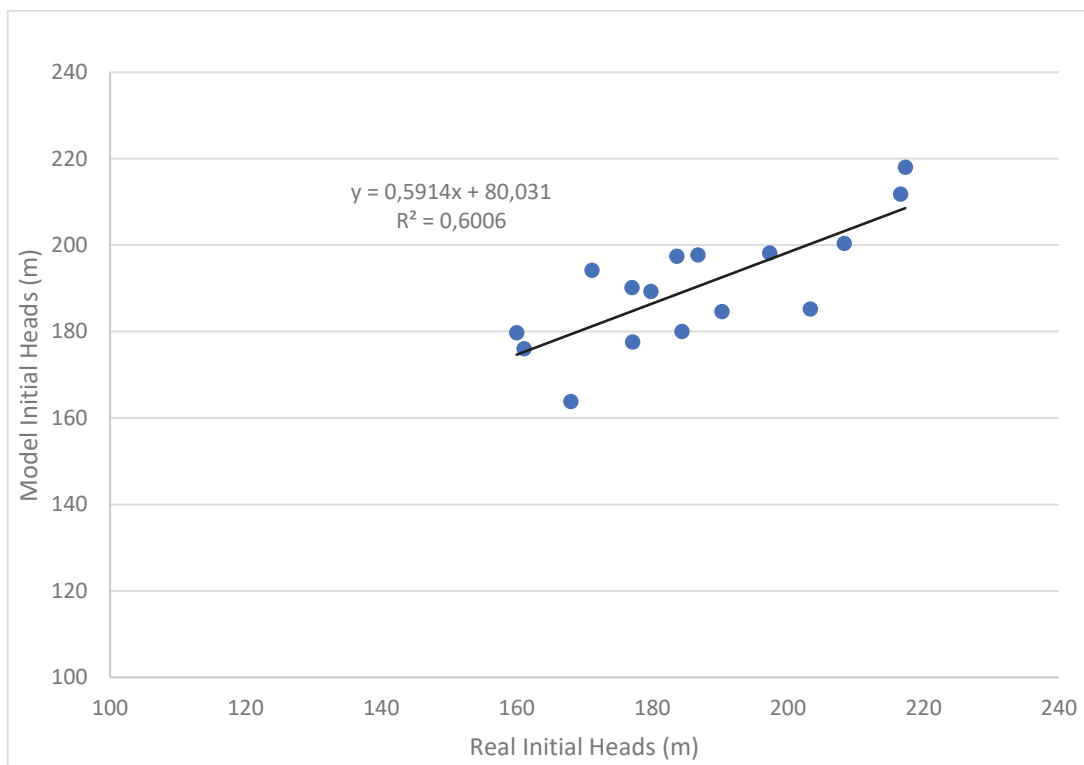
Τα αποτελέσματα μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου κρίνονται ικανοποιητικά και πλησιάζουν τα πραγματικά δεδομένα. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, εξετάζονταν ανά τακτά διαστήματα όλοι οι παραπάνω δείκτες τη κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου. Όλοι οι δείκτες RSR, NSE, PBIAS και RMSE έδειξαν ότι πρόκειται για μια επιτυχημένη μοντελοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, η τιμή για τον δείκτη PBIAS υπολογίστηκε +3,08. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω όσο οι τιμές πλησιάζουν το 0 και είναι μικρότερες του ± 10 , υποδηλώνεται μια επιτυχής προσομοίωση, ενώ παράλληλα οι θετικές τιμές δείχνουν ότι το μοντέλο έχει την τάση να υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές των πραγματικών δεδομένων. Η τιμή +3,08 λοιπόν επαληθεύει τη μεγάλη προγνωστικότητα του μοντέλου.

Ο δείκτης NSE υπολογίστηκε 0,55. Δεδομένου ότι η μονάδα να είναι η βέλτιστη καταλήγουμε ότι υπάρχει μια σχετικά ικανοποιητική σύγκλιση πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών.

Στη συνέχεια, τελευταίοι δείκτες που υπολογίστηκαν ήταν οι RMSE και RSR. Το μέσο υπολειμματικό σφάλμα RMSE είναι 2,93 και γενικά, οι μικρές τιμές να υποδηλώνουν καλή αποδοτικότητα του μοντέλου. Σε συνδυασμό με τον RMSE έχουμε και τον δείκτη $RSR = 0,67$. Τιμές πλησίον του μηδενός σε αυτούς τους δείκτες υποδεικνύουν μηδενική απόκλιση των σφαλμάτων και επομένως τέλεια προσομοίωση. Στην προκειμένη περίπτωση η μοντελοποίηση είναι στα όρια του ικανοποιητικού για τους εν λόγω δείκτες.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Γράφημα 6), έχει γίνει απεικόνιση των πραγματικών δεδομένων του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Όπως φαίνεται, τα σημεία βρίσκονται σχετικά κοντά στην ευθεία μέσης τάσης, ωστόσο το αποτέλεσμα του συντελεστή R^2 δεν είναι αρκετά καλό. Παρ' όλα αυτά, εφόσον έχουν ελεγχθεί οι παραπάνω τέσσερις δείκτες, πληρούνται οι προϋποθέσεις για μια ικανοποιητική προσομοίωση των πραγματικών δεδομένων του υδραυλικού ύψους.

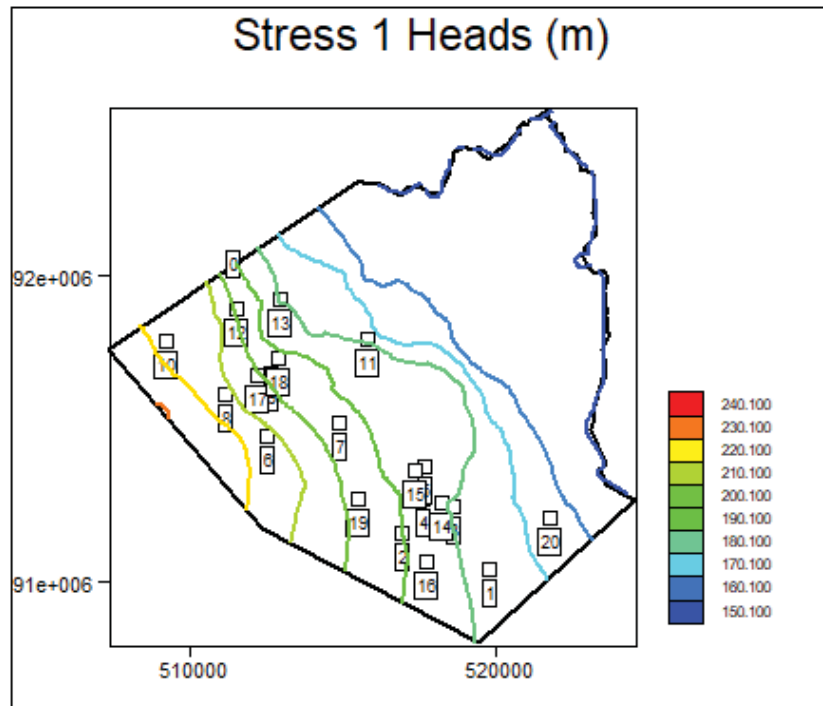


Γράφημα 5. Γραφική απεικόνιση των πραγματικών τιμών στάθμης σε σχέση με τις τιμές του μοντέλου

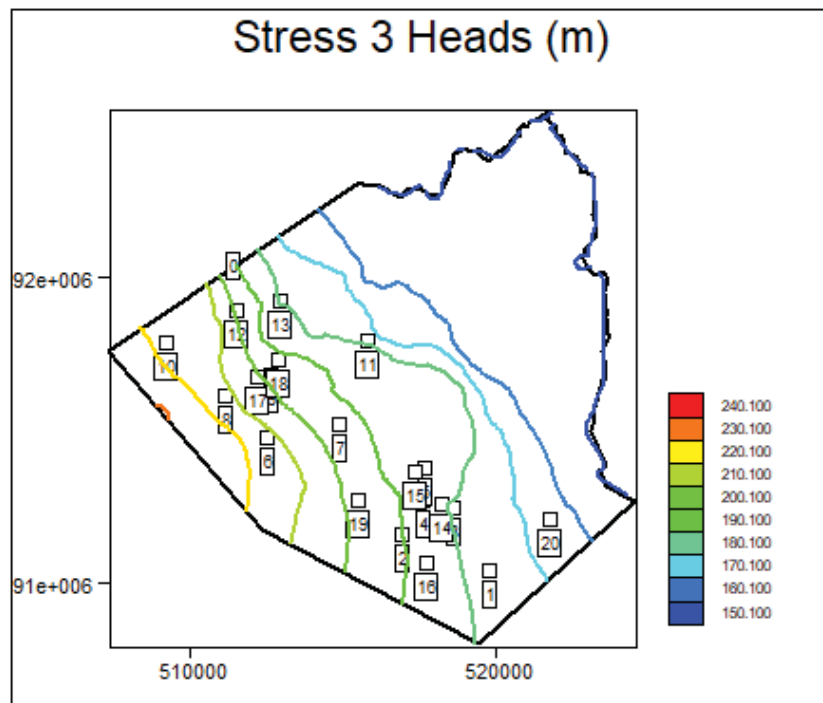
5.3. Αποτελέσματα με τα γραφήματα του μοντέλου

Έχοντας ολοκληρώσει τη βαθμονόμηση και τον έλεγχο των στατιστικών δεικτών, οδηγούμαστε στα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η μοντελοποίηση εκτελέστηκε για χρονικό διάστημα 2 υδρολογικών ετών, με το κάθε έτος να χωρίζεται σε 2 χρονικές περιόδους, χειμερινή και καλοκαιρινή. Στις Εικόνες 22 και 23 παρατίθενται τα αποτελέσματα τις δύο χειμερινές περιόδους για το 2015 έως το 2017 και αμέσως μετά τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων στις τις δύο θερινές περιόδους παρουσιάζονται στις Εικόνες 24 και 25.

Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος – Απρίλιος)

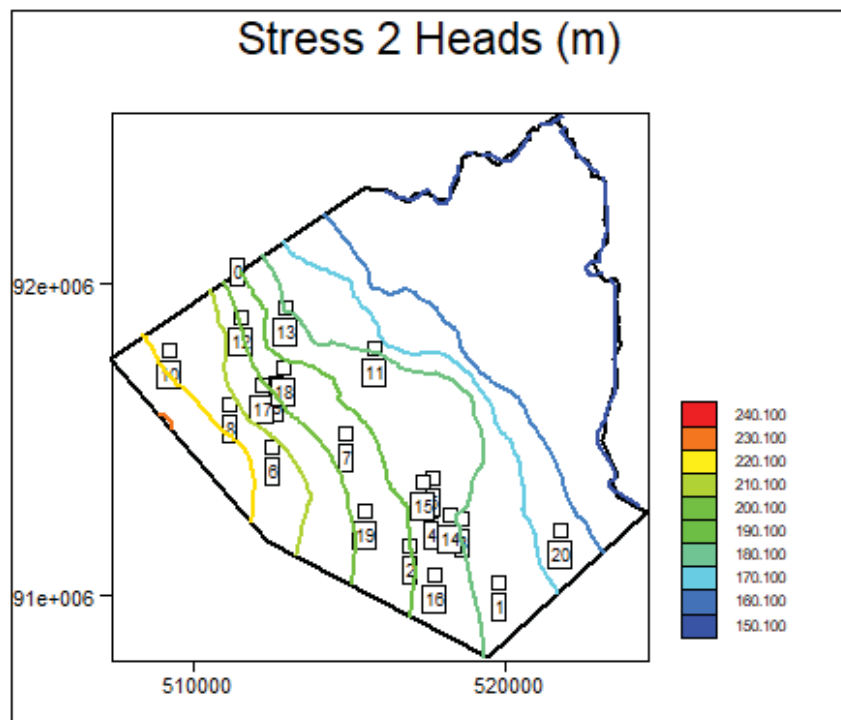


Εικόνα 22. Αποτελέσματα μοντέλου για την πρώτη περίοδο (wet stress)

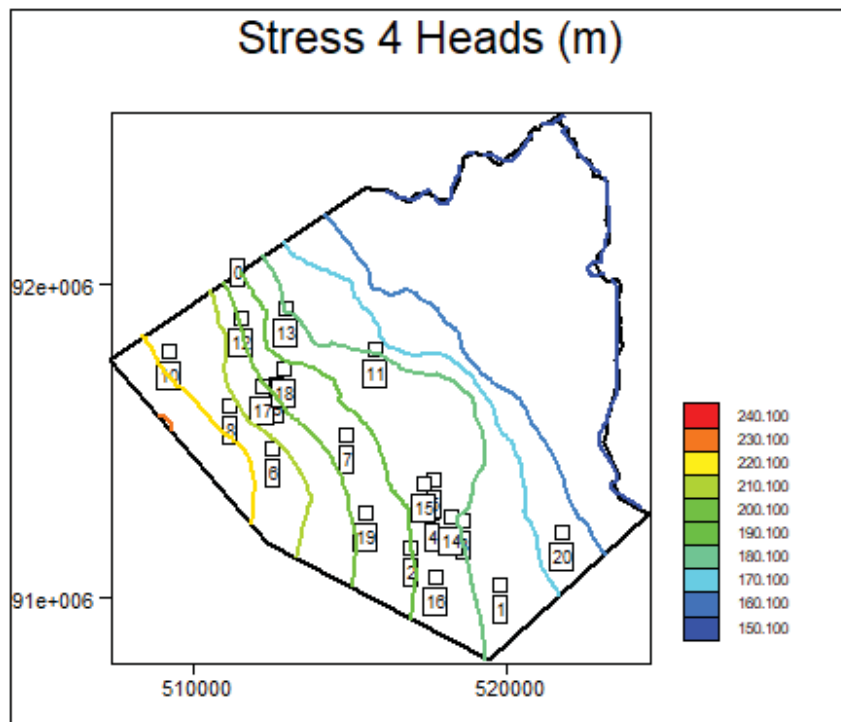


Εικόνα 23. Αποτελέσματα μοντέλου για τη δεύτερη περίοδο (dry stress)

Θερινή περίοδος (Μάιος – Σεπτέμβριος)

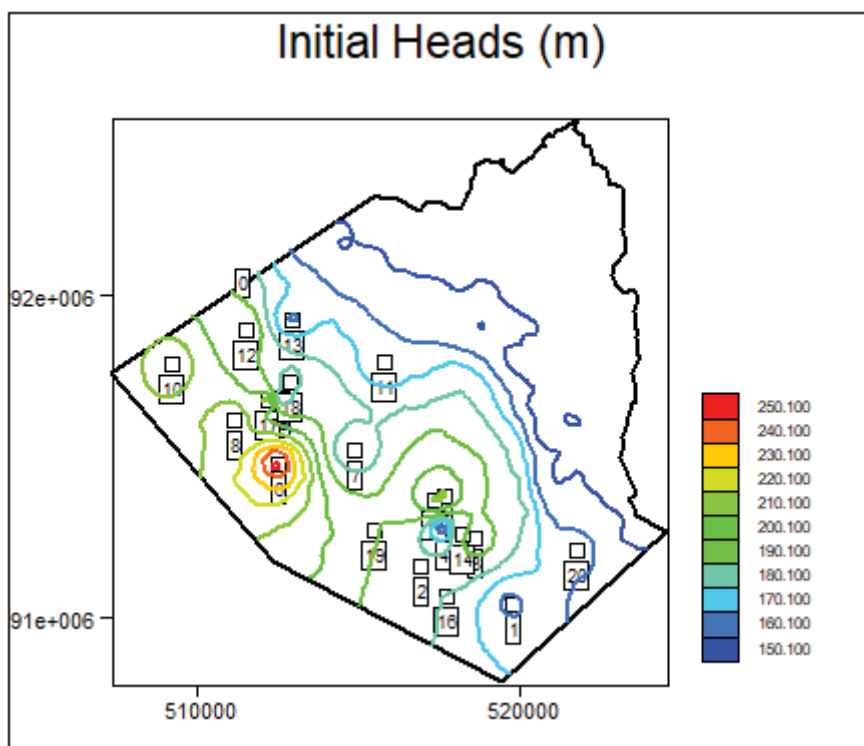


Εικόνα 24. Αποτελέσματα μοντέλου για την τρίτη περίοδο (wet stress)



Εικόνα 25. Αποτελέσματα μοντέλου για την τέταρτη περίοδο (dry stress)

Στην Εικόνα 26 παρατίθενται τα πραγματικά υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων προκειμένου να γίνει η σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

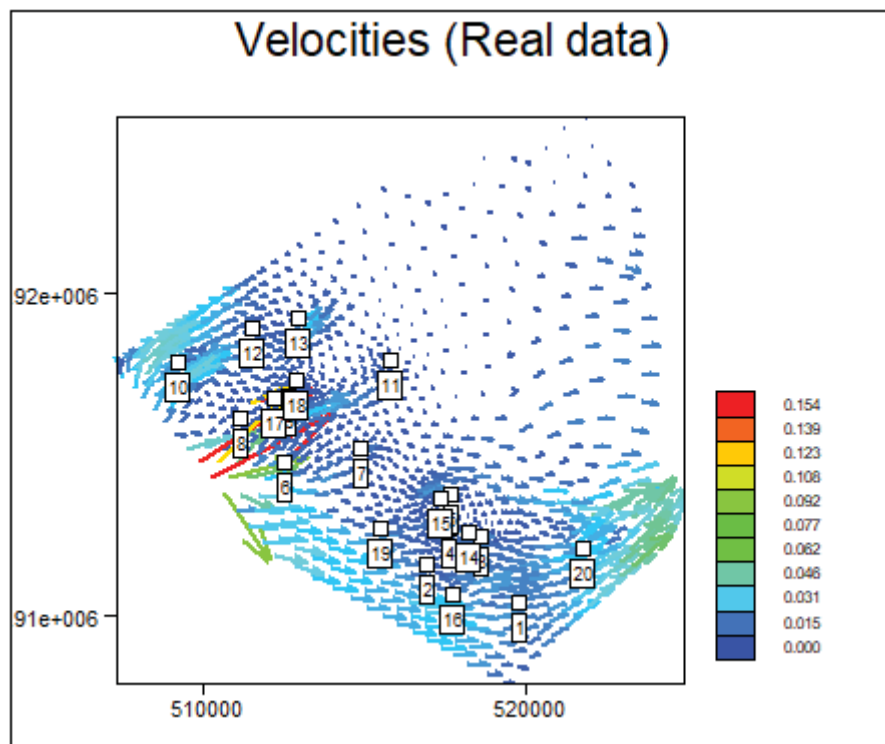


Εικόνα 26. Πραγματικά δεδομένα στάθμης

Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη του μοντέλου με τα αρχικά, βλέπουμε ότι έχουν προσεγγιστεί ικανοποιητικά, με περαιτέρω εξομάλυνση των υδραυλικών γραμμών. Η μέγιστη στάθμη εμφανίζεται στη γεώτρηση W6 και το μοντέλο δε κατάφερε να την προσομοιώσει με ακρίβεια, ενώ οι χαμηλότερες στάθμες βρίσκονται στις γεωτρήσεις W13 και W11.

Επιπλέον, τα γράφημα των Εικόνων 22, 23, 24, 25 παρουσιάζουν έναν μέσο όρο στις τιμές των υδραυλικών υψών ανά περίοδο (ξηρή ή υγρή). Είναι προφανές ότι τα εποχικά μέγιστα ή ελάχιστα που εμφανίζει το γράφημα της Εικόνας 26 με τα δεδομένα του πεδίου για την τελευταία ξηρή περίοδο θα έχουν μια μικρή απόκλιση από τα αποτελέσματα του μοντέλου τα οποία παρουσιάζονται για το τέλος της κάθε μίας περιόδου (ξηρή ή υγρή).

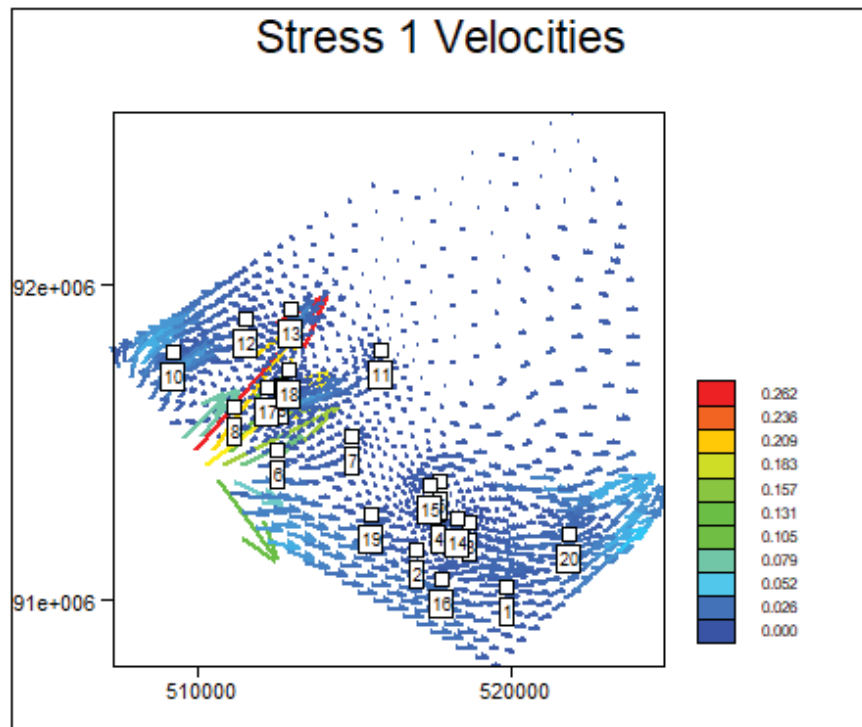
Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ταχύτητες των υπόγειων υδάτων για τη χειμερινή και τη θερινή περίοδο αντίστοιχα. Το πρώτο γράφημα (Εικόνα 24) αναφέρεται στις ταχύτητες που έχουν τα υπόγεια ύδατα με τα δεδομένα του πεδίου.



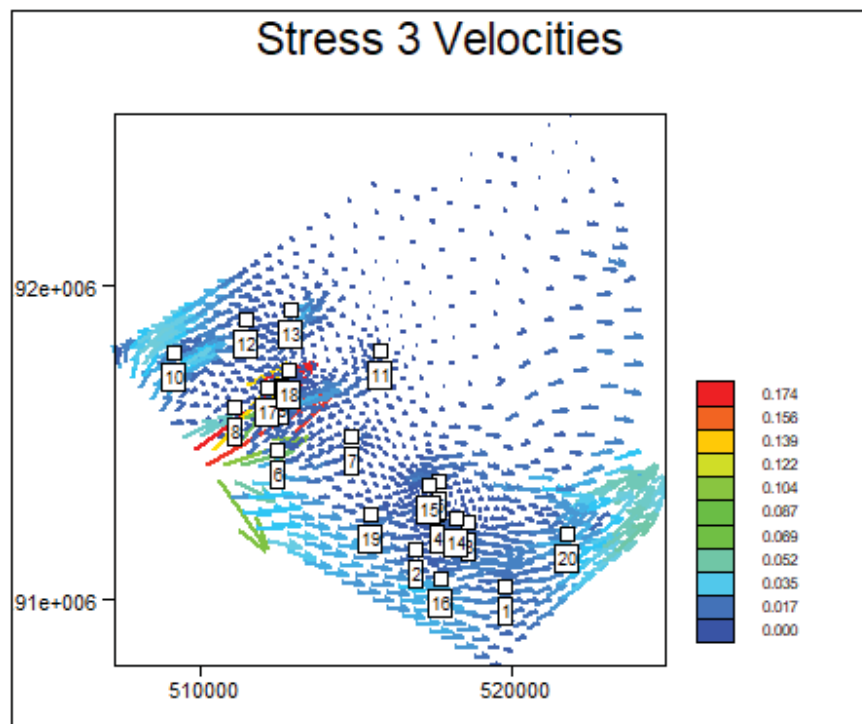
Εικόνα 27. Πραγματικά δεδομένα ταχυτήτων ροής υπόγειων υδάτων

Ακολουθούν τα γραφήματα (Εικόνα 28 και 29) για τις δύο χειμερινές και θερινές περιόδους αντίστοιχα για τα έτη 2015 και 2017.

Χειμερινή περίοδος (Οκτώβριος – Απρίλιος)



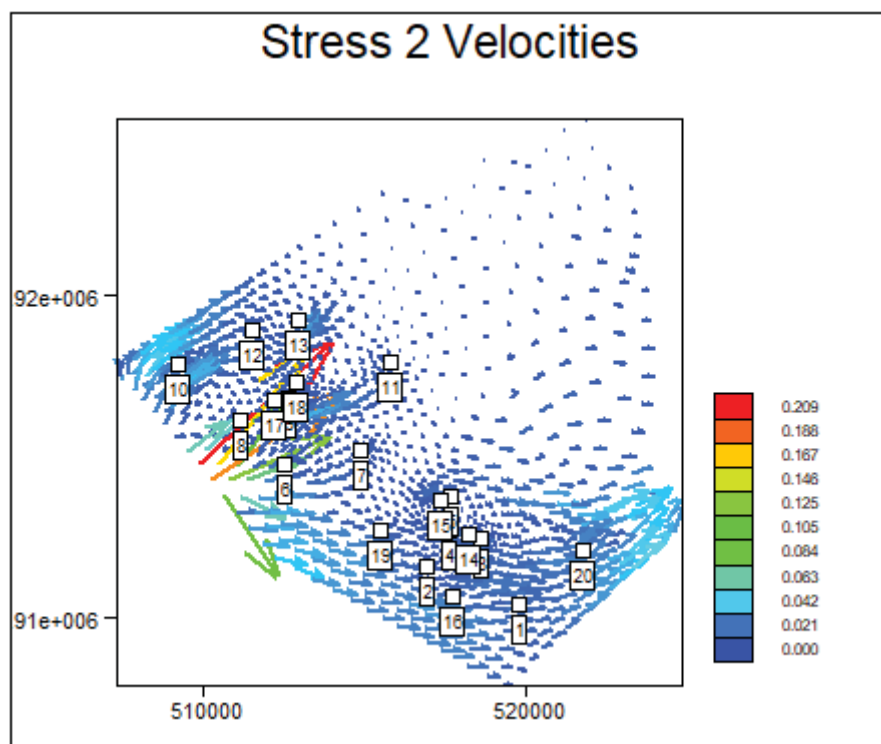
Εικόνα 28. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την πρώτη περίοδο



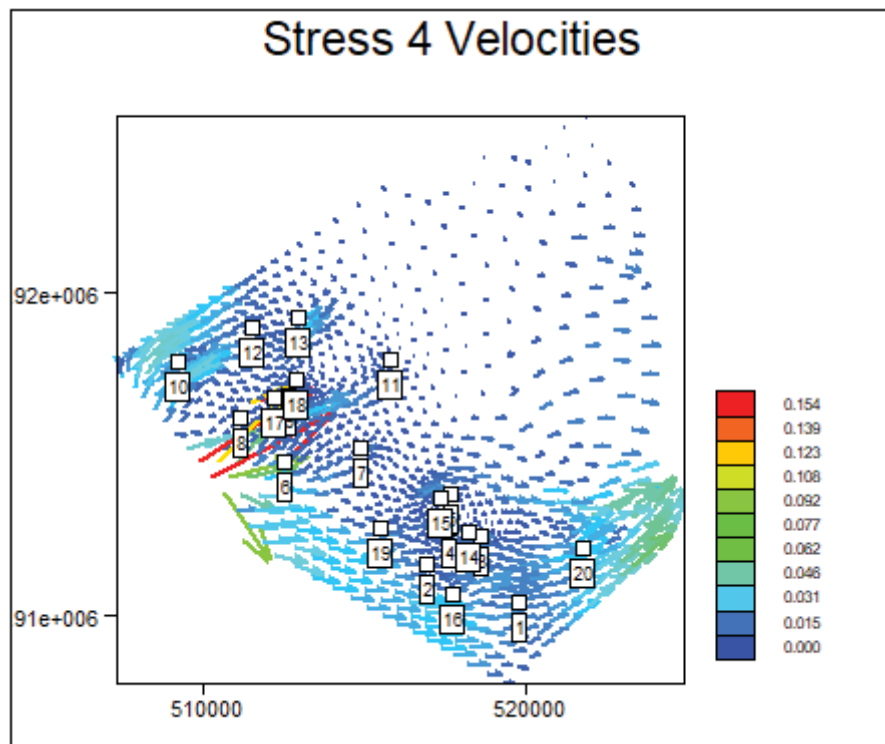
Εικόνα 29. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για τη δεύτερη περίοδο

Όπως εμφανίζεται στις Εικόνες 30 και 31 για τις χειμερινές περιόδους, υπάρχει εκφόρτιση προς τη θάλασσα. Γενικά, οι ταχύτητες είναι αρκετά χαμηλές λόγω της γεωλογίας της περιοχής, ενώ δείχνουν να είναι ελαφρώς πιο αυξημένες προς δυτικά, από την πλευρά των Λευκών Ορέων όπου έχουμε εισροές υδάτων.

Θερινή περίοδος (Μάιος – Σεπτέμβριος)



Εικόνα 30. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την τρίτη περίοδο



Εικόνα 31. Δεδομένα προσομοίωσης ταχύτητας για την τέταρτη περίοδο

Το καλοκαίρι υπάρχει μία μικρή διαφοροποίηση στις ταχύτητες σε σχέση με τη χειμερινή περίοδο. Ελαφρώς εντονότερη διαφορά παρατηρείται στο σημείο που εμφανίζεται η υψηλότερη ταχύτητα, δηλαδή στο δυτικό κομμάτι της περιοχής. Στο εν λόγω σημείο υπάρχει άντληση με υψηλό ρυθμό και σε συνδυασμό με τις εισροές από τα Λευκά Όρη αναπτύσσονται σχετικά πιο υψηλές ταχύτητες. Όπως προαναφέρθηκε ωστόσο, σε κάθε περίπτωση ισχύει ότι οι ταχύτητες που παρατηρούνται στην περιοχή κυμαίνονται σε αρκετά χαμηλά επίπεδα.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

Περιγραφή εξεταζόμενων παραμέτρων

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων και υπολογισμών. Οι παράμετροι αυτοί παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος και σχετίζονται με την κίνηση των υπόγειων υδάτων στον υδροφορέα, την περιγραφή του υπεδάφους και των πετρωμάτων (πορώδες, αποθηκευτικότητα, υδραυλική αγωγιμότητα), τη διήθηση της βροχόπτωσης κλπ. Ωστόσο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει τις τιμές σε κάθε μία από αυτές κι έτσι επιτυγχάνεται μια σαφή κατανόηση όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο και καθώς και των αποτελεσμάτων που εξάγονται (T. Lenhart , K. Eckhardt, N. Fohrer, H.-G. Frede, et al 2002).

Στην παρούσα εργασία έχοντας κατασκευάσει υπολογιστικό μοντέλο για ένα κομμάτι της περιοχής του Αποκόρωνα 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 που εξετάστηκαν ήταν οι τιμές των οριακών συνθηκών 2^{ου} τύπου, δηλαδή οι εισροές των υδάτων από την εξωτερική πλευρά της περιοχής μελέτης, η διήθηση από τις βροχοπτώσεις, καθώς και οι αντλήσεις από τις 20 μελετώμενες γεωτρήσεις. Κάθε παράμετρος διαφοροποιήθηκε κατά 20% τόσο αρνητικά όσο και θετικά και εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

1^ο Σενάριο

Μείωση των αντλήσεων κατά 20%

2^ο Σενάριο

Αύξηση των αντλήσεων κατά 20%

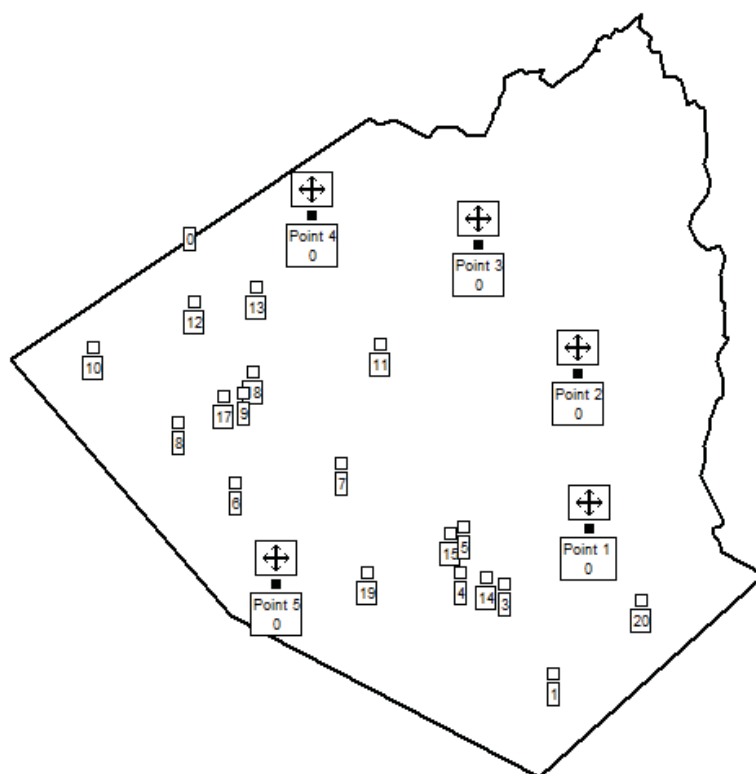
3^ο Σενάριο

Μείωση των εισροών κατά 20% και αύξηση των αντλήσεων κατά 20%

4° Σενάριο

Μείωση των εισροών κατά 20% και μείωση των αντλήσεων κατά 20%.

Διατηρώντας κάθε φορά ως δεδομένες τις συνθήκες για το κάθε σενάριο, δημιουργήθηκαν τέσσερεις διαφορετικές περιπτώσεις και εξετάστηκαν 19 σημεία ελέγχου τα οποία ήταν ουσιαστικά οι γεωτρήσεις της περιοχής και άλλα 5 σημεία διάσπαρτα μέσα στην περιοχή μελέτης και πέρα από τις γεωτρήσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32. Στη συνέχεια, εφόσον εκτελέστηκε το μοντέλο, τα αποτελέσματα της στάθμης εισήχθησαν στο Excel για τη δημιουργία των παρακάτω γραφημάτων, καθώς επίσης και στο PTC για να κατασκευαστούν τα γραφήματα της στάθμης με τις ισοδυναμικές γραμμές για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η σύγκριση έγινε για την τελευταία (ξηρή) περίοδο του δεύτερου μελετώμενου υδρολογικού έτους (2017), κατά το οποίο το σύστημα ευρίσκεται σε συνθήκες steady state. Σκοπός ήταν να διαπιστωθεί σε ποιους κόμβους υπάρχει η μεγαλύτερη μεταβολή σε σχέση με τις αρχικές τιμές και άρα να εντοπιστούν οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ευαισθησία.

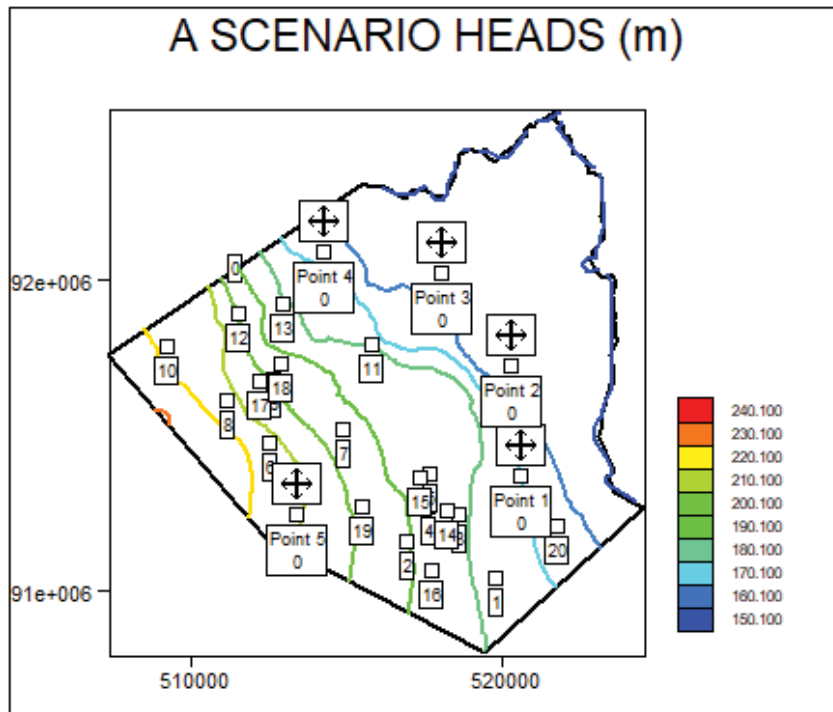


Εικόνα 32. Επιπλέον σημεία παρακολούθησης

6.1. Αποτελέσματα σεναρίων κλιματικής αλλαγής

1^ο Σενάριο

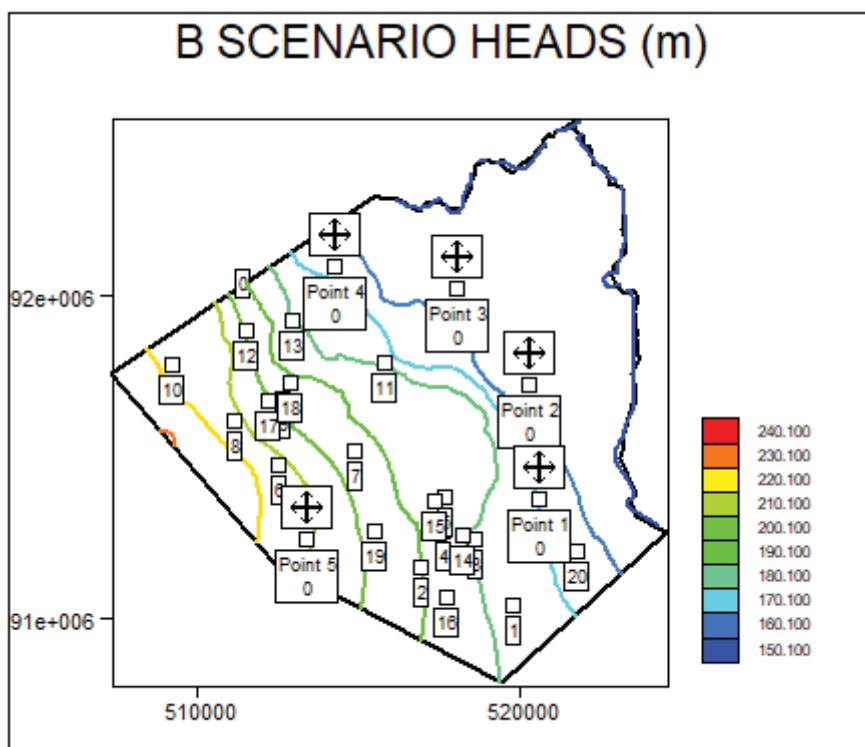
Στο 1^ο σενάριο όπως προαναφέρθηκε έγινε μείωση των αντλήσεων των γεωτρήσεων κατά 20% και αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια γενική αύξηση της στάθμης όπως εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 33). Μικρότερη μεταβολή παρουσιάστηκε στα σημεία των γεωτρήσεων 20 και 7. Το υπέδαφος κάτω από τα σημεία αυτά έχει χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, επομένως αυτή είναι και μία πιθανή αιτία της αύξησης της στάθμης μόλις 40 και 80 εκατοστά αντίστοιχα. Μεγαλύτερη μεταβολή παρουσίασαν τα σημεία στις γεωτρήσεις 3, 11 και 14 όπου η αύξηση της στάθμης ήταν 3,84 m, 4,40 m και 3,54 m αντίστοιχα. Τα εν λόγω σημεία βρίσκονται ακριβώς δίπλα σε αλλαγή τύπου πετρώματος, εκ των οποίων το ένα έχει υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα και το άλλο χαμηλή. Τέλος, από τα σημεία που εξετάστηκαν στους κόμβους που δεν υπήρχαν γεωτρήσεις, η μεταβολή του υδραυλικού ύψους ήταν μηδενική, εκτός του σημείου 1 που παρουσιάστηκε μικρή αύξηση της στάθμης (18 εκατοστά).



Εικόνα 33. Αποτελέσματα στάθμης για το 1^ο σενάριο

2° Σενάριο

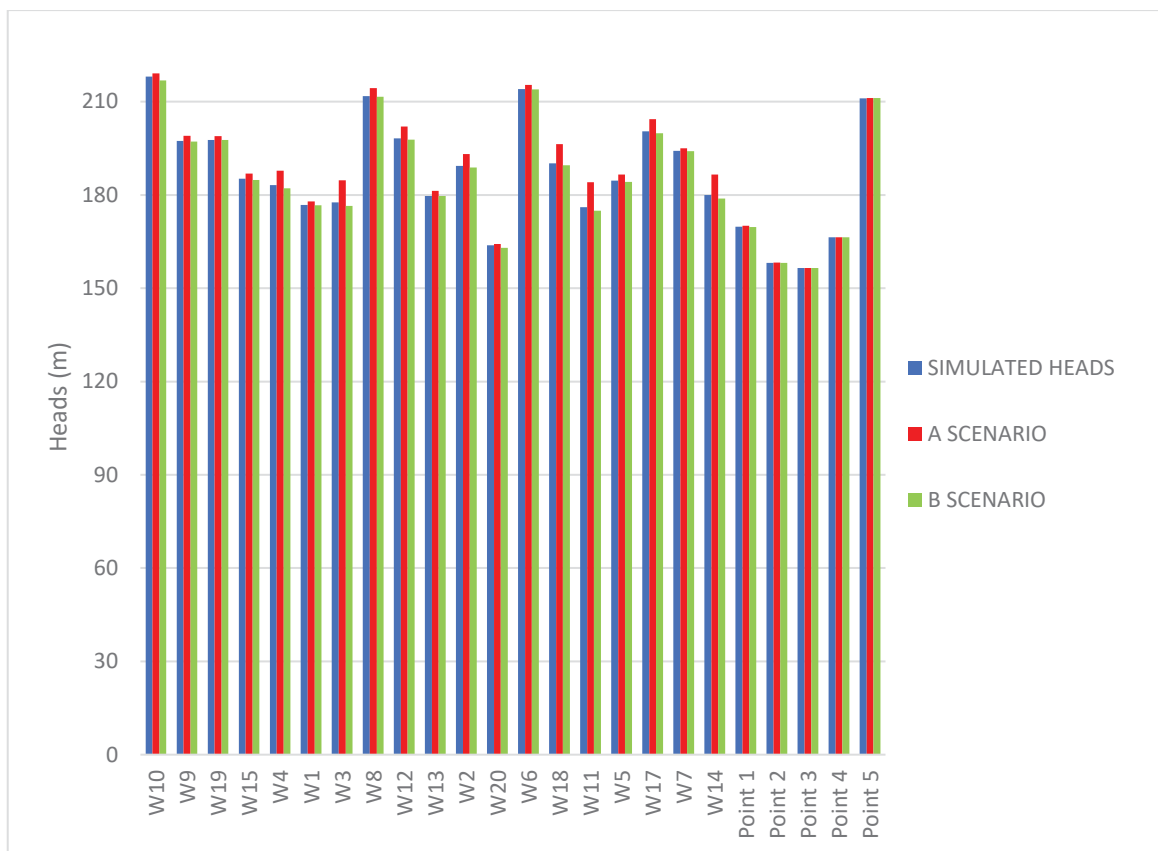
Στο 2° σενάριο έγινε αύξηση των αντλήσεων των γεωτρήσεων κατά 20% και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μια γενική πτώση της στάθμης όπως εμφανίζεται στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 34). Συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο, οι μεταβολές εδώ ήταν μικρότερες και η στάθμη έπεσε από 10 εκατοστά μέχρι και 1,2 μέτρα με μεγαλύτερη πτώση να εμφανίζουν και σε αυτήν την περίπτωση τα σημεία στις γεωτρήσεις 3, 11 και 14. Τα σημεία που μελετήθηκαν πέραν των γεωτρήσεων δεν εμφάνισαν μεταβολή στη στάθμη. Πιθανότατα σε αυτήν την περίπτωση το υπόγειο νερό αναπληρώνεται στον υδροφορέα από τις εισροές των οριακών συνθηκών από την πλευρά των Λευκών Ορέων.



Εικόνα 34. Αποτελέσματα στάθμης για το 2° σενάριο

Ακολουθεί ένα συγκριτικό γράφημα (Γράφημα 6) με τις μεταβολές των δύο πρώτων σεναρίων. Με τη μείωση της παροχής άντλησης υπήρξε άνοδος της στάθμης των

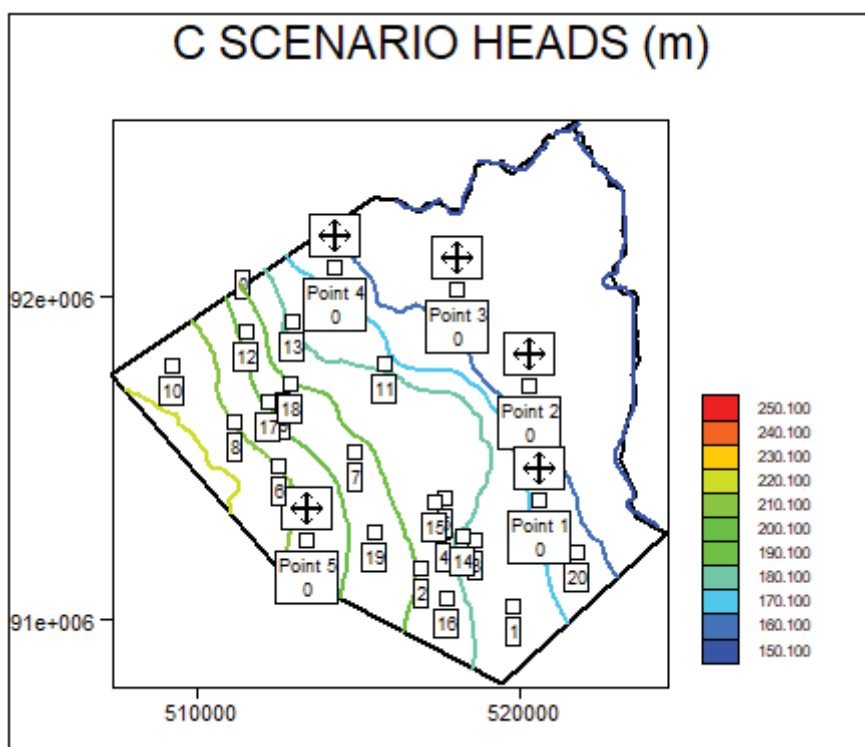
σημείων ελέγχου και η στάθμη φάνηκε να επηρεάζεται περισσότερο από τη μείωση των αντλήσεων (1^ο σενάριο) κατά 20% απ' ό τι από την αύξηση των αντλήσεων 20%. Ελαφρώς εντονότερες μεταβολές τις στάθμης παρατηρήθηκαν στα σημεία που συγκεντρώνονται αρκετές γεωτρήσεις άντλησης. Τέλος, όπως προαναφέρθηκε τα σημεία που μελετήθηκαν πέραν των γεωτρήσεων εμφάνισαν πολύ μικρή ή και καμία μεταβολή στη στάθμη, με συμπέρασμα οι αυξομειώσεις των υδραυλικών υψών να παρατηρούνται βασικά στα σημεία που βρίσκονται στην περιοχή επιρροής των γεωτρήσεων.



Γράφημα 6. Συγκριτικό γράφημα 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου σε σχέση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης

3^ο Σενάριο

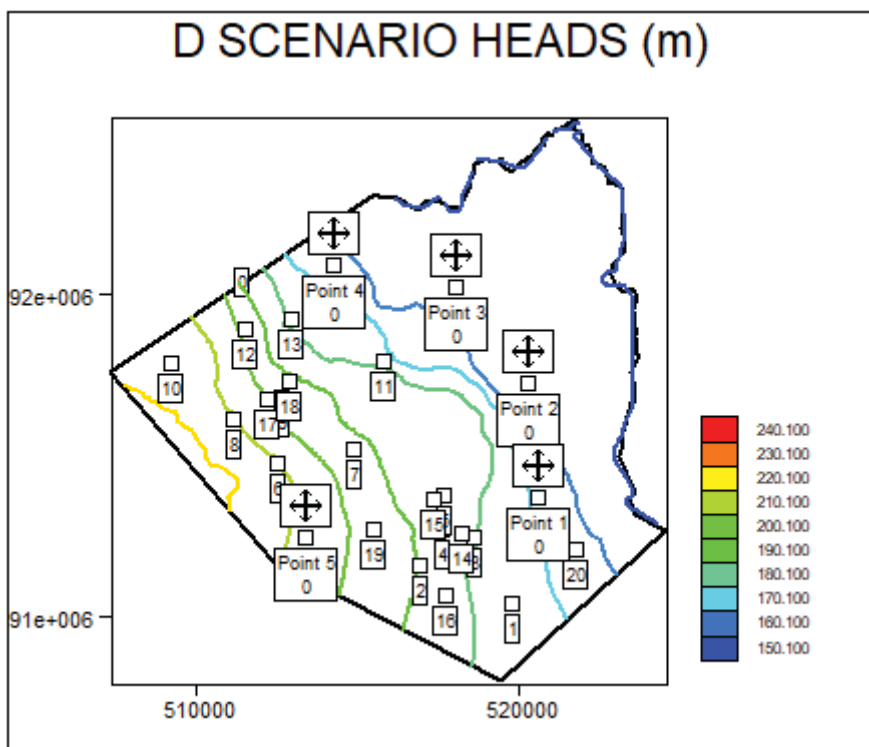
Στο τρίτο σενάριο έγινε μείωση των εισροών από τις οριακές συνθήκες και τη διήθηση από τις βροχοπτώσεις κατά 20% και ταυτόχρονη αύξηση των αντλήσεων κατά 20%. Η μεταβολή αυτή είχε ίδια τάση με αυτή του δεύτερου σεναρίου, δηλαδή η στάθμη έπεσε, αυτή τη φορά όμως η απόκλιση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική περίπτωση. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς από τη μία μειώνονται οι εισροές ύδατος και από την άλλη αυξάνονται οι αντλήσεις, με αποτέλεσμα η πτώση της στάθμης στον υδροφόρα να είναι πιο αισθητή. Επιπλέον, 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.



Εικόνα 35. Αποτελέσματα στάθμης για το 3^ο σενάριο

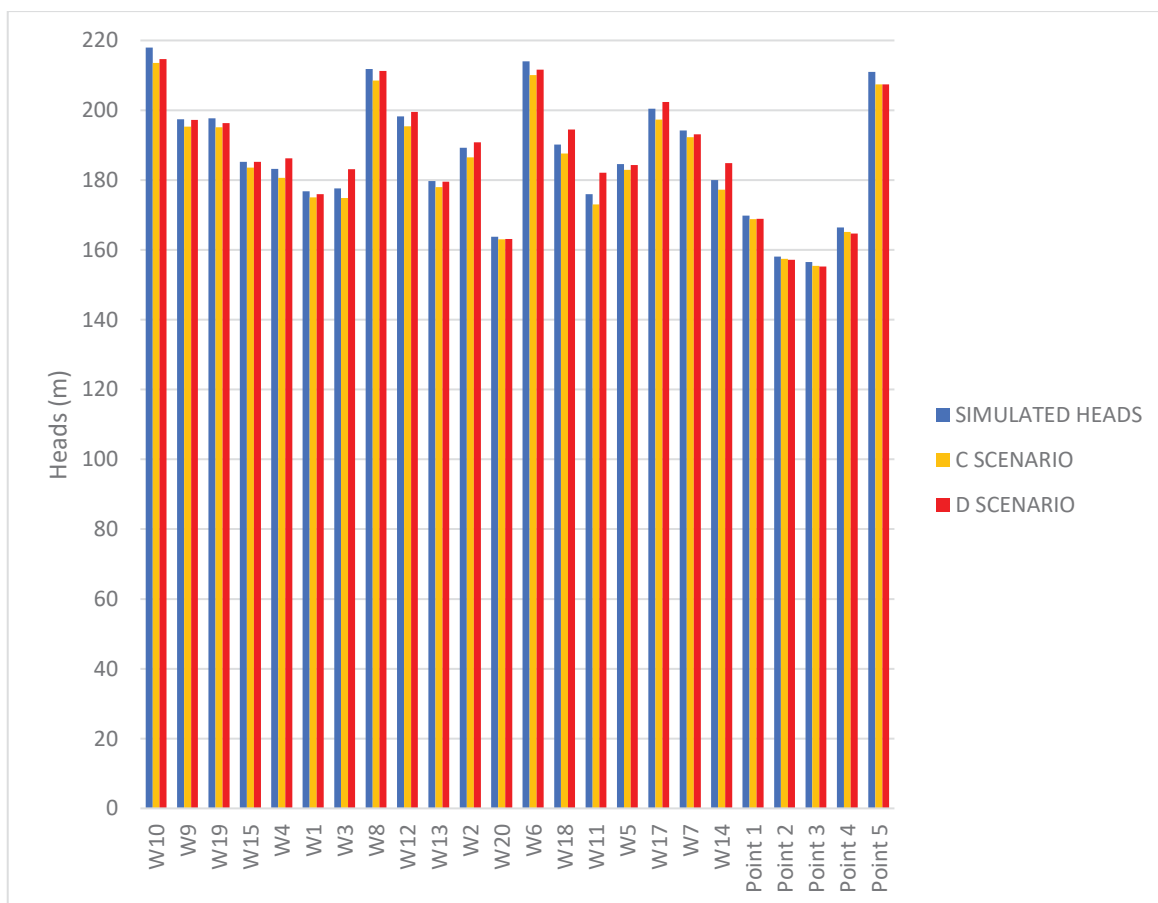
4° Σενάριο

Στο 4° σενάριο έγινε μείωση των εισροών κατά 20% και μείωση των αντλήσεων κατά 20%. Αυτή η περίπτωση είχε άλλοτε αύξηση και άλλοτε μείωση της στάθμης. Αύξηση εμφάνισαν τα σημεία που βρίσκονται στο πεδίο επιρροής πολλαπλών γεωτρήσεων (δηλ. οι γεωτρήσεις 4, 3, 2, 18, 17 και 14), ενώ τα υπόλοιπα που ήταν μεμονωμένα και σχετικά κοντά στις οριακές συνθήκες εμφάνισαν μικρή πτώση της στάθμης. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν και το αναμενόμενο, καθώς τα σημεία που βρίσκονται πλησίον των περιοχών που έχουν οριστεί οι οριακές συνθήκες, εφόσον μειώνονται οι εισροές τότε πέφτει και η στάθμη στον υδροφορέα και αντιθέτως στα σημεία που βρίσκονται υπό την επιρροή πολλαπλών γεωτρήσεων υπάρχει αύξηση της στάθμης καθώς επηρεάζονται περισσότερο από τη μείωση στις αντλούμενες ποσότητες.



Εικόνα 36. Αποτελέσματα στάθμης για το 4° σενάριο

Ακολουθεί ένα συγκριτικό γράφημα (Γράφημα 7) με τις μεταβολές των επόμενων δύο σεναρίων (3^ο και 4^ο σενάριο). Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα και σε αυτά τα δύο σενάρια παρουσίασαν την αναμενόμενη τάση, ωστόσο και εδώ ήταν σχετικά μικρές οι μεταβολές τις στάθμης, πιθανότατα λόγω των κατά βάση αδιαπέρατων πετρωμάτων της περιοχής.

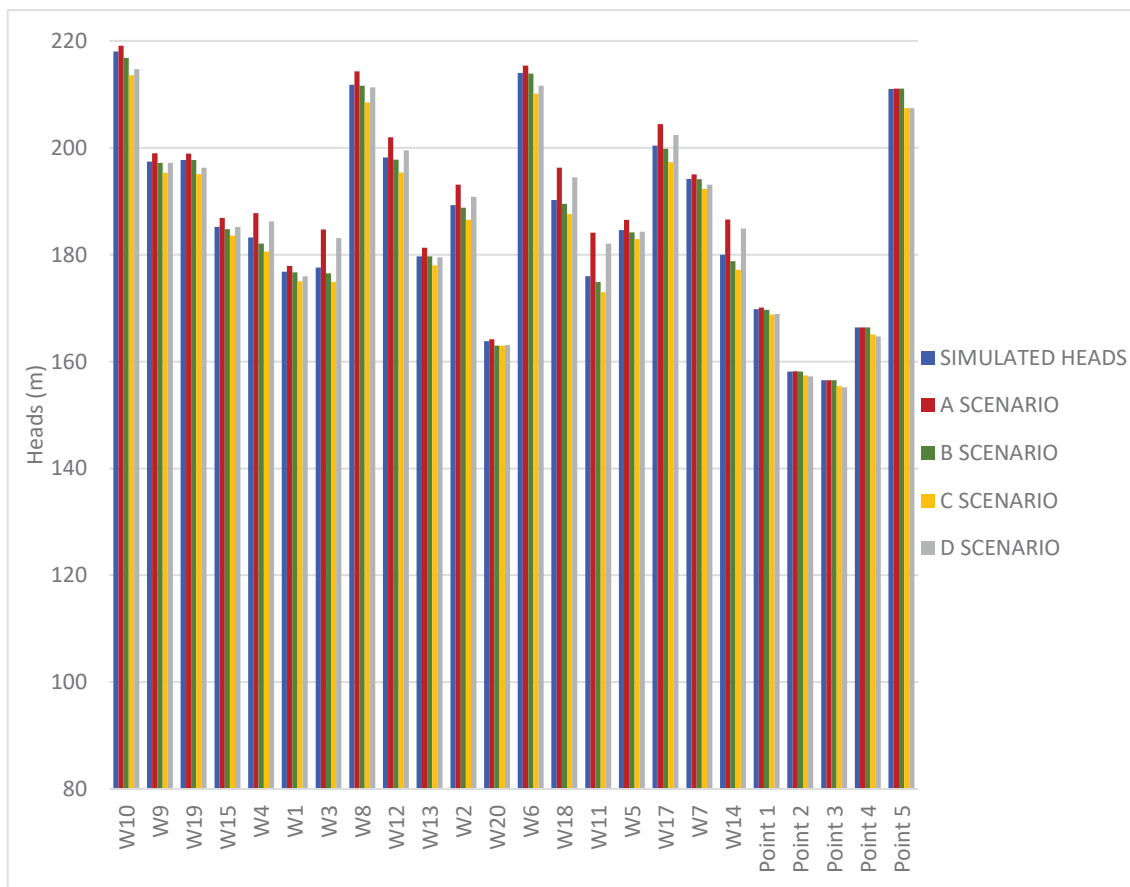


Γράφημα 7. Συγκριτικό γράφημα 3^{ου} και 4^{ου} σεναρίου σε σχέση με τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης

Ακολουθεί ο συνολικός Πίνακας 10 και το Γράφημα 8 για τις μεταβολές των υδραυλικών υψών σε όλους τους κόμβους. Να σημειωθεί ότι οι μεταβολές και για τα τέσσερα σενάρια ήταν οι αναμενόμενες, ωστόσο όμως δεν ήταν αρκετά έντονες αν και η σύγκριση έγινε την τελευταία ξηρή περίοδο και λόγω των υψηλών αντλήσεων θα αναμέναμε μεγαλύτερη μεταβολή στη στάθμη. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση μείωσης των αντλήσεων κατά 20 % (1^ο σενάριο) και την περίπτωση μείωσης των εισροών μαζί με τις

αντλήσεις κατά 20% (3^ο σενάριο), η αύξηση της στάθμης είναι της τάξης του 1,25%. Τα άλλα δύο σενάρια παρουσιάζουν μικρότερη μεταβολή κατά μέσον όρο. Για αύξηση της άντλησης κατά 20 % (2^ο σενάριο) η μεταβολή είναι της τάξης 0,25%. Για μείωση των εισροών μαζί με τις αντλήσεις κατά 20% (4^ο σενάριο), η μεταβολή είναι της τάξης είναι επίσης 0,25% περίπου. Συνεπώς, τα δύο πρώτα σενάρια (1^ο και 2^ο σενάριο) παρουσίασαν ελαφρώς εντονότερες μεταβολές της στάθμης από ότι τα σενάρια 3 και 4.

Έτσι, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι γενικά η περιοχή μας παρουσιάζει χαμηλό βαθμό ευαισθησίας στις μεταβολές των παροχών άντλησης των πηγαδιών. Το γεγονός του χαμηλού βαθμού ευαισθησίας της περιοχής υποδεικνύει πως η περιοχή δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την μεταβολή στις παροχές άντλήσεως των πηγαδιών και πως θα ήταν καλό να πραγματοποιηθούν επιπλέον μετρήσεις προκειμένου να έχουμε μια καλύτερη εικόνα σχετικά με τα υδραυλικά ύψη και το πόσο και πως αυτά επηρεάζονται.



Γράφημα 8. Συγκριτικό γράφημα με όλα τα σενάρια και τα αποτελέσματα μοντελοποίησης

Σενάρια / Σημεία ελέγχου	<u>1° Σενάριο</u> Ποσοστό (%) μεί- ωσης των αντλή- σεων κατά 20%	<u>2° Σενάριο</u> Ποσοστό (%) αύ- ξης των αντλή- σεων κατά 20%	<u>3° Σενάριο</u> Ποσοστό (%) μεί- ωσης των εισ- ροών κατά 20% και αύξηση των α- ντλήσεων κατά 20%	<u>4° Σενάριο</u> Ποσοστό (%) μεί- ωση των εισροών κατά 20% και μεί- ωση των αντλή- σεων κατά 20%
W10	-0,50	0,55	2,06	1,54
W9	-0,80	0,10	1,08	0,10
W19	-0,60	0,00	1,33	0,71
W15	-0,91	0,22	0,87	0,00
W4	-2,45	0,60	1,44	-1,61
W1	-0,62	0,06	1,03	0,45
W3	-3,84	0,62	1,54	-3,00
W8	-1,17	0,09	1,58	0,24
W12	-1,88	0,20	1,43	-0,65
W13	-0,88	0,00	0,96	0,11
W2	-1,97	0,26	1,50	-0,79
W20	-0,24	0,49	0,49	0,43
W6	-0,65	0,05	1,86	1,13
W18	-3,11	0,37	1,39	-2,21
W11	-4,40	0,63	1,73	-3,35
W5	-1,02	0,22	0,93	0,16
W17	-1,96	0,30	1,57	-0,99
W7	-0,41	0,05	0,99	0,57
W14	-3,54	0,67	1,58	-2,65
Point 1	-0,18	0,06	0,59	0,53
Point 2	-0,06	0,00	0,44	0,57
Point 3	0,00	0,00	0,71	0,84
Point 4	0,00	0,00	0,79	1,03
Point 5	-0,05	-0,05	1,74	1,74

Πίνακας 10. Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας (τεσσάρων σεναρίων)

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσομοίωση της υπόγειας ροής της περιοχής του Αποκόρωνα Χανίων για τα υδρολογικά έτη από το 2015 έως το 2017 κι έπειτα έγινε και η προσομοίωση τεσσάρων σεναρίων κλιματικής αλλαγής για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος ARGUS ONE και συγκεκριμένα του κώδικα PTC, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής.

Βάση των δεδομένων που λήφθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για το πρόγραμμα, στα αποτελέσματα που εξήχθησαν δείχνουν ότι τα υπόγεια ύδατα της περιοχής που μελετήθηκε εμφανίζουν χαμηλή κινητικότητα. Κάτι τέτοιο ήταν εξ αρχής αναμενόμενο, καθώς όταν μελετήθηκε η γεωλογία της περιοχής είδαμε ότι επικρατούν πετρώματα με χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, με εισροές υπόγειων υδάτων από τα Λευκά Όρη.

Σχετικά με τα υδραυλικά ύψη που παρατηρήθηκαν στην περιοχή, θα λέγαμε ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου. Το χειμώνα λόγω των βροχοπτώσεων και της αυξημένης διήθησης νερού στον υδροφορέα έχουμε ανύψωση της στάθμης περίπου κατά 0,92 m. Πιθανότατα αν είχαμε δεδομένα παροχής άντλησης για μεγαλύτερο διάστημα και «τρέχαμε» το μοντέλο για περισσότερες περιόδους να βλέπαμε και μεγαλύτερη διαφοροποίηση στη στάθμη μεταξύ των δύο εποχών.

Στις περιπτώσεις των σεναρίων κλιματικής αλλαγής παρατηρήθηκε ότι το σύστημα παρουσιάζει ανθεκτικότητα στις μεταβολές των αντλούμενων ποσοτήτων ύδατος καθώς και στις μεταβολές των οριακών συνθηκών και των εισροών ύδατος από τις βροχοπτώσεις. Για μία πιθανή μεταβολή στις παροχές άντλησης των γεωτρήσεων, το συμπέρασμα είναι ότι στο εγγύς μέλλον ο υδροφορέας δε θα παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα σχετικά με την υδρομάστευση στην οποία υπόκειται, ακόμη και αν υπάρξει μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων. Ωστόσο, αν μια αλλαγή στις παροχές άντλησης των γεωτρήσεων συνοδεύεται και από ταυτόχρονη μεταβολή των οριακών συνθηκών και των διηθούμενων ποσοτήτων (βρόχινο νερό), τότε το σύστημα παρουσιάζει σχετικά μεγαλύτερη ευαισθησία. Συνεπώς, οποιαδήποτε εκτίμηση μελλοντικών διαχειριστικών σχεδίων ή

μοντελοποίηση της περιοχής θα πρέπει να επικεντρώνεται στην ορθή και όσο γίνεται ακριβέστερη εκτίμηση των συγκεκριμένων παραμέτρων.

Στην περιοχή μελέτης υπάρχει μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων και κατά πλειοψηφία γίνεται μικτή χρήση (ύδρευση και άρδευση). Αν και έχει γίνει απογραφή τους, δεν έχει γίνει επαρκής καταγραφή ούτε των δεδομένων στάθμης, ούτε έχουν γίνει γεωλογικές τομές με πλήρη στοιχεία για όλες τις γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχει ελλιπής πληροφόρηση για την συνολική κατάσταση στην ευρύτερη περιοχή για το χρονικό διάστημα μελέτης. Κρίνεται, λοιπόν, βασική ανάγκη η εκπόνησης μελετών και η διεξαγωγή μετρήσεων κυρίως της παράκτιας ζώνης (πλέον ευάλωτη) για να περιοριστούν τυχόν πιέσεις στον υδροφορέα και να αποφευχθεί η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων της περιοχής. Όπως ακριβώς ορίζεται και στις περισσότερες από τις άδειες των υδρογεωτρήσεων, απαραίτητη είναι η χρήση σταθμημέτρου, ώστε να ελέγχεται η στάθμη του υδροφορέα κι έτσι να είναι δυνατή η επαναξιολόγηση της δυναμικότητας και των λοιπών χαρακτηριστικών του και να παίρνονται τα κατά περίπτωση αναγκαία μέτρα.

Για λόγους εξοικονόμησης ύδατος, και εφόσον όπως παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη δεν υπάρχει μεγάλη κινητικότητα ύδατος στην περιοχή, καλό θα ήταν να αποφεύγεται η άρδευση με συστήματα καταιονισμού (μικροεκτοξευτήρες, τεχνητή βροχή) ή με κατάκλιση κατά τις ώρες (ή περιόδους) υψηλών θερμοκρασιών.

Αν και προς το παρόν δε φαίνεται να υπάρχει σοβαρό πρόβλημα, η περιοχή είναι παραθαλάσσια γι' αυτό και θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, καθώς η διάνοιξη μίας γεώτρησης ή η υπεράντληση από τις ήδη υπάρχουσες μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την υφαλμύριση του υδροφορέα. Ως μέθοδος πρόληψης θα μπορούσε να εφαρμοστεί ο έλεγχος της άντλήσεως ιδίως των γεωτρήσεων που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα. Έτσι, σε περίπτωση που δημιουργηθεί το πρόβλημα, θα μειώνεται ο ρυθμός άντλησης των γεωτρήσεων, με επιδιωκόμενο αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης του υδροφορέα, ούτως ώστε να περιοριστεί η κίνηση του γλυκού νερού προς το θαλασσινό και αντίστροφα.

Τέλος, σημαντική είναι και η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων και η από κοινού προσπάθεια προς την κατεύθυνση της ορθολογικής και βιώσιμης χρήσης των

υδατικών πόρων της περιοχής και φυσικά η συμμόρφωση των εμπλεκόμενων φορέων και ιδιωτών με την κείμενη νομοθεσία. Άλλωστε μην ξεχνάμε, πως η εν λόγω περιοχή είναι σημαντικού οικονομικού και ιδιαίτερα τουριστικού ενδιαφέροντος.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1. Ελληνική βιβλιογραφία

Ntona, M., Gavriilidou, E., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2018). *Διερεύνηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης του παράκτιου υδροφορέα Καλλικράτειας-Φλογητών Χαλκιδικής*. Ελλάδα. Υδροτεχνικά, 27, 54-67.

Αθανασάκης Μ. (2008). «*Διαχείριση του Υδατικού Συστήματος του βόρειου τμήματος του νομού Χανίων με χρήση Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων*», Πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών «*Επιστήμη και τεχνολογία υδατικών πόρων*». Μεταπτυχιακή διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθανασιάδου Ε. (2008). «*Υδρογεωλογική μελέτη με χρήση μοντέλου προσομοίωσης του Β.Δ. τμήματος του Ν. Χανίων*». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Παυλάκη Α., Λιόνης Μ. (2013). «*Αναθεώρηση και επέκταση γενικού πολεοδομικού σχεδίου (Γ.Π.Σ) Δήμου Χανίων και των περιαστικών Δήμων Ελ. Βενιζέλου, Θερίσου και Σούδας*». Προκαταρκτική Μελέτη Γεωλογικής Καταλληλότητας, Τεχνική Έκθεση, Δήμος Χανίων

Αλδακός Θ. (2014). *Μοντελοποίηση της υδρολογίας και γεωχημείας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη με χρήση του μοντέλου SWAT*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Ανδρεοπούλου Ρ., Μόλλα Ε. (2014). *Γενικό Πολεοδομικό σχέδιο δήμου Αποκορώνου, (Ν. Χανίων) και πολεοδομική οργάνωση των οικισμών: Μελιδόνη Καβρός Φυλακή*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνείο Κρήτης

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

Απέργη Μ.(2014). *«Προσομοίωση της υπόγειας ροής στο κατάντι τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη με τη χρήση του μοντέλου PTC»*. Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Αρετίνη Χ. (2008). *«Κλιματική αλλαγή – Οικονομικές επιπτώσεις σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο»*. Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών στη ναυτιλία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Βοζινάκη Ε. (2014). Διδακτορική Διατριβή *«Ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Εκτίμησης της Επικινδυνότητας και των Επιπτώσεων Πλημμυρικών Φαινομένων»*. Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Βουλούρης Κ. (2009). *«Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος»*. Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον, Εκδόσεις: ΤΖΙΟΛΑ

Γεωργιάδου Ι. (2015). *Προσομοίωση και διαχείριση υπόγειου υδροφορέα στη λεκάνη απορροής του Αλμυρού, Μαγνησίας*. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Γκούμας Χ. (2016). *Μελέτη της Υπόγειας Ροής στον Κάμπο Χανίων με χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code)*. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δαουλάρη Γ. (2007). «*Μοντελοποίηση Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός Υφάλμυρης Ζώνης Υπόγειου Υδροφορέα*». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Δίγκα Α. (2007). «*Ανάλυση Ευαισθησίας Του Μοντέλου Προσομοίωσης PTC Στον Υπόγειο Υδροφορέα της Περιοχής Αγυιάς – Χανίων* ». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Θωμοπούλου Ε. (2016). «*Προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή και χωρικός σχεδιασμός*». Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Κανλής Ι. (2012). *Αξιολόγηση μέτρων αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης*. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Κακούρος, Π., Τσιαούση, Β., Χατζηχαλαράμπους, Ε., Kakouros, P., Tsiaousi, V., & Hadjicharalampous, E. (2014). *Οδηγίες εκπόνησης σχεδίων διαχείρισης προστατευόμενων περιοχών*.

Καρατζάς Γ. (2003). *Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων* – Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κοσκινά Κ. (2004). «*Υδρογεωλογική μελέτη και μοντελοποίηση του υπόγειου υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής κόλπου Κισσάμου – Χανίων*». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Κουμπούρης Ε. (2005). «Ανάλυση Ευαισθησίας του Μοντέλου Προσομοίωσης PTC στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής Λιμένα Χερσονήσου-Ηρακλείου». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Λαζαρίδου Αθανασιάδου Μ., *Φυσικές Ιδιότητες του εδάφους*, ΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα Δασοπονίας και Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος Εργαστήριο Εδαφολογίας.

Νικολαΐδης Ν., Καρατζάς Γ. (2010), «Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη – Θερίσου και Κοιλιάρη», Τεχνική Έκθεση, Χανιά

Παλιατζίκη Α. (2006). «Ανάλυση Περιβαλλοντικών Πιέσεων και Επιπτώσεων στη Λεκάνη Απορροής του Ποταμού Κοιλιάρη». Μεταπτυχιακή Διατριβή, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Παπαδογιάννη Μπέλλου Α. (2010). «Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς του εξασθενούς χρωμίου στην περιοχή του Ασωπού ποταμού, νομού Αττικής». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Παπαζαφειρίου Ζαφείρης (1999). *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδότης: Ζήτη

Παυλάκη Αικ. (2008). «Τεχνικές γεωλογικές συνθήκες στο Ν.Χανίων» (σελ 540). Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

Πελέκη Α. (2003). «Συνθήκες κατείσδυσης και υπόγειας ροής στις χαλαρές αποθέσεις των κοιτών των υδατορευμάτων της Μυγδονίας λεκάνης». Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Οικολογική ποιότητα και διαχείριση υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής», Α.Π.Θ.

Παυλίδου Σ., Κριτσωτάκης Μ. (2013). *Κατάσταση υπόγειων υδροφόρων Κρήτης*. Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης, Γενική Δ/ση Χωροταξικής και Περιβαλλοντικής Πολιτικής, Διεύθυνση Υδάτων

Στεργιάδη Μ. (2004). «Υδρογεωλογική μελέτη του βόρειου τμήματος της Νήσου Ρόδου – Προσομοίωση Υπόγειας Ροής με χρήση του τρισδιάστατου Μοντέλου Υπόγειας Ροής Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων PTC». Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Τσακίρης, Γ., Αντωνόπουλος Β., Βαγγέλης Χ., Γιακουμάκης Σ., Καββαδίας Γ., Καϊμάκη Σ., Κερκίδης Π., Λατινόπουλος, Μπαλούτσος Γ., Μπέλλος Κ., Παπαϊωάννου Γ., Χρυσάνθου Β., 2013. Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

Χατζηανδρέου, Α. (2015). *Ποιότητα και ρύπανση υπόγειων νερών*.

Λυκούδης Σ., Λάλας Δ., Ακύλας Ε. (2005). «Κλιματική αλλαγή στον Ελλαδικό χώρο». Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

8.2. Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

M.P. Anderson W. W. Woessner. (2002). *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advection*. Academic Press

Anderson M., Woessner W. (2002). “*Applied Groundwater Modeling*”, Simulation of flow and advective transport

Anderson M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic press.

Bobba, A.G., Singh, V.P., Bengtsson, L. (2000). *Application of environmental models to different hydrological systems*. Ecological Modeling 125.

Constantinof, A., Moisiadis, V. G., & Matthews, S. G. (2016). *Programming of stress pathways: A transgenerational perspective*. The Journal of steroid biochemistry and molecular biology, 160, 175-180.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). Groundwater: Englewood Cliffs. New Jersey.

Gianniou et al, (2012)

Gleick, P.H. (1998). *The World's Water 1998-1999: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington, D.C.

Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. Climatic Change, 134(3), 371-385.

Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2011). *Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada*. Journal of Hydrology, 409(1-2), 1-19.

Hagiwara, K., Hikasa, K., Nakamura, K., Tanabashi, M., Aguilar-Benitez, M., Amsler, C., ... & Conforto, G. (2002). *Review of particle physics*. Physical review D, 66(1), 100011-10001958.

Koutroulis, A. G., Tsanis, I. K., Daliakopoulos, I. N., & Jacob, D. (2013). *Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece*. Journal of hydrology, 479, 146-158.

Kumar, C. P. (2002). *Groundwater flow models*. Scientist 'E1' National Institute of Hydrology Roorkee–247667. (Uttaranchal) publication.

Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2002). *Comparison of two different approaches of sensitivity analysis*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 27(9-10), 645-654.

Lyon, J. G., Trimble, S. W., Ward, A. D., & Burckhard, S. R. (2015). Environmental hydrology. Crc Press.

Ludwig, F., van Slobbe, E., & Cofino, W. (2014). Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. Journal of Hydrology, 518, 235-242.

M.P. Anderson W. W. Woessner. (2002). *Applied Groundwater Modeling Simulation of FLOW and Advective*. Academic Press, 2002

MeshMaker–PTC interface. *User's guide*, José-Luis Olivares

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900.

NEWELL, J. (1995). *Light nonaqueous phase liquids, Ground water Issue*. EPA/540/S-95/500.

Nikolov, P., Fratev, F., & Minchev, S. (1983). *A new class of organic luminophores with a stilbene chromophore: 3-phenylmethylene-1 (3H)-isobenzofuranones*. Zeitschrift für Naturforschung A, 38(2), 200-205.

Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G., Daliakopoulos, I. N., & Jacob, D. (2011). *Severe climate-induced water shortage and extremes in Crete*. Climatic Change, 106(4), 667-677.

UNEP and UNFCCC. (2002, September). *Climate Change Information Kit, Fontline Electronic Publishing*. Grance, p. b-7, 12, 14.

Vardavas, I., Chartzoulakis, K., Papamastorakis, D., Xepapadeas, A., Spanoudaki, K., Zacharioudakis, G., ... & Donta, A. (2005). *Report on Crete. Water on Mediterranean Islands: Current conditions and prospects for sustainable management*. (pp. 293-422)

Hassan, K. M., Surdashy, A. M., & Bapeer, G. B. (2010). *Infiltration rates of soils in some locations within erbil plain, Kurdistan region, north Iraq*. Iraqi Bulletin of Geology and Mining, 6(2), 127-137.

8.3. Άρθρα από τον τύπο

Εφημερίδα «Ανατολή», (2018, Δεκέμβριος 01). «Κλιματική Αλλαγή προ των πυλών». σελ. 4.

Εφημερίδα «ΡΕΘΕΜΝΙΩΤΙΚΑ ΝΕΑ». (2018, Δεκέμβριος 20-30). «Η Ελλάδα θα βρεθεί αντιμέτωπη με αυξημένη λειψυδρία, στο μέλλον». σελ. 5.

Εφημερίδα «Κρητική Επιθεώρηση». (2019, Ιανουάριος 5-6). «Συντονισμός για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας». σελ. 10

Τράπεζα της Ελλάδος, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής. (2011). «Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα»

Εφημερίδα «Ύπαιθρος». (2018, Αύγουστος 11). Από Δημήτρη Βολουδάκη: «Χρηματοδοτικές ευκαιρίες για δράσεις στη γεωργία για την κλιματική αλλαγή». σελ. 52

8.4. Διαδικτυακές πηγές

<https://unfccc.int/>

<https://www.nasa.gov/>

<https://www.ipcc.ch/>

<https://www.civilonline2010.blogspot.com>

Μετεωρολογικός σταθμός Βρυσών Χανίων Κρήτης, Ιδιοκτησία Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών - Φιλοξενία: Δήμος Αποκορωνού, Επίβλεψη: Λέανδρος Συμεωνίδης