

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ
ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ
ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΚΟΥΡΤΑΛΙΩΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΠΟΥΡΑΖΑΝΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Γ. ΚΑΡΑΤΖΑΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Ν. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ
Ε. ΒΑΡΟΥΧΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΗΣ 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Γεώργιο Καρατζά για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγηση που παρείχε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη και τον επιστημονικό συνεργάτη Εμμανουήλ Βαρουχάκη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή, καθώς και τον αναπληρωτή καθηγητή Νικόλαο Παρανυχιανάκη για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή ως αναπληρωτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ	
1.1 Εισαγωγή και υδρολογικός κύκλος.....	10
1.2 Η σημασία των υπογείων υδάτων.....	11
1.3 Πιέσεις που ασκούνται στα υπόγεια ύδατα και το φαινόμενο της υφαλμύρισης.....	12
1.3.1 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης.....	14
1.3.1.i Υφαλμύριση στην Ελλάδα.....	15
1.3.1.ii Μηχανισμός της υφαλμύρισης.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	17
2.2 Χλωρίδα και Πανίδα.....	19
2.2.1 Χλωρίδα.....	19
2.2.2 Πανίδα.....	19
2.2.3 Προστατευόμενες περιοχές – Περιοχές NATURA.....	20
2.3 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά	22
2.4 Γεωλογικά και Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ	
3.1 Εισαγωγή στα μοντέλα προσομοίωσης.....	30
3.1.1 Μαθηματικές εξισώσεις μοντέλων ροής υπογείων υδάτων.....	31
3.1.2 Μαθηματικές εξισώσεις μοντέλων μεταφοράς μάζας υπογείων υδάτων.....	31
3.2 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης.....	33
3.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών.....	33
3.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	33
3.2.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων.....	34
3.3 Το μοντέλο PTC.....	34
3.3.1 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου PTC.....	35
3.3.2 Οριακές συνθήκες.....	36
3.3.2.i Καθορισμένο υδραυλικό ύψος.....	36

3.3.2.ii Καθορισμένη ροή.....	36
3.3.2.iii Τρίτου τύπου.....	36
3.3.2.iv Οριακές συνθήκες μεταφοράς μάζας.....	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΤC

4.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	38
4.1.1 Γενικά στοιχεία.....	38
4.1.2 Οριακές συνθήκες.....	40
4.1.3 Υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες.....	40
4.1.4 Βροχόπτωση.....	41
4.1.5 Γεωτρήσεις.....	42
4.1.6 Πλέγμα.....	42
4.2 Αποτελέσματα μοντέλου.....	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

5.1 Ορισμός του προβλήματος.....	45
5.2 Η έννοια της μη γραμμικότητας σε προβλήματα υπογείων υδάτων.....	45
5.3 Η μέθοδος Simplex.....	46
5.4 Εφαρμογή της μεθόδου Simplex για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....70

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....72

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....72

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Μηνιαία βροχόπτωση, Σταθμός Σπήλι	
Πίνακας 2.2 Ετήσια ελάχιστη θερμοκρασία, Σταθμός Σπήλι	
Πίνακας 2.3 Ετήσια μέγιστη θερμοκρασία, Σταθμός Σπήλι	
Πίνακας 4.1 Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας	
Πίνακας 4.2 Τιμές ρυθμών άντλησης των γεωτρήσεων	
Πίνακας 5.1 Παροχές άντλησης 1 ^{ης} βελτιστοποίησης	
Πίνακας 5.2 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 1 ^{ης} βελτιστοποίησης	
Πίνακας 5.3 Πίνακας απόκρισης A για την 1 ^η βελτιστοποίηση	
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα 1 ^{ης} βελτιστοποίησης	

Πίνακας 5.5 Παροχές άντλησης 2^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.6 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 2^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.7 Πίνακας απόκρισης A για την 2^η βελτιστοποίηση

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα 2^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.9 Παροχές άντλησης 3^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.10 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 3^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.11 Πίνακας απόκρισης A για την 3^η βελτιστοποίηση

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα 3^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.13 Παροχές άντλησης 4^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.14 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 4^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.15 Πίνακας απόκρισης A για την 4^η βελτιστοποίηση

Πίνακας 5.16 Αποτελέσματα 4^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.17 Παροχές άντλησης 5^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.18 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 5^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.19 Πίνακας απόκρισης A για την 5^η βελτιστοποίηση

Πίνακας 5.20 Αποτελέσματα 5^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.21 Παροχές άντλησης 6^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.22 Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 6^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.23 Πίνακας απόκρισης A για την 6^η βελτιστοποίηση

Πίνακας 5.24 Αποτελέσματα 6^{ης} βελτιστοποίησης

Πίνακας 5.35 Συγκετρωτικά αποτελέσματα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Υδρολογικός κύκλος

Εικόνα 1.2 Μηχανισμός της υφαλμύρισης – Φυσικές συνθήκες

Εικόνα 1.3 Μηχανισμός της υφαλμύρισης – Αντλούμενη Γεωτρηση

Εικόνα 1.4 Υφαλμύριση στην Ελλάδα

Εικόνα 2.1 Έκταση περιοχής μελέτης

Εικόνα 2.2 Χάρτες χρήσεων γης του δήμου Αγίου Βασιλείου

Εικόνα 2.3 Προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 εντός της περιοχής μελέτης

Εικόνα 2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης

Εικόνα 2.5 Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου στον οικισμό Σπήλι

Εικόνα 2.6 Ανεμογράφημα της περιοχής

Εικόνα 2.7 Γεωλογικές ενότητες Κρήτης

Εικόνα 2.8 Γεωλογικές ενότητες της περιοχής μελέτης και όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη

Εικόνα 3.1 Παράδειγμα πλέγματος για την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών

Εικόνα 3.2 Παράδειγμα πλέγματος για την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των γενικών στοιχείων στο μοντέλο PTC

Εικόνα 4.2 Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των καταπονήσεων στο μοντέλο PTC

Εικόνα 4.3 Στιγμιότυπο οθόνης από την ψηφιοποίηση των αρχικών δεδομένων

Εικόνα 4.4 Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο PTC

Εικόνα 4.5 Πλέγμα του μοντέλου PTC

Εικόνα 4.6 Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη της τελευταίας περιόδου

Εικόνα 4.7 Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής της τελευταίας περιόδου

Εικόνα 5.1 Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου Simplex

Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα Matlab

Εικόνα 5.3 Βέλτιστες τιμές υδραυλικών υψών για την τελευταία περίοδο

Εικόνα 5.4 Βέλτιστες τιμές ταχύτητας ροής για την τελευταία περίοδο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονείται στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και έχει ως σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρισης στην ευρύτερη περιοχή της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη βελτιστοποιώντας τους ρυθμούς άντλησης σε γεωτρήσεις της περιοχής.

Αρχικά, παρουσιάζονται κάποιες γενικές πληροφορίες για τα υπόγεια ύδατα και τις πιέσεις που δέχονται τα τελευταία είκοσι χρόνια και περιγράφεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης κάνοντας αναφορά στις βασικές μαθηματικές εξισώσεις που το διέπουν. Έπειτα, αναλύονται τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης χρησιμοποιώντας περιβαλλοντικά, υδρογεωλογικά και κλιματικά στοιχεία.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής, αναλύεται το μαθηματικό τους υπόβαθρο και παρουσιάζονται οι κύριες κατηγορίες τους. Ένα από αυτά τα μοντέλα προσομοίωσης είναι το μοντέλο PTC το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία σαν Plug-In Extension του προγράμματος ArgusOne. Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινά με την συλλογή και ψηφιοποίηση γεωγραφικών και υδρογεωλογικών δεδομένων και το χρονικό διάστημα της ορίζεται στα 10 χρόνια.

Για την εφαρμογή της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Simplex μέσω του προγράμματος Matlab στην οποία διαταράσσεται ο ρυθμός άντλησης σε δέκα γεωτρήσεις της περιοχής έτσι ώστε το υδραυλικό ύψος σε εννέα υποθετικά πηγάδια παρατήρησης να μην ξεπερνά ένα μέγιστο όριο. Για να εφαρμοστεί η μέθοδος πρέπει να προσδιοριστούν οι περιορισμοί του προβλήματος και να κατασκευαστεί ο πίνακας απόκρισης A και το διάνυσμα b. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνουν τα αποτελέσματα.

Έπειτα από έξι επαναλήψεις, ο αλγόριθμος φάνηκε να συγκλίνει με την ζώνη της υφαλμύρισης να υποχωρεί και ταυτόχρονα εξάγονται διάφορα συμπεράσματα για τα αποτελέσματα της μεθόδου Simplex.

ABSTRACT

The present dissertation is completed in the framework of the undergraduate studies program in the department of Chemical and Environmental Engineering of the Technical University of Crete and aims to limit the phenomenon of salinization in the wider area of the Kourtalioti hydrogeological basin by optimizing pumping rates of wells in the area.

First, some general information about groundwater and the pressures it has received over the last twenty years is presented and the salinization phenomenon is described with reference to the basic mathematical equations that govern it. Then, the characteristics of the study area are analyzed using environmental, hydrogeological and climatic data.

Afterwards, groundwater simulation models are introduced, their mathematical background is analyzed and their main categories are presented. One of these simulation models is the PTC model that is used in the present work as a Plug-In Extension of the ArgusOne program. The simulation process begins with the collection and digitization of geographical and hydrogeological data and its time period is set at 10 years.

For the implementation of the optimization process, the Simplex method was used through the Matlab program in which the pumping rate is disturbed in ten pumping wells of the area so that the hydraulic height in nine hypothetical observation wells does not exceed a maximum limit. In order to apply the method, the constraints of the problem must be identified and the response table A and the vector b are constructed. The process is repeated until the results converge.

After six iterations, the algorithm appeared to converge with the salinization band receding and at the same time various conclusions were drawn about the results of the Simplex method.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή και υδρολογικός κύκλος

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι το νερό είναι από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους του πλανήτη τόσο για τους ανθρώπους όσο και για τα υπόλοιπα έμβια όντα. Όμως, τα αποθέματα του είναι πεπερασμένα και μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτά είναι αξιοποιήσιμα από τον άνθρωπο. Η Γη σαν κλειστό σύστημα, δεν μπορεί να παράγει νέο νερό ούτε να εξαφανίσει το ήδη υπάρχον οπότε όλο το νερό που υπάρχει τώρα στον πλανήτη υπήρχε και δισεκατομμύρια χρόνια πριν και ανακυκλώνεται συνεχώς μέσω του υδρολογικού κύκλου. Αυτό που αλλάζει όμως, με τα χρόνια, είναι το που αποθηκεύεται αυτό το νερό και σε ποια μορφή βρίσκεται.

Ο υδρολογικός κύκλος κινείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ο ήλιος, θερμαίνοντας τους ωκεανούς και τα υπόλοιπα επιφανειακά νερά προκαλεί την εξάτμιση μέρους του νερού τους το οποίο καταλήγει με την μορφή ατμού στην ατμόσφαιρα. Ακόμη, η διαπνοή των φυτών καθώς και η εξάτμιση νερού που περιέχεται στο έδαφος συνεισφέρουν στην συλλογή των υδρατμών αυτών. Τέλος, μια μικρή ποσότητα υδρατμών στον αέρα προέρχεται από την εξάχνωση των πάγων. Έπειτα, οι υδρατμοί αυτοί μεταφέρονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και συμπυκνώνονται σε σύννεφα που με την σειρά τους, όταν κορεστούν επαρκώς, ελευθερώνουν το νερό με την μορφή κατακρημνισμάτων. Η πιο συχνή μορφή κατακρημνίσματος είναι η βροχή και το μεγαλύτερο ποσοστό της καταλήγει απευθείας πίσω στους ωκεανούς. Η υπόλοιπη που καταλήγει στην στεριά είτε, μέσω της επιφανειακής απορροής, καταλήγει και αυτή πίσω στον ωκεανό και σε άλλα επιφανειακά σώματα νερού είτε διαπερνά το έδαφος και εμπλουτίζει τα υπόγεια ύδατα. Από τα υπόγεια ύδατα το νερό μπορεί να καταλήξει και πάλι στα επιφανειακά υδάτινα σώματα μέσω της εκφόρτισης, είτε να αποθηκευτεί σε υπόγειους υδροφορείς, και έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος αυτός.



Εικόνα 1.1 - Υδρολογικός κύκλος, USGS

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της κλιματικής αλλαγής και της σταθερής αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, έχει αυξηθεί ραγδαία και ο ρυθμός με τον οποίο εξατμίζεται το θαλασσινό νερό. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στην αύξηση των κατακρημνίσεων, που είναι όμως άνισα κατανεμημένες στον κόσμο. Περιβαλλοντικά μοντέλα προβλέπουν πως οι υδρατμοί που συλλέγονται στα σύννεφα πιο συχνά θα απελευθερώνονται σε ωκεανούς και ότι στις παράκτιες περιοχές θα επικρατεί πολυομβρία ενώ στα μέσα των ηπείρων θα επικρατεί ξηρασία. Παράλληλα, όσο μειώνονται οι βροχοπτώσεις και εντείνονται τα ακραία καιρικά φαινόμενα σε συνδυασμό με την υποβάθμιση του εδάφους, τροποποιείται σε μεγάλο βαθμό ο τρόπος με τον οποίο εμπλουτίζονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Αυξάνεται η επιφανειακή απορροή με αποτέλεσμα το υπόγειο νερό και κατ' επέκταση τα ρέματα, να μην μπορούν να επαναφοριστούν επαρκώς. Τέλος, η κλιματική αλλαγή εντείνει και την επιδείνωση του φαινομένου της υφαλμύρισης καθώς όσο αυξάνεται συνεχώς η στάθμη της θάλασσας με το λιώσιμο των πάγων, τα υπόγεια ύδατα υποβαθμίζονται. ^[1]

1.2 Η σημασία των υπόγειων υδάτων

Η Γη αποτελείται από 70,9% νερό, ωστόσο μόνο το 2,8% είναι το πόσιμο. Από αυτό το 2,8% περίπου το 0,3% είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο από τον άνθρωπο, το υπόλοιπο πόσιμο νερό του πλανήτη βρίσκεται σε μορφή πάγου, υπάρχει στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών ή αποτελεί την υγρασία του εδάφους. Το μεγαλύτερο μέρος του πόσιμου νερού (98%) βρίσκεται κάτω από το έδαφος, αλλά η πλειονότητα αυτού βρίσκεται σε βάθη άνω των 800 μέτρων που καθιστά την άντληση του κοστοβόρα. ^[2]

Το υπόγειο νερό, το οποίο απασχολεί την παρούσα εργασία, είναι εκείνο το οποίο βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της γης και ρέει ή είναι αποθηκευμένο σε κάποιον γεωλογικό σχηματισμό. Η ροή αυτού του νερού γίνεται συνήθως μέσω πόρων που υπάρχουν σε διάφορα πετρώματα και στο χώμα ή μέσω ρηγμάτων και λοιπών ασυνεχειών του εδάφους. Πιο συχνά υπόγειο νερό απαντάται σε υπόγειους υδροφορείς οι οποίοι είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν ποσότητες διαπερατών υλικών, επιτρέποντας την διέλευση του νερού και ταυτόχρονα έχουν την δυνατότητα να τροφοδοτούν γεωτρήσεις. Οι υπόγειοι υδροφορείς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τους ελεύθερους και τους περιορισμένους. Οι ελεύθεροι υδροφορείς βρίσκονται συνήθως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους οπότε το υπόγειο νερό βρίσκεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα και τροφοδοτείται απευθείας από κατακρημνίσματα. Αυτή η άμεση επαφή με την επιφάνεια του εδάφους εν μέρει βοηθάει πολύ τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων, αλλά ταυτόχρονα τα καθιστά ευάλωτα σε ρύπανση που προέρχεται από το έδαφος. Από την άλλη, περιορισμένοι υδροφορείς χαρακτηρίζονται εκείνοι που περιορίζονται από κάποια γεωλογική δομή η οποία είναι πρακτικά αδιαπέρατη.^[3] Λόγω αυτής της περιοριστικής στρώσης το νερό σε έναν περιορισμένο υδροφορέα βρίσκεται υπό πίεση. Αν η πίεση είναι αρκετά υψηλή όταν ανοιχθεί μια γεώτρηση το νερό θα αναβλύζει από μόνο του πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Παράλληλα, οι περιορισμένοι υδροφορείς δεν είναι τόσο επιρρεπείς σε μόλυνσεις σε σχέση με τους ελεύθερους, λόγω αυτού του φυσικού φραγμού που είναι πρακτικά αδιαπέρατος και δεν επιτρέπει την επικοινωνία του νερού με υποκείμενες στρώσεις. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το νερό σε περιορισμένους υδροφορείς κινείται με σχετικά μικρές ταχύτητες.

Στην Ελλάδα, τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους για άρδευση, ακολουθεί η ύδρευση και λιγότερο συχνά γίνεται η χρήση τους στην βιομηχανία.^[4] Μερικά πλεονεκτήματα που έχει η χρήση υπογείων υδάτων αντί για επιφανειακά είναι τα ακόλουθα:

- Το υπόγειο νερό είναι λιγότερο επιρρεπές σε ξηρασία, ενώ το επιφανειακό νερό μπορεί εύκολα να εξαντληθεί.
- Τα υπόγεια ύδατα τείνουν να ρυπαίνονται λιγότερο γεγονός που καθιστά την εξυγίανση τους ευκολότερη και οικονομικότερη.
- Με την χρήση γεωτρήσεων, διευκολύνεται η μεταφορά του υπόγειου νερού εκεί ακριβώς που χρειάζεται, ενώ οι λίμνες και οι τοποθεσίες ποταμών είναι στάσιμες.
- Μια άλλη χρήση του υπόγειου νερού είναι σε γεωθερμικά συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αυτό το νερό για την παραγωγή ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.^[5]

Γίνεται λοιπόν σαφές ότι η ορθολογική διαχείριση και η προστασία των υπόγειων υδάτων είναι ύψιστης σημασίας, ειδικότερα σε περίοδο κρίσης νερού.

1.3 Πιέσεις που ασκούνται στα υπόγεια ύδατα και το φαινόμενο της υφαλμύρισης

Τα υπόγεια ύδατα υφίστανται πολλές πιέσεις που όλο και περισσότερο τα θέτουν σε κίνδυνο. Για την προστασία των υπόγειων υδατικών πόρων είναι αναγκαίο να εξεταστούν ποιες ελλείψεις υπάρχουν στην διαχείρισή τους, και τι προβλήματα μπορούν να προκαλέσουν αυτές οι ελλείψεις. Οι κυριότερες πιέσεις που ασκούνται είναι:

- Η αύξηση του πληθυσμού.
- Η μη-ορθολογική διαχείριση των υπογείων πόρων.
- Η ρύπανση και μόλυνση από ανθρώπινες δραστηριότητες.

Αναλυτικότερα, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, τα τελευταία 25 χρόνια οι ανάγκες για νερό στις μεσογειακές χώρες έχουν αυξηθεί κατά 60%. Η μεγαλύτερη ζήτηση νερού στην Ελλάδα παρατηρείται στα μεγάλα αστικά κέντρα με τους κάτοικους να καταναλώνουν περίπου 150-250 λίτρα την ημέρα. Η ζήτηση αυτή εξυπηρετείται τόσο από επιφανειακά νερά, όσο και από υπόγεια ύδατα. Με την όλο και αυξανόμενη ζήτηση, οι γεωτρήσεις που εξυπηρετούν την ύδρευση της χώρας δεν μπορούν πλέον να ανταπεξέλθουν. Ειδικότερα, από τα 236 υπόγεια υδροσυστήματα τα 110 κρίνονται ακατάλληλα για χρήση. Σε τουριστικές περιοχές, όπως στα νησιά του Αιγαίου, η ζήτηση κατά την τουριστική περίοδο υπολογίζεται ότι είναι περίπου 30 φορές μεγαλύτερη από την κανονική με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλά προβλήματα στην διαχείριση των υδατικών πόρων. Τους καλοκαιρινούς μήνες αυξάνεται τόσο η ανάγκη για ύδρευση όσο και η ανάγκη για άρδευση, όμως δίνεται προτεραιότητα στο πρώτο, και δημιουργούνται συγκρούσεις μεταξύ των αγροτών και των παρόχων νερού.

Όσον αφορά την μη ορθολογική διαχείριση αυτή μπορεί να οφείλεται στο δίκτυο ή στη χρήση ιδιωτών. Είναι γεγονός ότι τα υπόγεια ύδατα στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την άρδευση γεωργικών εκτάσεων, όμως, η έλλειψη εκπαίδευσης των αγροτών και τα παλαιά μηχανήματα που χρησιμοποιούν πολλές φορές έχουν σαν αποτέλεσμα το να σπαταλάται περισσότερο νερό από ότι χρειάζεται, και με αυτόν τον τρόπο εξαντλούνται οι υπόγειοι υδατικοί πόροι. Από το συνολικό νερό που

χρησιμοποιείται για την άρδευση, μόλις το 55% καταλήγει στις καλλιέργειες διότι ένα ποσοστό χάνεται στην μεταφορά του (12-50%), 8% χάνεται κατά την εφαρμογή του στο έδαφος και ένα 25% χάνεται λόγω υπεράρδευσης. Με τον όρο υπεράρδευση περιγράφεται το φαινόμενο στο οποίο το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο και άρα δεν μπορεί να δεχτεί άλλο νερό στους πόρους του. Οι περισσότερες γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για την άρδευση είναι ιδιωτικές, και υπάρχουν και πολλές οι οποίες είναι παράνομες. Συνολικά στην Ελλάδα, υπάρχουν πάνω από 200.000 γεωτρήσεις με σκοπό την άρδευση γεωργικών εκτάσεων. Παράλληλα, οι αγρότες για να ποτίσουν την γη τους χρησιμοποιούν κυρίως συστήματα ποτίσματος που εκτοξεύουν νερό τα όποια αποδίδουν 60-70%, άρα ένα ποσοστό της τάξης 30-40% χάνεται και για αυτόν τον λόγο. Τέλος, σημαντικό γεγονός είναι ότι όλο και συχνότερα χρησιμοποιείται νερό από μη-ανανεώσιμα υπόγεια νερά για το πότισμα εκτάσεων με αποτέλεσμα η άρδευση να πραγματοποιείται με μια μη βιώσιμη πηγή νερού. ^[2]Αναφορικά με το δίκτυο ύδρευσης, η Ελλάδα μέσω της Κ.Υ.Α. Δ11/Φ16/8500/22-3-1991 (Φ.Ε.Κ. 174/τ. Β/22-3-1991) ορίζει ανώτατα ποσοστά απωλειών νερού ανάλογα με την ηλικία του δικτύου. Για δίκτυα ηλικίας μέχρι 35 ετών υπολογίζονται απώλειες μέχρι και 20%, ενώ για παλαιότερα δίκτυα το ποσοστό μπορεί να ανέλθει στο 40%.^[6]

Τέλος, οι κύριοι λόγοι για τους οποίους υποβαθμίζεται η ποιότητα των υπογείων υδάτων είναι η υπαλμύριση και η ρύπανση από νιτρικά. Με την υπέρμετρη χρήση λιπασμάτων καταλήγουν μεγάλοι όγκοι στα υπόγεια ύδατα και συνεπώς τα ρυπαίνουν. Επιπρόσθετα, άλλες πηγές ρύπανσης με νιτρικά άλατα συμβαίνουν από διαρροές σηπτικών δεξαμενών σε αστικές περιοχές.^[7] Το φαινόμενο της υπαλμύρισης παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο υποκεφάλαιο.

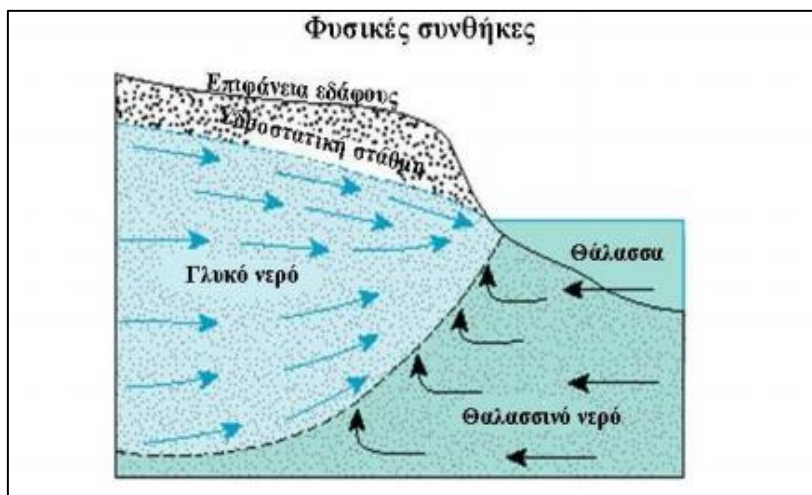
1.3.1 Το φαινόμενο της υπαλμύρισης

Περισσότερο από 60% του παγκόσμιου πληθυσμού μένει σε απόσταση μικρότερη των 60 χιλιομέτρων από κάποια ακτή. Ειδικότερα στην Ελλάδα, που έχει την μεγαλύτερη ακτογραμμή στην Ευρώπη, η προστασία των παράκτιων ζωνών είναι ύψιστης σημασίας δεδομένου ότι οι πιέσεις που υφίστανται οι υπόγειοι υδροφορείς τους μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα που επηρεάζουν τόσο κοινωνικούς όσο και οικονομικούς τομείς. Ένα από αυτά τα προβλήματα είναι το φαινόμενο της υπαλμύρισης το οποίο περιγράφει την διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς με αποτέλεσμα να ρυπαίνεται το γλυκό νερό που περιέχουν. Οι επιπτώσεις αυτής της μορφής ρύπανσης είναι πολύ μεγάλες, δεδομένου ότι σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας αρκεί ένα ποσοστό 2% κατ' όγκο ποσότητας θαλασσινού νερού για να αποκτήσει το νερό αλμυρή γεύση και 4% για να θεωρηθεί ακαταρτίστο για κάθε μορφή χρήσης.

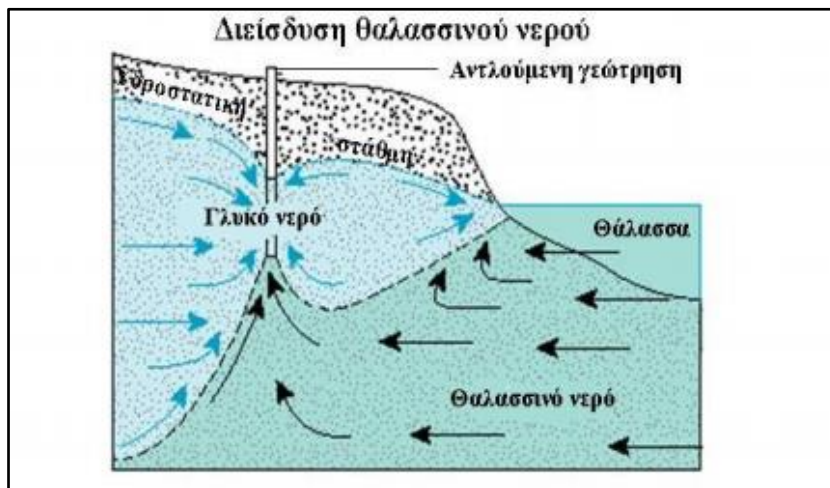
Σε παράκτιες ζώνες τα υπόγεια ύδατα και το θαλασσινό νερό βρίσκονται σε άμεση αλληλεπίδραση αλλά όμως δεν αναμιγνύονται λόγω του διαφορετικού ειδικού βάρους που έχουν (γλυκό νερό $\rho=1,000\text{gr/cm}^3$, θαλασσινό νερό $\rho=1,025\text{gr/cm}^3$). Λόγω αυτής της υδραυλικής σύνδεσης η διείσδυση θαλασσινού νερού μπορεί να συμβεί και φυσικά όταν το θαλασσινό νερό επειδή είναι πυκνότερο και έχει μεγαλύτερη πίεση από το γλυκό νερό αναγκάζει το δεύτερο να υποχωρήσει.^[8] Από την άλλη, πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες, ιδίως η υπεράντληση υπόγειων υδροφορέων, επίσης συμβάλλουν στην διείσδυση θαλασσινού νερού. Όσο αντλείται νερό από γεωτρήσεις, τόσο μειώνεται το επίπεδο του γλυκού νερού στους υπόγειους υδροφορείς, με την πτώση αυτή να επιτρέπει την εισροή του αλατόνερου. Παράλληλα, η άνοδος της

στάθμης του επιπέδου της θάλασσας λόγω της κλιματικής αλλαγής και του λιώσιματος των πάγων μπορεί να οδηγήσει στο φαινόμενο αυτό.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.2) φαίνονται οι φυσικές συνθήκες με την ζώνη που δημιουργείται ανάμεσα στο γλυκό και το θαλασσινό νερό να βρίσκεται σε μια ισορροπία. Αντιθέτως, στην Εικόνα 1.3 φαίνεται η επιρροή που έχει μια αντλούμενη γεώτρηση στον μηχανισμό της υφαλμύρισης. Γίνεται αντιληπτό ότι το μέτωπο της υφαλμύρισης μετατοπίζεται προς το γλυκό νερό, και με υπέρμετρη άντληση πλέον το νερό που εξέρχεται από την γεώτρηση είναι υφάλμυρο.



Εικόνα 1.2 - Μηχανισμός της υφαλμύρισης - Φυσικές Συνθήκες [9]



Εικόνα 1.3 Φαινόμενο της υφαλμύρισης - Αντλούμενη γεώτρηση [9]

1.3.1.i Υφαλμύριση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, το φαινόμενο της υφαλμύρισης παρατηρείται σε σχεδόν κάθε παράκτια περιοχή. Εκτιμάται ότι η συνολική έκταση των υδροφορέων που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο αυτό είναι περίπου 1500 km². Οι θαλάσσιες διεισδύσεις μπορεί να συμβαίνουν είτε λόγω υπερεκμετάλλευσης των υπογείων πόρων είτε από φυσικά αίτια



Εικόνα 1.4 – Υφαλμύριση στην Ελλάδα [9]

λόγω της γεωλογικής δομής της περιοχής. Οι περιοχές της Ελλάδας που επηρεάζονται περισσότερο από το φαινόμενο αυτό είναι περιοχές στις οποίες υπάρχουν εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας τους θερινούς μήνες. Πιο συγκεκριμένα, τα νησιά του Ιονίου και οι παράκτιες ζώνες της δυτικής Ελλάδας καθώς και το νότιο-ανατολικό κομμάτι του Αιγαίου μαζί με ένα κομμάτι της Θεσσαλίας είναι περιοχές που είναι έντονη η διείσδυση αλατόνερου στους υπόγειους υδροφορείς.

Συγκεκριμένα για την Κρήτη, μια καταπονημένη περιοχή είναι η Χερσόνησος κοντά στην πόλη του Ηρακλείου. Σε αυτή την περιοχή, η θάλασσα έχει διεισδύσει τουλάχιστον 2 χιλιόμετρα στο εσωτερικό, με αποτέλεσμα όλες οι γεωτρήσεις της περιοχής να έχουν ρυπανθεί. [9]

1.3.1.ii Μηχανισμός της υφαλμύρισης

Τον μηχανισμό της υφαλμύρισης δοκίμασαν να ερμηνεύσουν πρώτοι οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901). Με την έρευνα τους ανακάλυψαν ότι για κάθε μέτρο γλυκού νερού που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, υπάρχουν σαράντα μέτρα νερού στον υδροφορέα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Ακολουθεί η μαθηματική ερμηνεία του μηχανισμού αυτού:

Το πιεζομετρικό ύψος στην ζώνη του αλμυρού και του γλυκού νερού αντίστοιχα ορίζονται ως εξής:

$$h_{\alpha} = \frac{p}{\rho_{\alpha}g} + z$$

$$h_{\gamma} = \frac{p}{\rho_{\gamma}g} + z$$

Όπου p είναι η πίεση των πόρων, ρ_α και ρ_γ είναι οι πυκνότητες του θαλασσινού και του γλυκού νερού και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Επειδή η πίεση είναι η σταθερή ανάμεσα στο αλμυρό και γλυκό νερό, μπορεί να απλουστευτούν οι παραπάνω εξισώσεις με την παράλειψη της πίεσης από τον κάθε όρο, ως εξής:

$$\rho_\gamma h_\gamma = \rho_\alpha h_\alpha + (\rho_\alpha - \rho_\gamma) \xi$$

Με τον όρο ξ να αντιπροσωπεύει το βάθος του γλυκού νερού από τη μέση στάθμη της θάλασσας.

Με την υπόθεση ότι τα πιεζομετρικά ύψη δεν αλλάζουν κατά την κάθετη διεύθυνση και ότι η πίεση του θαλασσινού νερού ισούται με την υδροστατική, οι Ghyben-Hertzberg αποφαινόνται ότι μπορούν να απλουστευτούν και οι όροι h_γ και h_α με αποτέλεσμα η εξίσωση να παίρνει την τελική της μορφή:

$$\xi = \frac{\rho_\gamma}{\rho_\alpha - \rho_\gamma} h_\alpha \approx 40h_\alpha$$

Η εξίσωση των Ghyben-Hertzberg είναι ιδιαίτερα απλουστευμένη, αλλά μπορεί να εκτιμήσει σε ικανοποιητικό βαθμό τη μέση στάθμη της θάλασσας γνωρίζοντας μόνο το βάθος ξ του γλυκού νερού που περιέχεται στην γεώτρηση. [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

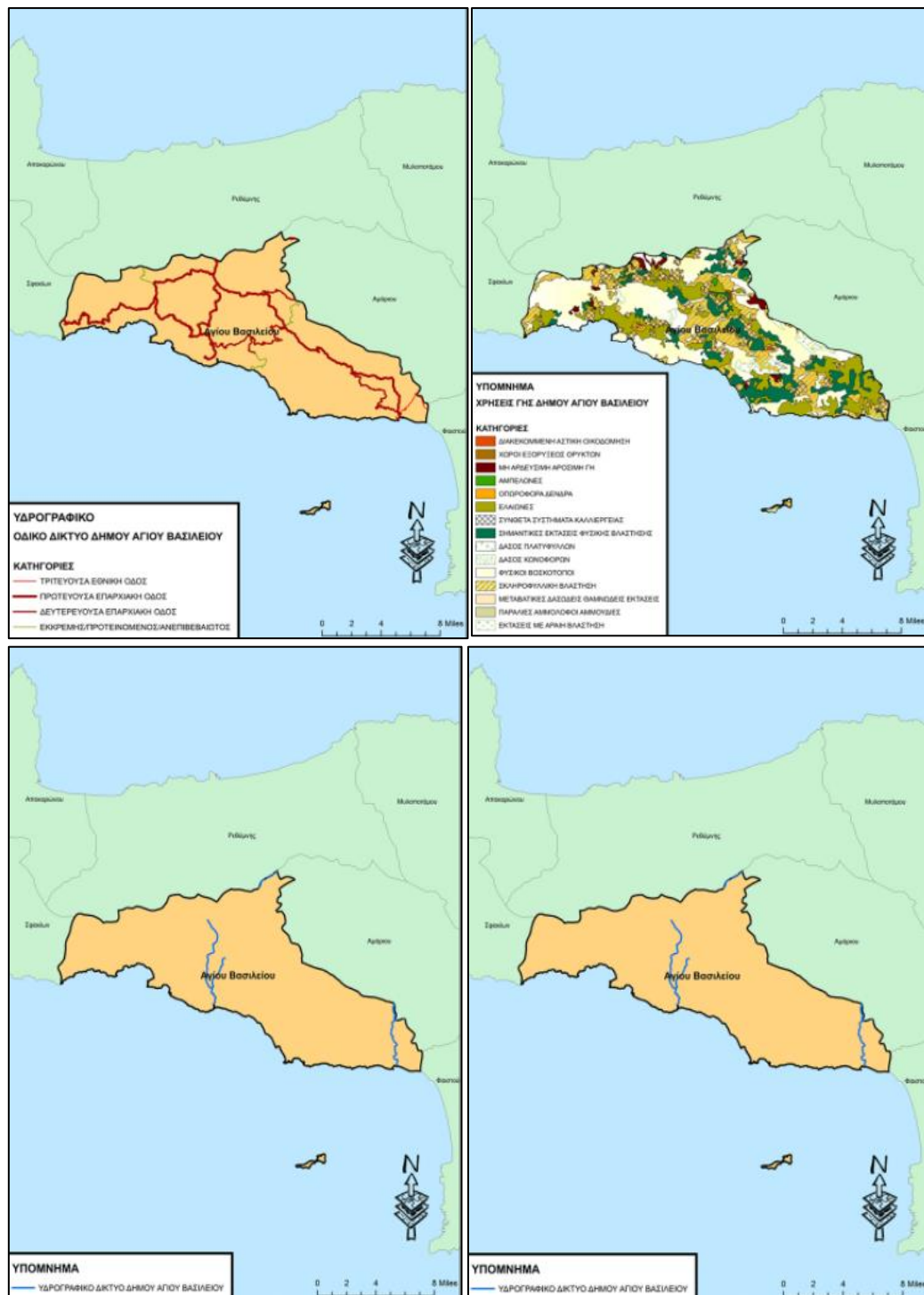
Η περιοχή μελέτης υπάγεται στον Δήμο Αγίου Βασιλείου του νομού Ρεθύμνου και καταλαμβάνει συνολικά περίπου 174.000 στρέμματα από τα 220.154 του Δήμου και βρίσκεται νότιο-κεντρικά της Κρήτης. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011, ο μόνιμος πληθυσμός του Δήμου είναι 7.440 κάτοικοι. Από τα Βόρεια συνορεύει με τον Δήμο Ρεθύμνου, Ανατολικά με τους Δήμους Αμαρίου και Φαιστού, Δυτικά με τον Δήμο Σφακίων ενώ Νότια βρέχεται από το Λιβυκό Πέλαγος. Οι σημαντικότεροι οικισμοί που περιέχονται στην υπό μελέτη περιοχή είναι οι: Σπήλι, Ατσιπάδες, Κοζαρέ, Λαμπινή, Μουρνέ, Μυζόρρουμα, Ακτούντα και Κεραμές.

Το ανάγλυφο της περιοχής είναι ιδιαίτερο καθώς περιλαμβάνει παραθαλάσσιες, πεδινές, ημιορεινές και ορεινές ζώνες. Σε ποσοστά, οι υψομετρικές ζώνες χωρίζονται, ως εξής: Η πεδινή ζώνη των 0-200 μέτρων καταλαμβάνει το 19,9% του Δήμου, η ημιορεινή ζώνη των 200-600 μέτρων το 54,3%, και η ορεινή ζώνη με υψόμετρα άνω των 600 μέτρων καταλαμβάνει ένα 25,9%. Το υψηλότερο σημείο της περιοχής είναι η κορυφή του όρους Κέδρου που βρίσκεται στα 1.635 μέτρα. Οι πεδινές εκτάσεις καλύπτονται κατά 45,3% από αγροτικές καλλιέργειες οι οποίες κυρίως είναι ελαιώνες, σύμφωνα με τον χάρτη χρήσεων γης του δήμου (Εικόνα 2.2). Όσον αφορά την παραθαλάσσια ζώνη, η ακτογραμμή του Δήμου Αγίου Βασιλείου έχει συνολικό μήκος 55 χιλιόμετρα. [11]

Αξίζει να αναφερθεί ότι η έκταση της περιοχής μελέτης επιλέχθηκε με στόχο να περιλαμβάνει όσες περισσότερες γεωτρήσεις γίνεται στην ευρύτερη περιοχή της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη.



Εικόνα 2.1 – Έκταση περιοχής μελέτης, Google Earth



Εικόνα 2.2 – Χάρτες χρήσεων γης του Δήμου Αγίου Βασιλείου, Διοίκηση 7^{ης} ΥΠΕ Κρήτης

2.2 Χλωρίδα και Πανίδα

2.2.1 Χλωρίδα

Στην Κρήτη υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ενδημικών φυτών, λόγω της ιδιαίτερης γεωγραφικής διαμόρφωσης του νησιού και χάρη στην απομόνωση που προσέφερε ανέκαθεν η θάλασσα. Από τα 2000 είδη φυτών που παρατηρούνται στο νησί, εκτιμάται ότι τα 160 είναι ενδημικά. Ειδικότερα στην περιοχή του Ρεθύμνου, έχουν αναγνωριστεί 18 τοπικά ενδημικά είδη βλάστησης και 6 Ελληνικά ενδημικά. Παράλληλα, ανάλογα με το υψόμετρο και το κλίμα της περιοχής αναπτύσσονται διαφορετικά και ιδιαίτερα είδη φυτών. Πιο συγκεκριμένα, στην ορεινή ζώνη, μπορεί κάποιος να συναντήσει το Κρητικό Σφεντάμι (*Acer sempervirens*), αγριολούλουδα όπως οι κίτρινες βιολέτες (*Erysimum creticum*), η τουλίπα (*Tulipa cretica*), η κρητική αγριαψιθιά (*Achillea cretica*), οι αγριομενεξέδες (*Viola cretica*) και ο κρίκος (*Crocus Oreocreticus*). Στην ημιορεινή ζώνη απαντώνται πολλά είδη θάμνων όπως το σχίνο (*Pistacia lentiscus*), το θυμάρι (*Thymus capitatus*), ο αγγάραθος (*Phlomis cretica*) και ορισμένα αγριολούλουδα όπως το κρητικό κυκλάμινο (*Cyclamen creticum*), η ιριδα (*Iris cretica*) και η δρακοντιά (*Dracungulus*), καθώς και δέντρα όπως η χαρουπιά (*Ceratonia siliqua*) και η βελανιδιά (*Quercus*). Στην πεδινή ζώνη, βλαστούν πολλά είδη θάμνων και φρυγάνων όπως το Χαμομήλι (*Chamomilla recutita*), η Μέντα (*Mentha spicata*), η Μυρτιά (*Myrtus communis*), τα Ρείκια (*Erica*), και η Λαδανιά (*Cistus incanus-creticus*). Τέλος στην παραθαλάσσια ζώνη, υπάρχουν φυτά τα οποία ευνοούνται από την υγρασία και τη θαλασσινή αλμύρα, όπως το κρινάκι της θάλασσας (*Pancratium maritimum*) και τα αρμυρίκια (*Tamarix cretica*) και το σπάνιο είδος φοίνικα (*Phoenix theophrastii*).^[12]

Δυστυχώς, λόγω της ανάγκης για γεωργικές καλλιέργειες στις πεδινές ζώνες και της εγκατάστασης θερμοκηπίων στις παραθαλάσσιες ζώνες, η βλάστηση έχει περιοριστεί σημαντικά σε σχέση με παλαιότερα έτη και πολλά είδη φυτών είναι υπό εξαφάνιση.

2.2.2 Πανίδα

Όπως και στην χλωρίδα, έτσι και στην πανίδα οι κλιματολογικές συνθήκες και η γεωγραφία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την εξέλιξη των ειδών. Στην Κρήτη έχει εκτιμηθεί ότι τα ενδημικά είδη πανίδας είναι περίπου 1.000 με την πλειοψηφία αυτών να είναι ασπόνδυλα, καθώς οι συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη αρθροπόδων, εντόμων και αραχνοειδών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι πάνω από το 40% των αραχνών του νησιού είναι ενδημικές και δεν συναντώνται πουθενά αλλού στον κόσμο. Παράλληλα, στην Κρήτη βρίσκεται και το μοναδικό ενδημικό θηλαστικό είδος της Ελλάδας, η μυγαλή της Κρήτης. Ευρύτερα της περιοχής μελέτης σε ορεινές και ημιορεινές ζώνες απαντάται πλήθος αρπακτικών και μη πουλιών όπως ο γυπαετός (*Gypaetus barbatus*), ο χρυσαετός (*Aquila chrysaetos*) τα κοράκια (*Corvus corax*) και τα κοτσίφια (*Turdus merula*), καθώς και ο κρητικός αίγαγρος (*Capra aegagrus cretica*) και ο κρητικός αγριόγατος (*Felis silvestris*). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο γυπαετός είναι απειλούμενο είδος και στην Κρήτη έχει τον μοναδικό αναπαραγόμενο πληθυσμό σε όλα τα Βαλκάνια. Σε πεδινές ζώνες εμφανίζονται 9 είδη θηλαστικών τα οποία είναι ευρέως εξαπλωμένα σε όλο το νησί. Τα είδη αυτά είναι: ο σκαντζόχοιρος (*Erinaceus concolor ssp nesiotus*), η κηπομυγαλίδα (*Crocidura suaveolens*), ο ασβός (*Meles meles ssp arcalus*), το κουνάβι (*Martes foina ssp bunitus*), η ζουρίδα (*Mustela*

nivalis ssp galinthias), ο λαγός (*Lepus europaeus*), ο τρανορινολόφος (*Rhinolophus ferrumequinum*) και ο μικρορινολόφος (*Rhinolophus hiposideros*).

Τέλος, συναντώνται και αρκετά είδη αμφιβίων, ερπετών και λεπιδόπτερων με τα κυριότερα είδη να είναι ο πρασινοφρύνος (*Bufo viridis*), δένδροβάτραχος (*Hyla arborea*), αιγαιόσαυρα (*Podarcis erhardii*) και τα λεπιδόπτερα *Zerynthia cretica* και *Hipparchia cretica*.^[12]

2.2.3 Προστατευόμενες περιοχές – Περιοχές NATURA

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος ως περιοχές NATURA ορίζονται περιοχές οι οποίες είναι διεθνούς σημασίας ή/και ελληνικού ενδιαφέροντος που χρειάζονται προστασία και διατήρηση. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως σημεία προστασίας της βιοποικιλότητας και χωρίζονται σε ειδικές ζώνες σύμφωνα με τον Εθνικό Κατάλογο Περιοχών του Ευρωπαϊκού Δικτύου Natura 2000. Το δίκτυο Natura αποτελείται από δύο κατηγορίες περιοχών:

- Τις Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ) όπως ορίζεται από την Οδηγία 79/409/ΕΚ για την προστασία της άγριας ορνιθοπανίδας.
- Τους Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) όπως ορίζεται από την Οδηγία 92/43/ΕΟΚ για την προστασία των οικοτόπων, της χλωρίδας και της πανίδας, εξαιρουμένης της άγριας ορνιθοπανίδας.^[13]

Στην Κρήτη, το δίκτυο NATURA καλύπτει σχεδόν το 30% της χερσαίας έκτασης του νησιού και συνολικά περιλαμβάνει 54 περιοχές από τις οποίες: οι 25 είναι χαρακτηρισμένες ως Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ), οι 28 ως Τόποι Κοινοτικής Σημασίας – Ειδικές Ζώνες Διατήρησης (ΤΚΣ-ΕΖΔ), και μια περιοχή η οποία ανήκει και στις δύο παραπάνω κατηγορίες.

Όσον αφορά την περιοχή μελέτης, περιλαμβάνει τέσσερις προστατευόμενες περιοχές: δύο Ειδικές Ζώνες Διατήρησης και δύο Ζώνες Ειδικής Προστασίας. Πιο συγκεκριμένα για την κάθε ζώνη ξεχωριστά:

- **GR4330007 - ΖΕΠ**

Κουρταλιώτικο φαράγγι - Φαράγγι του Πρέβελη.

Το Κουρταλιώτικο φαράγγι και το φαράγγι του Πρέβελη απαρτίζονται από ασβεστολιθικές εκτάσεις και στις κοίτες των ποταμιών τους ευδοκιμεί βλάστηση με λυγαριές, πικροδάφνες, χαρουπιές, και το προστατευόμενο είδος φοίνικα του Θεόφραστου που είναι ενδημικό της περιοχής. Το ανάγλυφο των φαραγγιών επιτρέπει στα μεγάλα αρπακτικά πουλιά της περιοχής να φωλιάσουν, με αποτέλεσμα να φιλοξενούν πολλά είδη πτηνών όπως το προστατευόμενο είδος του γυπαετού, το όρνιο και ο σπιζαετός. Η συνολική έκταση της περιοχής ανέρχεται στα 7.595 εκτάρια.

- **GR4330003 - ΕΖΔ**

Κουρταλιώτικο φαράγγι - Μονή Πρέβελη - Ευρύτερη Περιοχή

Στο Κουρταλιώτικο φαράγγι, συμπεριλαμβανόμενης και της ευρύτερης περιοχής έκτασης 3.643 εκταρίων, συναντώνται σε μεγάλο ποσοστό βραχώδεις εκτάσεις που ευνοούν την βλάστηση φρύγανων και χασμόφυτων.

Οι παραλιακοί βιότοποι της περιοχής φιλοξενούν είδη βλάστησης που είναι ανθεκτικά στην αλατότητα και στην άμμο, με το σημαντικότερο από αυτά να είναι ο φοίνικας του Θεόφραστου (*Phoenix theophrasti*), ένα από τα δύο ιθαγενή είδη φοίνικα στην Ευρώπη. Το φοινικόδασος της περιοχής είναι το δεύτερο μεγαλύτερο σε μέγεθος της Κρήτης. Στην περιοχή αυτή ασκούνται πιέσεις λόγω υπερβόσκησης, ποδοπατήματος, υπεράντλησης νερού για άρδευση, υπέρμετρου κυνήγιού. Έπειτα της μεγάλης πυρκαγιάς του 2012 το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας σε συνεργασία με την Αποκεντρωμένη Διοίκηση της Κρήτης δρομολόγησαν τη φυσική ανάπλαση της περιοχής.

- **GR4330006 – ΖΕΠ**

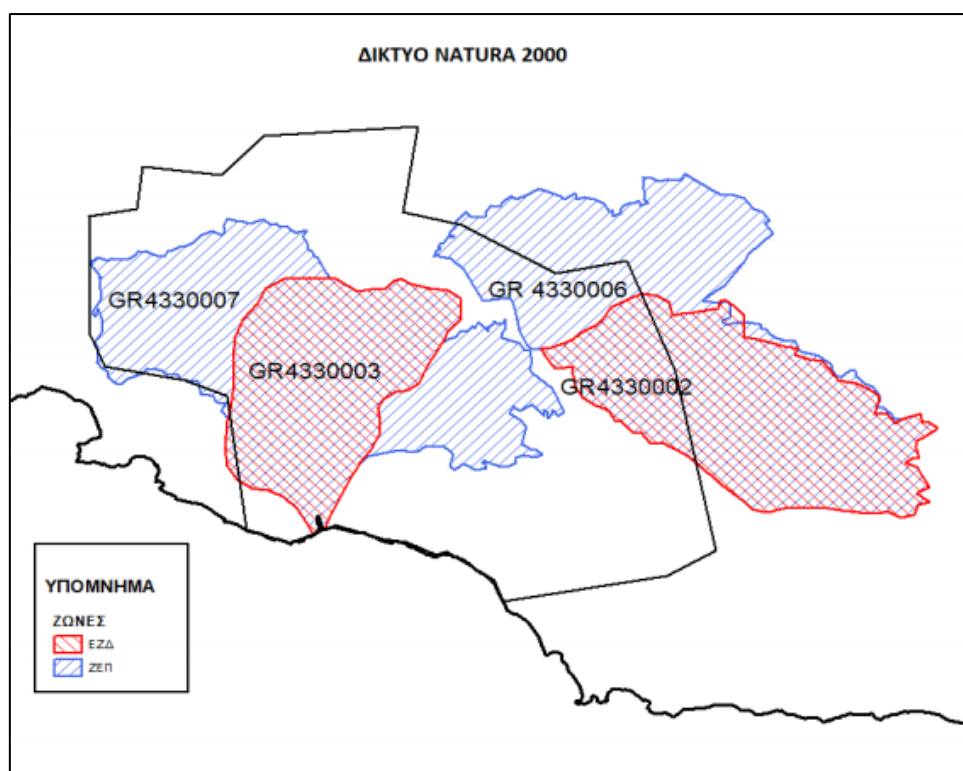
Σωρός – Αγκάθι – Κέδρος

Η περιοχή που περιλαμβάνει τα τρία αυτά βουνά, συνολικής έκτασης 8.129 εκταρίων, χαρακτηρίζεται από φαράγγια, ασβεστολιθικές κορυφές και απότομους γκρεμούς. Εκεί, επικρατούν ενδημικά ή σπάνια είδη χλωρίδας και πανίδας που ευδοκιμούν λόγω του γεωλογικού ανάγλυφου. Τέτοια είδη είναι ο γύπας, ο σπιζαετός και ο γυπαετός *Gypaetus barbatus* καθώς και αξιοσημείωτα είδη χλωρίδας όπως τα *Dianthus pulviniformis*, που είναι νομικά προστατευόμενο είδος, και το *Cerastium brachypetalum* ssp. *doerfleri*, που είναι ενδημικό του Κέδρου. Η περιοχή, στα χαμηλά υψόμετρα, περιλαμβάνει και μια ζώνη 15 μικρών χωριών, κυρίως κτηνοτροφικών.

- **GR4330002 – ΕΖΔ**

Όρος Κέδρος

Η περιοχή βρίσκεται στη νοτιοδυτική πλευρά του Ψηλορείτη και εκτείνεται στα 7.595 εκτάρια. Το όρος Κέδρος χαρακτηρίζεται από ασβεστολιθικά πετρώματα, φαράγγια και γυμνές βραχώδεις πλαγιές και περιτριγυρίζεται από μικρά χωριά. Στην περιοχή αυτή ευδοκιμούν φρύγανα και χαμηλοί θάμνοι καθώς και σπάνια είδη φυτών όπως τα *Dianthus juniperinus* subsp. *pulviniformis*, *Cerastium brachypetalum* subsp. *doerfleri*, η αμπελιτσιά και πολλά χασμόφυτα. Όσον αφορά την πανίδα, φιλοξενεί πολλά είδη αρπακτικών πουλιών, οκτώ είδη ερπετών, τρία είδη αμφιβίων καθώς και μεγάλο αριθμό ενδημικών σαλιγκαριών. Ανθρωπογενής δραστηριότητες όπως το κυνήγι, η υπερβόσκηση και οι πυρκαγιές θέτουν τον ορεινό όγκο σε κίνδυνο. [14]

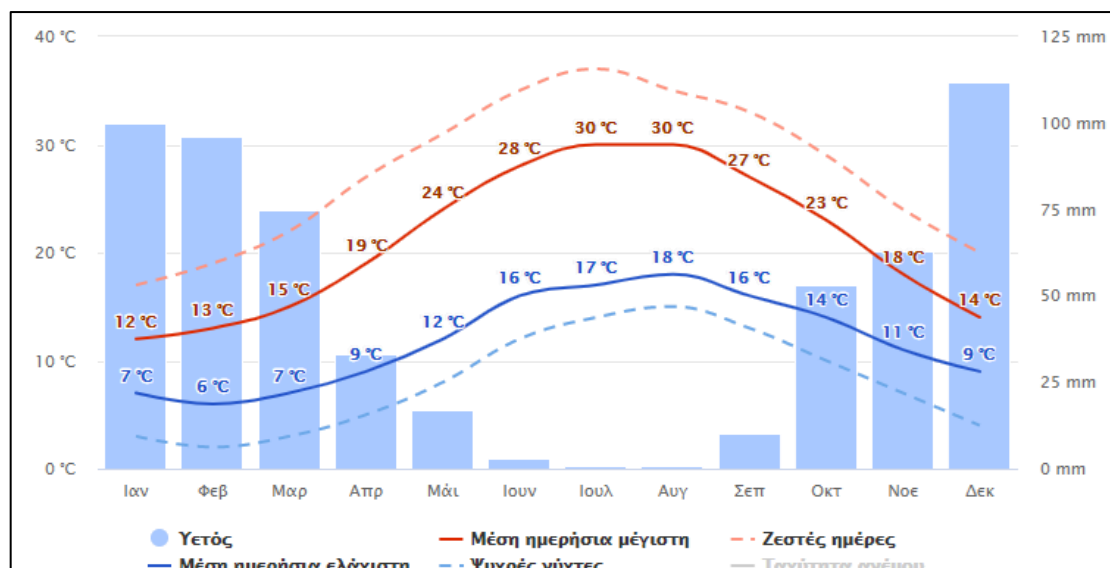


Εικόνα 2.3 – Προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 εντός της περιοχής μελέτης [18]

2.3 Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά

Το κλίμα της Ελλάδας και κατά προέκταση και της περιοχής μελέτης έχει τα χαρακτηριστικά του μεσογειακού κλίματος με ήπιους και βροχερούς χειμώνες, και θερμά καλοκαίρια με την θερμοκρασία να κυμαίνεται από 14°C έως 29°C το καλοκαίρι. Συγκεκριμένα στον νομό Ρεθύμνου, εξαιτίας του μεταβαλλόμενου εδαφικού ανάγλυφου, διαφοροποιείται αρκετά το κλίμα ανάλογα με το υψόμετρο. Σε παράκτιες περιοχές επικρατεί ήπιο κλίμα, με τις ζέστες του καλοκαιριού να μετριάζονται λόγω της θαλάσσης ενώ σε ορεινές περιοχές το κλίμα αποκτά χαρακτηριστικά του ηπειρωτικού κλίματος έναντι του μεσογειακού. Όσον αφορά την βροχόπτωση, λαμβάνει μέρος κυρίως κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου μέχρι και τον Απρίλη. Όπως και σε άλλα μέρη της Κρήτης, έτσι και στην περιοχή μελέτης τα κατακρημνίσματα είναι περισσότερα στα νότια παράλια.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται ο μέσος όρος βροχοπτώσεων και θερμοκρασιών στον οικισμό Σπήλι, την πρωτεύουσα του Δήμου Αγίου Βασιλείου. Τα δεδομένα βασίζονται σε 30 χρόνια ωριαίων προσομοιώσεων από καιρικό μοντέλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα παρακάτω είναι δεδομένα προσομοίωσης και όχι πραγματικά δεδομένα όμως προσομοιάζουν σε πολύ καλό βαθμό τις πραγματικές μετρήσεις.



Εικόνα 2.4 Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, meteoblue

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, το έτος χωρίζεται σε δύο περιόδους: Την ψυχρή και βροχερή περίοδο που αρχίζει τον Οκτώβρη και διαρκεί μέχρι τέλη Μαρτίου, και την θερμή και ξηρή περίοδο που αρχίζει τον Απρίλη και τελειώνει τον Οκτώβρη. Οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με ελάχιστη μέση θερμοκρασία 7°C και 6°C αντίστοιχα ενώ ο μήνας με την μεγαλύτερη βροχόπτωση είναι ο Δεκέμβρης με περίπου 110mm βροχής. Αντίθετα, η θερμότερη περίοδος παρατηρείται να εκτείνεται από αρχές Ιουλίου μέχρι τέλη Αυγούστου με μέση ημερήσια μέγιστη τιμή θερμοκρασίας στους 30°C. Τα πραγματικά βροχομετρικά δεδομένα καθώς και οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού στον οικισμό Σπήλι την περίοδο 2008-2018 παρουσιάζονται παρακάτω. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται από τον σταθμό που βρίσκεται στην οροφή του δημαρχείου Αγ. Βασιλείου στο Σπήλι, σε υψόμετρο 405m.

ΜΕΤΕΟ Μηνιαία Βροχόπτωση (mm) - Μετεωρολογικός Σταθμός Σπηλί Ρεθύμνου													
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Συνολικά
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	85.4	303.8	389.2
2008	83.6	240.4	29.8	70.8	23.6	0	0	7.2	43.6	123.6	75.2	176.4	874.2
2009	170.8	183.3	58.6	42.6	44.4	0	0	0	53.8	195.2	94.4	233.6	1076.7
2010	242	58.4	18	7	12.6	1.6	0	0	7	148.2	70.2	155.6	720.6
2011	163.6	248.2	95.6	66.2	80.9	0	0	0.8	13.6	169.2	168.4	229.4	1235.9
2012	397.4	35.4	0	56.2	0.2	0.0	0.0	0.2	11.2	45.4	84.0	240.0	870.0
2013	218.4	110.8	28.4	41.2	9.2	0.0	0.4	2.8	17.6	0.4	110.0	232.8	772.0
2014	124.0	93.8	119.8	56.6	4.6	1.2	0.0	0.0	97.2	131.0	43.6	253.2	925.0
2015	428.2	327.0	141.6	55.8	18.6	50.2	0.0	27.0	89.8	142.0	58.4	31.2	1369.8
2016	119.4	56.0	63.0	0.0	34.4	2.2	0.0	2.0	13.6	52.2	91.4	298.8	733.0
2017	186.2	59.4	111.2	10.0	89.8	6.4	1.2	0.6	16.0	21.0	75.0	150.6	727.4
2018	102.6	84.4	34.8	21.6	24.2	28.6	11.8	0.0	98.0	33.8	279.6	228.6	948.0

Πίνακας 2.1 – Μηνιαία βροχόπτωση, Σταθμός Σπήλι, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

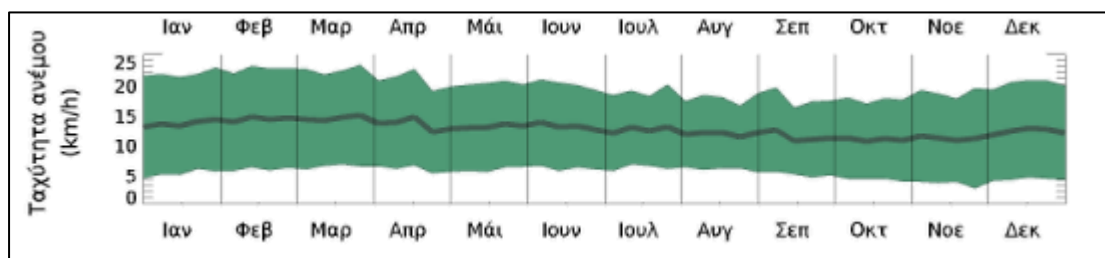
ΜΕΤΕΟ Ελάχιστη Θερμοκρασία °C - Μετεωρολογικός Σταθμός Σπηλί Ρεθύμνου												
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
2008	1.0	-1.2	5.1	5.1	9.8	13.8	18.1	17.4	12.9	10.5	8.4	3.6
2009	3.2	2.2	2.9	6.7	8.8	12.8	15.1	17.0	14.7	11.3	6.9	4.2
2010	1.7	3.0	3.7	7.6	9.0	14.3	16.7	17.8	15.2	9.3	7.4	0.8
2011	2.9	4.7	0.2	6.2	8.2	13.7	15.4	17.7	16.8	7.2	4.9	3.1
2012	1.9	2	-	6.9	10.9	12.1	18.4	17.8	15.5	12.4	9.6	5.7
2013	1.1	2.8	3.6	7.1	10.8	12.6	19.4	18.1	14.3	9.2	7.8	3.4
2014	5.7	4.0	-	5.3	8.4	12.8	16.0	18.2	14.1	10.2	7.9	5.0
2015	0.1	-0.7	2.6	4.8	10.1	12.8	17.5	18.3	15.7	12.0	8.7	1.6
2016	0.7	2.8	3.7	7.1	10.0	13.0	18.5	18.3	15.2	11.2	5.4	0.6
2017	-2.5	3.0	4.7	5.2	10.9	12.9	16.9	17.6	13.5	8.5	4.8	3.0
2018	2.7	4.3	5.2	6.0	11.7	14.7	15.4	17.6	13.9	7.7	7.4	4.1

Πίνακας 2.2 – Ετήσια ελάχιστη θερμοκρασία, Σταθμός Σπήλι, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

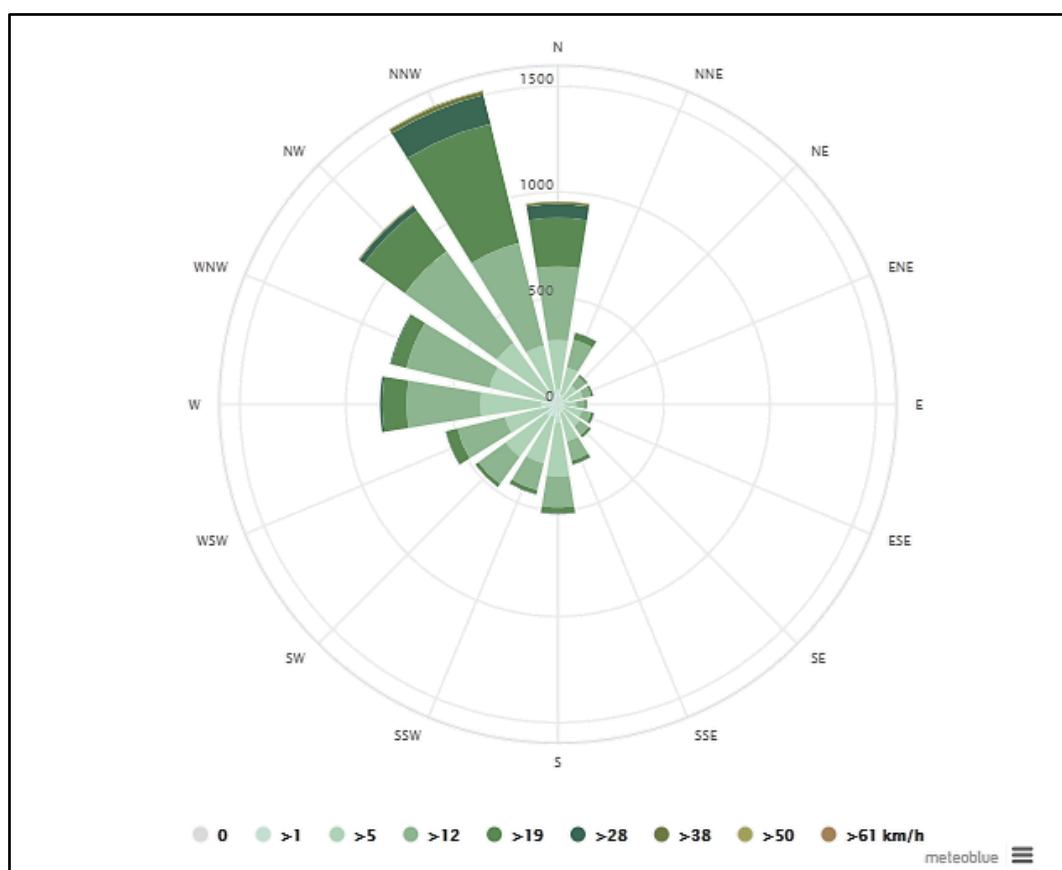
ΜΕΤΕΟ Μέγιστη Θερμοκρασία °C - Μετεωρολογικός Σταθμός Σπηλί Ρεθύμνου												
	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
2008	15.4	19.9	25.4	32.1	32.2	36.1	37.6	36.1	32.8	30.3	28.9	22.6
2009	18.2	20.2	26.3	25.3	28.4	33.0	38.5	34.1	32.6	26.0	21.1	23.3
2010	20.2	24.7	25.2	26.8	33.6	38.1	33.0	35.8	32.7	29.5	25.2	24.9
2011	16.3	17.9	23.4	23.7	25.9	33.4	36.8	34.1	31.3	25.6	21.6	17.4
2012	14.7	14.9	-	27.2	29.1	33.6	37.6	35.1	33.3	30.8	26.6	22.1
2013	17.3	18.8	25.2	27.1	32.6	34.7	33.1	35.8	36.0	30.1	22.9	21.1
2014	18.3	19.2	-	28.7	29.9	37.5	36.1	37.2	32.3	30.7	20.8	21.3
2015	20.4	17.9	19.9	27.0	30.4	33.8	35.9	33.1	36.6	27.6	21.3	18.6
2016	19.5	24.2	21.7	29.4	34.6	37.8	36.4	35.1	32.8	30.2	24.3	16.8
2017	14.3	18.1	21.8	25.9	33.1	39.4	39.0	33.2	37.9	25.6	21.6	19.4
2018	17.4	19.9	23.9	28.9	32.2	34.6	36.9	31.1	30.8	28.0	24.6	16.4

Πίνακας 2.3 – Ετήσια μέγιστη θερμοκρασία, Σταθμός Σπήλι, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

Όσον αφορά την ταχύτητα ανέμου, παρακάτω παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα ανά μήνα καθώς και το ανεμογράφημα της περιοχής. Από την Εικόνα 2.7 φαίνεται ότι στην περιοχή πνέουν κυρίως βόρειο βόρειο δυτικοί άνεμοι.



Εικόνα 2.5 – Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου στον οικισμό Σπήλι, meteoblue



Εικόνα 2.6 – Ανεμογράφημα της περιοχής, meteoblue

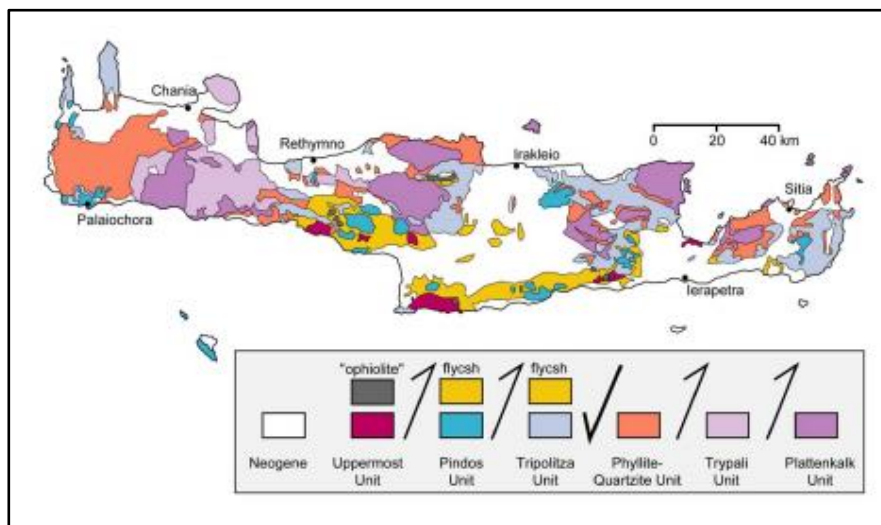
2.4 Γεωλογικά και Υδρογεωλογικά Χαρακτηριστικά

Η νήσος της Κρήτης είναι ευρέως γνωστή για τις γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες της. Σχηματίστηκε από τα υπολείμματα του ωκεανού της Τιθύος και είναι αποτέλεσμα της αλπικής ορογένεσης. Από το τέλος της Παλαιοζωικής περιόδου μέχρι και την αρχή της Νεογενούς βυθίστηκε και αναδύθηκε τρεις φορές και γενικότερα υπέστη πολλές αλλαγές όσον αφορά την γεωμορφολογία της. Αυτές οι συνεχείς εναλλαγές ξηράς και θαλάσσης καθώς και η διάβρωση, η ιζηματογένεση και οι φυσικοχημικές διεργασίες που έλαβαν χώρα, διαμόρφωσαν το σημερινό ανάγλυφο. [15]

Οι γεωλογικές ανακατατάξεις αυτές είναι υπεύθυνες και για την μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων που συναντώνται στην Κρήτη. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται στην Εικόνα 2.8, η περιοχή μελέτης έχει 7 κυριότερες τεκτονικές ενότητες. Αναλυτικότερα, οι ενότητες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω καταταγμένες από την παλαιότερη μέχρι την νεότερη:

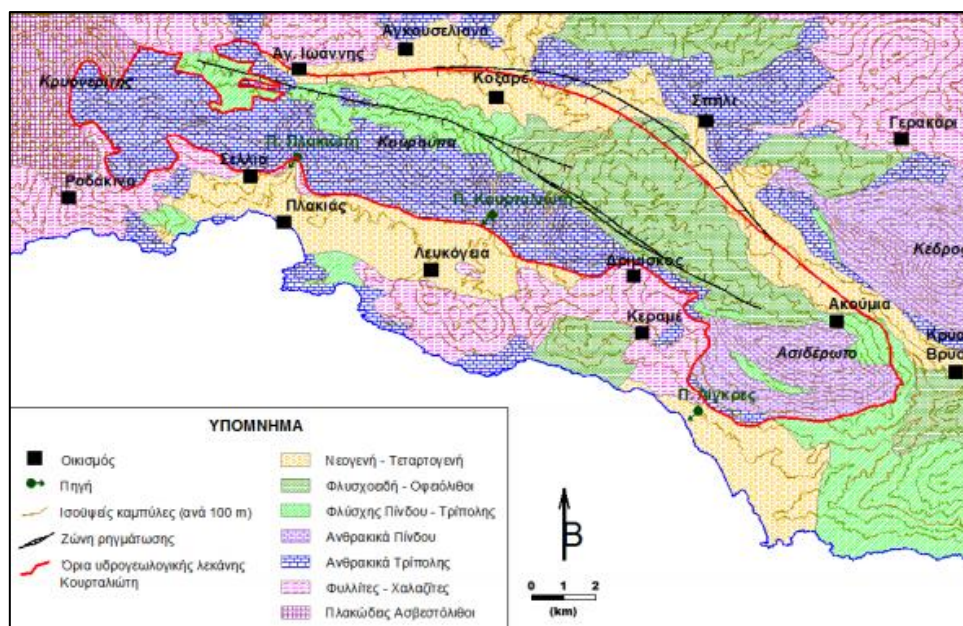
- **Ενότητα Κρήτης-Μάνης (Plattenkalk)**
Χαρακτηρίζεται κυρίως από πλακώδεις ασβεστόλιθους (Plattenkalk) με πυριτικές ενστρώσεις καθώς και άστρωτους ασβεστόλιθους, πελαγικούς και νητρικούς δολομίτες, και φυλλιτικές-χαλαζιτικές παρεμβολές. Η τεκτονική ενότητα αυτή είναι μεγάλης σημασίας για την Κρήτη, καθώς αποτελεί το υπόβαθρο του νησιού.
- **Ενότητα Τρυπαλίου**
Η ενότητα Τρυπαλίου περιλαμβάνει δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστόλιθους, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους καθώς και μάρμαρα νηρητικής φάσης και γύψους – ραουβάκες.
- **Ενότητα Φυλλιτών-Χαλαζιτών**
Η ενότητα αυτή βρίσκεται επωθημένη πάνω στην ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και την ενότητα τρύπαλι και απαρτίζεται από φυλλίτες, χαλαζίτες και άλλα μεταμορφωμένα πετρώματα όπως μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι, μεταφαισטיακά πετρώματα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Στην σειρά αυτή, παρόλη την αλλοίωση που έχει υποστεί έχουν ανακαλυφθεί σε περιοχές της διάφορα απολιθώματα.
- **Ενότητα Γαβρόβου-Τριπόλεως**
Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται από ανθρακική ιζηματογένεση με κυρίαρχα πετρώματα τους ασβεστόλιθους και δολομίτες. Οι σχηματισμοί της ζώνης αυτής επικαλύπτουν ένα υπόβαθρο αποτελούμενο από φυλλίτες, χαλαζιακούς φυλλίτες και μάρμαρα.
- **Ενότητα Ωλονού-Πίνδου**
Απαρτίζεται από ασβεστόλιθους, δολομίτες, κερατόλιθους, ηφαιστειο-ιζηματογενή πετρώματα, ραδιολαρίτες, άργιλους, ψαμμίτες και πηλίτες. Στην περιοχή μελέτης, η τεκτονική ενότητα αυτή παρουσιάζεται νότιο-κεντρικά, ιδίως στο Όρος Κέδρος.
- **Νεογενείς Σχηματισμοί**
Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει χαλαρά συνδεδεμένα κροκαλοπαγή, άμμους και ψαμμίτες. Τέτοιου είδους τεκτονικοί σχηματισμοί παρατηρούνται κυρίως στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού Κοζαρέ.
- **Τετατογενείς Σχηματισμοί**

Η ενότητα των τεταρτογενών σχηματισμών απαρτίζεται κυρίως από ασβεστολιθικές και μαργαϊκές κροκάλες και αποστρωγγυλωμένα χαλίκια. [16],[17]



Εικόνα 2.9 – Γεωλογικές ενότητες Κρήτης [17]

Οι σχέσεις μεταξύ των παραπάνω τεκτονικών ενοτήτων είναι περίπλοκες, αλλά μελετώντας τις εξάγονται διάφορα συμπεράσματα για τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Αρχικά, στα δυτικά της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, λόγω την ύπαρξη διαστρώσεων πυριτολίθων και ανθρακικών σχιστολίθων μειώνεται η εγκάρσια περατότητα στην ενότητα Κρήτης-Μάνης που απαρτίζεται από πλακώδους ασβεστόλιθους. Αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την απομόνωση της ανθρακικής σειράς της Τρίπολης σε εκείνο το τμήμα λόγω μη επικοινωνίας με την ενότητα των πλακώδων ασβεστόλιθων. Γενικότερα, η ανθρακική ενότητα της Τρίπολης, όπως και τα ανθρακικά της Πίνδου είναι πετρώματα μέτριας προς υψηλής περατότητας, δηλαδή επιτρέπουν την κίνηση των υδάτων δια μέσου αυτών. Στο Νότιο κομμάτι κυριαρχούν οι Φυλλίτες-Χαλαζίτες οι οποίοι, όντας στεγανοί, δεν επιτρέπουν την υπόγεια επικοινωνία της ενότητας Τρίπολης με την θάλασσα. Ομοίως, στον βορρά η περιοχή καταλαμβάνεται από φλύσχη της Τρίπολης, που σαν σχηματισμός όπως και ο φλύσχη της Πίνδου, χαρακτηρίζεται ως χαμηλής περατότητας ή αδιαπέρατος.[18]



Εικόνα 2.9 – Γεωλογικές ενότητες της περιοχής μελέτης και όρια υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη [17]

Παράλληλα, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στην περιοχή μελέτης υπάρχει και μια ζώνη ρηγμάτωσης που εκτείνεται από τους οικισμούς: Σπήλι, Αγία Φωτιά και Κισσό μέχρι την Κρύα Βρύση και τον Άγιο Ευστράτιο. Τμήμα από την ρηγμάτωση αυτή έχει ληφθεί υπόψιν κατά την μοντελοποίηση του υπόγειου υδροφορέα διότι διαπιστώθηκε ότι επηρέαζε σημαντικά τα υδραυλικά ύψη της περιοχής εκείνης.

Τέλος, όσον αφορά την τροφοδοσία της λεκάνης Κουρταλιώτη, υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι με τους οποίους εμπλουτίζεται. Πρωτίστως, εμπλουτίζεται μέσω βροχοπτώσεων, δηλαδή απευθείας κατείσδυσης και μερικώς από την επιφανειακή απορροή των ρευμάτων που διασχίζουν την περιοχή όπως οι ποταμοί Κουρταλιώτης και Σπηλιανός. [18], [17]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

3.1 Εισαγωγή στα μοντέλα προσομοίωσης

Τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής είναι απλουστευμένες ερμηνείες ενός πραγματικού συστήματος που χρησιμοποιούνται:

- Ως ερμηνευτικά εργαλεία για την διερεύνηση του δυναμικού των υπόγειων υδροφορέων και την κατανόηση των μοτίβων της ροής τους.
- Ως εργαλεία προσομοίωσης που αναλύουν την απόκριση του υδροφορέα σε διάφορα ερεθίσματα.
- Ως εργαλεία αξιολόγησης των διαδικασιών άντλησης και εμπλουτισμού για μια βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτων.
- Ως εργαλεία πρόβλεψης μελλοντικών συνθηκών ή επιπτώσεων που επιφέρει η ανθρώπινη δραστηριότητα.
- Ως βοηθητικά εργαλεία για την συλλογή μετρήσεων πεδίου και τον σχεδιασμό πρακτικών λύσεων.
- Ως εργαλεία ελέγχου για την αξιολόγηση σεναρίων που αφορούν την ανάπτυξη των υπόγειων υδάτων.
- Ως εργαλεία που βοηθούν στην απεικόνιση διαφόρων καταστάσεων που διευκολύνει την επικοινωνία του κοινού με τους αποφασίζοντες. [19]

Ειδικότερα, στον τομέα της υδρογεωλογίας τέτοιου είδους μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ρύπανσης ενός υδροφορέα, την πρόβλεψη της μακροχρόνιας επίπτωσης της άντλησης υπόγειου νερού και για την εύρεση αποτελεσματικότερων μεθόδων διαχείρισης των υδάτων αυτών. [20]

Τα κυριότερα είδη μοντέλων είναι: τα φυσικά μοντέλα που είναι πιστά αντίγραφα του φυσικού συστήματος κατασκευασμένα υπό κλίμακα, τα αναλογικά μοντέλα τα οποία είναι εργαστηριακές προσομοιώσεις των υδροφορέων που υπακούουν σε μερικές διαφορικές εξισώσεις με παρόμοιες οριακές συνθήκες με αυτές του φυσικού συστήματος και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις για την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού.

Την πρώτη χρήση αναλυτικής λύσης για την έρευνα της υπόγειας ροής σε υποθετικές λεκάνες απορροής μικρής κλίμακας, έκανε ο Toth το 1963. Τα ευρήματά του, από την μία, επιβεβαιώνουν τις παρατηρούμενες ιδιότητες του νερού σε υπόγειους υδροφορείς και από την άλλη, παρουσιάζουν και κρυμμένες ιδιότητες του νερού, που αμελώντας τις μπορεί κάποιος να καταλήξει σε λάθος συμπεράσματα όσον αφορά την ροή των υπογείων υδάτων στις λεκάνες αυτές.

Αργότερα, το 1966, οι Freeze και Witherspoon ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν αριθμητικά μοντέλα για να προσομοιάσουν την υπόγεια ροή σε υποθετικούς υδροφορείς. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δίνει την δυνατότητα τρισδιάστατης προσομοίωσης της υπόγειας ροής σε ομογενής και ανισότροπους υδροφορείς.

Η εφαρμογή μοντέλων προσομοίωσης της υπόγειας ροής σε μεγάλης κλίμακας φυσικά συστήματα άρχισε το 1978, με το πρόγραμμα RASA των ΗΠΑ. Στο πρόγραμμα αυτό

κατασκευάστηκαν μοντέλα υπολογιστή όπως το USGS 3D (1975) και το USGS MODFLOW (1975) που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό των συστημάτων ροής και για την προσομοίωση των αποτελεσμάτων της ανάπτυξης των υπογείων υδάτων και των αλλαγών χρήσεων γης. Κατά την διάρκεια του προγράμματος αυτού, δημοσιεύτηκαν πάνω από 900 επιστημονικά άρθρα.

Τα τελευταία 20 χρόνια, με την ραγδαία ανάπτυξη της μηχανικής λογισμικού, των ικανοτήτων του υπολογιστή και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) έχει διευκολυνθεί σε μεγάλο βαθμό η μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας υπόγειων συστημάτων. Οι υπολογιστές πλέον μπορούν μέσα σε λίγα λεπτά να ολοκληρώσουν μια προσομοίωση υπόγειας ροής που παλαιότερα θα χρειαζόταν μέρες ή και μήνες. Παράλληλα, στα νέα μοντέλα προσομοίωσης η γραφική διεπαφή χρήστη κάνει την μοντελοποίηση πολύ πιο εύκολη και κατανοητή, εξοικονομώντας χρόνο κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων.^[19]

3.1.1 Μαθηματικές εξισώσεις μοντέλων ροής υπογείων υδάτων

Τα μοντέλα υπόγειας ροής στην κορεσμένη ζώνη επιλύουν τις δύο μερικές διαφορικές εξισώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω. Η πρώτη εξίσωση αναφέρεται στην ροή των υπογείων υδάτων και η δεύτερη στην ταχύτητα διαρροής.

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

Όπου:

- K_{xx} η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση x [LT^{-1}]
- K_{yy} η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση y [LT^{-1}]
- K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση z [LT^{-1}]
- S ο ειδικός συντελεστής αποθηκευσιμότητας [L^{-1}]
- Q_i ο όρος εμπλουτισμού / άντλησης στο σημείο i [L^3T^{-1}]
- δ η λειτουργία δέλτα
- r ο αριθμός πηγών εμπλουτισμού / άντλησης

Και

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

Όπου V_x , V_y , V_z οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τον Darcy στις κατευθύνσεις x, y και z αντίστοιχα [LT^{-1}] ^[20]

3.1.2 Μαθηματικές εξισώσεις μοντέλων μεταφοράς μάζας υπόγειων υδάτων

Τα μοντέλα μεταφοράς μάζας περιγράφουν τις κύριες διαδικασίες της διάχυσης, οριζόντιας μεταφοράς και διασποράς καθώς και κάποιες διαδικασίες μεταφοράς μάζας όπως η αποσύνθεση και η ρόφηση. Λειτουργούν επιλύοντας ένα σύστημα μερικών

διαφορικών εξισώσεων που απαρτίζεται από εξισώσεις ροής, ταχύτητας και μεταφοράς μάζας. Αρχικά, η εξίσωση της ροής επιλύεται ως εξής:

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

Γνωρίζοντας το υδραυλικό ύψος h , λύνεται η εξίσωση της ταχύτητας για κάθε κατεύθυνση αντίστοιχα.

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

Τέλος, η εξίσωση μεταφοράς μάζας λύνεται ως προς τον συντελεστή C που περιγράφει την χημική συγκέντρωση.

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

Όπου:

- C η συγκέντρωση των ρύπων [ML^{-3}]
- θ το πορώδες του υδροφορέα
- C^ω η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού [ML^{-3}]
- $E(C)$ η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης
- $D_{i,j}$ οι όροι της διασποράς στις τρεις κύριες κατευθύνσεις x, y, z [L^2T^{-1}]

Οι όροι της διασποράς $D_{i,j}$ ορίζονται ως εξής:

$$D_{xx} = a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2 / V + D_M$$

$$D_{yy} = a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2 / V + D_M$$

$$D_{zz} = a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2 / V + D_M$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V$$

Όπου:

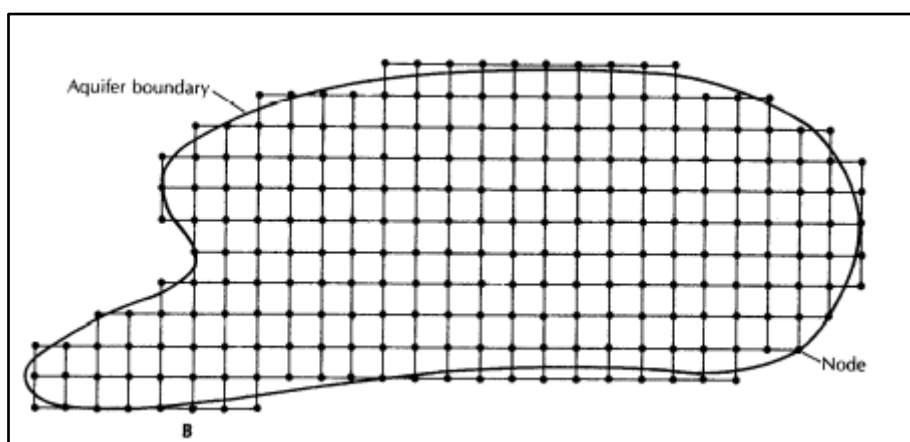
- D_M ο συντελεστής της μοριακής διάχυσης [L^2T]
- a_L η διαμήκης διασπορά [L]
- a_T η εγκάρσια διασπορά [L]
- a_V η κάθετη διασπορά [L]
- V η ταχύτητα ροής υπογείου νερού [LT^{-1}] [20]

3.2 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης

Ανάλογα με την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής διακρίνονται σε 5 κατηγορίες: την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, την μέθοδο ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, την μέθοδο συνοριακών στοιχείων και την μέθοδο των αναλυτικών λύσεων. Από τις παραπάνω μεθόδους, πιο ευρέως γνωστές είναι αυτές των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων σχετικά με την ροή υπογείων υδάτων και την μεταφορά μάζας. [20]

3.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο άμεση προσέγγιση διακριτικοποίησης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι οι ιδιότητες του υδροφορέα είναι γνωστές σε κάθε σημείο εντός των ορίων του συστήματος. Έπειτα, θεωρείται ένα σύνολο σημείων και διατάσσονται σε ένα πλέγμα. Στο πλέγμα αυτό υπάρχουν κόμβοι στους οποίους οι εξισώσεις επιλύονται για να βρεθούν οι ζητούμενες τιμές. Στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το πλέγμα έχει ορθογώνιο ή τετραγωνικό σχήμα οπότε η χρήση της δεν συνίσταται για όταν τα όρια του συστήματος είναι ακανόνιστου σχήματος. [21]

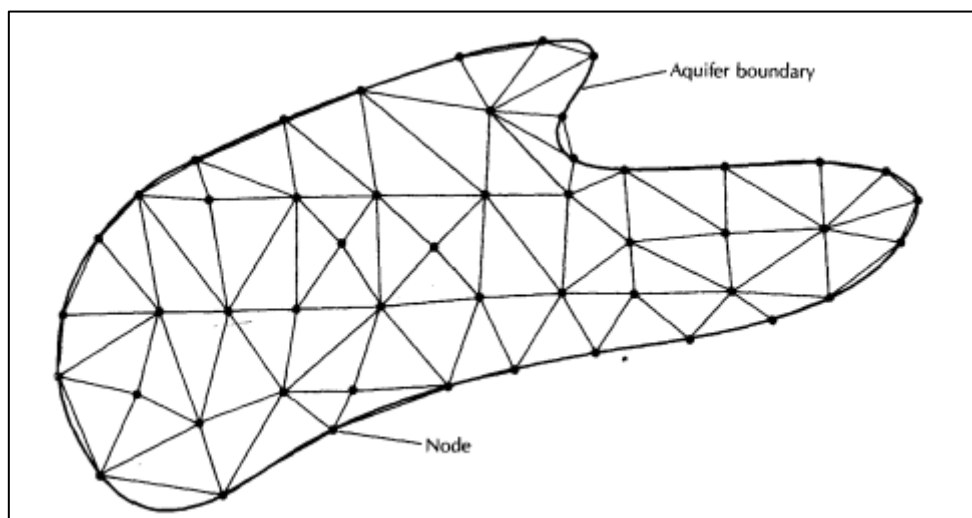


Εικόνα 3.1 : Παράδειγμα πλέγματος για την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών [21]

3.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί και αυτή έναν τρόπο με τον οποίο μπορούν να υπολογιστούν διάφοροι παράμετροι σε έναν υδροφορέα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν αυτή την μέθοδο διαιρούν την επιφάνεια του υδροφορέα σε πολυγωνικές κυψέλες, κυρίως τριγωνικές. Το σύνολο των πολυγωνικών σχημάτων αυτών αποτελεί το πλέγμα και τα σημεία στα οποία τα πολυγωνικά σχήματα τέμνονται

λέγονται κόμβοι. Στους κόμβους, η μέθοδος αυτή μπορεί να υπολογίσει άγνωστες τιμές όπως το υδραυλικό ύψος. [21]



Εικόνα 3.2 : Παράδειγμα πλέγματος για την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων [21]

3.2.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Αν και οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών είναι αρκετά παρόμοιοι στον τρόπο με τον οποίο κάνουν τους υπολογισμούς, έχουν και αρκετές διαφορές. Μια σημαντική διαφορά είναι η ευκολία με την οποία εφαρμόζεται η κάθε μέθοδος. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών θεωρείται ευκολότερη να εφαρμοστεί από την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διότι η δεύτερη απαιτεί περισσότερα δεδομένα εισόδου και χρησιμοποιεί πιο περίπλοκα μαθηματικά.[20] Αντιθέτως, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όπως προαναφέρθηκε πλεονεκτεί όταν πρόκειται για υδροφορείς στους οποίους τα όρια έχουν ακανόνιστο σχήμα. Παράλληλα αποφαίνεται ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπερτερεί εκείνης των πεπερασμένων διαφορών σε προβλήματα που έχουν κινούμενα όρια καθώς και για προβλήματα που περιλαμβάνουν μεταφορά ρύπων. [21] Συνολικά, όμως, η επιλογή μεθόδου εξαρτάται από το υπό μελέτη πρόβλημα και την προτίμηση/εξοικείωση του χρήστη.

3.3 Το μοντέλο PTC

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) για την μοντελοποίηση της μελετούμενης περιοχής. Το μοντέλο PTC είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο που συνδυάζει τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της ροής των υπογείων υδάτων και τη μεταφορά των ρύπων σε πορώδη μέσα. Το PTC είναι γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 συνεπώς είναι συμβατό με πολλά είδη υπολογιστών και αναπτύχθηκε ως Plug-In Extension (PIE) για το πρόγραμμα GIS ArgusOne.[20] Το μοντέλο αυτό, υλοποιείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο διάσπασης που διακριτοποιεί το πεδίο ορισμού σε παράλληλες οριζόντιες

στρώσεις. Σε κάθε στρώση λαμβάνει χώρα μια διακριτικοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για να αναπαρασταθούν σωστά τα όρια του συστήματος που έχουν ακανόνιστο σχήμα. Παράλληλα, οι στρώσεις μεταξύ τους συνδέονται κάθετα από διακριτικοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων επιτρέπει τον υπολογισμό της τρισδιάστατης λύσης σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα λύνονται όλες οι οριζόντιες διακριτικοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων ανεξάρτητα και στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τις στρώσεις.^[22]

Ως προς την αξιοπιστία του μοντέλου PTC, σε αντίστοιχη έρευνα των Ματιάτος, Βαρουχάκης και Παπαδοπούλου του 2017 που σύγκρινε τρία μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής (PTC, MODFLOW-MT3DMS και FEFLOW) ως προς την αποτελεσματικότητά τους, μπορούν να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα. Αρχικά, το μοντέλο PTC δεν εξήγαγε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε πηγάδια άντλησης τα οποία ήταν κοντά σε κάποιο ρέμα λόγω του ότι η κατανομή των υδραυλικών υψών είναι περίπλοκη σε τέτοιες περιπτώσεις. Παράλληλα, το μοντέλο φάνηκε να υποεκτιμά τις παρατηρούμενες τιμές της συγκέντρωσης των νιτρικών και της στάθμης του υπόγειου νερού σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα. Όμως, όσον αφορά τον χρόνο για την βαθμονόμηση των μοντέλων, το PTC ήταν συντομότερο από τα δύο μοντέλα και σε γενικότερες γραμμές τα αποτελέσματα που εξήγαγε δεν απέχχαν πολύ από τις παρατηρούμενες μετρήσεις.^[23]

3.3.1 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου PTC

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί τις προαναφερθείσες διαφορικές εξισώσεις (υποκεφάλαιο 3.1.1, 3.1.2) ροής υπογείων υδάτων, ταχύτητας και μεταφοράς μάζας για να την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα.

Χρησιμοποιείται η μερική διαφορική εξίσωση ροής με υδραυλικό ύψος h :

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

η ταχύτητα ροής:

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

και η εξίσωση που περιγράφει την μεταφορά ρύπων σε πορώδη μέσα:

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

Οι εξισώσεις αυτές προέρχονται από τον νόμο του Darcy που περιγράφει την αναλογία της παροχής του νερού με την απώλεια δυναμικού σε γραμμική ροή και από την αρχή διατήρησης μάζας.

3.3.2 Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC δέχεται τριών ειδών οριακές συνθήκες στην εξίσωση της ροής και δύο είδη στην εξίσωση μεταφοράς. Στην εξίσωση της ροής υπογείων υδάτων, οι τρεις τύποι των οριακών συνθηκών είναι οι συνθήκες Dirichlet για καθορισμένο υδραυλικό ύψος, οι συνθήκες Neumann για καθορισμένη ροή και τρίτου τύπου για διαρροή. Στο μοντέλο PTC οι προκαθορισμένες οριακές συνθήκες είναι μηδενικής ροής που υποδηλώνουν την ύπαρξη περιορισμένου υδροφορέα με αδιαπέρατα όρια γύρω και κάτω από αυτόν. Με την επιλογή διαφορετικών οριακών συνθηκών μπορούν να αναπαρασταθούν διαφορετικές περιπτώσεις.^[22] Ακολουθούν αναλυτικότερες περιγραφές των οριακών συνθηκών.

3.3.2.i Καθορισμένο υδραυλικό ύψος

Η οριακή συνθήκη του καθορισμένου υδραυλικού ύψους θέτεται στο μοντέλο με την εισαγωγή μιας σταθερής τιμής υδραυλικού ύψους σε κάθε δηλωμένο κόμβο. Ο κώδικας αυτόματα απαλείφει τις στήλες και τις γραμμές που σχετίζονται με τους κόμβους αυτούς από την εξίσωση του πίνακα. Στο τέλος, αυτό που απομένει είναι $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου ο όρος N_c είναι ο συνολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης.^[22]

3.3.2.ii Καθορισμένη ροή

Με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό ο καθορισμός των οριακών συνθηκών της ροής. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Σε ένα στοιχείο μήκους L με την ροή να παραμένει σταθερή, η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δώσει τις κομβικές κατανομές. Όσον αφορά την ροή που προκύπτει από την άντληση νερού, καθορίζεται με τον ίδιο τρόπο, ορίζοντας μια τιμή σε έναν κόμβο. Για να διευκολυνθεί η εισαγωγή του παράγοντα της ομοιόμορφης διήθησης, ο κώδικας επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή.^[22]

3.3.2.iii Τρίτου Τύπου

Οι οριακές συνθήκες τρίτου τύπου περιλαμβάνουν την διαρροή και για την εισαγωγή τους στο μοντέλο, χρειάζεται η μετατροπή μιας εξίσωσης του συστήματος που σχετίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Με την μετατροπή της εξίσωσης αυτής, εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής ο οποίος ολοκληρώνεται και πλέον αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Τροποποιώντας την παράμετρο k_L της εξίσωσης, υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί η διαρροή σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.^[22]

3.3.2.iv Οριακές συνθήκες μεταφοράς μάζας

Όσον αφορά την εξίσωση της μεταφοράς στο μοντέλο PTC, υπάρχουν δύο επιμέρους οριακές συνθήκες: η καθορισμένη συγκέντρωση σε κάποιο κόμβο και η καθορισμένη ροή συμμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες στα κάθετα όρια είναι μηδενικής ροής διασποράς ενώ στα άνω και κάτω όρια είναι μηδενικής ολικής ροής ρύπων. Οι καθορισμένες κομβικές συγκεντρώσεις ορίζονται απευθείας από τον χρήστη ενώ οι καθορισμένες ροές μεταφοράς ορίζονται μέσω του προγράμματος, υποδεικνύοντας μια συγκέντρωση που σχετίζεται με τις ογκομετρικές ροές ρευστών. Η οριακή συνθήκη της καθορισμένης ροής συμμεταφοράς εισάγεται εμμέσως με τον καθορισμό της οριακής συνθήκης τρίτου τύπου της εξίσωσης ροής υπογείων υδάτων.^[22]

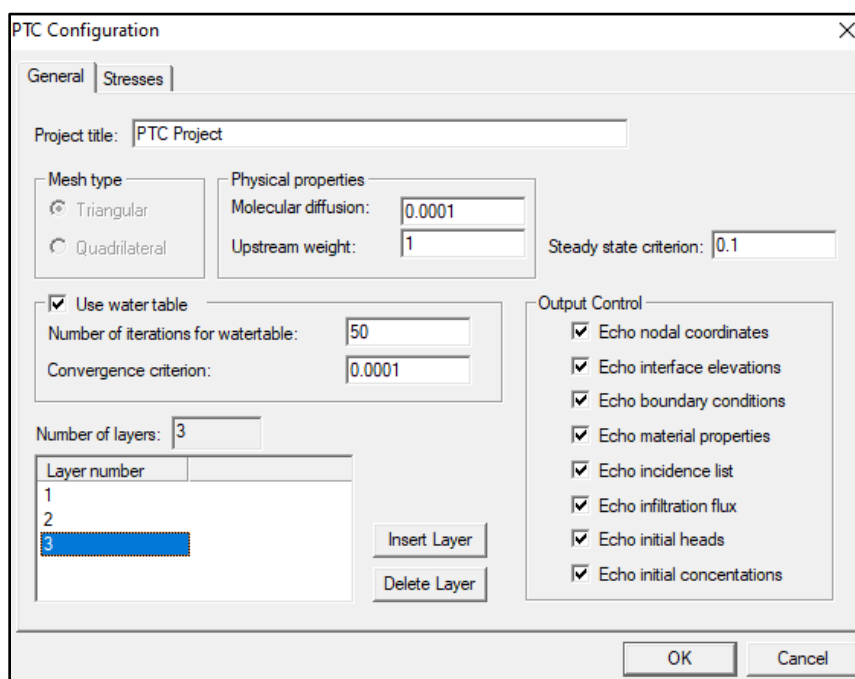
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

4.1 Εισαγωγή δεδομένων

4.1.1 Γενικά στοιχεία

Για την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα μέσω του μοντέλου PTC συλλέχθηκαν δεδομένα για την υπό μελέτη περιοχή από την μεταπτυχιακή διατριβή της Ιωάννας Αγγέλη («Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της ευρύτερης περιοχής της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη – Επιπτώσεις κλιματικής αλλαγής, 2019»). Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες, την υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών, τα υψόμετρα της περιοχής, τις θέσεις και τον ρυθμό άντλησης των πηγαδιών κ.ά. Με την συλλογή των δεδομένων αυτών ξεκινά η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων στο μοντέλο PTC.

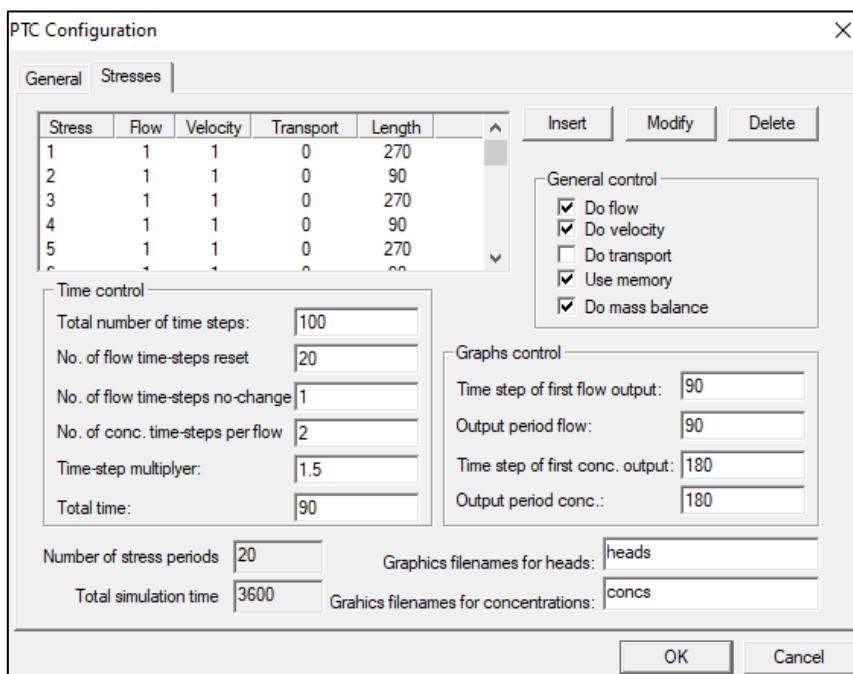
Αρχικά, επιλέγεται τριγωνικό πλέγμα έναντι τετραγωνικού διότι αναπαριστά πιστότερα τα όρια της περιοχής καθώς και επιλέγεται η εντολή use water table διότι πρόκειται να προσομοιωθεί περιοχή με ελεύθερο υδροφορέα. Όσον αφορά τον αριθμό των στρωμάτων, καθορίστηκαν τρία στρώματα (Layer 1, Layer 2, Layer 3) με την αρίθμηση των στρωμάτων να γίνεται από κάτω προς τα πάνω, δηλαδή το στρώμα νούμερο 1 είναι το βαθύτερο. Έπειτα, συμπληρώνεται το κριτήριο σταθερής κατάστασης που ορίζει την διαφορά μεταξύ διαδοχικών τιμών του υδραυλικού ύψους έτσι ώστε να επιτευχθεί σταθερή ροή.



Εικόνα 4.1 – Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των γενικών στοιχείων στο μοντέλο PTC

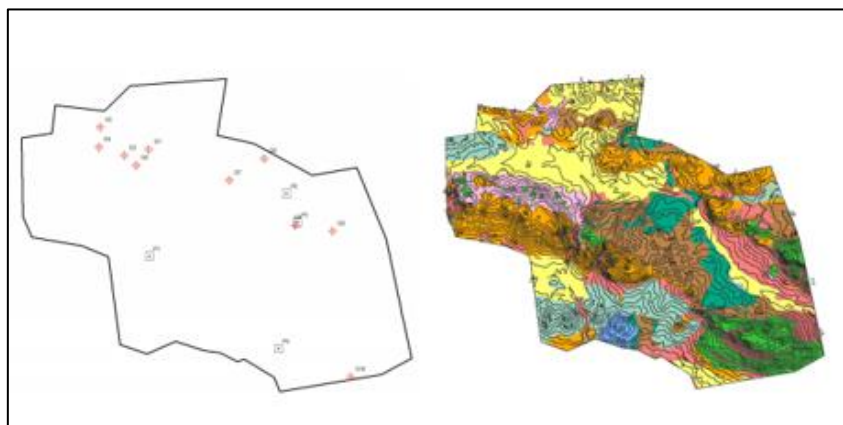
Στην επόμενη καρτέλα που περιλαμβάνει τις καταπονήσεις, καθορίζεται το χρονικό διάστημα για το οποίο θα γίνει η προσομοίωση. Επιλέχθηκε να δρομολογηθεί η προσομοίωση για 10 χρόνια, με το κάθε υδρολογικό έτος να περιλαμβάνει δύο περιόδους: την υγρή περίοδο που εκτείνεται από τον Σεπτέμβριο μέχρι τον Μάιο (270

ημέρες) και την ξηρή περίοδο που περιλαμβάνει τους μήνες από Ιούνιο μέχρι Αύγουστο (90 ημέρες). Επιπροσθέτως, κατά την εκτέλεση του μοντέλου λαμβάνουν χώρα όλες οι διεργασίες που περιλαμβάνονται στην λίστα General control, εκτός από την εντολή «Do transport» διότι δεν εξετάζεται η μεταφορά ρύπων στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 4.2 – Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των καταπονήσεων στο μοντέλο PTC

Στη συνέχεια, με την χρήση τοπογραφικών και υδρογεωλογικών χαρτών ψηφιοποιούνται τα όρια της περιοχής μελέτης, οι ισοϋψείς, οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων, καθώς και τα όρια γεωλογικών σχηματισμών. Οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν την ίδια κλίμακα. Με την ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπύλων της περιοχής, το μοντέλο μέσω της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής υπολογίζει το υψόμετρο σε όλη την περιοχή μελέτης και αναπαριστά το ανάγλυφο της. Η ψηφιοποίηση των παραπάνω δεδομένων έγιναν με σημεία (points) για τις γεωτρήσεις και τις πηγές, με γραμμές (polyline) για τις ισοϋψείς και με πολύγωνα (polygons) για τα όρια της περιοχής και τους γεωλογικούς σχηματισμούς.



Εικόνα 4.3 – Στιγμιότυπο οθόνης από την ψηφιοποίηση των αρχικών δεδομένων ^[18]

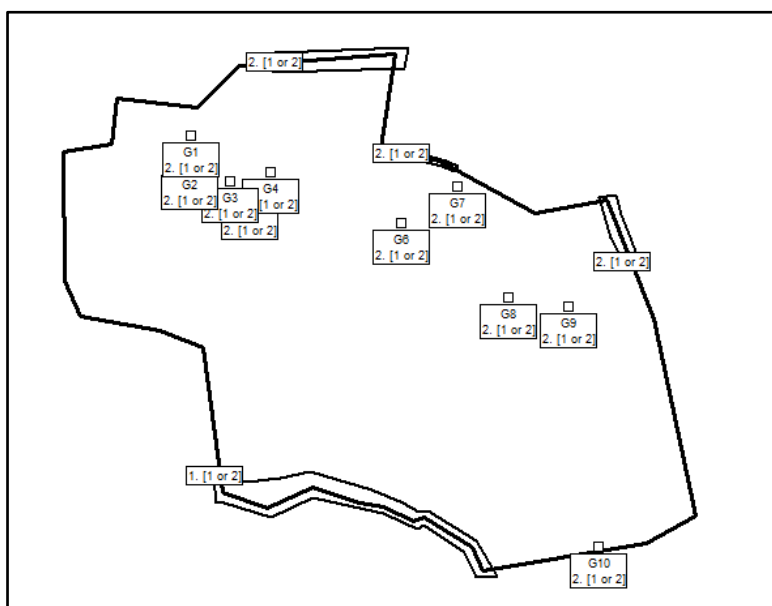
4.1.2 Οριακές Συνθήκες

Όπως έχει προαναφερθεί, το μοντέλο PTC δέχεται τριών ειδών οριακές συνθήκες όσον αφορά την ροή των υπογείων υδάτων. Για την μοντελοποίηση της συγκεκριμένης περιοχής χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι πρώτες δύο συνθήκες: του σταθερού υδραυλικού ύψους και της σταθερής ροής.

Για την εισαγωγή της συνθήκης του σταθερού υδραυλικού ύψους (Type 1), σχεδιάζεται ένα πολύγωνο κατά μήκος της ακτογραμμής και ορίζεται το υδραυλικό ύψος του νερού στα 0 μέτρα. Επίσης, ορίστηκε και η πηγή του Κουρταλιώτη ως πρώτου τύπου οριακή συνθήκη.

Όσον αφορά την οριακή συνθήκη για την σταθερή ροή (Type 2), εισάγεται σε κάθε γεώτρηση και πηγή μαζί με την παροχή άντλησης/εμπλουτισμού. Παράλληλα, οι οριακές συνθήκες δεύτερου τύπου για τις πλευρικές εισροές από τα νότια, νότιο-ανατολικά και ανατολικά ορίστηκαν ως εξής:

- Βόρεια: Εισροή $220 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη χειμερινή περίοδο και $210 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη θερινή περίοδο
- Βόρειο-Ανατολικά: $208 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη χειμερινή περίοδο και $188 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη θερινή περίοδο
- Ανατολικά: $540 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη χειμερινή περίοδο και $520 \text{ m}^2/\text{d}$ κατά τη θερινή περίοδο



Εικόνα 4.4 – Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο PTC

4.1.3 Υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες

Για την εισαγωγή των δεδομένων της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι το μοντέλο PTC δέχεται μόνο τις μονάδες μέτρησης του μέτρου για το μήκος και μέρες για τον χρόνο, οπότε χρειάζονται να γίνουν οι κατάλληλες μετατροπές.

Οι τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα στο κάθε στρώμα προσδιορίστηκαν από γνωστά δεδομένα για τον εκάστοτε γεωλογικό σχηματισμό. Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται στις κατευθύνσεις x,y,z με τις υδραυλικές αγωγιμότητες κατά x, y να ταυτίζονται και με την υδραυλική αγωγιμότητα του z άξονα να είναι το 10% των υπολοίπων. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο στρώμα αποτελείται από ασβεστόλιθους από την γεωλογική ενότητα Τριπόλεως που η υδραυλική τους αγωγιμότητα κυμαίνεται από $10^{-4} - 10^{-5}$ m/s άρα 8.64 m/d. Η δεύτερη στρώση αποτελείται από ασβεστόλιθους από την ενότητα της Πίνδου, και η υδραυλική τους αγωγιμότητα είναι μια τάξη μικρότερη από τους ασβεστόλιθους της Τρίπολης. Όσον αφορά την τρίτη στρώση, η υδραυλική αγωγιμότητα της προσδιορίστηκε σε 10^{-6} m/s. Η Τρίτη στρώση περιλαμβάνει και φακούς που αποτελούνται από τεταρτογενής σχηματισμούς.

Σχηματισμοί	Αγωγιμότητα (m/d)		
	Kx	Ky	Kz
Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	8.64	8.64	0.864
Ασβεστόλιθοι Πίνδου	0.864	0.864	0.0864
Νεογενή	0.0864	0.0864	0.00864
Τεταρτογενή	86.4	86.4	8.64

Πίνακας 4.1 – Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας ^[18]

Το πορώδες εισάγεται στο μοντέλο μέσω των layers Porosity L1, L2, L3 για κάθε στρώση αντίστοιχα. Από τα γεωλογικά δεδομένα, εκτιμήθηκε ότι ο ασβεστόλιθος τις Τριπόλεως, όντας καρστικοποιημένος, έχει υψηλότερη τιμή πορώδους από τον ασβεστόλιθο της Πίνδου. Συγκεκριμένα στο μοντέλο εισάχθηκαν οι τιμές 0,40 και 0,35 αντίστοιχα. Για τον γεωλογικό σχηματισμό των Νεογενών, εκτιμήθηκε το πορώδες λαμβάνοντας υπόψιν το πορώδες όλων των σχηματισμών που απαρτίζουν την ενότητα αυτή, και έγινε η εισαγωγή της τιμής 0.28 στο στρώμα Porosity L3. Η τιμή του πορώδους των τεταρτογενή σχηματισμών εισάγεται κατά τον καθορισμό των φακών στο τρίτο στρώμα του μοντέλου.

4.1.4 Βροχόπτωση

Η βροχόπτωση εισάγεται στο μοντέλο σύμφωνα με τα δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής. Η τιμή της ορίζεται ως μέση ετήσια βροχόπτωση και σαν παράμετρος καθορίζει την διήθηση των κατακρημνισμάτων στους υπόγειους υδροφορείς. Σημαντικό ρόλο για τον καθορισμό της διήθησης αυτής έχουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, οι υδροπερατοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν το 60% της συνολικής έκτασης, ενώ οι αδιαπέρατοι το υπόλοιπο 40%. Συνολικά, λαμβάνοντας υπόψιν και την συνολική έκταση της περιοχής οι συντελεστές της βροχόπτωσης που εισάγονται στο μοντέλο είναι 0.003628 m/d και 0.000056 m/d για την υγρή και την ξηρή περίοδο αντίστοιχα.

4.1.5 Γεωτρήσεις

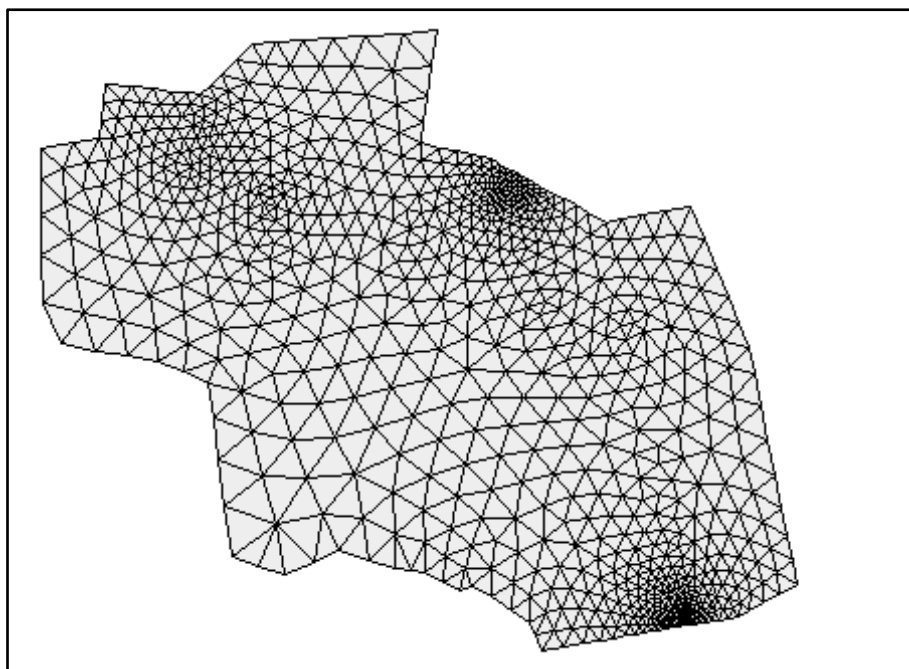
Στις γεωτρήσεις που έχουν ψηφιοποιηθεί στο μοντέλο κατά την εισαγωγή των αρχικών δεδομένων, εισάγονται και οι ρυθμοί άντλησης του υπόγειου νερού. Η παροχή άντλησης στο μοντέλο συμβολίζεται με αρνητικό πρόσημο, το οποίο δηλώνει την αφαίρεση όγκων νερού. Συνολικά, εξετάστηκαν 10 γεωτρήσεις τις περιοχής οι οποίες συμβολίστηκαν όπως φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 4.2.

Όνομα Γεώτρησης	Συμβολισμός	Παροχή Αντλησης (m ³ /d)
Στενόλακκος Αγκουσελιανά	G1	-2520
Καμαρα Αγκουσελιανά	G2	-1440
Δράκος	G3	-2520
Κοκκινοχώματα Κοζαρέ	G4	-2520
Αμπελα Κοζαρέ	G5	-1440
Σωχωρα Λαμπινι	G6	-2520
Κορφές Καρίνες	G7	-1080
Αγ. Φωτιά Σπήλι	G8	-2520
Κισσος	G9	-960
Αγ. Γεράσιμος Ακούμια	G10	-1440

Πίνακας 4.2 – Τιμές ρυθμών άντλησης των γεωτρήσεων ^[18]

4.1.6 Πλέγμα

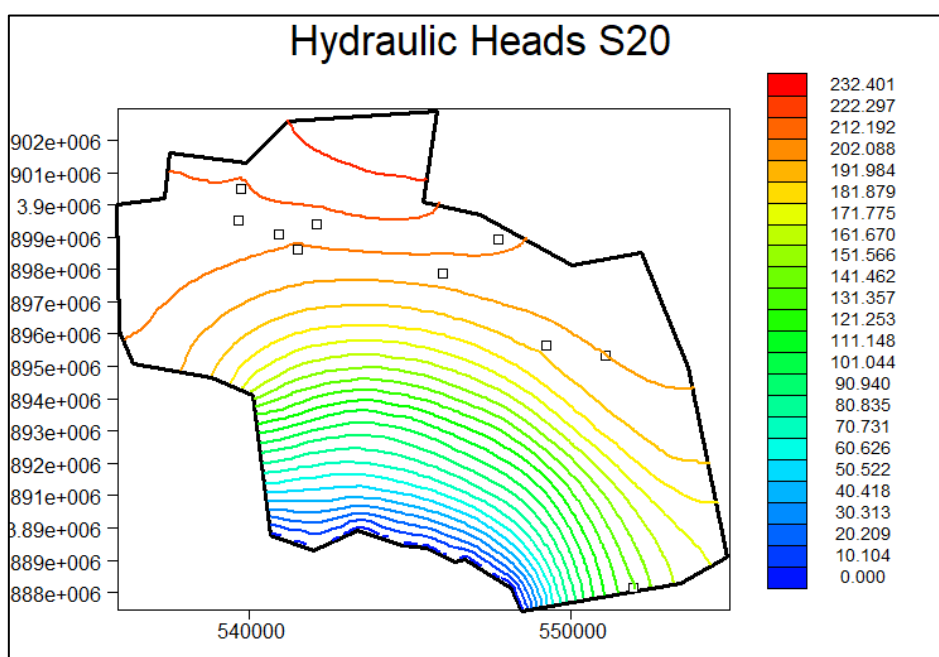
Σαν τελικό βήμα στην προσομοίωση του μοντέλου κατασκευάζεται το πλέγμα, το οποίο διαιρεί την περιοχή σε τριγωνικά στοιχεία και στα σημεία που τέμνονται τα στοιχεία αυτά βρίσκονται οι κόμβοι. Συνολικά στο παρών μοντέλο υπάρχουν 840 κόμβοι και 1559 στοιχεία. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την επιλογή πυκνότερου πλέγματος με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων και στοιχείων επιτυγχάνεται καλύτερη προσομοίωση του συστήματος της περιοχής, αλλά η μαθητική έκδοση του μοντέλου επιτρέπει την δημιουργία πλέγματος μέχρι 2000 στοιχείων. Μετά την εφαρμογή του μοντέλου PTC, σαν αρχεία εξόδου παρουσιάζονται τα υδραυλικά ύψη και η ταχύτητα ροής κατά x,y σε κάθε κόμβο για κάθε χρονική περίοδο που «τρέχει» το μοντέλο.



Εικόνα 4.5 – Πλέγμα του μοντέλου PTC

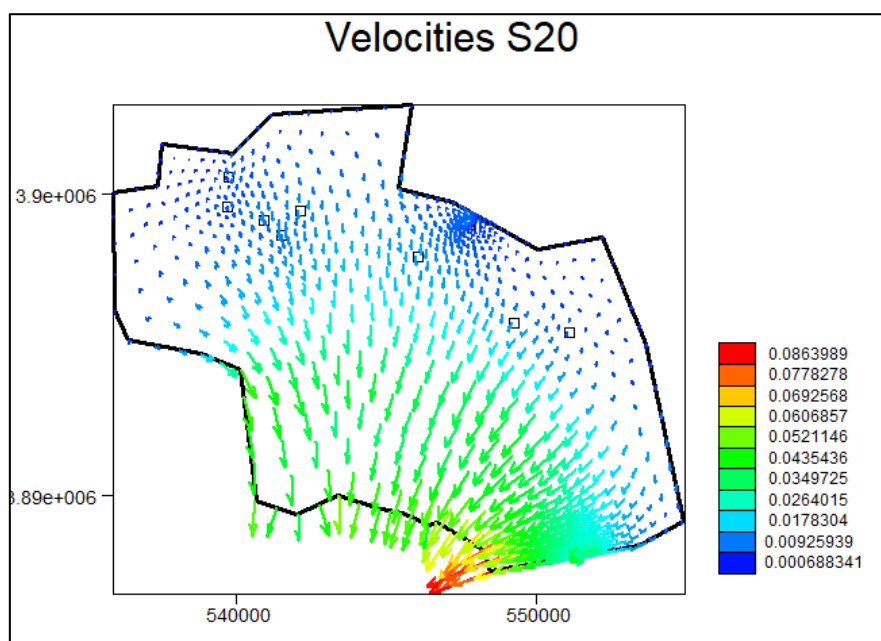
4.2 Αποτελέσματα του μοντέλου

Με την εφαρμογή του μοντέλου PTC, μπορούν να δημιουργηθούν μέσω του προγράμματος διάφορα διαγράμματα που αναπαριστούν γραφικά τα αποτελέσματα. Από το αρχείο εξόδου, και για την τελευταία χρονική περίοδο (εαρινή περίοδος 10^{ου} έτους) της προσομοίωσης προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 4.6 – Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη της τελευταίας περιόδου

Από την Εικόνα 4.6 προκύπτει ότι οι γεωτρήσεις με την υψηλότερη στάθμη είναι οι G1 και G4, γεγονός που είναι λογικό διότι η θέση τους είναι τέτοια που επιτρέπει την πλευρική εισροή από τα βόρεια και βόρειο-ανατολικά. Αντιθέτως, η χαμηλότερη στάθμη παρατηρείται στις γεωτρήσεις G8 και G10, που είναι και οι πιο κοντινές στην θάλασσα. Συγκριτικά με την χειμερινή περίοδο του αντίστοιχου έτους, τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς προσαυξημένα λόγω της επιπρόσθετης βροχόπτωσης που υπάρχει κατά την υγρή περίοδο.



Εικόνα 4.7 – Αποτελέσματα μοντέλου για τις ταχύτητες ροής της τελευταίας περιόδου

Τέλος, στο διάγραμμα 4.7 φαίνεται ότι η κατεύθυνση της ροής είναι από τα βόρειο-ανατολικά προς τα νότια, με το νότιο-ανατολικό τμήμα της περιοχής να εμφανίζει τις μεγαλύτερες ταχύτητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ

5.1 Ορισμός του προβλήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται δέκα πηγάδια και πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση της άντλησης τους έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η άντληση αυτή χωρίς όμως να επιδεινωθεί το υπάρχων πρόβλημα της υφαλμύρισης. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, επιλέγονται εννέα υποθετικά πηγάδια παρατήρησης στους κόμβους 290, 313, 333, 354, 379, 439, 474, 539 και 570 τα οποία ως εξής θα αναφέρονται ως πηγάδια παρατήρησης 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, και 9 αντίστοιχα. Οι κόμβοι αυτοί λειτουργούν ως σημεία παρακολούθησης της επίδρασης που έχει η αλλαγή των αρχικών συνθηκών στην κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα. Με αλλαγές στο αρχικό μοντέλο, παρατηρούνται μεταβολές στα υδραυλικά ύψη των πηγαδιών παρακολούθησης. Μέσω δοκιμών διαπιστώθηκε ότι το ελάχιστο επιτρεπτό υδραυλικό ύψος στους κόμβους παρατήρησης είναι 516.5 μέτρα έτσι ώστε το μέτωπο της υφαλμύρισης να μην μετατοπιστεί προς την ενδοχώρα. Ο περιορισμός αυτός, μαζί με τις μέγιστες παροχές στα πηγάδια άντλησης, χρησιμοποιήθηκε στον ορισμό του προβλήματος της βελτιστοποίησης που ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^{10} q_i \quad \text{subject to } H_1, H_2, \dots, H_9 &\geq 516.5 \\ 0 \leq q_1 &\leq 2772 \\ 0 \leq q_2 &\leq 1584 \\ 0 \leq q_3 &\leq 2772 \\ 0 \leq q_4 &\leq 2772 \\ 0 \leq q_5 &\leq 1584 \\ 0 \leq q_6 &\leq 2772 \\ 0 \leq q_7 &\leq 1188 \\ 0 \leq q_8 &\leq 2772 \\ 0 \leq q_9 &\leq 1056 \\ 0 \leq q_{10} &\leq 1584 \end{aligned}$$

Όπου H_n το υδραυλικό ύψος στα αντίστοιχα πηγάδια παρακολούθησης και q_n οι παροχές άντλησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της κλιματικής αλλαγής, και της όλο και αυξανόμενης ανάγκης για νερό προσαυξήθηκαν οι τιμές των παροχών άντλησης κατά 10%.

5.2 Η έννοια της μη γραμμικότητας σε προβλήματα υπογείων υδάτων

Στα περισσότερα προβλήματα υπογείων υδάτων που απαρτίζονται από ελεύθερους υδροφορείς, η αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζει μη-γραμμική συμπεριφορά. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι το υδραυλικό ύψος δεν μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την παροχή. Η μη γραμμικότητα αυτή περιγράφεται και από την εξίσωση του Dupuit που περιγράφει την ροή δια μέσου ενός ελεύθερου υδροφορέα:

$$q' = \frac{1}{2}K \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{L} \right)$$

Όπου:

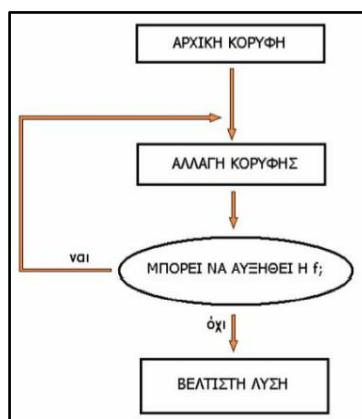
- q' η ροή ανά μονάδα πλάτους [L^2/T]
- K η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]
- h_1 το υδραυλικό ύψος στην αρχή [L]
- h_2 το υδραυλικό ύψος στην αρχή [L]
- L η απόσταση από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο που καταγράφεται το ύψος h_2 [L]

Από την εξίσωση του Dupuit αποφαίνεται ότι η υδραυλική κλίση σε έναν ελεύθερο υδροφορέα δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται. Για τον λόγο αυτό, χρειάζεται να τροποποιηθεί η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να μπορέσει να καλύψει τις μη-γραμμικές διακυμάνσεις του υδροφορέα. [3]

5.3 Η μέθοδος Simplex

Για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Simplex. Η μέθοδος αυτή κατά κόρον χρησιμοποιείται σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, αλλά μπορεί να εξάγει πολύ καλά αποτελέσματα και σε προβλήματα μη-γραμμικού προγραμματισμού. Ταυτόχρονα, είναι αρκετά εύκολη στην εφαρμογή της, όποτε εξοικονομεί αρκετό υπολογιστικό χρόνο.

Η μέθοδος αυτή δημιουργήθηκε από τον George Dantzig το 1947 με σκοπό να καλύψει το κενό που υπήρχε σε αλγόριθμους επίλυσης προβλημάτων με πληθώρα περιορισμών και μεταβλητών. Αργότερα, οι Khachiyan (1979) και Karmakar (1984) βελτίωσαν την διαδικασία επίλυσης της μεθόδου Simplex. Πρόκειται για μια μέθοδο η οποία αφού πρώτα προσδιορίσει μια εφικτή λύση, βελτιώνει μέσω επαναλήψεων την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η διαδικασία ξεκινάει με την εύρεση μιας αρχικής κορυφής η οποία βελτιώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα, μέσω αυξομειώσεων των μεταβλητών επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη τιμή στην οποία δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Γραφικά, η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 5.1 – Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου Simplex [24]

Στο παρόν πρόβλημα, εφαρμόζεται η μέθοδος της διαδοχικής γραμμικοποίησης για να προσεγγιστεί το πρόβλημα του μη-γραμμικού προγραμματισμού μέσω της μεθόδου Simplex. Πρόκειται για μια μέθοδος η οποία προσεγγίζει την καμπύλη υδραυλικού ύψους – παροχής άντλησης με διαδοχικές ευθείες. Δηλαδή, εφαρμόζεται η μέθοδος Simplex επάλληλες φορές χρησιμοποιώντας σε κάθε επανάληψη την βέλτιστη τιμή της προηγούμενης. [24]

5.4 Εφαρμογή της μεθόδου Simplex για την επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος

Αρχικά, επιλέγεται μια τυχαία αρχική δεκάδα τιμών για την παροχή άντλησης κάθε γεώτρησης. Τρέχοντας το μοντέλο, προκύπτουν 9 τιμές αρχικού υδραυλικού ύψους σε κάθε πηγάδι παρατήρησης.

$$\vec{Q}_0 = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \\ Q_8 \\ Q_9 \\ Q_{10} \end{bmatrix} \rightarrow \vec{H}_0 = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \\ H_6 \\ H_7 \\ H_8 \\ H_9 \end{bmatrix}$$

Στη συνέχεια, διαταράσσεται η παροχή του κάθε πηγαδιού άντλησης ξεχωριστά, και καταγράφεται η ανταπόκριση των κόμβων παρατήρησης. Για το πρώτο πηγάδι άντλησης η διαδικασία έχει ως εξής:

$$\vec{Q}'_{0,1} = \begin{bmatrix} Q_1 + \Delta Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \\ Q_8 \\ Q_9 \\ Q_{10} \end{bmatrix} \rightarrow \vec{H}'_{0,1} = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \\ H'_7 \\ H'_8 \\ H'_9 \end{bmatrix}$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές μπορεί πλέον να δημιουργηθεί το διάνυσμα κλίσης του υδραυλικού ύψους ως προς την μεταβολή της παροχής άντλησης

$$\left(\frac{\partial H}{\partial Q}\right)_1 = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_1} \\ \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_1} \\ \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_1} \end{bmatrix}$$

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε πηγάδι άντλησης, και κατασκευάζεται ο πίνακας απόκρισης A, που αποτελείται από 9 γραμμές και 10 στήλες.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_1} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_2} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_3} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_4} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_5} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_6} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_7} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_8} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_9} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_1} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_2} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_3} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_4} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_5} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_6} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_7} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_8} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_9} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_1} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_2} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_3} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_4} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_5} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_6} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_7} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_8} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_9} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_1} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_2} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_3} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_4} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_5} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_6} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_7} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_8} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_9} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_1} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_2} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_3} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_4} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_5} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_6} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_7} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_8} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_9} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_1} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_2} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_3} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_4} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_5} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_6} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_7} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_8} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_9} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_1} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_2} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_3} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_4} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_5} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_6} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_7} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_8} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_9} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_1} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_2} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_3} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_4} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_5} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_6} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_7} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_8} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_9} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_1} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_2} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_3} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_4} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_5} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_6} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_7} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_8} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_9} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{\Delta Q_1}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_2}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_3}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_4}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_5}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_6}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_7}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_8}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_9}{\Delta Q_1} & \frac{\Delta Q_{10}}{\Delta Q_1} \end{bmatrix}$$

Ο παραπάνω πίνακας μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά από την σχέση $\Delta H = A \times \Delta Q$. Χρησιμοποιώντας την μορφή αυτή ο πίνακας γίνεται:

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \\ H_6 \\ H_7 \\ H_8 \\ H_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_1} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_2} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_3} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_4} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_5} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_6} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_7} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_8} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_9} & \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_1} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_2} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_3} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_4} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_5} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_6} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_7} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_8} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_9} & \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_1} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_2} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_3} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_4} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_5} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_6} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_7} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_8} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_9} & \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_1} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_2} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_3} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_4} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_5} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_6} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_7} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_8} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_9} & \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_1} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_2} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_3} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_4} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_5} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_6} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_7} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_8} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_9} & \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_1} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_2} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_3} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_4} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_5} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_6} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_7} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_8} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_9} & \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_1} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_2} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_3} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_4} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_5} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_6} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_7} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_8} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_9} & \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_1} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_2} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_3} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_4} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_5} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_6} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_7} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_8} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_9} & \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_{10}} \\ \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_1} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_2} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_3} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_4} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_5} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_6} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_7} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_8} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_9} & \frac{H'_9 - H_9}{\Delta Q_{10}} \\ \Delta Q_1 & \Delta Q_2 & \Delta Q_3 & \Delta Q_4 & \Delta Q_5 & \Delta Q_6 & \Delta Q_7 & \Delta Q_8 & \Delta Q_9 & \Delta Q_{10} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta Q_6 \\ \Delta Q_7 \\ \Delta Q_8 \\ \Delta Q_9 \\ \Delta Q_{10} \end{bmatrix}$$

Για την εφαρμογή της μεθόδου Simplex με σκοπό την βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιείται η εντολή linprog (linear programming) του προγράμματος Matlab. Η εντολή linprog έχει την εξής μορφή:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$$

Όπου:

- x οι μεταβλητές απόφασης
- fval η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
- f το διάνυσμα της αντικειμενικής συνάρτησης με τους συντελεστές των μεταβλητών απόφασης
- A ο πίνακας των περιορισμών ανισότητας
- b το διάνυσμα των περιορισμών ανισότητας
- Aeq ο πίνακας των περιορισμών ισότητας
- beq το διάνυσμα αντίστοιχα των περιορισμών ισότητας
- lb το διάνυσμα ελαχίστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης
- ub το διάνυσμα μέγιστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης

Επειδή το πρόγραμμα μπορεί να πάρει μόνο την μορφή ελαχιστοποίησης είναι αναγκαία η μετατροπή του προβλήματος. Για τον λόγο αυτό η εντολή linprog θα κληθεί να ελαχιστοποιήσει την αρνητική ολική παροχή, δηλαδή να την μεγιστοποιήσει. Παράλληλα, εφόσον η μεταβλητή απόφασης x είναι εκφρασμένη ως η παροχή άντλησης q, πρέπει να μετατραπεί ο περιορισμός των υδραυλικών υψών των πηγαδιών παρατήρησης. Με την ελάχιστη τιμή αναφοράς H_{ref} να έχει εκτιμηθεί στα 516.5 μέτρα, σε κάθε πηγάδι παρατήρησης θα πρέπει:

$$H \geq H_{ref} \rightarrow H_0 + \Delta H \geq H_{ref}$$

$$H_0 + A \times \Delta Q \geq H_{ref} \rightarrow H_0 + A \times (Q - Q_0) \geq H_{ref}$$

$$-A \times Q \leq H_0 - H_{ref} - A \times Q_0$$

Δηλαδή, ο πίνακας A των περιορισμών ανισότητας είναι ο αρνητικός του πίνακα απόκρισης A και το διάνυσμα b των περιορισμών ανισότητας προκύπτει από την αφαίρεση τις ελάχιστης τιμής αναφοράς του υδραυλικού ύψους και του πίνακα A πολλαπλασιασμένο με το διάνυσμα των ρυθμών άντλησης από το αρχικό υδραυλικό ύψος: $H_0 - H_{ref} - A \times Q_0$.

Στο παρών πρόβλημα δεν υπάρχουν περιορισμοί ισότητας, όποτε ο πίνακας A_{eq} και το διάνυσμα b_{eq} μένουν κενά. Οι περιορισμοί των κάτω και άνω ορίων για τις παροχές όπως έχει προαναφερθεί είναι:

$$lb = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, ub = \begin{bmatrix} 2772 \\ 1584 \\ 2772 \\ 2772 \\ 1584 \\ 2772 \\ 1188 \\ 2772 \\ 1056 \\ 1584 \end{bmatrix}$$

Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται το στήσιμο της μεθόδου Simplex στο πρόγραμμα Matlab και μπορεί να «τρέξει» ο κώδικας. Σαν αποτέλεσμα προκύπτουν οι 10 παροχές άντλησης καθώς και η συνολική παροχή. Ως τελικό βήμα, συγκρίνονται οι παροχές που προέκυψαν με τις αρχικές, και αν είναι παραπλήσιες η διαδικασία έχει λήξει. Αν δεν υπάρξει σύγκλιση των αποτελεσμάτων, επαναλαμβάνεται η παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της κάθε βελτιστοποίησης ως αρχικά δεδομένα για την επόμενη, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στην παρούσα εργασία η τυχαία δεκάδα αριθμών που επιλέχθηκε για τις παροχές άντλησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1 η οποία διαταράσσεται κατά 2000 σε κάθε βήμα ξεχωριστά.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	1000	3000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
G2	800	800	2800	800	800	800	800	800	800	800	800
G3	1300	1300	1300	3300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
G4	500	500	500	500	2500	500	500	500	500	500	500
G5	300	300	300	300	300	2300	300	300	300	300	300
G6	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	2000	2000	2000	2000
G7	600	600	600	600	600	600	600	2600	600	600	600
G8	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	3700	1700	1700
G9	200	200	200	200	200	200	200	200	200	2200	200
G10	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	3100

Πίνακας 5.1 – Παροχές άντλησης 1^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.477	536.424	536.419	536.415	536.418	536.410	536.414	536.425	536.424	536.446	536.461
539.135	539.083	539.079	539.075	539.076	539.069	539.065	539.076	539.073	539.096	539.114
536.938	536.897	536.894	536.890	536.889	536.885	536.872	536.881	536.873	536.894	536.912
529.838	529.811	529.809	529.806	529.805	529.802	529.786	529.790	529.779	529.794	529.808
528.047	528.026	528.025	528.022	528.021	528.019	528.000	528.001	527.986	527.999	528.009
516.577	516.568	516.568	516.566	516.565	516.565	516.551	516.549	516.536	516.542	516.540
529.694	529.681	529.681	529.679	529.678	529.678	529.650	529.643	529.615	529.619	529.577
529.692	529.681	529.681	529.679	529.678	529.678	529.649	529.641	529.611	529.611	529.496
529.858	529.848	529.848	529.846	529.845	529.845	529.816	529.808	529.777	529.776	529.630

Πίνακας 5.2 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 1^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000267	-0.0000290	-0.0000309	-0.0000296	-0.0000335	-0.0000315	-0.0000262	-0.0000265	-0.0000156	-0.0000078
-0.0000256	-0.0000276	-0.0000300	-0.0000294	-0.0000329	-0.0000346	-0.0000293	-0.0000308	-0.0000195	-0.0000102
-0.0000204	-0.0000219	-0.0000242	-0.0000244	-0.0000267	-0.0000328	-0.0000288	-0.0000325	-0.0000223	-0.0000130
-0.0000134	-0.0000143	-0.0000160	-0.0000166	-0.0000178	-0.0000258	-0.0000238	-0.0000295	-0.0000218	-0.0000148
-0.0000104	-0.0000110	-0.0000124	-0.0000131	-0.0000139	-0.0000236	-0.0000230	-0.0000307	-0.0000242	-0.0000190
-0.0000045	-0.0000047	-0.0000053	-0.0000058	-0.0000060	-0.0000131	-0.0000139	-0.0000205	-0.0000177	-0.0000186
-0.0000062	-0.0000063	-0.0000072	-0.0000081	-0.0000080	-0.0000221	-0.0000253	-0.0000396	-0.0000374	-0.0000586
-0.0000055	-0.0000056	-0.0000063	-0.0000072	-0.0000070	-0.0000213	-0.0000254	-0.0000405	-0.0000404	-0.0000978
-0.0000054	-0.0000055	-0.0000062	-0.0000070	-0.0000068	-0.0000212	-0.0000254	-0.0000408	-0.0000412	-0.0001140

Πίνακας 5.3 – Πίνακας απόκρισης Α για την 1^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 20.0036 \\ 22.6551 \\ 20.4646 \\ 13.3445 \\ 11.5501 \\ 0.08602 \\ 13.1975 \\ 13.2015 \\ 13.3596 \end{bmatrix}$

Η εισαγωγή των δεδομένων στο Matlab έγινε ως εξής:

```
f=[-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1];
A=[-0.0000267 -0.0000290 -0.0000309 -0.0000296 -0.0000335 -0.0000315 -0.0000262 -0.0000265 -0.0000156 -0.0000078
-0.0000256 -0.0000276 -0.0000300 -0.0000294 -0.0000329 -0.0000346 -0.0000293 -0.0000308 -0.0000195 -0.0000102
-0.0000204 -0.0000219 -0.0000242 -0.0000244 -0.0000267 -0.0000328 -0.0000288 -0.0000325 -0.0000223 -0.0000130
-0.0000134 -0.0000143 -0.0000160 -0.0000166 -0.0000178 -0.0000258 -0.0000238 -0.0000295 -0.0000218 -0.0000148
-0.0000104 -0.0000110 -0.0000124 -0.0000131 -0.0000139 -0.0000236 -0.0000230 -0.0000307 -0.0000242 -0.0000190
-0.0000045 -0.0000047 -0.0000053 -0.0000058 -0.0000060 -0.0000131 -0.0000139 -0.0000205 -0.0000177 -0.0000186
-0.0000062 -0.0000063 -0.0000072 -0.0000081 -0.0000080 -0.0000221 -0.0000253 -0.0000396 -0.0000374 -0.0000586
-0.0000055 -0.0000056 -0.0000063 -0.0000072 -0.0000070 -0.0000213 -0.0000254 -0.0000405 -0.0000404 -0.0000978
-0.0000054 -0.0000055 -0.0000062 -0.0000070 -0.0000068 -0.0000212 -0.0000254 -0.0000408 -0.0000412 -0.0001140];
b=[20.0036;22.6551;20.4647;13.3446;11.5501;0.0860;13.1975;13.2015;13.3596];
lb=zeros(10,1);
ub=[2772;1584;2772;2772;1584;2772;1188;2772;1056;1584];
[q,fval]=linprog(f,-A,b,[],[],lb,ub);
q
Q=sum(q)
```

Εικόνα 5.2 – Στιγμιότυπο οθόνης από την εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα Matlab

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q0	Q 1 ^{ης} Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	1000	2772	177.20%
G2	800	1584	98.00%
G3	1300	2772	113.23%
G4	500	2772	454.40%
G5	300	1584	428.00%
G6	2000	1971.6	-1.42%
G7	600	0	-100.00%
G8	1700	0	-100.00%
G9	200	0	-100.00%
G10	1100	0	-100.00%
Συνολικά	9500	13455.6	41.64%

Πίνακας 5.4 – Αποτελέσματα 1^{ης} βελτιστοποίησης

Παρατηρείται ότι η απόκλιση είναι μεγάλη μεταξύ των αρχικών τιμών και των αποτελεσμάτων, οπότε ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει και χρειάζεται να γίνει νέα επανάληψη. Στην δεύτερη επανάληψη θα χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές τιμές παροχών άντλησης τα αποτελέσματα της πρώτης.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	1584	1584	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	1971.6	1971.6	1971.6	1971.6	1971.6	1971.6	3971.6	1971.6	1971.6	1971.6	1971.6
G7	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
G8	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0
G9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0
G10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000

Πίνακας 5.5 – Παροχές άντλησης 2^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.226	536.184	536.179	536.176	536.178	536.160	536.179	536.185	536.189	536.193	536.204
538.905	538.865	538.861	538.856	538.857	538.841	538.852	538.857	538.860	538.865	538.878
536.772	536.739	536.737	536.732	536.731	536.720	536.720	536.723	536.721	536.727	536.740
529.751	529.729	529.727	529.724	529.723	529.716	529.709	529.708	529.702	529.707	529.715
528.003	527.986	527.985	527.982	527.980	527.976	527.965	527.961	527.951	527.954	527.959
516.585	516.577	516.577	516.576	516.575	516.574	516.564	516.559	516.549	516.550	516.545
529.771	529.759	529.759	529.757	529.755	529.756	529.734	529.721	529.700	529.696	529.647
529.826	529.815	529.814	529.813	529.811	529.813	529.791	529.775	529.753	529.745	529.623
530.013	530.002	530.001	530.000	529.999	530.000	529.978	529.962	529.939	529.930	529.777

Πίνακας 5.6 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 2^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000208	-0.0000231	-0.0000251	-0.0000237	-0.0000327	-0.0000234	-0.0000206	-0.0000184	-0.0000161	-0.0000107
-0.0000202	-0.0000222	-0.0000246	-0.0000241	-0.0000321	-0.0000266	-0.0000240	-0.0000226	-0.0000199	-0.0000135
-0.0000163	-0.0000177	-0.0000201	-0.0000203	-0.0000260	-0.0000260	-0.0000247	-0.0000255	-0.0000226	-0.0000162
-0.0000109	-0.0000118	-0.0000135	-0.0000140	-0.0000172	-0.0000208	-0.0000213	-0.0000243	-0.0000221	-0.0000176
-0.0000087	-0.0000093	-0.0000107	-0.0000114	-0.0000133	-0.0000193	-0.0000212	-0.0000262	-0.0000244	-0.0000218
-0.0000040	-0.0000042	-0.0000048	-0.0000053	-0.0000056	-0.0000108	-0.0000133	-0.0000181	-0.0000178	-0.0000204
-0.0000059	-0.0000061	-0.0000070	-0.0000079	-0.0000074	-0.0000183	-0.0000249	-0.0000356	-0.0000374	-0.0000621
-0.0000055	-0.0000056	-0.0000063	-0.0000071	-0.0000063	-0.0000175	-0.0000252	-0.0000364	-0.0000404	-0.0001015
-0.0000055	-0.0000055	-0.0000062	-0.0000070	-0.0000061	-0.0000173	-0.0000253	-0.0000366	-0.0000412	-0.0001178

Πίνακας 5.7 – Πίνακας απόκρισης Α για την 2^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 19.7833 \\ 22.4370 \\ 20.3172 \\ 13.2811 \\ 11.5169 \\ 0.09324 \\ 13.2707 \\ 13.3256 \\ 13.5125 \end{bmatrix}$

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q'0	Q 2 ^{ης} Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	2772	2772	0.00%
G2	1584	1584	0.00%
G3	2772	2772	0.00%
G4	2772	2772	0.00%
G5	1584	1584	0.00%
G6	1971.6	2772	40.60%
G7	0	654.4	-
G8	0	0	0.00%
G9	0	0	0.00%
G10	0	0	0.00%
Συνολικά	13455.6	14910.4	10.81%

Πίνακας 5.8 – Αποτελέσματα 2^{ης} βελτιστοποίησης

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει ούτε στην δεύτερη βελτιστοποίηση και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία. Ομοίως με την πρώτη επανάληψη, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της 2^{ης} βελτιστοποίησης σαν αρχικά δεδομένα για την 3^η βελτιστοποίηση.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	1584	1584	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	2772	2772	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772
G7	654.4	654.4	654.4	654.4	654.4	654.4	654.4	2654.4	654.4	654.4	654.4
G8	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0
G9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0
G10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000

Πίνακας 5.9 – Παροχές άντλησης 3^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.193	536.143	536.138	536.134	536.137	536.129	536.148	536.153	536.153	536.157	536.173
538.868	538.820	538.816	538.811	538.812	538.805	538.816	538.821	538.818	538.823	538.842
536.735	536.697	536.694	536.689	536.689	536.684	536.684	536.686	536.679	536.685	536.703
529.720	529.695	529.694	529.690	529.689	529.687	529.679	529.678	529.667	529.671	529.685
527.974	527.955	527.954	527.951	527.950	527.948	527.936	527.932	527.917	527.920	527.931
516.568	516.560	516.560	516.558	516.557	516.557	516.547	516.542	516.529	516.529	516.528
529.740	529.729	529.729	529.727	529.726	529.726	529.704	529.690	529.662	529.659	529.616
529.795	529.786	529.786	529.785	529.783	529.783	529.761	529.745	529.716	529.708	529.593
529.982	529.974	529.973	529.972	529.970	529.971	529.949	529.932	529.902	529.893	529.747

Πίνακας 5.10 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 3^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000253	-0.0000276	-0.0000295	-0.0000282	-0.0000322	-0.0000228	-0.0000203	-0.0000205	-0.0000182	-0.0000104
-0.0000242	-0.0000262	-0.0000286	-0.0000281	-0.0000315	-0.0000260	-0.0000237	-0.0000251	-0.0000224	-0.0000132
-0.0000191	-0.0000206	-0.0000229	-0.0000231	-0.0000255	-0.0000255	-0.0000244	-0.0000280	-0.0000252	-0.0000160
-0.0000124	-0.0000132	-0.0000150	-0.0000155	-0.0000168	-0.0000204	-0.0000211	-0.0000266	-0.0000244	-0.0000174
-0.0000095	-0.0000100	-0.0000115	-0.0000122	-0.0000129	-0.0000189	-0.0000210	-0.0000286	-0.0000268	-0.0000216
-0.0000040	-0.0000041	-0.0000048	-0.0000053	-0.0000054	-0.0000106	-0.0000132	-0.0000197	-0.0000194	-0.0000203
-0.0000052	-0.0000054	-0.0000063	-0.0000072	-0.0000071	-0.0000180	-0.0000247	-0.0000388	-0.0000406	-0.0000619
-0.0000045	-0.0000046	-0.0000053	-0.0000062	-0.0000060	-0.0000171	-0.0000250	-0.0000399	-0.0000439	-0.0001014
-0.0000044	-0.0000045	-0.0000052	-0.0000060	-0.0000058	-0.0000169	-0.0000251	-0.0000402	-0.0000448	-0.0001177

Πίνακας 5.11 – Πίνακας απόκρισης Α για την 3^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 19.7833 \\ 22.4370 \\ 20.3172 \\ 13.2811 \\ 11.5169 \\ 0.09324 \\ 13.2707 \\ 13.3256 \\ 13.5125 \end{bmatrix}$

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q'0	Q 3 ^{ης} Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	2772	2772	0.00%
G2	1584	1584	0.00%
G3	2772	2772	0.00%
G4	2772	2772	0.00%
G5	1584	1584	0.00%
G6	2772	2346.9	-15.34%
G7	654.4	0	-
G8	0	0	0.00%
G9	0	0	0.00%
G10	0	0	0.00%
Συνολικά	14910.4	13830.9	-7.24%

Πίνακας 5.12 – Αποτελέσματα 3^{ης} βελτιστοποίησης

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει ούτε στην τέταρτη εφαρμογή της μεθόδου Simplex και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία. Παράλληλα παρατηρείται ότι υπάρχει μια μείωση της συνολικής παροχής της τάξης 7.24%. Ομοίως με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της 4^{ης} βελτιστοποίησης σαν αρχικά δεδομένα για την 5^η βελτιστοποίηση.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	1584	1584	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	2346.9	2346.9	2346.9	2346.9	2346.9	2346.9	4346.9	2346.9	2346.9	2346.9	2346.9
G7	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
G8	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0
G9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0
G10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000

Πίνακας 5.13 – Παροχές άντλησης 4^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.212	536.176	536.162	536.158	536.171	536.148	536.166	536.177	536.181	536.186	536.197
538.890	538.856	538.843	538.838	538.848	538.827	538.838	538.848	538.851	538.856	538.869
536.757	536.731	536.721	536.717	536.723	536.706	536.706	536.714	536.713	536.718	536.731
529.738	529.722	529.717	529.713	529.716	529.705	529.697	529.701	529.695	529.700	529.709
527.991	527.980	527.976	527.973	527.974	527.965	527.953	527.955	527.945	527.948	527.953
516.578	516.574	516.573	516.572	516.571	516.567	516.557	516.555	516.546	516.546	516.541
529.758	529.753	529.754	529.752	529.749	529.744	529.722	529.715	529.694	529.690	529.641
529.812	529.810	529.811	529.809	529.806	529.800	529.778	529.770	529.748	529.740	529.617
529.999	529.997	529.998	529.997	529.994	529.988	529.965	529.957	529.934	529.925	529.772

Πίνακας 5.14 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 4^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000179	-0.0000252	-0.0000271	-0.0000208	-0.0000322	-0.0000228	-0.0000176	-0.0000154	-0.0000132	-0.0000077
-0.0000169	-0.0000235	-0.0000259	-0.0000208	-0.0000315	-0.0000260	-0.0000207	-0.0000194	-0.0000166	-0.0000102
-0.0000130	-0.0000177	-0.0000201	-0.0000169	-0.0000255	-0.0000254	-0.0000214	-0.0000221	-0.0000193	-0.0000129
-0.0000080	-0.0000107	-0.0000125	-0.0000111	-0.0000168	-0.0000204	-0.0000184	-0.0000214	-0.0000191	-0.0000147
-0.0000057	-0.0000075	-0.0000089	-0.0000085	-0.0000129	-0.0000189	-0.0000182	-0.0000232	-0.0000214	-0.0000189
-0.0000021	-0.0000024	-0.0000031	-0.0000034	-0.0000054	-0.0000106	-0.0000114	-0.0000162	-0.0000159	-0.0000184
-0.0000022	-0.0000020	-0.0000029	-0.0000041	-0.0000071	-0.0000180	-0.0000211	-0.0000318	-0.0000337	-0.0000583
-0.0000015	-0.0000009	-0.0000017	-0.0000031	-0.0000060	-0.0000171	-0.0000211	-0.0000323	-0.0000363	-0.0000975
-0.0000013	-0.0000007	-0.0000014	-0.0000029	-0.0000058	-0.0000169	-0.0000211	-0.0000324	-0.0000370	-0.0001137

Πίνακας 5.15 – Πίνακας απόκρισης Α για την 4^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 19.7616 \\ 22.4165 \\ 20.2927 \\ 13.2603 \\ 11.5002 \\ 0.08304 \\ 13.2577 \\ 13.3124 \\ 13.4993 \end{bmatrix}$

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q'0	Q 4 ^{ης} Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	2772	2772	0.00%
G2	1584	1584	0.00%
G3	2772	2772	0.00%
G4	2772	2772	0.00%
G5	1584	1584	0.00%
G6	2346.9	2772	-18.11%
G7	0	1188	-
G8	0	0	0.00%
G9	0	246.5	-
G10	0	0	0.00%
Συνολικά	14910.4	13830.9	13.45%

Πίνακας 5.16 – Αποτελέσματα 4^{ης} βελτιστοποίησης

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παροχών της τρίτης και τέταρτης βελτιστοποίησης, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία. Ομοίως με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της 4^{ης} βελτιστοποίησης σαν αρχικά δεδομένα για την 5^η βελτιστοποίηση.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	1584	1584	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	2772	2772	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772
G7	1188	1188	1188	1188	1188	1188	1188	3188	1188	1188	1188
G8	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0
G9	246.5	246.5	246.5	246.5	246.5	246.5	246.5	246.5	246.5	2246.5	246.5
G10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000

Πίνακας 5.17 – Παροχές άντλησης 5^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.178	536.127	536.122	536.119	536.116	536.108	536.127	536.122	536.127	536.131	536.142
538.850	538.801	538.797	538.792	538.787	538.781	538.791	538.785	538.788	538.793	538.806
536.716	536.677	536.674	536.670	536.663	536.658	536.658	536.650	536.649	536.654	536.667
529.703	529.677	529.676	529.673	529.666	529.664	529.656	529.644	529.638	529.643	529.651
527.956	527.936	527.935	527.933	527.926	527.924	527.912	527.899	527.889	527.893	527.898
516.556	516.548	516.548	516.546	516.542	516.541	516.531	516.521	516.512	516.512	516.507
529.716	529.705	529.705	529.704	529.695	529.695	529.673	529.654	529.633	529.629	529.580
529.771	529.761	529.761	529.760	529.751	529.751	529.729	529.708	529.686	529.678	529.556
529.957	529.948	529.948	529.947	529.938	529.938	529.916	529.895	529.872	529.863	529.710

Πίνακας 5.18 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 5^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000255	-0.0000278	-0.0000295	-0.0000309	-0.0000348	-0.0000255	-0.0000279	-0.0000257	-0.0000234	-0.0000180
-0.0000244	-0.0000264	-0.0000286	-0.0000311	-0.0000345	-0.0000290	-0.0000324	-0.0000310	-0.0000282	-0.0000218
-0.0000194	-0.0000208	-0.0000229	-0.0000262	-0.0000285	-0.0000285	-0.0000326	-0.0000334	-0.0000305	-0.0000241
-0.0000126	-0.0000134	-0.0000150	-0.0000182	-0.0000195	-0.0000231	-0.0000292	-0.0000322	-0.0000300	-0.0000255
-0.0000096	-0.0000102	-0.0000115	-0.0000149	-0.0000157	-0.0000217	-0.0000283	-0.0000332	-0.0000315	-0.0000289
-0.0000040	-0.0000042	-0.0000048	-0.0000071	-0.0000072	-0.0000124	-0.0000173	-0.0000221	-0.0000218	-0.0000244
-0.0000054	-0.0000055	-0.0000063	-0.0000107	-0.0000106	-0.0000216	-0.0000310	-0.0000418	-0.0000436	-0.0000683
-0.0000047	-0.0000048	-0.0000053	-0.0000100	-0.0000098	-0.0000210	-0.0000312	-0.0000424	-0.0000464	-0.0001076
-0.0000046	-0.0000046	-0.0000051	-0.0000099	-0.0000097	-0.0000209	-0.0000313	-0.0000426	-0.0000472	-0.0001239

Πίνακας 5.19 – Πίνακας απόκρισης Α για την 5^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 19.7486 \\ 22.3882 \\ 20.2691 \\ 13.2375 \\ 11.4710 \\ 0.08918 \\ 13.2226 \\ 13.2706 \\ 13.4585 \end{bmatrix}$

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q'0	Q 5 ^{ης} Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	2772	2772	0.00%
G2	1584	1584	0.00%
G3	2772	2772	0.00%
G4	2772	2772	0.00%
G5	1584	1584	0.00%
G6	2772	2181	-21.32%
G7	1188	0	-
G8	0	0	0.00%
G9	246.5	0	-
G10	0	0	0.00%
Συνολικά	15690.5	13665	-12.91%

Πίνακας 5.20 – Αποτελέσματα 5^{ης} βελτιστοποίησης

Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει ούτε με την πέμπτη επανάληψη και χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία. Ομοίως με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της 5^{ης} βελτιστοποίησης σαν αρχικά δεδομένα για την 6^η βελτιστοποίηση.

Οι παροχές άντλησης και πως διαταράσσονται σε κάθε βήμα											
Πηγάδι	Q0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
G1	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	2772	2772	2772	4772	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	1584	1584	1584	1584	3584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	2181	2181	2181	2181	2181	2181	4181	2181	2181	2181	2181
G7	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0	0
G8	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0	0
G9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000	0
G10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000

Πίνακας 5.21 – Παροχές άντλησης 6^{ης} βελτιστοποίησης

Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν στα πηγάδια παρατήρησης										
H0	ΔQ1	ΔQ2	ΔQ3	ΔQ4	ΔQ5	ΔQ6	ΔQ7	ΔQ8	ΔQ9	ΔQ10
536.215	536.180	536.175	536.171	536.174	536.156	536.170	536.180	536.185	536.189	536.200
538.894	538.860	538.856	538.851	538.852	538.836	538.842	538.852	538.855	538.860	538.873
536.761	536.735	536.732	536.727	536.727	536.715	536.710	536.718	536.716	536.722	536.735
529.741	529.725	529.723	529.720	529.719	529.713	529.700	529.704	529.698	529.703	529.712
527.994	527.982	527.981	527.978	527.977	527.973	527.956	527.957	527.947	527.951	527.956
516.580	516.575	516.575	516.574	516.573	516.572	516.558	516.557	516.547	516.548	516.543
529.760	529.756	529.755	529.754	529.752	529.753	529.724	529.718	529.696	529.693	529.643
529.815	529.812	529.812	529.810	529.809	529.810	529.780	529.772	529.750	529.742	529.620
530.001	529.999	529.999	529.997	529.996	529.998	529.968	529.959	529.937	529.927	529.774

Πίνακας 5.22 – Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης 6^{ης} βελτιστοποίησης

Ο πίνακας απόκρισης Α προέκυψε:

$\theta H/\theta Q_1$	$\theta H/\theta Q_2$	$\theta H/\theta Q_3$	$\theta H/\theta Q_4$	$\theta H/\theta Q_5$	$\theta H/\theta Q_6$	$\theta H/\theta Q_7$	$\theta H/\theta Q_8$	$\theta H/\theta Q_9$	$\theta H/\theta Q_{10}$
-0.0000179	-0.0000202	-0.0000221	-0.0000208	-0.0000298	-0.0000228	-0.0000176	-0.0000154	-0.0000132	-0.0000077
-0.0000169	-0.0000189	-0.0000213	-0.0000208	-0.0000288	-0.0000260	-0.0000207	-0.0000194	-0.0000166	-0.0000102
-0.0000130	-0.0000144	-0.0000167	-0.0000169	-0.0000227	-0.0000254	-0.0000214	-0.0000221	-0.0000193	-0.0000129
-0.0000080	-0.0000088	-0.0000106	-0.0000111	-0.0000143	-0.0000204	-0.0000184	-0.0000214	-0.0000191	-0.0000147
-0.0000057	-0.0000063	-0.0000077	-0.0000085	-0.0000104	-0.0000189	-0.0000182	-0.0000232	-0.0000214	-0.0000189
-0.0000021	-0.0000022	-0.0000029	-0.0000034	-0.0000037	-0.0000106	-0.0000114	-0.0000162	-0.0000159	-0.0000184
-0.0000022	-0.0000023	-0.0000032	-0.0000041	-0.0000037	-0.0000180	-0.0000211	-0.0000318	-0.0000336	-0.0000583
-0.0000015	-0.0000015	-0.0000023	-0.0000031	-0.0000023	-0.0000171	-0.0000211	-0.0000323	-0.0000363	-0.0000975
-0.0000013	-0.0000014	-0.0000021	-0.0000029	-0.0000020	-0.0000169	-0.0000211	-0.0000324	-0.0000370	-0.0001137

Πίνακας 5.23 – Πίνακας απόκρισης Α για την 6^η βελτιστοποίηση

Και το διάνυσμα $b = \begin{bmatrix} 19.7650 \\ 22.2203 \\ 20.2565 \\ 13.2633 \\ 11.3329 \\ 0.05576 \\ 12.8609 \\ 13.1371 \\ 13.2016 \end{bmatrix}$

Τελικά, οι παροχές άντλησης που προκύπτουν παρουσιάζονται παρακάτω:

Πηγάδι	Q'0	Q 6ης Βελτιστοποίησης	% Μεταβολή
G1	2772	2772	0.000%
G2	1584	1584	0.000%
G3	2772	2772	0.000%
G4	2772	2772	0.000%
G5	1584	1584	0.000%
G6	2181	2181.2	0.009%
G7	0	0	0.000%
G8	0	0	0.000%
G9	0	0	0.000%
G10	0	0	0.000%
Συνολικά	13665	13665.2	0.001%

Πίνακας 5.24 – Αποτελέσματα 6^{ης} βελτιστοποίησης

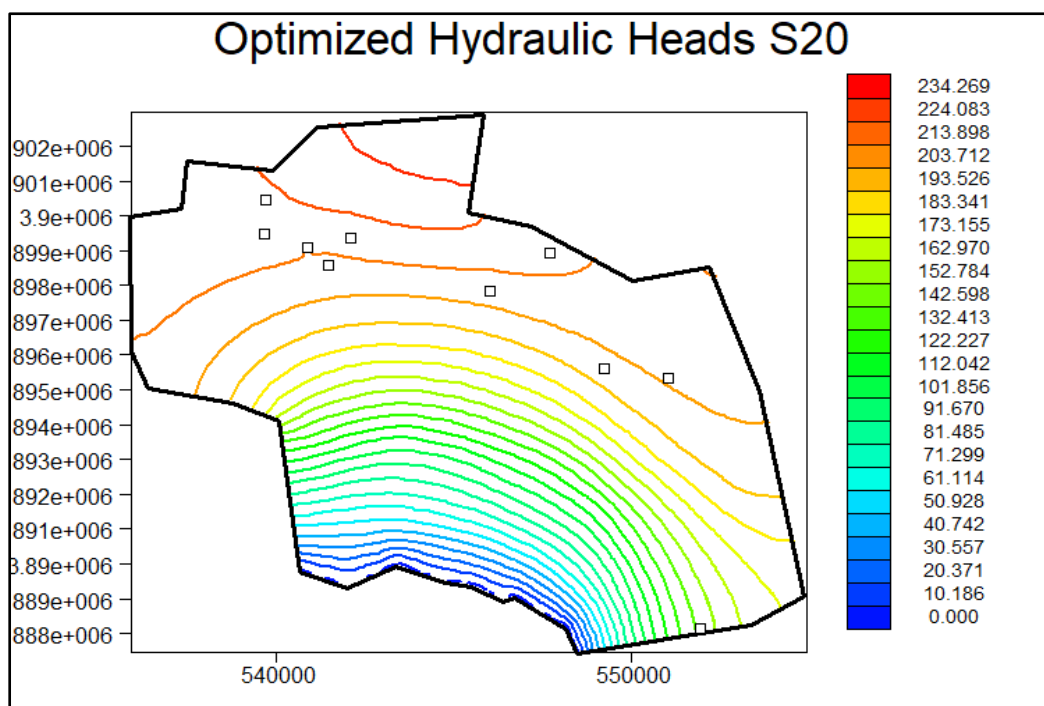
Τελικά, έπειτα από έξι επαναλήψεις ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει και δεν χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία. Το μη γραμμικό πρόβλημα έχει πλέον γραμμικοποιηθεί και σαν τελικό αποτέλεσμα προκύπτουν οι τιμές της παροχής άντλησης της έκτης βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.24. Τα αποτελέσματα όλων των επαναλήψεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πηγάδι	Q πραγματικό	Q0	Q 1ης βελτ.	Q 2ης βελτ.	Q 3ης βελτ.	Q 4ης βελτ.	Q 5ης βελτ.	Q 6ης βελτ.
G1	2772	1000	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G2	1584	800	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G3	2772	1300	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G4	2772	500	2772	2772	2772	2772	2772	2772
G5	1584	300	1584	1584	1584	1584	1584	1584
G6	2772	2000	1971.6	2772	2346.9	2772	2181	2181.2
G7	1188	600	0	654.4	0	1188	0	0
G8	2772	1700	0	0	0	0	0	0
G9	1056	200	0	0	0	246.5	0	0
G10	1584	1100	0	0	0	0	0	0
Συνολικά	20856	9500	13455.6	14910.4	13830.9	15690.5	13665	13665.2

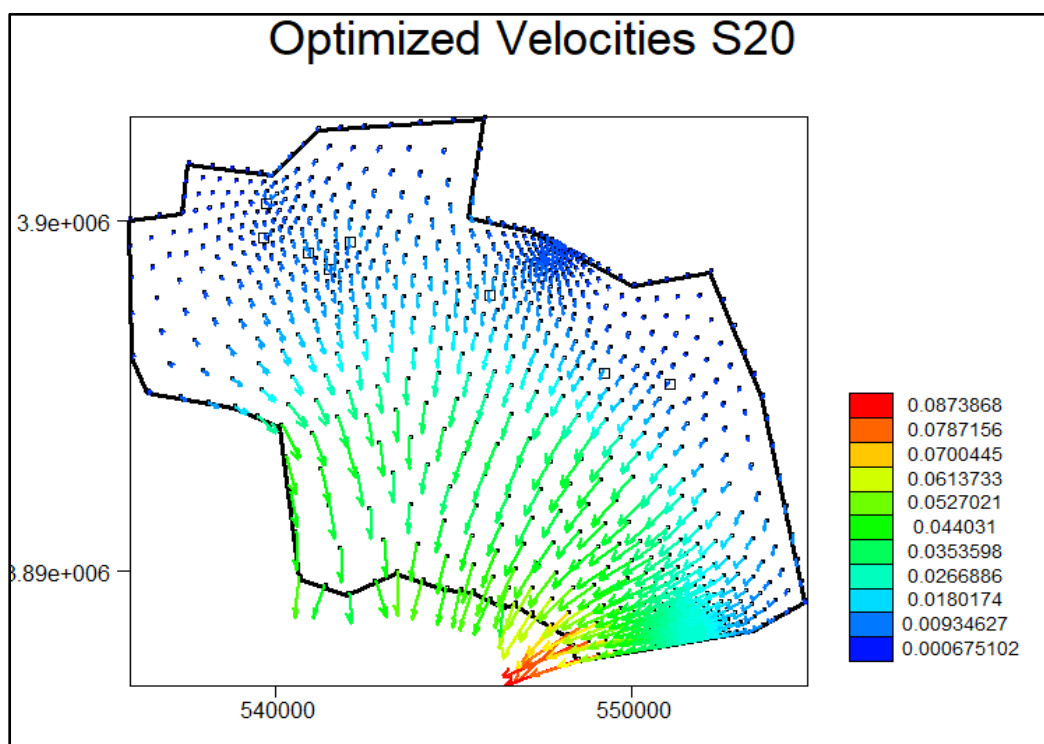
Πίνακας 5.25 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Γίνεται αντιληπτό ότι από τα πραγματικά δεδομένα, χρειάζονται να μείνουν κλειστές σχεδόν οι μισές γεωτρήσεις έτσι ώστε να μην επιδεινωθεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην περιοχή μελέτης.

Εισάγοντας τα δεδομένα των παροχών αυτών στο μοντέλο PTC προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 5.3 Βέλτιστες τιμές υδραυλικών υψών για την τελευταία περίοδο



Εικόνα 5.4 Βέλτιστες τιμές ταχύτητας ροής για την τελευταία περίοδο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ευρύτερη περιοχή της υδρογεωλογικής λεκάνης Κουρταλιώτη, που βρίσκεται στον νομό Ρεθύμνου, με σκοπό την αναχαίτηση του φαινομένου της υπαλμύρισης των υπογείων υδάτων. Για τον λόγο αυτό, αρχικά μοντελοποιήθηκε η περιοχή μελέτης μέσω του μοντέλου προσομοίωσης PTC, και έπειτα, χρησιμοποιώντας την μέθοδο Simplex, βελτιστοποιήθηκε η άντληση σε δέκα πηγάδια της περιοχής με σκοπό να μην επιδεινωθεί περεταίρω η εισχώρηση θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα.

Η περιοχή μελέτης, που υπάγεται στον δήμο Αγίου Βασιλείου, απαρτίζεται από πολλούς οικισμούς και αγροτικές περιοχές με την ανάγκη για νερό ολοένα να αυξάνεται κάθε χρόνο ειδικά σε περιόδους τουρισμού. Η ανάγκη για τόσο για ύδρευση όσο και για άρδευση των καλλιεργειών είναι μεγάλη και οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι με τα χρόνια δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στην ζήτηση αυτή. Μια σοβαρή επίπτωση της υπερεκμετάλλευσης των υπογείων υδάτων είναι το φαινόμενο της υπαλμύρισης, το οποίο περιγράφει την διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς με αποτέλεσμα να ρυπαίνεται το γλυκό νερό που περιέχουν.

Για την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PTC το οποίο έχει την δυνατότητα να προβλέπει τις μακροχρόνιες επιπτώσεις της άντλησης υπόγειου νερού. Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινά με την συλλογή και ψηφιοποίηση γεωγραφικών και υδρογεωλογικών δεδομένων. Παράλληλα, έγινε η εισαγωγή των δέκα πηγαδιών άντλησης που υπάρχουν στην περιοχή. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι δέκα χρόνια, τα οποία χωρίζονται σε είκοσι περιόδους, δύο για κάθε έτος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον δόθηκε στην εικοστή και τελευταία περίοδο του μοντέλου που αποτελεί ξηρή περίοδο διότι τότε εκτιμάται ότι η ανάγκη για ύδρευση θα είναι η μέγιστη.

Όσον αφορά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, σκοπός της είναι η σταδιακή μείωση της ζώνης υπαλμύρισης ελέγχοντας τις αντλούμενες ποσότητες νερού. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα μελετήθηκαν δέκα πηγάδια άντλησης της περιοχής και βελτιστοποιήθηκε ο ρυθμός άντλησης τους έτσι ώστε το υδραυλικό ύψος στους κόμβους παρατήρησης να μην ξεπερνά ένα συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος. Μέσω δοκιμών αποφάνθηκε ότι το μέγιστο υδραυλικό ύψος που μπορεί να εμφανιστεί στα πηγάδια παρατήρησης έτσι ώστε να μην παρατηρείται διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι τα 516.5 μέτρα. Για την υλοποίηση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε η μέθοδος Simplex μέσω του προγράμματος Matlab. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής είναι η εύρεση μιας λύσης που βελτιώνει την προηγούμενη μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Για την εφαρμογή της πρέπει να προσδιοριστούν οι περιορισμοί του προβλήματος και να κατασκευαστεί ο πίνακας απόκρισης A και το διάνυσμα b. Στο παρόν πρόβλημα επιλέχθηκε μια τυχαία αρχική δεκάδα παροχών άντλησης η οποία διαταράσσεται κατά 2000m³/d σε κάθε βήμα, και ταυτόχρονα καταγράφονται οι τιμές των υδραυλικών υψών που εμφανίστηκαν στα πηγάδια παρατήρησης.

Τελικά, η διαδικασία της βελτιστοποίησης σύγκλινε στο έκτο βήμα, με τις παροχές των πρώτων πέντε πηγαδιών να είναι οι μέγιστες δυνατές, η παροχή του έκτου πηγαδιού παρουσιάζει μια μείωση της τάξης 20% σε σχέση με την αρχική τιμή και τα τελευταία τέσσερα πηγάδια άντλησης να πρέπει να μείνουν μη ενεργά έτσι ώστε να μειωθεί σταδιακά η ζώνη της υπαλμύρισης. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωτρήσεις G1, G2, G3, G4, G3 αντλούν με ρυθμούς -2772, -1584, -2772, -2772 και -1584 αντίστοιχα ενώ η γεώτρηση G6 αντλεί με

ρυθμό -2081.2 αντί για -2772. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά, διότι οι γεωτρήσεις G7, G8, G9 και G10 βρίσκονται πλησιέστερα στο μέτωπο της υφαλμύρισης. Παράλληλα, παρατηρείται ότι η μείωση στους ρυθμούς άντλησης είναι αρκετά αισθητή με την συνολική παροχή να μειώνεται κατά 7190.8 m³/d σε σχέση με τις πραγματικές αντλήσεις. Γίνεται αντιληπτό ότι στις περιοχές που πλήττονται θα πρέπει να ληφθούν εναλλακτικές μέθοδοι για παροχή νερού είτε πρόκειται για αγροτική χρήση είτε για οικιακή. Προτείνεται να ανοιχθούν επιπλέον γεωτρήσεις στο βόρειο τμήμα της περιοχής για να καλυφθεί η ζήτηση για ύδρευση και ταυτόχρονα να εφαρμοστούν τεχνικές εξοικονόμησης νερού που προάγουν μια ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sohoulade, Clement & Djebou, Sohoulade & Singh, Vijay. (2016). Impact of climate change on the hydrologic cycle and implications for society. Environment and Social Psychology. 1. 10.18063/ESP.2016.01.002.
- [5] Safe Drinking Water Foundation, "Groundwater", <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/groundwater>, [07/2021]
- [7] European Academics Science Advisory Council, "Groundwater in the Member States of the European Union an assessment of current knowledge and future prospects – Country report for Greece"
- [8] Johnson, Teddy (2007). "Battling Seawater Intrusion in the Central & West Coast Basins" (PDF). Water Replenishment District of Southern California.
- [10] J. Bear et al., "Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods and Practices", Kluwer Academic Publishers, 1999 ISBN 0-7923-5573-3
- [19] Yangxiao Zhou, Wenpeng Li, "A review of regional groundwater flow modeling", Geoscience Frontiers, Volume 2, Issue 2, 2011, Pages 205-214, ISSN 1674-9871
- [20] George P. Karatzas, 2017, Developments on Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport, 3235-3243.
- [21] C. W. Fetter, 2000, Applied Hydrogeology Fourth Edition, ISBN-13: 978-0130882394
- [22] Babu D.K. et al, 1997, Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows, Princeton University
- [23] Matiatos, I., Varouchakis, E.A. & Papadopoulou, M.P, 2019, Performance Evaluation of Multiple Groundwater Flow and Nitrate Mass Transport Numerical Models. Environ Model Assess 24, 659–675

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2] Αλέξανδρος Μητάκης, 2018 , www.greenagenda.gr, «Ποσο απειλείται η Ελλάδα από μια κρίση νερού- Οι περιοχές υψηλού κινδύνου» [07/2021]
- [3] Πανεπιστημιακές σημειώσεις για το μάθημα «Ροή Υπογείων Υδάτων» Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
- [4] WSM Newsletter, Εθνικό Μέτσοβιο Πολυτεχνείο, «Greece: Range of circumstances and region analysis», 2^ο τεύχος, 2003
- [6] Στ. Γιαννόπουλος, Μ. Σπανοθύμνιου «Πρόβλεψη της ζήτησης νερού αστικής χρήσης», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- [9] Τρούσσα-Μάρτη Σοφία, Διπλωματική Εργασία, «Υφαλμύρωση Υπόγειων Υδροφορέων Νομού Χανίων», Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2009
- [11] Δήμος Αγίου Βασιλείου, «Γενική περιγραφή Δήμου Αγίου Βασιλείου», <https://www.agios-vasilios.gr/municipality.html>, [08/2021]

- [12] Δήμος Ρεθύμνης, «Ρεθεμνιώτικη Φύση» [08/2021], <https://www.rethymno.gr/city/flora-fauna>
- [13] Περιφέρεια Κρήτης, NATURA 200 Προστατευόμενες Περιοχές της Κρήτης, [08/2021] <https://natura2000.crete.gov.gr/index.php?id=20>
- [14] LIFE Natura2000 Value Crete, “Περιοχές Natura 2000 στην Κρήτη», <http://www.eco-value-crete.eu/el/natura-sites>, [08/2021]
- [15] Μιχαήλ Δ. Δερμιτζάκης, Χαρά Ντρίνια «Γεωλογικά Συμβάντα, Φαινόμενα και Παλαιοντολογικά Ευρήματα στην Ευρύτερη Περιοχή του Αγίου Νικολάου», 2010, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
- [16] Δέσποινα Γ. Αρχοντάκη, «Γεωηλεκτρική Διασκόπηση στο Φράγμα Τριών Ποταμών Ρεθύμνου», Διπλωματική Εργασία, 2006, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- [17] Ελευθέριος Κατσανικάκης, «Υδρογεωλογική Έρευνα Λεκάνης Κουρταλιώτη», Διπλωματική Εργασία, 2013, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
- [18] Ιωάννα Κ. Αγγέλη, «Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής της Ευρύτερης Περιοχής της Υδρογεωλογικής Λεκάνης Κουρταλιώτη – Επιπτώσεις Κλιματικής Αλλαγής», Μεταπτυχιακή Διατριβή, 2019, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- [24] Κατεράκης Στέφανος, Χανιά, 2005, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διαχείριση των Υπογείων Υδάτων με Χρήση Συνδυασμού Μέθοδων Προσομοίωσης Και Βελτιστοποίησης.