



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βέλτιστη Διαχείριση του Υδροφορέα της Αγυιάς Χανίων με τη χρήση
Γενετικού Αλγόριθμου**

ΣΤΥΛΙΑΝΟΥΔΑΚΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Εξεταστική Επιτροπή: Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων Καθηγητής)
 Νικολαΐδης Νικόλαος
 Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Αναπληρωματικός: Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βέλτιστη διαχείριση του υδροφορέα της Αγυιάς Χανίων με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου

Χριστίνα Στυλιανουδάκη

Εξεταστική Επιτροπή:	Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων Καθηγητής) Νικολαΐδης Νικόλαος Παρανυχιανάκης Νικόλαος
Αναπληρωματικός:	Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι αυξημένες ανθρωπογενείς δραστηριότητες των τελευταίων ετών ασκούν τεράστιες πιέσεις στα υπόγεια ύδατα, που αποτελούν για πολλές περιοχές τη μόνη πηγή εξασφάλισης νερού. Για την αποφυγή της περαιτέρω υποβάθμισης των υπόγειων αποθεμάτων είναι αναγκαία η ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων που θα προάγουν την ορθή διαχείριση τους.

Στόχος της παρούσας μελέτης, είναι η διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα της Αγυιάς Χανίων με συνδυασμό μοντέλου προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Η περιοχή παρουσιάζει έντονη υδροφορία και τροφοδοτεί την Πόλη των Χανίων και τις γύρω περιοχές με νερό τόσο για ύδρευση όσο και για άρδευση. Μελετάται η διάνοιξη νέων γεωτρήσεων για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών κατά τη θερινή περίοδο, αναζητώντας τις βέλτιστες παροχές άντλησης χωρίς να προκαλείται μεγάλη πτώση στάθμης στον υδροφορέα.

Αρχικά, γίνεται προσπάθεια προσομοίωσης της υπόγειας ροής της περιοχής με χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου ροής υπόγειων υδάτων και μεταφοράς ρύπων, PTC (Princeton Transport Code) και επιχειρείται πρόβλεψη της μελλοντικής κατάστασης των υπόγειων υδάτων βάσει των καταγεγραμμένων πηγαδιών και του σημερινού ρυθμού άντλησης τους.

Στη συνέχεια, αναζητούνται οι βέλτιστες παροχές άντλησης με τη χρήση Γενετικού Αλγόριθμου, ενός στοχαστικού αλγόριθμου εμπνευσμένο από τη βιολογική εξέλιξη, που κρίνεται ικανός για την αντιμετώπιση μη γραμμικών προβλημάτων. Για τη βελτιστοποίηση αναπτύχθηκε ένας κώδικας που συνδέει το μοντέλο προσομοίωσης PTC με το περιβάλλον MATLAB, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως υπάρχει η δυνατότητα διάνοιξης νέων γεωτρήσεων για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής, χωρίς να προκαλείται σοβαρή ταπείνωση στον υδροφορέα.

Λέξεις Κλειδιά: Διαχείριση υπόγειου υδροφορέα, Μοντέλο Προσομοίωσης Υπόγειας ροής PTC, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Βελτιστοποίηση

ABSTRACT

In the last years, the increased manmade activities have a huge impact on the quality and quantity of the groundwater resources, which in many areas is the only source of water. In order to avoid further degradation, it is necessary to develop a strategic plan for a sustainable groundwater management.

The purpose of this study is the management of the aquifer in the area of Agia in Chania, using combined methods of simulation and optimization. The area of Agia has a rich stock of ground water capacity so the aquifer of Agia is the main source of water for the city of Chania and the nearby areas. However, the amount that is pumped is not enough to cover the increased needs in the summer, so it is crucial that new pumping wells will be placed. The scope is to cover the needs of the area for water supply but also ensure that the water level in the aquifer remains above a sustainable limit.

Firstly, in order to simulate and predict the flow of the groundwater, a three dimensional groundwater flow mathematical model is developed, the PTC (Princeton Transport Code), according to the existing rates of pumping.

After the simulation, the optimization takes place by using Genetic Algorithms which is a very capable method of solving non-linear problems. The operation of the Genetic Algorithms is based on the Evolution Theory. For the process, it is required to develop a code that connects the simulation model PTC to MATLAB, where the optimization occurs.

The given results showed that the aquifer is resistant to changes, so new pumping wells can be installed to prevent drought in the summer.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα που με ενδιέφερε, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την άψογη συνεργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Δόκου Ζωή για τις κατευθυντήριες γραμμές που μου έδωσε και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλους μου τους φίλους, χωρίς την ηθική και πρακτική υποστήριξη των οποίων, η διεκπεραίωση αυτής της εργασίας θα ήταν σίγουρα δυσκολότερη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη τους και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	10
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ.....	11
1.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	11
1.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	12
1.3 ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ.....	13
1.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	14
1.4.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	14
1.4.2 ΠΟΡΩΔΕΣ.....	14
1.4.3 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ.....	15
1.4.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ	17
1.4.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	17
1.4.6 ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ	18
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	19
2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	19
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	20
2.3 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	23
2.3.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	24
2.3.2 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ	24
2.3.3 ΥΓΡΑΣΙΑ	25
2.3.4 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ.....	25
2.3.5 ΑΝΕΜΟΙ.....	26
2.4 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	26
2.5 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	27
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	29
3.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE (PTC)	31
3.1.1 ΒΑΣΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ.....	31
3.1.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	33
3.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ONE.....	33
3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	34
3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	42
4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	49

4.1	ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	49
4.2	ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	53
4.2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ	53
4.2.2	Η ΘΕΩΡΙΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ	54
4.2.3	ΓΕΝΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	55
4.2.4	ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	56
4.2.5	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	57
4.2.6	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	58
4.3	ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟ MATLAB	59
4.4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	65
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	73
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	80
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό φαινομενικά είναι από τους πλέον σε αφθονία φυσικούς πόρους του πλανήτη, εάν ληφθεί υπ' όψιν το γεγονός ότι οι θάλασσες και οι ωκεανοί καλύπτουν το 70% της επιφάνειας του.

Η εικόνα αυτή όμως είναι παραπλανητική, καθώς αν εξαιρέσουμε το αλμυρό νερό που αποτελεί περίπου το 97,3% του συνολικού νερού, τους πάγους που βρίσκονται σε ποσοστό 2,1% και το νερό που βρίσκεται σε μορφή υδρατμών, υπολείπεται μόνο το 0,6% να είναι κατάλληλο προς χρήση, ενώ το 98% αυτού είναι αποθηκευμένο ή κινείται κάτω από το έδαφος. Επιπλέον, μεγάλο μέρος του υπόγειου νερού βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, καθιστώντας την άντληση δαπανηρή και μερικές φορές τη χρήση του επικίνδυνη λόγω της ενδεχομένης υψηλής συγκέντρωσης αλάτων.

Επιπρόσθετα τα τελευταία χρόνια οι υδατικοί πόροι υφίστανται ολοένα πιο έντονες πιέσεις, λόγω της αυξημένης ζήτησης για επαρκές σε ποσότητα και ποιότητα νερό, ενώ παράλληλα το πρόβλημα της ρύπανσης από αστικές, γεωργικές και βιομηχανικές χρήσεις διογκώνεται. Η κατάσταση αναμένεται να επιβαρυνθεί από την ενδεχόμενη μειωμένη βροχόπτωση που μπορεί να προκαλέσει η κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΟΗΕ 232.000.000 άνθρωποι από 26 χώρες του τρίτου κόσμου πλήττονται από λειψυδρία και αδυνατούν να καλύψουν βασικές καθημερινές ανάγκες σε νερό, ενώ 18 χώρες στην Αφρική και στην Ασία απειλούνται άμεσα διότι βρίσκονται σε κατάσταση οριακή από άποψη υδατικών αποθεμάτων. Εκτιμάται πως το 2025 το 1/3 του πλανήτη θα ζει σε καθεστώς λειψυδρίας ή θα κινδυνεύει άμεσα από αυτήν. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της Οδηγίας Πλαίσιο για τα νερά 200/60 έθεσε συγκεκριμένους στόχους και θέσπισε τις βάσεις για ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων ώστε να αποφευχθεί η περαιτέρω υποβάθμιση τους.

Το πρόβλημα στον ελλαδικό χώρο

Το πρόβλημα στην Ελλάδα εντοπίζεται κυρίως στην ποσότητα και όχι τόσο στην ποιότητα. Οι ιδιαιτερότητες των υδατικών πόρων που δημιουργούν πρόβλημα στη διαχείριση τους είναι η ανισοκατανομή των υδατικών αποθεμάτων και των επιφανειακών νερών λόγω γεωγραφικής ανομοιομορφίας, το πολύπλοκο ανάγλυφο της, η χρονική ανισορροπία προσφοράς - ζήτησης και τέλος τα άνυδρα νησιά και οι τεράστιες ακτογραμμές της χώρας.

Τα ποιοτικά προβλήματα που έχουν παρουσιαστεί οφείλονται κυρίως στην παρουσία νιτρικών που προέρχονται από τη χρήση φυτοφαρμάκων σε γεωργικές περιοχές. Επιπλέον, σημαντικά προβλήματα υποβάθμισης νερών αντιμετωπίζουν πολλά νησιά και η ανατολική Κρήτη εξ' αιτίας της διείσδυσης θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Ο νομός Χανίων και ιδιαίτερα η περιοχή μελέτης αναμένεται να αντιμετωπίσει προβλήματα υφαλμύρισης λόγω της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων αποθεμάτων νερού.

Στην περιοχή της Αγυιάς Χανίων βρίσκονται οι πλείστες των γεωτρήσεων που τροφοδοτούν την πόλη των Χανίων και τις γύρω περιοχές με νερό. Δεν επαρκούν όμως για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών, ειδικά κατά τους θερινούς μήνες. Οι

εντατικές αντλήσεις που απαιτούνται και ο κώνος ταπείνωσης που δημιουργείται από την πτώση στάθμης των υπόγειων νερών ενδέχεται να έχουν ως αποτέλεσμα ποικίλες επιπτώσεις στο υδατικό περιβάλλον της περιοχής και της ευρύτερης υδρολογικής λεκάνης.

Είναι λοιπόν σαφές πως είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός σχεδίου ασφαλούς διαχείρισης των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής της Αγυιάς, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της έντονης υδροφορίας της και λόγω της λίμνης της Αγυιάς που είναι ενταγμένη στο Δίκτυο Προστατευόμενων Βιοτόπων Natura 2000.

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης - διάνοιξης οκτώ νέων γεωτρήσεων στην περιοχή Πηγών Αγυιάς Χανίων.

Αρχικά γίνεται προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης με χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) βάσει των καταγεγραμμένων δημοτικών πηγαδιών και του ρυθμού άντλησης τους. Η προσομοίωση βασίζεται στη Διπλωματική Εργασία της Ευδοκίας Ταπόγλου με θέμα «Διαχείριση υπόγειου υδροφορέα με χρήση Μοντέλου 3-D στην ευρύτερη Περιοχή Πηγών Αγυιάς Χανίων» (2010).

Έπειτα επιχειρείται πρόβλεψη της μελλοντικής ροής και στάθμης του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής μελέτης μέχρι το έτος 2019. Επιλέγονται θέσεις για τη διάνοιξη των νέων γεωτρήσεων και με χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγόριθμων μέσω του περιβάλλοντος MATLAB αναζητούνται οι βέλτιστες παροχές άντλησης.

Σκοπός είναι να καλύπτονται οι αρδευτικές και υδρευτικές ανάγκες της περιοχής, χωρίς όμως να προκαλείται σοβαρή ταπείνωση του υδροφορέα. Συγκεκριμένα η μέγιστη επιτρεπτή πτώση στα πηγάδια παρατήρησης είναι το 1m.

Μελετάται επίσης η περίπτωση διάνοιξης έξι γεωτρήσεων αντί για οκτώ με την ίδια συνολική παροχή.

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

1.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Για τη μελέτη των υπόγειων νερών είναι απαραίτητη μια σφαιρική εξέταση του θέματος σε συσχετισμό με τον υδρολογικό κύκλο.

Ο κύκλος του νερού, γνωστός ως υδρολογικός κύκλος, είναι η συνεχής ανακύκλωση του νερού μέσα στην ατμόσφαιρα και στην υδρόσφαιρα. Υπεύθυνη για το συνεχές της κυκλικής αυτής διαδικασίας είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει το νερό της θάλασσας, των λιμνών και των ποταμιών και προκαλεί εξάτμιση μέρους αυτού. Το νερό αυτό ανυψώνεται στον αέρα με τη μορφή υδρατμών, ενώ υδρατμοί δημιουργούνται και από την διαπνοή των φυτών. Η συνδυασμένη δράση της εξάτμισης και της διαπνοής αναφέρεται ως εξατμισοδιαπνοή, καθώς σε μετρήσεις πεδίου είναι δύσκολο να υπολογιστούν χωριστά. Ένα μικρό μέρος των υδρατμών της ατμόσφαιρας προέρχεται και από την εξάχνωση, δηλαδή την απευθείας μετατροπή μορίων νερού από τη στερεή στην αέρια μορφή.

Ανοδικά ρεύματα αέρα ανυψώνουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν και οι χαμηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση των υδρατμών και τη δημιουργία νεφών. Στη συνέχεια το νερό επιστρέφει στη γη μέσω των κατακρημνίσεων, είτε σε υγρή μορφή (βροχή), είτε σε στερεή (χιόνι, χαλάζι), στους ωκεανούς ή στο έδαφος. Τμήμα του νερού που θα επιστρέψει στο έδαφος οδηγείται μέσω της επιφανειακής ροής στους τελικούς αποδέκτες (λίμνες, θάλασσες), ένα μέρος του προσλαμβάνεται από τις ρίζες των φυτών και το υπόλοιπο διηθείται εμπλουτίζοντας τα υπόγεια νερά.

Το ισοζύγιο που αντιπροσωπεύει τον υδρολογικό κύκλο δίδεται από τη σχέση 1.1.

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

Όπου :

P: βροχόπτωση

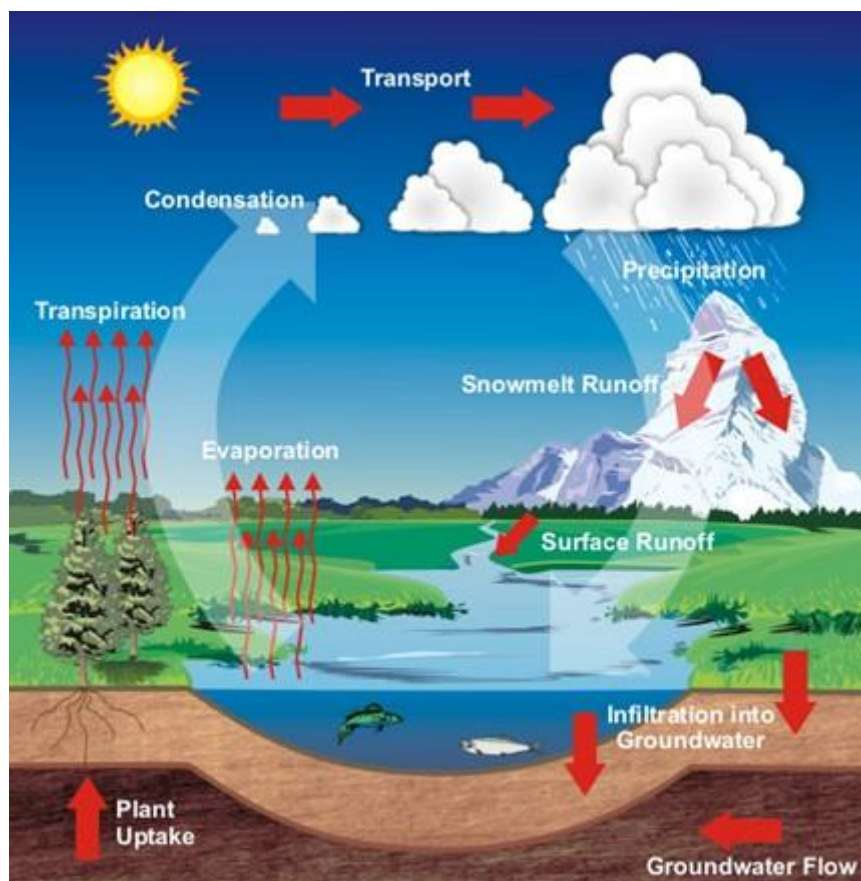
R: επιφανειακή απορροή

G: υπόγεια ροή

E: εξάτμιση

T: διαπνοή

ΔS: μεταβολή ρυθμού αποθήκευσης νερού



Εικόνα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: Office of Water Prediction, <http://water.noaa.gov/>)

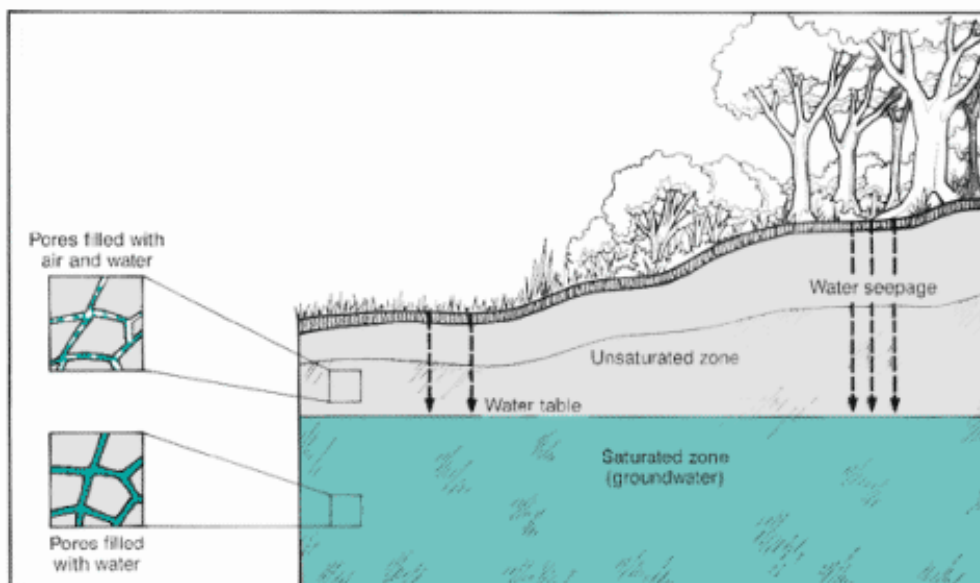
1.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Ως υπόγειο νερό ορίζεται το νερό που βρίσκεται στους εδαφικούς πόρους και κινείται υπογείως.

Με την κίνηση του νερού προς το υπέδαφος δημιουργούνται δύο ζώνες:

- Η Κορεσμένη, στην οποία το νερό καταλαμβάνει το σύνολο των εδαφικών πόρων και
- Η Ακόρεστη, όπου το νερό καταλαμβάνει μέρος των εδαφικών πόρων, ενώ οι υπόλοιποι πληρούνται από αέρα.

Η Ακόρεστη ζώνη διακρίνεται στη ζώνη εδαφικού ύδατος – από την εδαφική επιφάνεια ως το τέλος του ριζικού συστήματος– και στη ζώνη τριχοειδών φαινομένων – από τον υδροφόρο ορίζοντα ως το όριο που παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα (Καρατζάς Γ.,2003).



Εικόνα 1.2: Ακόρεστη-Κορεσμένη ζώνη

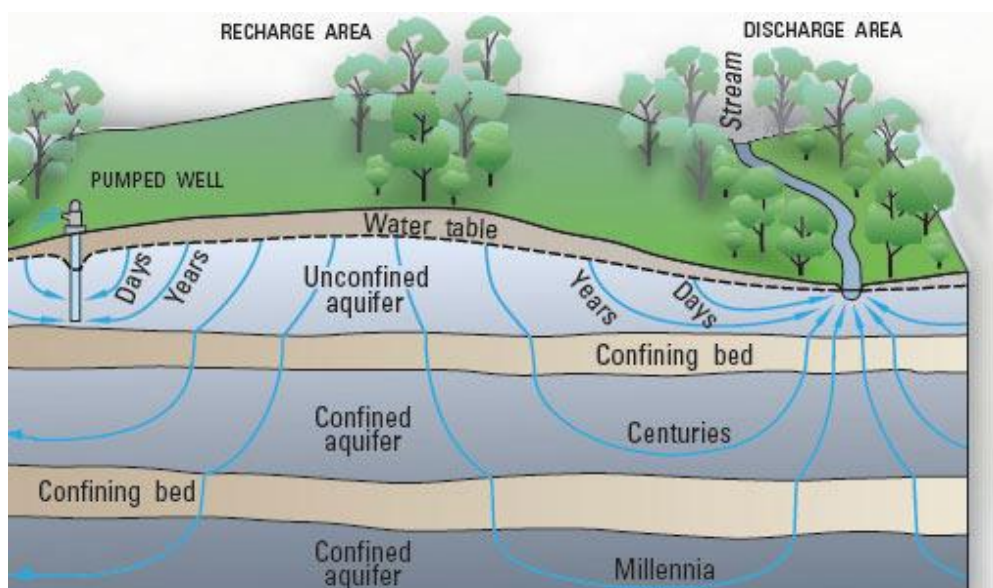
(http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm)

1.3 ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Ως υδροφορέας χαρακτηρίζεται ένας γεωλογικός σχηματισμός που επιτρέπει τη διέλευση και αποθήκευση νερού μέσα στη μάζα του.

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

Στον ελεύθερο υδροφορέα η ανώτερη επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, ενώ στον περιορισμένο το νερό βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια του από αδιαπέρατα στρώματα (Καρατζάς Γ.,2003).



Εικόνα 1.3: Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφορέας (Πηγή: Kentucky Department for Environmental Protection, (<https://kyocp.wordpress.com/2012/04/25/groundwater/>)).

1.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

1.4.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρουν και η οποία -ανά μονάδα όγκου- ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής.

Πρακτικά, η ενέργεια αυτή (H) ανά μονάδα βάρους (ή υδραυλικό φορτίο) είναι ίση με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ και του φορτίου ύψους (ή υψομετρικό ή θέσης), της απόστασης δηλαδή από το επίπεδο αναφοράς z:

$$H = \left(\frac{P}{\gamma}\right) + z \quad (1.2)$$

Όπου:

P= η υδροστατική πίεση [M/L^2] και

γ = το ειδικό βάρος του νερού [$M/(T^2 \cdot L^2)$], ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Σε γεωτρήσεις σε ελεύθερο υδροφορέα το υδραυλικό ύψος ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού. Αντίθετα σε γεωτρήσεις σε περιορισμένο υδροφορέα το υδραυλικό ύψος είναι το υψόμετρο που θα έφτανε το νερό σε περίπτωση που ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν ακόμα και ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους (Καββαδάς Μ, 2007).

1.4.2 ΠΟΡΩΔΕΣ

Το πορώδες (Porosity) είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και τα οποία επιτρέπουν τη ροή του ρευστού διαμέσου αυτών. Εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_K) προς τον συνολικό όγκο του δείγματος ($V_{ολ}$):

$$n = \frac{V_K}{V_{ολ}} \quad (1.3)$$

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές πορώδους για διάφορα υλικά.

Πίνακας 1.1: Τιμές πορώδους (Καλλέργης, 1999)

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματοωμένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλυόλιθοι	21-41	Μη Ρωγματοωμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιη- μένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμέ- νοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Το πορώδες εξαρτάται από την κοκκομετρική σύνθεση του εδάφους, τη διάταξη των κόκκων του εδάφους και το σχήμα τους.

Μια ακόμα χαρακτηριστική ιδιότητα ενός υδροφορέα, η οποία συνδέεται με το πορώδες, είναι το ενεργό πορώδες.

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity) αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$n_e = \frac{V_y}{V_{ολ}} \quad (1.4)$$

Όπου:

V_y = ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων [L^3].

$V_{ολ}$ = ο συνολικός όγκος του εδάφους [L^3] (Καρατζάς Γ, 2003).

1.4.3 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ DARCY ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Το 1856 ο Γάλλος μηχανικός Henry Darcy μελέτησε τη ροή του ύδατος διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται ως υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μελέτης ήταν πως ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους μέσου είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ενός συντελεστή K που εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους υλικού και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους της πορείας ροής. Προέκυψε έτσι η εξής εξίσωση, γνωστή ως νόμος του Darcy:

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

$$q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.5)$$

Όπου:

Q= η παροχή [L^3/T]

A= η επιφάνεια [L^2]

K= η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

$\Delta h/L$ = η υδραυλική κλίση

q= η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή [L/T]

Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση 1.5 δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Για την εφαρμογή του νόμου του Darcy θα πρέπει ο αριθμός Reynolds να είναι μικρότερος του 1, αν και έχει παρατηρηθεί πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αριθμό Reynolds μέχρι και 10. Στα υπόγεια ύδατα η ροή λαμβάνει χώρα με $Re < 1$, οπότε η χρήση του νόμου του Darcy είναι δυνατή, εκτός των περιπτώσεων με έντονη υδραυλική κλίση (Καρατζάς Γ., 2003).

Η υδραυλική αγωγιμότητα K εκφράζει την ευκολία με την οποία ρέει ένα ρευστό μέσα σε πορώδες μέσο. Εξαρτάται από το πορώδες μέσο και από το είδος του ρευστού.

Από σειρά πειραμάτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το νόμο του Darcy προέκυψε η παρακάτω σχέση για την υδραυλική αγωγιμότητα:

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

Όπου:

k: η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου

K: η υδραυλική αγωγιμότητα

Η ειδική διαπερατότητα δίνεται από τον τύπο: $k = C d^2$, όπου C είναι κάποιος συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν τη ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων, τη σφαιρικότητα των κόκκων και τη διάταξη τους και d η διάμετρος των κόκκων.

Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους εδάφους.

Πίνακας 1.2: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999)

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

1.4.4 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

Για την ταχύτητα του Darcy η ροή πραγματοποιείται μέσω της ολικής επιφάνειας του εδάφους, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη το στέρεο υλικό και οι πόροι. Για αυτό συχνά χρησιμοποιείται η ταχύτητα διήθησης, ή αλλιώς πραγματική ταχύτητα, η οποία αναφέρεται στη ροή ενός ρευστού διαμέσου του χώρου των πόρων ενός πορώδους υλικού και υπολογίζεται από την σχέση 1.7 (Καρατζάς Γ., 2003).

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dn} \quad (1.7)$$

Όπου:

q_p : η ταχύτητα διήθησης [L/T]

Q : ο ρυθμός παροχής [L³/T]

A : η επιφάνεια [L²]

n : το πορώδες

q : η ταχύτητα Darcy [L/T]

K : η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

dh/dl : η υδραυλική κλίση

1.4.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο, νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους, μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$T=Kb \quad (1.8)$$

Όπου:

K: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

b: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [L] (Καρατζάς Γ., 2003).

1.4.6 ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας ή υδροχωρητικότητας (S) αποτελεί τον όγκο του νερού που απομακρύνεται από έναν υδροφορέα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα μεταβολής του υδραυλικού φορτίου.

$$S = \frac{\Delta V}{A \Delta h} \quad (1.9)$$

Όπου:

ΔV : ο όγκος νερού [L^3] που απελευθερώνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας $A[L^2]$, εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης ή αύξησης του φορτίου Δh [L] (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

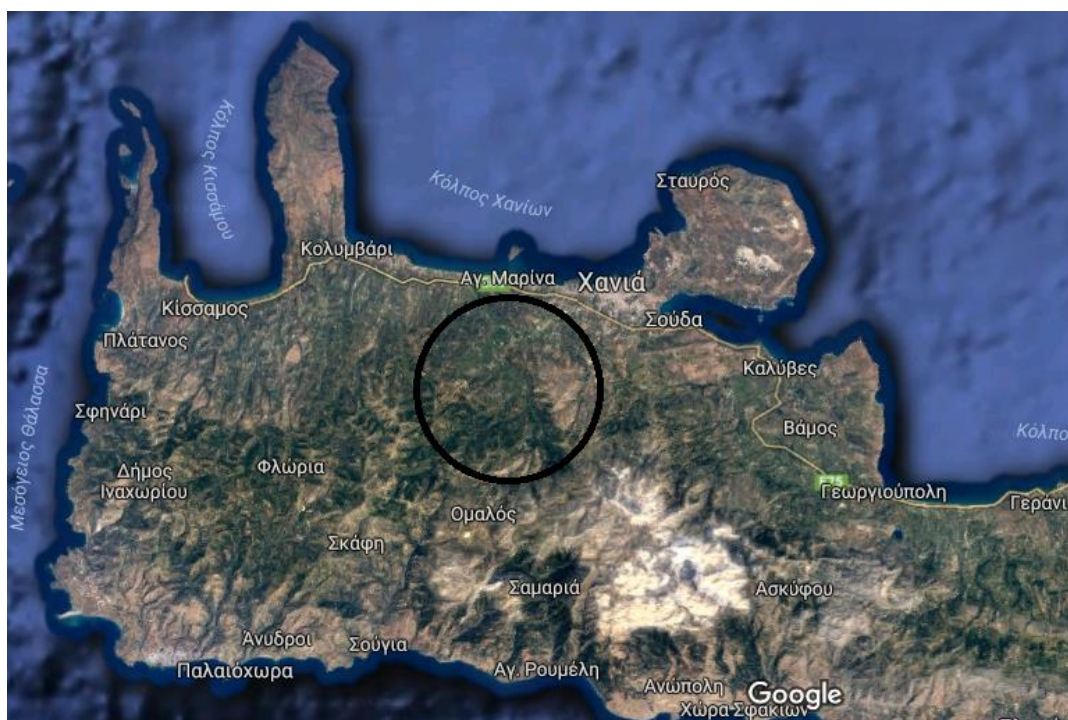
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της εργασίας, η οποία προσομοιώθηκε μέσω του κώδικα PTC, είναι η περιοχή της Αγυιάς η οποία αποτελεί τμήμα της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης Κερίτη. Η περιοχή καταλαμβάνει περίπου 30km^2 και σε αυτήν βρίσκονται πολλά σημεία εμφάνισης νερού όπως πηγάδια, γεωτρήσεις και πηγές.

Στην περιοχή γύρω από τη λίμνη της Αγυιάς αλλά σε επαρκή απόσταση από αυτήν βρίσκονται τα προτεινόμενα σημεία για τη διάνοιξη των οκτώ γεωτρήσεων.

Η λεκάνη απορροής του Κερίτη βρίσκεται στο κέντρο του Νομού Χανίων, νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων σε απόσταση 15km από αυτήν. Η έκταση της υπολογίζεται στα 178km^2 . Η λεκάνη Κερίτη ανήκει κατά το μεγαλύτερο μέρος της στο δήμο Πλατανιά (κυρίως στον πρώην δήμο Μουσούρων) αλλά και στο δήμο Χανίων. Περιλαμβάνει 19 οικισμούς και εντός της περιοχής της λεκάνης περιλαμβάνονται τα χωριά Φουρνές, Σκηνές, Ασκόρδαλος, Αλικιανός, Βατόλακκος, Κουφός, Αγυιά, Πατελάρι, Πλατανιάς, Γεράνι, Λάκκοι, Βαρύπετρο, Μεσκλά κ.ά. Το δέλτα του ποταμού Κερίτη που είναι στην τουριστική περιοχή Πλατανιά καθώς και η τεχνητή λίμνη της Αγυιάς είναι προστατευόμενες περιοχές από το δίκτυο NATURA 2000.



Εικόνα 2.1: Περιοχή μελέτης (Πηγή: google earth)

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η ονομασία της λεκάνης του Κερίτη προέρχεται από τον ομώνυμο ποταμό ο οποίος στην αρχαιότητα ονομαζόταν Ιαρδανός. Κατόπιν πήρε την ονομασία Καιρίτης λόγω της χειμαρρώδους ορμής του σε έντονα καιρικά φαινόμενα και στη συνέχεια με αφορμή κάποιο ιστορικό γεγονός κατά τη διάρκεια της γερμανικής κατοχής, ονομάστηκε Κερίτης. Ο ποταμός Κερίτης πηγάζει από τα Λευκά Όρη σε υψόμετρο περίπου 1900m και καταλήγει στη θάλασσα στην περιοχή του Πλατανιά. Σε αυτόν εκβάλλουν οι παραπόταμοι ή παραχείμαρροι Μεσκλιανός, Μαύρος, Σκινιανός, Βαρσαμιώτης και της Αγυιάς. Όλοι αυτοί, μαζί με τον Κερίτη, συνθέτουν το πρωτεύον αποχετευτικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης. Το νότιο τμήμα της λεκάνης αποτελεί τμήμα του ορεινού όγκου των Λευκών Ορέων. Το υδρογραφικό δίκτυο σε αυτό το τμήμα είναι αραιό με βαθιές χαραδρώσεις. Γενικά η βλάστηση είναι αραιή, με εξαίρεση το ενδιάμεσο τμήμα που είναι ημιορεινό και λοφώδες, όπου λόγω του πυκνότερου υδρογραφικού δικτύου παρουσιάζεται εντονότερη βλάστηση. Το βόρειο τμήμα είναι πεδινό με πλούσια βλάστηση και υδροφορία. Σε αυτό το τμήμα βρίσκεται ο υγρότοπος της Αγυιάς (Καρατζάς & Νικολαΐδης, 2010).

Η λίμνη της Αγυιάς δημιουργήθηκε το 1927-1928 με την κατασκευή τεχνητού φράγματος στη νότια πλευρά της, για την εκμετάλλευση του αναξιοποίητου υδατικού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τροφοδοτείται από πηγές που βρίσκονται στις όχθες της, στον πυθμένα της και από τον παραπόταμο Ξεκλωμένου. Η στάθμη της λίμνης δεν παραμένει σταθερή σε ετήσια βάση, καθώς εξαρτάται από τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής και από την ένταση των χρήσεων νερού.

Τα νερά της περιοχής είναι εξαιρετικής σημασίας, αφού η υδροδότηση της πόλης των Χανίων και άλλων οικισμών εξαρτάται από αυτά, καθώς επίσης καλύπτουν τις αρδευτικές ανάγκες μεγάλων παρακείμενων εκτάσεων.

- Διοικητική Υπαγωγή

Με τη νέα διοικητική ρύθμιση (πρόγραμμα Καλλικράτης, νόμος 3852/2010) η υπό μελέτη περιοχή ανήκει στο δήμο Πλατανιά, ο οποίος προέκυψε από την ένωση των πρώην δήμων Πλατανιά, Βουκολίων, Κολυμβαρίου και Μουσούρων. Νέα έδρα του είναι το Γεράνι. Η έκταση του δήμου υπολογίζεται στα 495.43km², οι κάτοικοι στους 16.874 (απογραφή 2011) και ανήκει στην περιφερειακή ενότητα Χανίων της περιφέρειας Κρήτης.

- Παραγωγικοί τομείς

Στη περιοχή μελέτης το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων απασχολείται στον πρωτογενή τομέα με σημαντικότερο κλάδο παραγωγής την καλλιέργεια εσπεριδοειδών -κυρίως πορτοκαλιών- και την ελαιοκαλλιέργεια. Ένα σημαντικό μέρος του πληθυσμού ασχολείται με την κτηνοτροφία. Ο δευτερογενής τομέας παραγωγής δεν είναι ανεπτυγμένος στην περιοχή αυτή, όπου υπάρχουν ελάχιστες μικρές μονάδες (ελαιουργεία, ξυλουργεία, επιχειρήσεις αρτοποιίας, παρασκευαστήρια). Τέλος, ένα μεγάλο ποσοστό των κατοίκων απασχολείται στον

τριτογενή τομέα παραγωγής ο οποίος περιλαμβάνει τους εξής κλάδους: εμπόριο, εστιατόρια, ξενοδοχεία, μεταφορές, τράπεζες, ενοικιάσεις, λοιπές υπηρεσίες. Στην περιοχή δεν υπάρχουν βιομηχανίες (Δήμος Πλατανιά, <http://www.platanias.gr/>).

- Χρήσεις γης

Στη λεκάνη Κερίτη οι περιοχές που χαρακτηρίζονται από σκληρόφυλλη βλάστηση καταλαμβάνουν το 34,98% των συνολικών χρήσεων γης των κοινοτήτων της λεκάνης που αντιστοιχούν σε 61,88km². Μη συνεχείς αστικές περιοχές καταλαμβάνουν το 0,45% των συνολικών χρήσεων γης, περιοχές με βλάστηση καρποφόρων δέντρων το 10,26% (18,15km²), ελαιώνες ποσοστό ίσο με 7,37% (13,3km²), σύνθετες πρότυπες καλλιέργειες 10,28% (18,19km²), αγροτικές εκτάσεις 10,75% (19km²), φυσικά λιβάδια 7,21% (12,76km²), δασώδεις εκτάσεις 3,48% (6,16km²), άγονες περιοχές/χερσότοποι το 10,17% (17,99km²), περιοχές με αραιή βλάστηση το 4,46% (8,25km²) και ακροθαλασσιές/ αμμουδιές το 0,39% (0,64km²). Το υπόλοιπο της συνολικής έκτασης καταλαμβάνουν τα επιφανειακά ύδατα - Σύστημα Κερίτη, λίμνη Αγυιάς (Καρατζάς & Νικολαΐδης, 2010).

- Χλωρίδα

Η υπό μελέτη περιοχή συνιστά ένα εξαίρετο φυσικό περιβάλλον ιδιαίτερης σημασίας. Έχει πλούσια χλωρίδα με μεγάλο αριθμό ενδημικών ειδών και αποτελείται κυρίως από:

Platanus orientalis – Πλατάνια της Ανατολής

Phragmites australis -Καλαμώνες

Sorbus cretica – Κρητική Ασημοσορβιά

Quercus aegilops – Ήμερη βελανιδιά

Quercus pedunculiflora – Ντουσκοβελανιδιά

Quercus robur - Ρουπακοβελανιδιά

Pistacia terebinthus– Τερέβινθους

Salix alba - Ασημοϊτιά

Eucalyptus globulus - Ευκάλυπτο

Vitex Agnus Castus - Λυγαριές

Nerium oleander - Πικροδάφνες

Populus Alba- Ασημόλευκες

Castanea sativa- Καστανιές

Juglans regia - Καρυδιές

Tamarix Smyrnensis-Αρμυρίκια

Olea Europaea Oleaster - Αγριελιές

EricaArborea - Ρείκη

EricaManihuliflora – Ρείκη το μελισσοτροφικό

Pinuspineae - Κουκουναριές ή ήρεμα πεύκα

Pinusbrutia - Τραχεία Πεύκη

Laurusnobilis - Δάφνες

Ceratoniasiliqua - Κερατόνιες ή Χαρουπιές

Arbutusunedo - Κουμαριές

Arbutusandrachne – Γλυστροκουμαριές

Calycotomevilosa- Ασπαλάθους

Phlomis cretica – Αγκάραθους

Sarcopoterium spinosum - Αστοιβήδα

Genista Acanthoclada - Λευκαγκάθια ή Αχινοπόδας

Myrtun Communis - Σκίνο

Thymus capitatus - Θυμαρί

Melissa officinalis - Μελισσόχορτο

Mentha pulegium - Φλισκούνι

Origanum onites - Ρίγανη

Origanum dictamnus - Δίκταμο

Satureja thymbra - Θρούμπι

Sideritis syriaca - Μαλοτήρα

Levandula stoechas - Αγριολεβάντα

Levandula officinalis- Λεβάντα

Arundo donax – Καλάμια

Preriolium Aquilinum – Φτέρες

Και ειδικότερα το σπάνιο και προστατευόμενο είδος φτέρης:

Woodwardia radicans

Τα τελευταία χρόνια βέβαια οι ανθρώπινες επεμβάσεις έχουν δημιουργήσει προβλήματα στην περιοχή (ψεκασμοί σε αγροτικές εκτάσεις, έντονη βόσκηση, έργα για οδικά δίκτυα, αύξηση των οικιών, ξύλευση κτλ) (Καρατζάς & Νικολαΐδης, 2010).

- Πανίδα

Στην περιοχή υπάρχουν πολλοί τύποι βιότοπων, αφού υπάρχει πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο και ποικιλία βιοκλιματικών ορόφων. Οι ανθρωπογενείς όμως επιδράσεις στην περιοχή έχουν υποβαθμίσει κατά πολύ τους βιότοπους, με

συνέπεια να υπάρχει άμεσος αντίκτυπος στην ποσότητα και στην ποικιλότητα της πανίδας. Επίσης, έχουν περιοριστεί τα είδη και οι πληθυσμοί της ορνιθοπανίδας. Ενδεικτικά, αναφέρονται κάποια είδη πανίδας, που είναι συχνή η παρουσία τους στην περιοχή:

- Πτηνοπανίδα: Ερωδιοί, τσιροβάκοι, ποταμίδες, αηδόνι, σταυραετός, φιδαιτός, μαυροκιρκίνεζο, θαλασσοσφυριχτής, πετροτρίλιδα, μεκάτσινο, κιστική, μαυρολαίμης, καστανολαίμης, συρλοτσίχλονο, μαυρομυγοχάφτης, ψευταηδόνι, κορμοράνος, αρτέμης, μύχος, ασπροκόλα, δεντροφυλλοσκόπος.
- Αμφίβια: Έχουν παρατηρηθεί σημαντικά μεγάλοι πληθυσμοί του κρητικού βατράχου, του δενδροβατράχου, του φρύνου και της νεροχελώνας. Έχει καταγραφεί και το εισαχθέν είδος βατράχου *Rana catesbiana*.
- Ερπετά: Σαμιαμίδι, λιακόνι όχεντρα, νερόφιδο και όφης.
- Θηλαστικά: Άρκαλος, καλλιγιαννού, ζουρίδα, σκαντζόχοιρος, μυγαλή, νανομυγαλή λαγός, δασοποντικός, ποντικός, αρουραίος (Καρατζάς & Νικολαΐδης, 2010).

2.3 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η Κρήτη, σύμφωνα με την κατάταξη Köppen, ανήκει στην κατηγορία Csa, που αντιστοιχεί σε μεσογειακό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες με αρκετές βροχοπτώσεις και θερμά ως ζεστά καλοκαίρια μακρά σε διάρκεια.

Στα Χανιά οι πεδινές και ημιορεινές περιοχές ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με θερμό, ήπιο ή ψυχρό χειμώνα, οι ορεινές στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό, ενώ κάποιες πολύ ορεινές περιοχές ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με δριμύ χειμώνα. Η παραλιακή ζώνη του νησιού έχει θερμομεσογειακό χαρακτήρα.

Ειδικότερα, στην περιοχή που μελετάται, το κλίμα είναι μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και βροχερό και ήπιο χειμώνα. Ο χειμώνας αρχίζει το δεύτερο δεκαήμερο του Νοεμβρίου και διαρκεί μέχρι το Μάρτιο με πολλές βροχοπτώσεις. Η άνοιξη είναι μικρής διάρκειας, από τον Απρίλιο έως αρχές Μαΐου με λίγες βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι αρχίζει συνήθως μέσα Μαΐου και διαρκεί έως τέλος Σεπτεμβρίου με λίγες βροχοπτώσεις κατά το μήνα αυτό. Ολικό παγετό δεν εμφανίζονται στην περιοχή ενώ οι μερικοί ή λευκοί αποτελούν σπάνιο φαινόμενο. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες και δε δημιουργούν πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Το χαλάζι είναι ένα σπάνιο φαινόμενο στα χαμηλά υψόμετρα και έχει μικρό μέγεθος χωρίς να προκαλεί ζημιές. Η θερμοκρασία ελάχιστες φορές πέφτει υπό το μηδέν. Οι άνεμοι που παρατηρούνται συνήθως στην περιοχή είναι Δυτικοί και Βορειοδυτικοί μέσης εντάσεως. Οι παραπάνω λόγοι εξηγούν τη μεγάλη ευδοκίμηση των καλλιεργειών στην περιοχή και ειδικότερα των εσπεριδοειδών (Λιονής & Περλέρος, 2001).

Για τη μελέτη των κλιματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του σταθμού του Αλικιανού, ο οποίος βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης σε υψόμετρο +66,3m.

2.3.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η περιοχή παρουσιάζει το καλοκαίρι σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, με θερμότερους μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, ενώ και το χειμώνα δεν έχουν καταγραφεί ακραία χαμηλές τιμές. Γενικώς οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι ήπιες ειδικά στην πεδινή ζώνη.

Στον πίνακα 2.1 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης θερμοκρασιακών δεδομένων τριάντα χρόνων από το σταθμό του Αλικιανού:

Πίνακας 2.1: Θερμοκρασιακά δεδομένα για τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού (Λιονής & Περλέρος, 2001)

Σταθμός	Μέση ετήσια θερμοκρασία °C	Μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία °C	Μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία °C	Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος °C
Αλικιανός	16,96	8	26	18

2.3.2 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Στην Κρήτη γενικά παρατηρείται ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης, γεωγραφικά και φυσιογραφικά. Πιο συγκεκριμένα, η ετήσια βροχόπτωση αυξάνεται από ανατολικά προς τα δυτικά και από νότια προς τα βόρεια - κατατάσσοντας τα Χανιά ανάμεσα στους πιο βροχερούς νομούς της Ελλάδας - και από τις πεδινές περιοχές προς τις ορεινές. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη το Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι στις πεδινές περιοχές. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής στην Κρήτη ανέρχεται σε 90 ημέρες περίπου.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις σε mm, η μέση τιμή ημερών βροχής κατά μήνα και έτος καθώς και η εξάτμιση όπως υπολογίστηκε από παρατηρήσεις 50 ετών στην περιοχή της λεκάνης της Αγυιάς.

Πίνακας 2.2: Δεδομένα βροχόπτωσης (Πηγή: Λιονής & Περλέρος, 2001)

Μήνες	Μέσες Μηνιαίες Βροχοπτώσεις (mm)	Ημέρες βροχής (days/month)	Εξάτμιση από εξατμισόμετρο (mm)
Ιανουάριος	176,4	15,3	35
Φεβρουάριος	137	14,3	40
Μάρτιος	119,5	10,5	67
Απρίλιος	52,8	7	117
Μάιος	9,9	3,4	175
Ιούνιος	5,8	0,9	235
Ιούλιος	0,9	0,5	246
Αύγουστος	4,9	0,6	207
Σεπτέμβριος	24,3	2,7	142
Οκτώβριος	82,1	7,8	81
Νοέμβριος	111,2	11,4	3
Δεκέμβριος	125,9	14,5	30
Έτος	850,7	88,9	1378

2.3.3 ΥΓΡΑΣΙΑ

Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία σε ολόκληρη την βόρεια Κρήτη είναι ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ενώ στη νότια Κρήτη η ελάχιστη μέση μηνιαία σχετική υγρασία εμφανίζεται τον Ιούλιο (Λιονής & Περλέρος, 2001).

2.3.4 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ

Η Κρήτη είναι από τις περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλή ηλιοφάνεια. Σύμφωνα με την εργασία: «Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων» (Λιονής & Περλέρος, 2001) , ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σε 2700 ώρες περίπου στη βόρεια Κρήτη, ενώ στη νότια ανέρχεται σε 3000 περίπου ώρες. Ο αριθμός ωρών ηλιοφάνειας στην Ιεράπετρα είναι ο μεγαλύτερος στην Ελλάδα και φτάνει τις 3068. Η μέση νέφωση κυμαίνεται μεταξύ 5/8 τον Ιανουάριο και 0,6-1/8 τον Ιούλιο. Ο μέσος αριθμός αίθριων ημερών (νέφωση μεταξύ 0-1,5/8) κυμαίνεται μεταξύ 3 τον Ιανουάριο και 28 ημερών τον Ιούλιο στις πεδινές περιοχές, ενώ στις ορεινές ο αριθμός κατά τους θερινούς μήνες είναι κατά 30% μικρότερος. Η ομίχλη όπως και η πάχνη είναι σπάνιο φαινόμενο για την Κρήτη. Ο μέσος αριθμός ημερών

ομίχλης είναι λιγότερος από 1 μέρα για τους πεδινούς σταθμούς και περίπου 15 για τους ορεινούς (Λιονής & Περλέρος, 2001).

2.3.5 ΑΝΕΜΟΙ

Στη δυτική Κρήτη οι ταχύτητες των ανέμων δε ξεπερνούν τα 4m/sec. Οι εντονότεροι άνεμοι εμφανίζονται κατά το Φεβρουάριο και Μάρτιο και είναι κυρίως βόρειοι και βορειοδυτικοί. Συχνά επικρατούν επίσης και νότιοι άνεμοι οι οποίοι μεταφέρουν στο νησί αφρικανική σκόνη.

2.4 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Γεωλογικά η λεκάνη Κερίτη χαρακτηρίζεται από τέσσερις κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς:

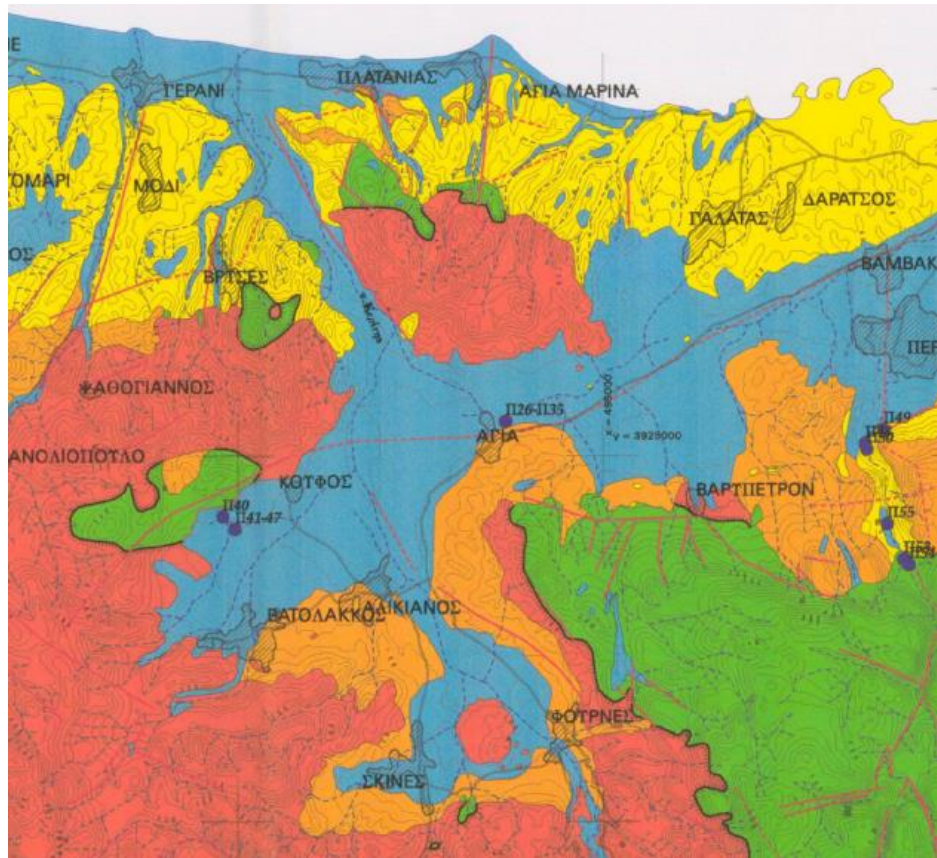
- **Ανθρακικά πετρώματα:** Καταλαμβάνουν το ΝΑ τμήμα της λεκάνης Κερίτη και επεκτείνονται πολύ νοτιότερα και πέραν των ορίων της εν λόγω υδρολογικής λεκάνης έως τον κύριο ασβεστολιθικό όγκο των Λευκών Ορέων. Αποτελούνται από ασβεστολιθικά και δολομιτικά πετρώματα και μπορούν να ομαδοποιηθούν γενικότερα σε καρστικούς σχηματισμούς. Χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλή υδροπερατότητα και η ύπαρξη τους ευνοεί τη δημιουργία υπόγειων υδροφορέων. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν εμφανίζουν σαφή στρώση και το πάχος τους ξεπερνάει τα 500 μέτρα.
- **Φυλλίτες - Χαλαζίτες:** Συναντώνται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης και εμφανίζονται σε μικρότερη έκταση και στο βόρειο τμήμα της. Είναι γενικά μη υδατοπερατοί σχηματισμοί και αποτελούν συνήθως τα όρια των υπογείων υδάτων. Οι φυλλίτες με σημαντικές ενστρώσεις χαλαζιτών και ψαμμιτών δομούν την περιοχή βόρεια της Αγυιάς και του Κουφού. Βόρεια της Αγυιάς δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι οι φυλλίτες είναι επωθημένοι σε ασβεστόλιθους Τρυπαλίου, ενώ δυτικότερα στην περιοχή Κουφού καταγράφεται η τεκτονική επαφή ασβεστόλιθων Τρυπαλίου και φυλλιτών. Οι μικρές εμφανίσεις στις περιοχές αυτές ασβεστόλιθων της ζώνης Τριπόλεως δε φαίνεται να έχουν υδρογεωλογική σημασία και πιθανώς συνδέονται με τις γνωστές καρστικές υδροφορίες του Κερίτη.
- **Νεογενείς σχηματισμοί:** Στην λεκάνη Κερίτη αναπτύσσονται κροκαλοπαγή νότια της Αγυιάς και στο βορειοδυτικό κομμάτι της λεκάνης στην περιοχή του Γερανίου και των Βρυσσών. Είναι ανθρακικής προέλευσης με ανθρακικό συνδετικό υλικό, με γνώρισμα την υδροπερατότητά τους. Στα νεογενή πετρώματα περιλαμβάνονται πορώδεις μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και μάργες του Μειόκαινου, καθώς και μάργες, μαργαϊκοί ψαμμίτες, κροκαλομιγείς μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Πλειόκαινου. Οι δλουβιακοί σχηματισμοί απαντώνται κυρίως στην περιοχή της Αγυιάς.
- **Τεταρτογενείς σχηματισμοί:** Είναι οι νεότερες αποθέσεις και αποτελούνται από αδρομερή εν γένει υλικά, καθώς και αργίλους, άμμους και καταλαμβάνουν ένα σημαντικό τμήμα της λεκάνης στην περιοχή Αγυιάς,

Αλικιανού, Βατόλακκου, Σκηνέ, Κουφού, με σημαντικό πάχος και αξιόλογη υδροφορία. Οι σχηματισμοί αυτοί όσον αφορά στο πάχος τους αλλά και στην υδροφορία που παρουσιάζουν, δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως. Οι νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμοί μπορούν να ομαδοποιηθούν, λόγω των παραπλήσιων χαρακτηριστικών τους, στους προσχωματικούς σχηματισμούς. Οι πρόσφατες ολοκαινικές αποθέσεις σημειώνουν μεγάλη ανάπτυξη στην κοιλάδα Αγυιάς-Χανίων-Σούδας και στη λεκάνη Κουφού-Κερίτη. Στην κοιλάδα απαντώνται κυρίως λεπτόκοκκοι αργιλοίλυαμμώδεις σχηματισμοί ενώ στη λεκάνη Κουφού-Κερίτη επικρατούν οι αδρομερείς κροκαλοαμμώδεις αποθέσεις, ποτάμιας προέλευσης (Τσάιμος, 2009).

2.5 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Οι πετρολογικοί σχηματισμοί που συμμετέχουν στη δομή της περιοχής διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες σχηματισμών, όπως φαίνονται στον γεωλογικό χάρτη 2.2, ανάλογα με τα υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά τους (Καρατζάς & Νικολαΐδης, 2010):

- Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Η υδραυλική αγωγιμότητα που χρησιμοποιήθηκε κατά την μοντελοποίηση για τους σχηματισμούς αυτούς ελήφθη από τα τεστ άντλησης που έγιναν στην περιοχή και είναι ίση με 300m/day. Η περιοχή που βρίσκονται αυτοί οι σχηματισμοί φαίνονται με πράσινο χρώμα στον παρακάτω γεωλογικό χάρτη.
- Πορώδεις προσχωματικοί μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Η υδραυλική αγωγιμότητα για αυτά τα πετρώματα είναι ίση με 51,84m/day και είναι σημειωμένα στον γεωλογικό χάρτη με πορτοκαλί χρώμα.
- Πορώδεις μη προσχωματικοί σχηματισμοί μικρής υδροπερατότητας. Η υδραυλική αγωγιμότητα για αυτά τα πετρώματα είναι ίση με 8,64m/day, και είναι σημειωμένα στον χάρτη με μπλε χρώμα.
- Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί, οι οποίοι είναι σημειωμένοι με κόκκινο χρώμα και έχουν υδραυλική αγωγιμότητα ίση με $8,6 \cdot 10^{-5}$ m/day.



Εικόνα 2.2: Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ταπόγλου Ε., 2010)

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Τα συστήματα των υπόγειων υδάτων δέχονται τεράστιες πιέσεις που προέρχονται είτε από ανθρωπογενείς δραστηριότητες είτε από φυσικές διεργασίες. Για να διατηρείται η ποιότητα και η ποσότητα τους εντός αποδεκτών και βιώσιμων ορίων αλλά παράλληλα να ικανοποιούνται και οικονομικά ή κοινωνικά οφέλη απαιτούνται στοχευμένες δράσεις που να διασφαλίζουν την ορθολογική διαχείριση τους. Για την επίτευξη αυτών των στόχων είναι απαραίτητη η κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος σε τέτοιο επίπεδο, που να δύναται να προβλεφθεί η μελλοντική ανταπόκριση του σε διάφορες αλλαγές.

Τα μοντέλα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη της υπόγειας κι επιφανειακής ροής και για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα και την ποσότητα των υδάτων. Αναπαριστούν ένα φαινόμενο ή ένα σύστημα και μπορεί να είναι φυσικά ή μαθηματικά. Το φυσικό μοντέλο είναι ένα άμεσο προσομοίωμα μιας πραγματικής κατάστασης, όπως για παράδειγμα οι εργαστηριακές στήλες άμμου. Το μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας κάποιες βασικές εξισώσεις, προσομοιώνει τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα ενώ περιγράφει τις οριακές συνθήκες που το διέπουν. Χρησιμοποιείται είτε για την κατανόηση της κατάστασης ενός συστήματος είτε για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του, συνήθως για τον υπολογισμό των συνεπειών μιας προτεινόμενης ενέργειας. Επειδή τα συστήματα των υπόγειων υδροφορέων είναι πολύπλοκα, η περιγραφή τους με μαθηματικές εξισώσεις καθίσταται αρκετά δύσκολη και αναγκαστικά οδηγούν στη θεώρηση πολλών παραδοχών-απλοποιήσεων. Θα πρέπει λοιπόν, για τη λήψη ορθών αποφάσεων να υπάρχει γνώση και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τη διαδικασία της μοντελοποίησης.

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να επιλυθούν είτε με αριθμητικές είτε με αναλυτικές μεθόδους. Οι αριθμητικές μέθοδοι προτιμούνται σε περιπτώσεις πολύπλοκων προβλημάτων, καθώς για να λυθεί ένα τέτοιο πρόβλημα με την αναλυτική μέθοδο πρέπει να γίνουν πολλές απλοποιήσεις. Γενικά, όσο λιγότερες υποθέσεις γίνονται κατά την δημιουργία του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι αυτό (Anderson & Woessner, 1992).

Στα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω μέθοδοι:

- Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
- Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
- Η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης
- Η μέθοδος των αναλυτικών στοιχείων

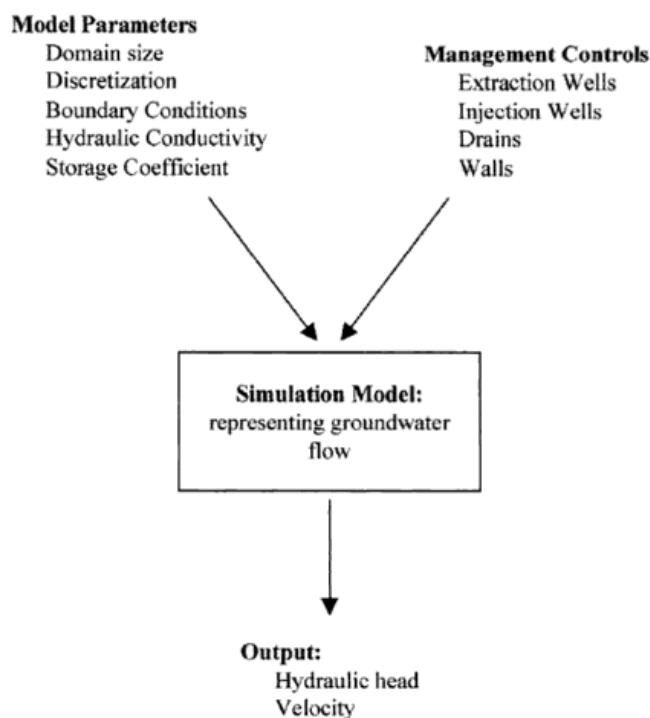
Οι πιο διαδεδομένες είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων και αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο που είναι επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δε γίνεται καμία υπόθεση για τον

τρόπο που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζουν ακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων (Anderson & Woessner, 1992). Γενικώς η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι πιο εύκολη στην κατανόηση και στον προγραμματισμό κι έχει μικρότερες απαιτήσεις σε δεδομένα για την κατασκευή πλέγματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει καλύτερα όρια που έχουν ακανόνιστο σχήμα, καθώς είναι ευκολότερη η προσαρμογή των θέσεων των ορίων και το μέγεθος του κάθε στοιχείου. Επιπλέον, τα πεπερασμένα στοιχεία προσομοιώνουν καλύτερα σημειακές πηγές, επιφάνειες με διαρροή και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες. Η επιλογή της μιας ή της άλλης μεθόδου επαφίεται στην κρίση του χρήστη καθώς τα ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε μίας μπορεί να είναι επιθυμητά για μια συγκεκριμένη εφαρμογή (Gray, 1984).

Τα βασικά στοιχεία ενός μαθηματικού μοντέλου είναι οι θεμελιώδεις εξισώσεις, οι αρχικές συνθήκες και οι οριακές συνθήκες. Οι αρχικές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής (το υδραυλικό ύψος) σε αρχικό χρόνο ($t=0$). Οι οριακές συνθήκες περιγράφουν την εξαρτημένη μεταβλητή ή κάποια παράγωγο της (ροή) στα όρια της περιοχής που μελετάται και την αλληλεπίδραση που έχει με το εξωτερικό της περιβάλλον. Τα όρια της περιοχής μπορεί να είναι φυσικά όπως αδιαπέρατα στρώματα και μεγάλοι υδάτινοι επιφανειακοί όγκοι ή υδραυλικά και σχετίζονται με τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής (Bear & Cheng, 2010).

Αναλυτικότερα, ένα μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής δέχεται ως είσοδο παραμέτρους που μπορεί να είναι φυσικές, (υδραυλική αγωγιμότητα, αποθηκευτικότητα), παραμέτρους που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες του συστήματος, παραμέτρους που έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό του μοντέλου όπως είναι η επιλογή του πλέγματος και παραμέτρους ελέγχου του συστήματος (πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού). Το μοντέλο χρησιμοποιώντας τις θεμελιώδεις εξισώσεις, επεξεργάζεται τις πληροφορίες εισόδου και αναπαριστά τη ροή στην περιοχή που μελετάται, εξάγοντας αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη και την ταχύτητα ροής (Mulligan & Ahlfeld, 2000).

Η διαδικασία αποτυπώνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 3.1: Είσοδοι- έξοδοι σε μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής (Πηγή: Mulligan & Ahlfeld)

Τα τελευταία χρόνια τα μοντέλα προσομοίωσης συνδυάζονται με τεχνικές βελτιστοποίησης με στόχο τον εντοπισμό της καλύτερης πολιτικής διαχείρισης ώστε να εξυπηρετούνται διαφορετικά και αντικρουόμενα συμφέροντα που μπορεί να είναι κοινωνικής, οικονομικής ή οικολογικής σημασίας.

3.1 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PRINCETON TRANSPORT CODE (PTC)

Το PTC αποτελεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών που προσομοιώνει την υπόγεια ροή υδάτων και τη μεταφορά μάζας σε υδροφορείς. Ο κώδικας PTC είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran77 και είναι αποτέλεσμα συνεισφορών πολλών ατόμων στο πανεπιστήμιο του Princeton. Αρχικά αναπτύχθηκε σε δύο διαστάσεις από τους Pinder & Gray και αργότερα ο κώδικας επεκτάθηκε στον τρισδιάστατο χώρο από τους Babu et al. (1997).

3.1.1 ΒΑΣΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ

Για την περιγραφή της ροής των υπόγειων υδάτων ο κώδικας PTC επιλύει το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και από το νόμο του Darcy. Αρχικά λύνεται η εξίσωση για τα υδραυλικά ύψη:

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

έπειτα υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy:

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

και τέλος επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς ρύπων:

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

Όπου:

H: το υδραυλικό ύψος [L]

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}: οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x, y και z αντίστοιχα [LT⁻¹]

S: ειδική αποθηκευτικότητα [L⁻¹]

Q: Ρυθμός άντλησης [L³T⁻¹]

V_x, V_y, V_z: οι συνιστώσες της ταχύτητας στους x, y και z [LT⁻¹]

D_{xx}, D_{yy}, D_{zz}, D_{xy}, D_{yx}, D_{xz}, D_{zx}, D_{zy}, D_{yz}: οι συνιστώσες υδροδυναμικής διασποράς [L²T⁻¹]

c: η συγκέντρωση ρύπου στο σημείο (x,y,z) τη χρονική στιγμή t [ML⁻³]

c^w: η συγκέντρωση αντλούμενου νερού στο σημείο (x_i,y_i,z_i)

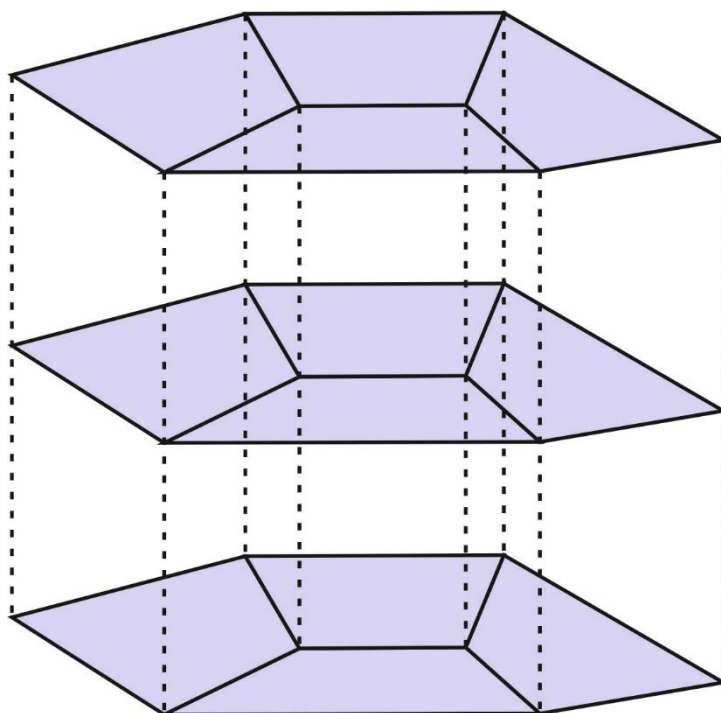
θ: το πορώδες του υδροφορέα

E(c): όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης.

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων για συστήματα σε κλίμακα πεδίου απαιτεί μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια. Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων ο οποίος μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει το διαχωρισμό των επιπέδων σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο γίνεται διακριτοποίηση με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων (Pinder & Gray, 1977) με σκοπό να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση ακαθόριστων σχημάτων. Τα επίπεδα συνδέονται μεταξύ τους με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με αυτή των πεπερασμένων διαφορών παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας (splitting algorithms). Αυτό σημαίνει πως κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο επιλύονται όλες οι εξισώσεις οριζοντίως, ενώ στο

δεύτερο επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα επίπεδα (Babu et al., 1997).



Εικόνα 3.2: Οριζόντιο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al, 1997).

3.1.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το μοντέλο PTC δέχεται τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής. Τις συνθήκες Dirichlet ή οριακές συνθήκες 1^{ου} τύπου για καθορισμένο υδραυλικό ύψος, τις συνθήκες Neumann ή οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου για καθορισμένη ροή και τις συνθήκες Cauchy ή οριακές συνθήκες 3^{ου} τύπου που είναι συνθήκες ροής εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος (διαρροή) (Anderson & Woessner, 1992).

3.2 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ONE

Η προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων στην περιοχή μελέτης μέσω του μοντέλου PTC έγινε σε συνδυασμό με το πρόγραμμα ARGUS ONE. Το λογισμικό ARGUS ONE είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση υπόγειας κι επιφανειακής ροής και πολλών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς υποστηρίζει τα περισσότερα μοντέλα υπόγειων υδάτων όπως το MODFLOW, το NAPL, το PTC, το SUTRA και το MODPATH.

Επιτρέπει μέσω μιας σειράς εργαλείων την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών, την αυτόματη δημιουργία πλεγμάτων και την εξαγωγή αποτελεσμάτων, σε μορφή που να είναι αναγνωρίσιμη από κάθε αριθμητικό κώδικα (Olivares, 1999).

Βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας του προγράμματος αποτελούν τα επίπεδα (layers). Μπορούν να παρομοιαστούν με διάφανα φύλλα εργασίας πάνω στα οποία

ο χρήστης εισάγει τις πληροφορίες που αφορούν στις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος. Κάθε είδος πληροφορίας εισάγεται σε διαφορετικό επίπεδο.

Οι τύποι επιπέδων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

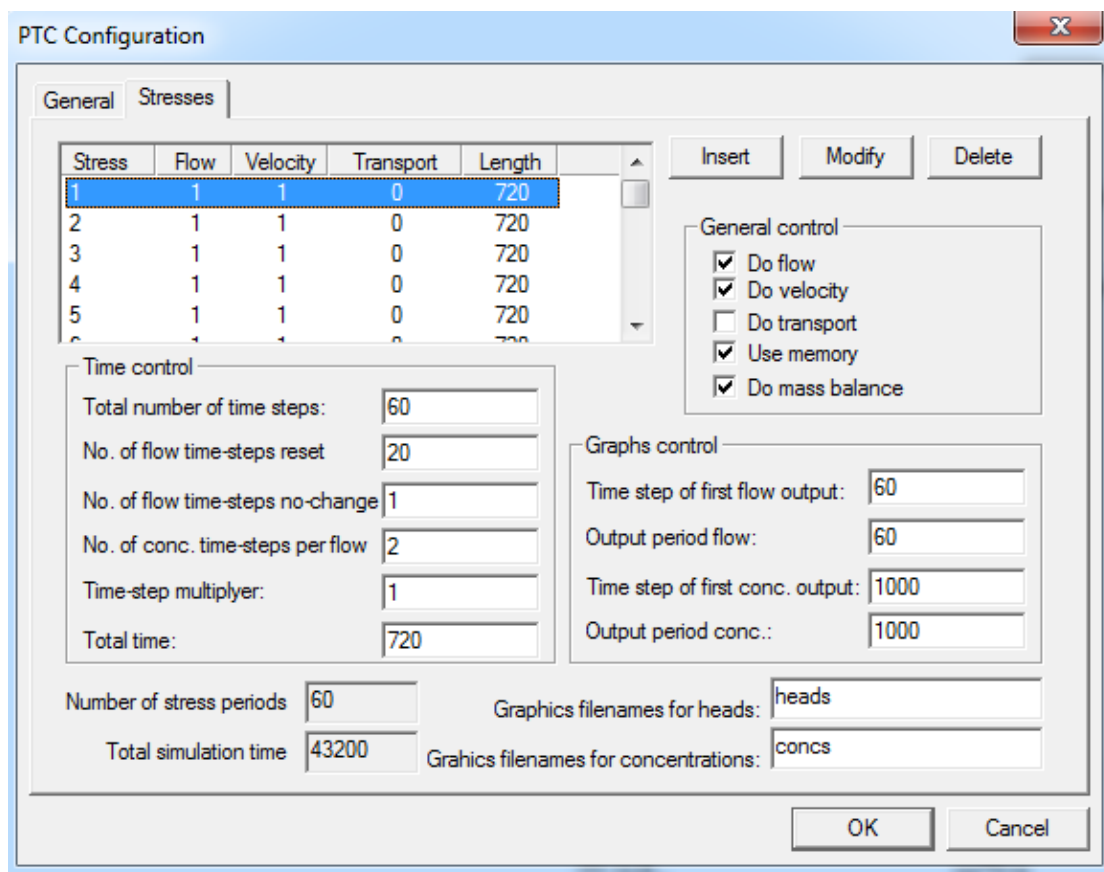
- Επίπεδα πληροφοριών (Information layers): Χρησιμοποιούνται για τον συσχετισμό των μεταβλητών με το πλέγμα. Για παράδειγμα σε τέτοιου είδους επίπεδα προσδιορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους.
- Επίπεδα χαρτών (Map layers): Σε αυτό το επίπεδο γίνεται η εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών. Τα επίπεδα χαρτών επιτρέπουν επίσης την κατασκευή γραφημάτων ισοδυναμικών γραμμών ή τρισδιάστατων επιφανειών.
- Επίπεδα δεδομένων (Data layers): Χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων άλλων προγραμμάτων στο Argus One. Μέσω αυτών δύναται να γίνει γραφική απόδοση διάφορων αποτελεσμάτων.

3.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το μοντέλο προσομοίωσης, όπως προαναφέρθηκε, βασίστηκε στο μοντέλο που κατασκεύασε η Ευδοκία Ταπόγλου στη διπλωματική της εργασία το 2010. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα εισόδου (χάρτες και δεδομένα γεωτρήσεων), όμως για την προσομοίωση της κατάστασης των υπόγειων νερών μέχρι το 2014 ήταν απαραίτητο να γίνει εκ νέου βαθμονόμηση.

Παρατίθενται τα βήματα για το στήσιμο του προβλήματος καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν:

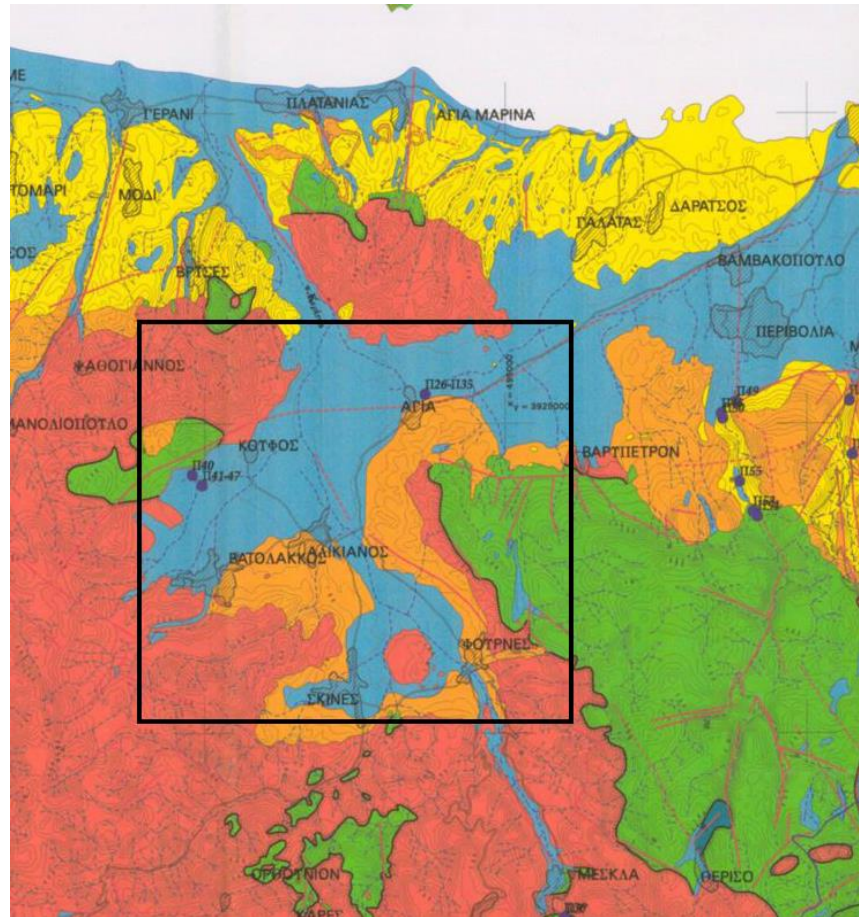
- Αρχικά πρέπει να γίνει επιλογή του τύπου πλέγματος. Επιλέχθηκε τριγωνικός καθώς είναι πιο ακριβής.
- Έπειτα προσδιορίζεται το είδος του υδροφορέα, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ελεύθερος, και ο αριθμός των στρωμάτων που αντιστοιχούν στους γεωλογικούς σχηματισμούς που υπάρχουν στην περιοχή. Στην εξεταζόμενη περίπτωση είναι τρία.
- Στη συνέχεια, εισάγονται οι χρονικές περίοδοι για τις οποίες γίνεται η προσομοίωση. Η προσομοίωση έγινε για πέντε έτη, δηλαδή για 60 χρονικές περιόδους (stresses). Κάθε περίοδος είχε διάρκεια 30 ημέρες.



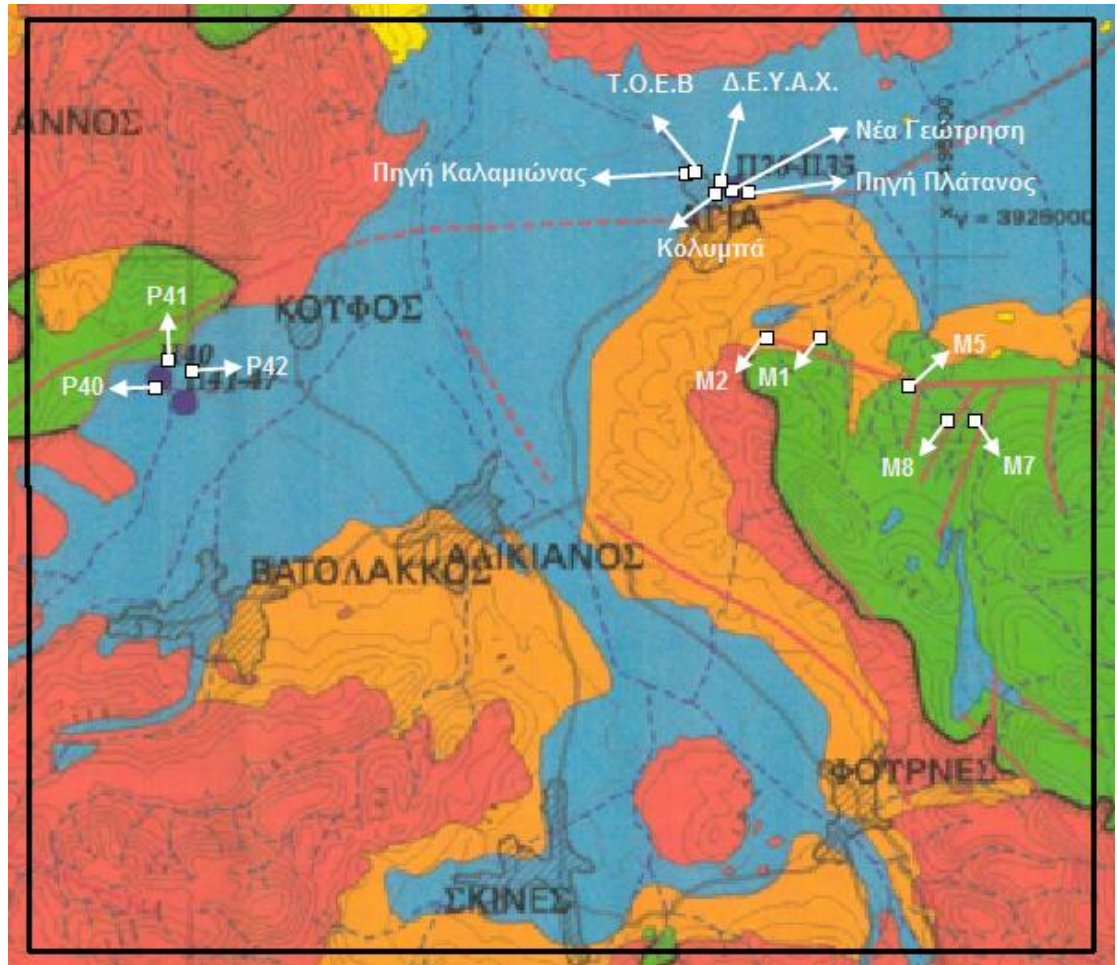
Εικόνα 3.3: Αριθμός χρονικών περιόδων μοντελοποίησης

- Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των χαρτών της περιοχής. Στο μοντέλο είχαν εισαχθεί δύο χάρτες, ένας με τις υδραυλικές αγωγιμότητες και ένας με τα υδραυλικά ύψη της περιοχής. Πάνω στους χάρτες ήταν τοποθετημένα τα σημεία όπου υπάρχουν γεωτρήσεις.

Σε αυτό το σημείο καθορίζεται και η πυκνότητα του πλέγματος. Ορίστηκε για όλο το πεδίο πυκνότητα ίση με 250 και στα σημεία των γεωτρήσεων, όπου απαιτείται πιο πυκνό πλέγμα, ίση με 20.

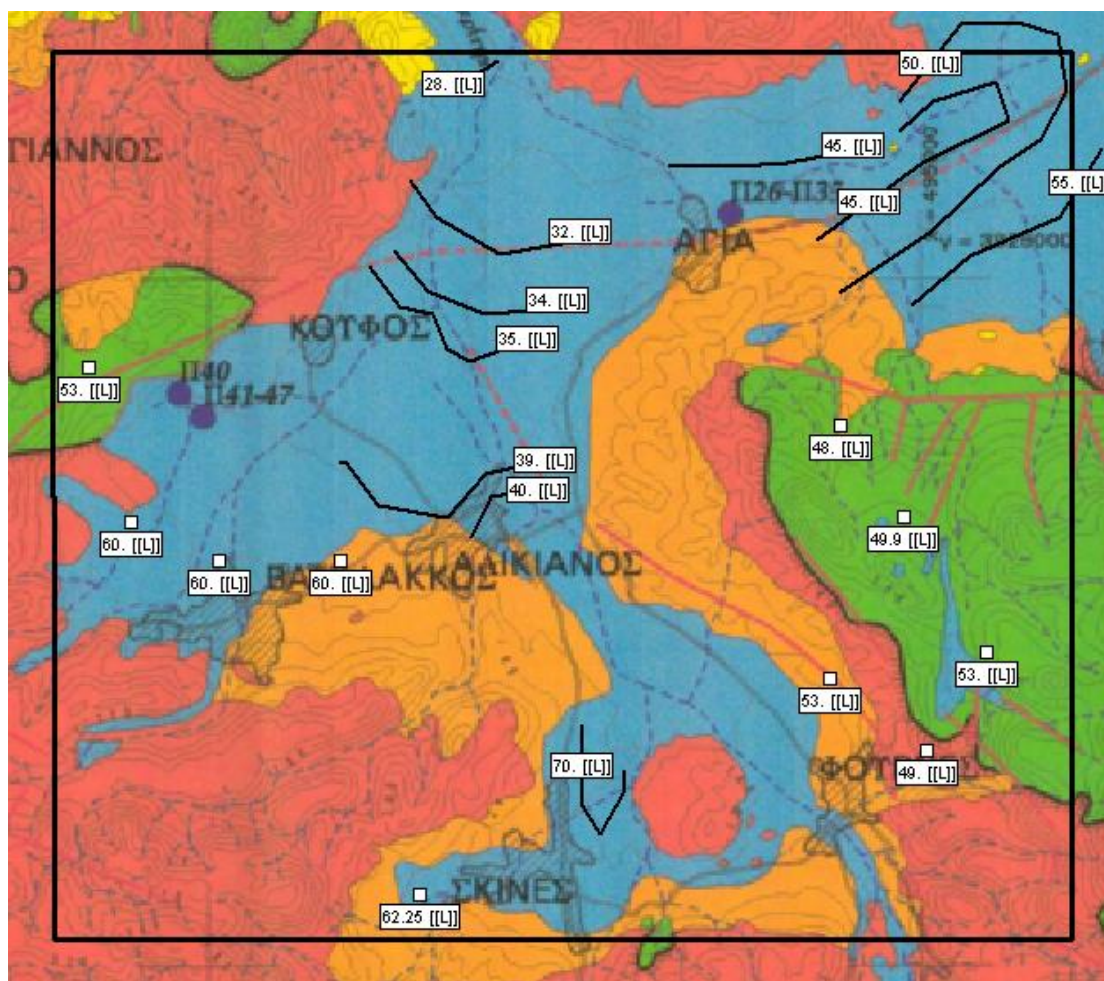


Εικόνα 3.4: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Πηγή: Ταπόγλου Ε., 2010)



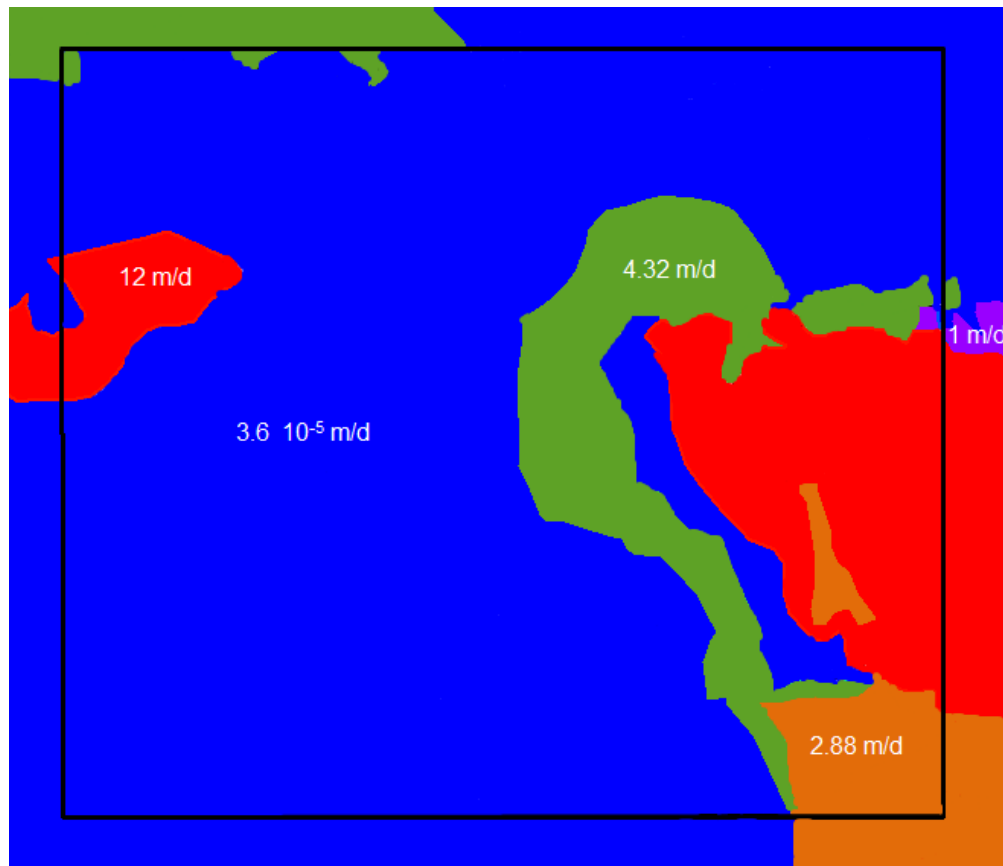
Εικόνα 3.5: Γεωτρήσεις στην περιοχή μελέτης (Πηγή: Ταπόγλου Ε., 2010)

- Ακολουθώς εισάγονται τα αρχικά υδραυλικά ύψη, τα οποία είναι γνωστά από μετρήσεις πεδίου. Στο μοντέλο είχαν τοποθετηθεί τα υδραυλικά ύψη που φαίνονται στον επόμενο χάρτη:

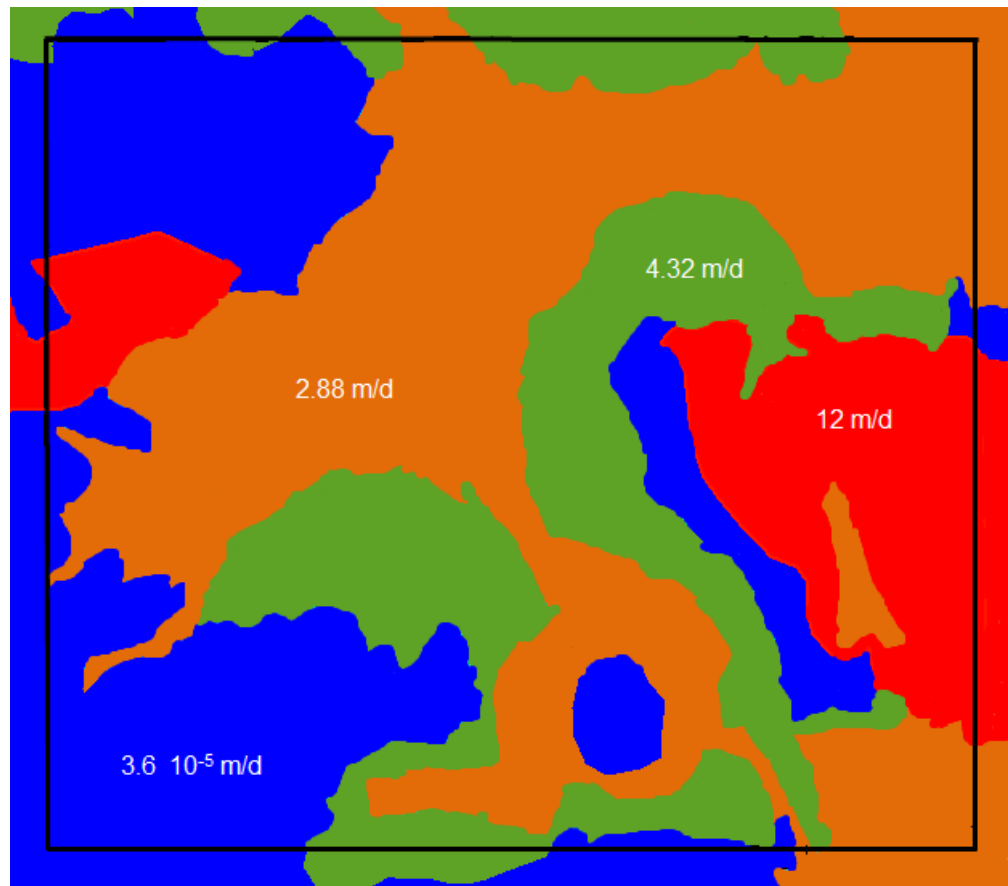


Εικόνα 3.6: Αρχικά υδραυλικά ύψη

- Κατόπιν γίνεται εισαγωγή της ποσότητας της βροχής που διηθείται. Για την υγρή περίοδο (Νοέμβριο - Δεκέμβριο) θεωρήθηκε ποσότητα ίση με $6 \cdot 10^{-5}$ και για τη ξηρή περίοδο μηδενική.
- Η αποθηκευτικότητα ορίστηκε ίση με 10^{-4} και στα τρία στρώματα και το πορώδες ίσο με $4 \cdot 10^{-1}$.
- Για κάθε στρώμα ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα στις τρεις διευθύνσεις. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει την ίδια τιμή στη x και y διεύθυνση, ενώ στην z διεύθυνση ισούται με το 10% της αγωγιμότητας στα άλλα δύο στρώματα. Για το κατώτερο στρώμα (Layer 1) η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρήθηκε ίση με 12m/d στην x και y διεύθυνση και 1,2m/d για την z. Για τα άλλα δύο στρώματα η αγωγιμότητα ορίστηκε όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 3.6 και 3.7.



Εικόνα 3.7: Υδραυλική αγωγιμότητα στο 2^ο στρώμα ((Πηγή: Ταπόγλου Ε., 2010).



Εικόνα 3.8: Υδραυλική αγωγιμότητα στο 3^ο στρώμα .

- Ακολουθεί η εισαγωγή των παροχών των γεωτρήσεων και των πηγών. Πρόκειται για την εισαγωγή των οριακών συνθηκών δεύτερου τύπου καθώς οι παροχές είναι σταθερές σε κάθε χρονική περίοδο. Στους πίνακες 3.1 και 3.2 παρατίθενται οι τιμές των αντλήσεων.

Πίνακας 3.1: Παροχή γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης

Χρονική περίοδος	M1,M2,M5 M7 (m ³ /h)	M8 (m ³ /h)	ΔΕΥΑΧ (m ³ /h)	ΤΟΕΒ (m ³ /h)	Πηγή Κολύμπα (m ³ /h)	Νέα Γεώτρηση (m ³ /h)
1	0	0	-315	0	-2630	-225
2	0	0	-315	0	-2870	-225
3	0	0	-315	0	-2905	-225
4	0	0	-315	0	-2940	-225
5	-675	-400	-315	-2750	-1195	-225
6	-675	-400	-315	-2750	-1046	-225
7	-675	-400	-315	-2750	-262	-225
8	-675	-400	-315	-2750	-121	-225
9	-675	-400	-315	-2750	-12	-225
10	-675	-400	-315	-2750	-590	-225
11	0	0	-315	0	-2155	-225
12	0	0	-315	0	-2230	-225

Πίνακας 3.2: Παροχή γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης

Χρονική περίοδος	Πηγή Καλαμιώνας (m ³ /h)	P40 (m ³ /h)	P41 (m ³ /h)	P42 (m ³ /h)	Πηγή Πλάτανος (m ³ /h)
1	-1195	0	0	0	-2150
2	-1305	0	0	0	-2350
3	-1320	0	0	0	-2376
4	-1335	0	0	0	-2400
5	-543	-240	-250	-340	-980
6	-475	-240	-250	-340	-856
7	-120	-240	-250	-340	-215
8	-55	-240	-250	-340	-100
9	-6	-240	-250	-340	-10
10	-268	-240	-250	-340	-482
11	-980	0	0	0	-1765
12	-1013	0	0	0	-1825

3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

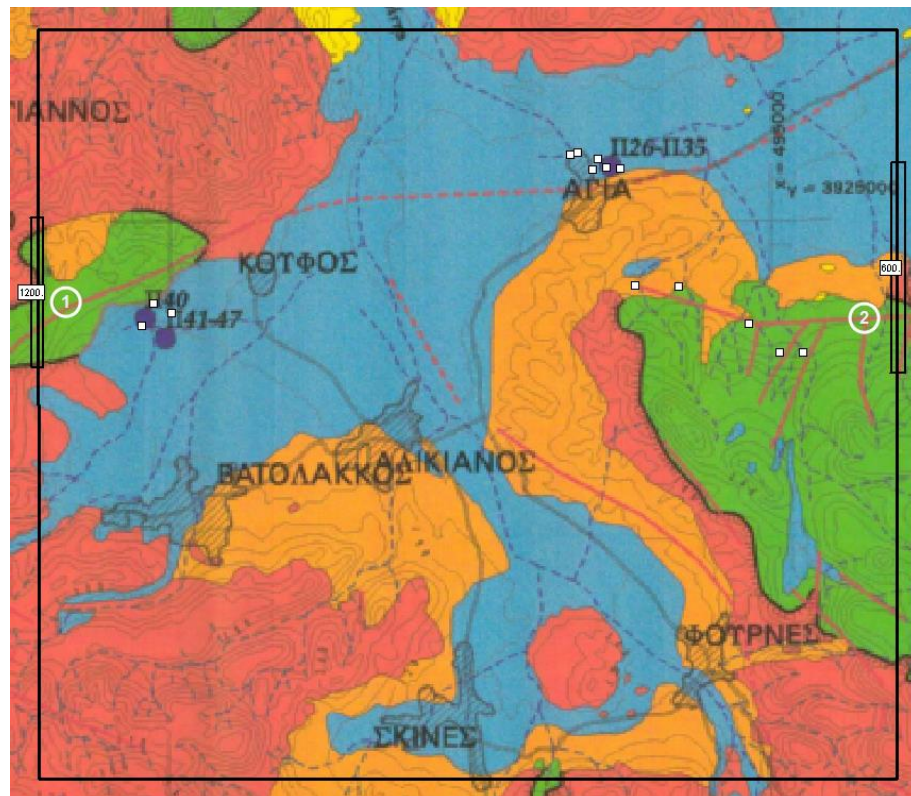
Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου χρειάστηκε να επανεξεταστούν οι οριακές συνθήκες ώστε να υπάρξει ταυτοποίηση των τιμών των υδραυλικών υψών που είναι γνωστές από μετρήσεις πεδίου, με αυτές που έδωσε το μοντέλο. Κατά την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν οριακές συνθήκες 1^{ου} και 2^{ου} τύπου, όμως οι οριακές συνθήκες 1^{ου} τύπου παραμείναν σταθερές. Μέσω της διαδικασίας δοκιμής σφάλματος, έγιναν αρκετές επαναλήψεις μέχρι να εξαχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά να αναφερθεί, πως δοκιμάστηκαν τιμές για τις οριακές συνθήκες που αντιπροσώπευαν τις εισροές και τις εκροές από το σύστημα με διάφορα ποσοστά μείωσης ανά έτος. Τελικώς, οι τιμές των οριακών συνθηκών που οδήγησαν σε συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και των τιμών του μοντέλου ήταν οι ακόλουθες:

Πίνακας 3.3: Τιμές οριακών συνθηκών 2^{ου} τύπου

Stresses	Οριακή Συνθήκη 1 (m ³ /h)	Οριακή Συνθήκη 2 (m ³ /h)	Stresses	Οριακή Συνθήκη 1 (m ³ /h)	Οριακή Συνθήκη 2 (m ³ /h)
1	1200	600	16	924	492
2	1200	600	17	616	328
3	1200	600	18	385	246
4	1200	600	19	77	65
5	800	400	20	39	41
6	500	300	21	39	41
7	100	80	22	308	164
8	50	50	23	616	410
9	50	50	24	924	492
10	400	200	25	711	403
11	800	500	26	711	403
12	1200	600	27	711	403
13	924	492	28	711	403
14	924	492	29	474	269
15	924	492	30	296	202

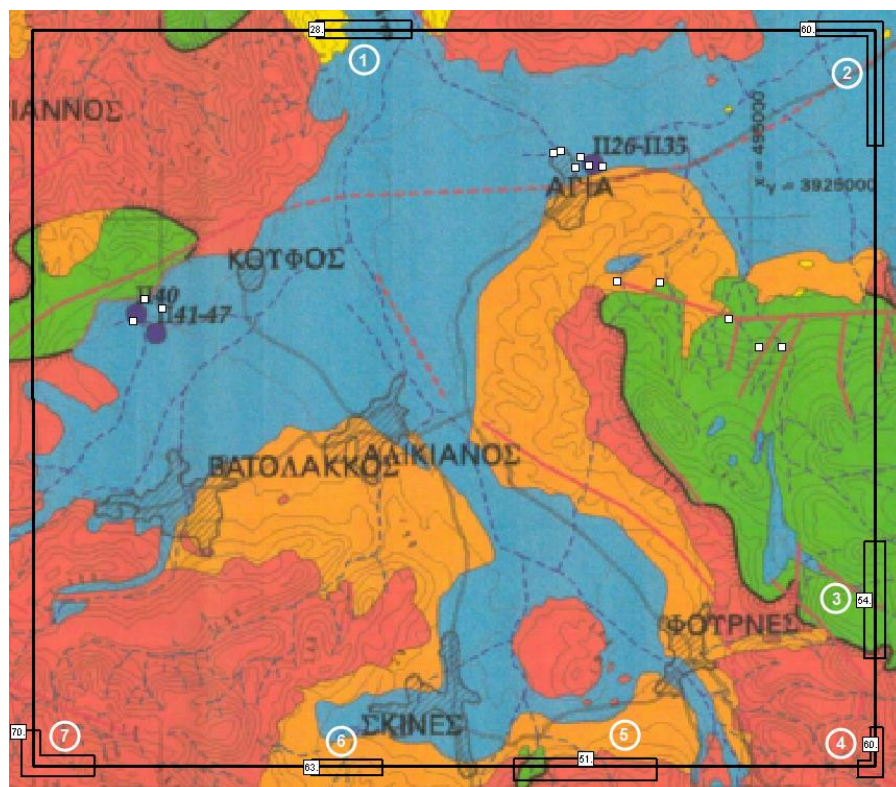
Stresses	Οριακή Συνθήκη 1 (m ³ /h)	Οριακή Συνθήκη 2 (m ³ /h)	Stresses	Οριακή Συνθήκη 1 (m ³ /h)	Οριακή Συνθήκη 2 (m ³ /h)
31	59	54	46	183	110
32	30	34	47	365	276
33	30	34	48	548	331
34	237	134	49	422	271
35	474	336	50	422	271
36	711	403	51	422	271
37	548	331	52	422	271
38	548	331	53	281	181
39	548	331	54	176	136
40	548	331	55	35	36
41	365	221	56	18	23
42	228	165	57	18	23
43	46	44	58	141	90
44	23	28	59	281	226
45	23	28	60	422	271

Οι οριακές συνθήκες φαίνονται στον παρακάτω χάρτη:



Εικόνα 3.9: Οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου

Οι οριακές συνθήκες 1^{ου} τύπου φαίνονται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.10: Οριακές Συνθήκες 1^{ου} τύπου

Σε αυτά τα όρια, οι τιμές που δόθηκαν για κάθε μήνα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

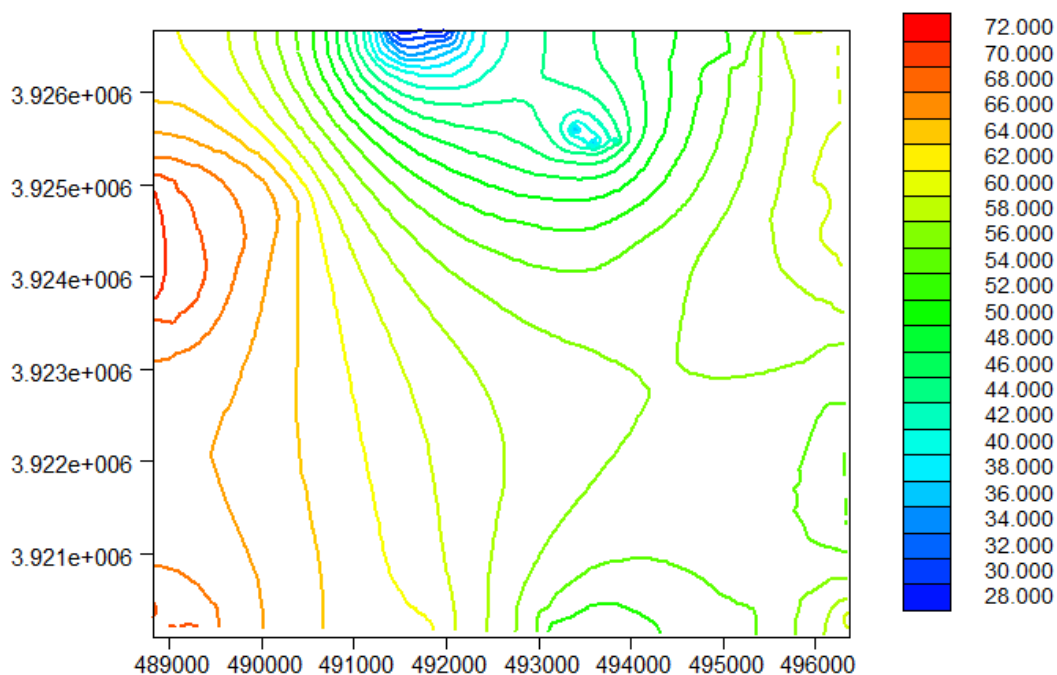
Πίνακας 3.4: Τιμές Οριακών Συνθηκών 1^{ου} τύπου

Μήνας	Οριακή Συνθήκη 1 (m)	Οριακή Συνθήκη 2 (m)	Οριακή Συνθήκη 3 (m)	Οριακή Συνθήκη 4 (m)	Οριακή Συνθήκη 5 (m)	Οριακή Συνθήκη 6 (m)	Οριακή Συνθήκη 7 (m)
1	28	60	54	60	51	63	70
2	28	60	54	60	51	63	70
3	28	60	54	60	51	63	70
4	28	60	54	60	51	63	70
5	25	58	50	58	49	60	70
6	25	56	50	58	49	60	65
7	23	54	50	58	49	60	65
8	22	43	46	54	48	56	60
9	22	43	46	54	48	56	60
10	25	52	50	58	49	60	70
11	26	56	52	60	51	63	70
12	28	60	54	60	51	63	70

Οι μετρήσεις πεδίου αφορούν στην πηγή Καλαμιώνας, όπου το υδραυλικό ύψος τον Ιανουάριο είναι ίσο με 37,5 m, ενώ τον Αύγουστο είναι ίσο με 35,5 m και στην περιοχή των Μυλωνιανών, όπου τον Ιανουάριο το υδραυλικό ύψος είναι ίσο με 51 m και τον Αύγουστο ίσο με 48 m.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το μήνα Αύγουστο, κατά τον οποίο υφίσταται η πιο τεταμένη κατάσταση λόγω των αυξημένων αντλήσεων.

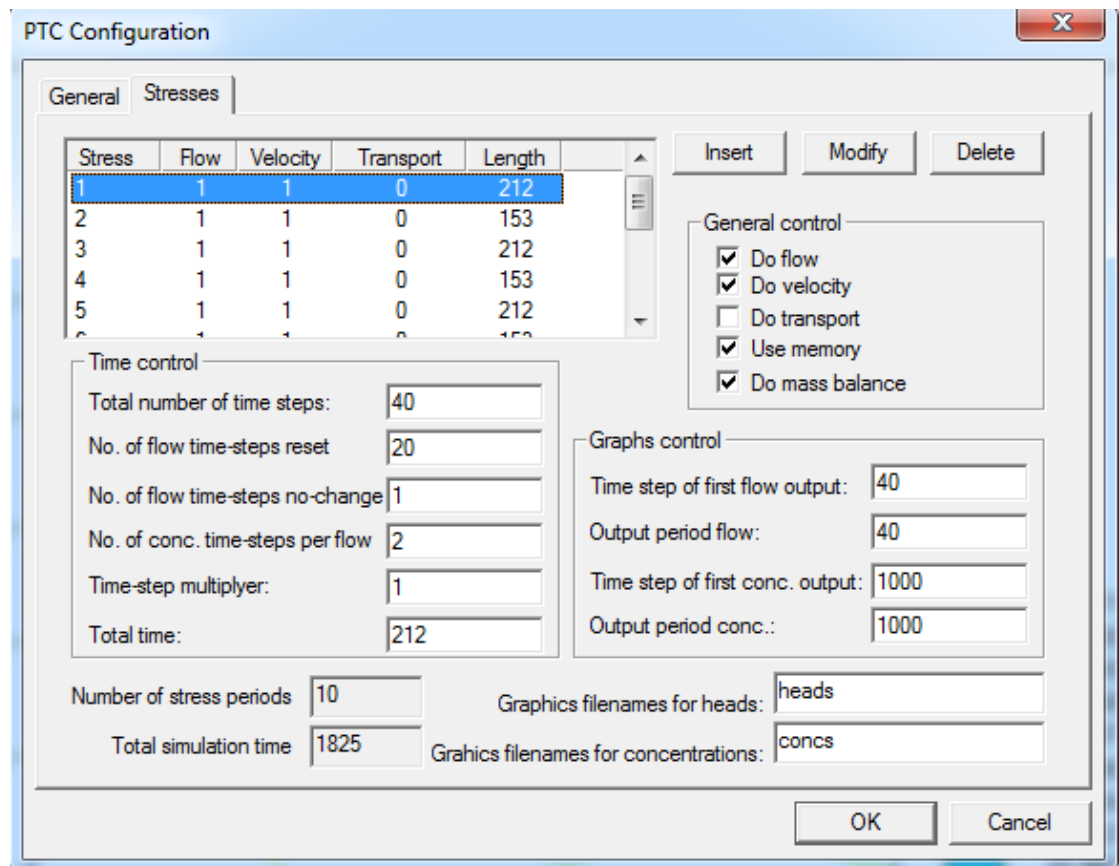


Εικόνα 3.11: Υφιστάμενη κατάσταση τον Αύγουστο

Το υδραυλικό ύψος στην πηγή Καλαμιώνας βρίσκεται στα 37,5m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και στην περιοχή των Μυλωνιανών στα 51m.

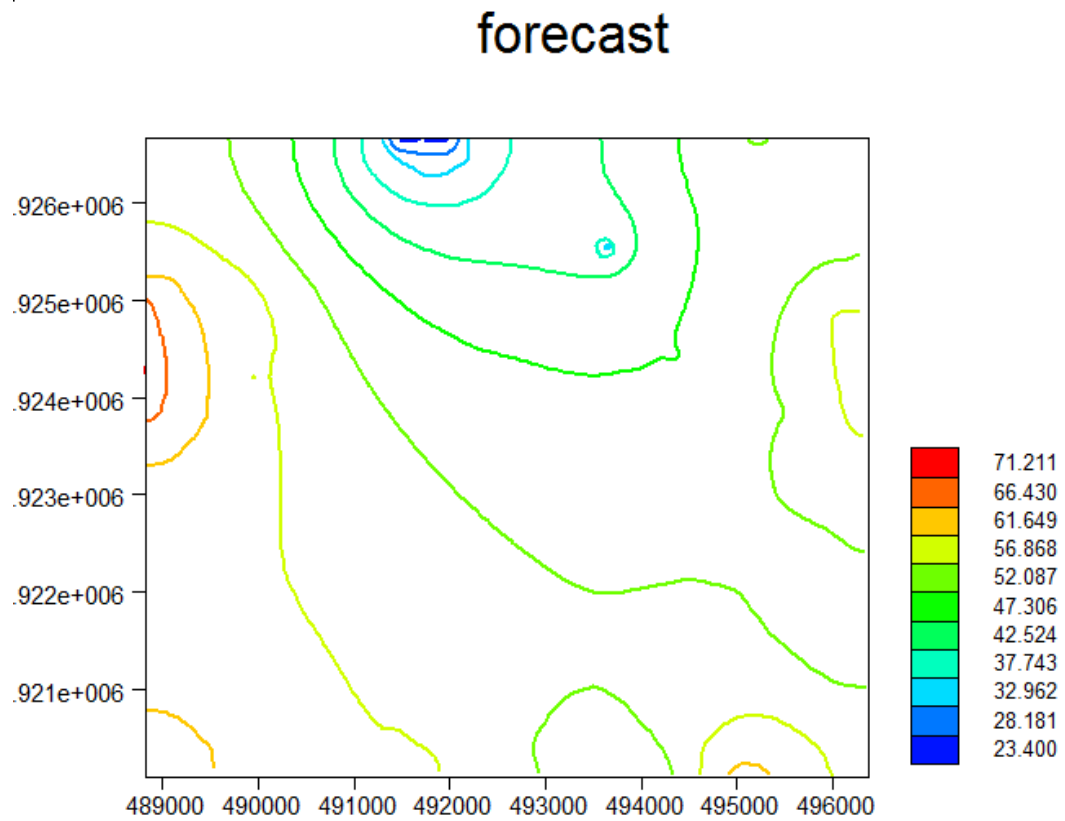
Για την πρόβλεψη της κατάστασης του υδροφορέα έγινε επανασχεδιασμός στις παραμέτρους ελέγχου της προσομοίωσης. Δηλαδή στο χρονικό βήμα (ορίστηκε στο 40 από 60) και στον αριθμό των χρονικών περιόδων. Τα δεδομένα που αφορούν στα χαρακτηριστικά της περιοχής παρέμειναν ίδια και ως αρχικά υδραυλικά ύψη χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την προσομοίωση.

Για λόγους εξοικονόμησης χρόνου, καθώς η διαδικασία της βελτιστοποίησης είναι αρκετά χρονοβόρα, κάθε έτος χωρίστηκε σε δύο περιόδους. Η υγρή αφορά στους μήνες Νοέμβριο ως Μάιο με 212 ημέρες και η ξηρή από Ιούνιο ως Οκτώβριο με 153. Συνεπώς τα stresses σε αυτήν την περίπτωση είναι 10. Η άντληση στις νέες γεωτρήσεις θα λαμβάνει χώρα κατά τη θερινή περίοδο.



Εικόνα 3.12: Αριθμός χρονικών περιόδων μοντελοποίησης

Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης για το μήνα Αύγουστο:



Εικόνα 3.13: Πρόβλεψη κατάστασης

Η μικρή μείωση στη στάθμη του υδροφορέα που παρατηρείται, πιθανά να οφείλεται στις τροποποιήσεις του μοντέλου και δεν αξιολογείται.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ - ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

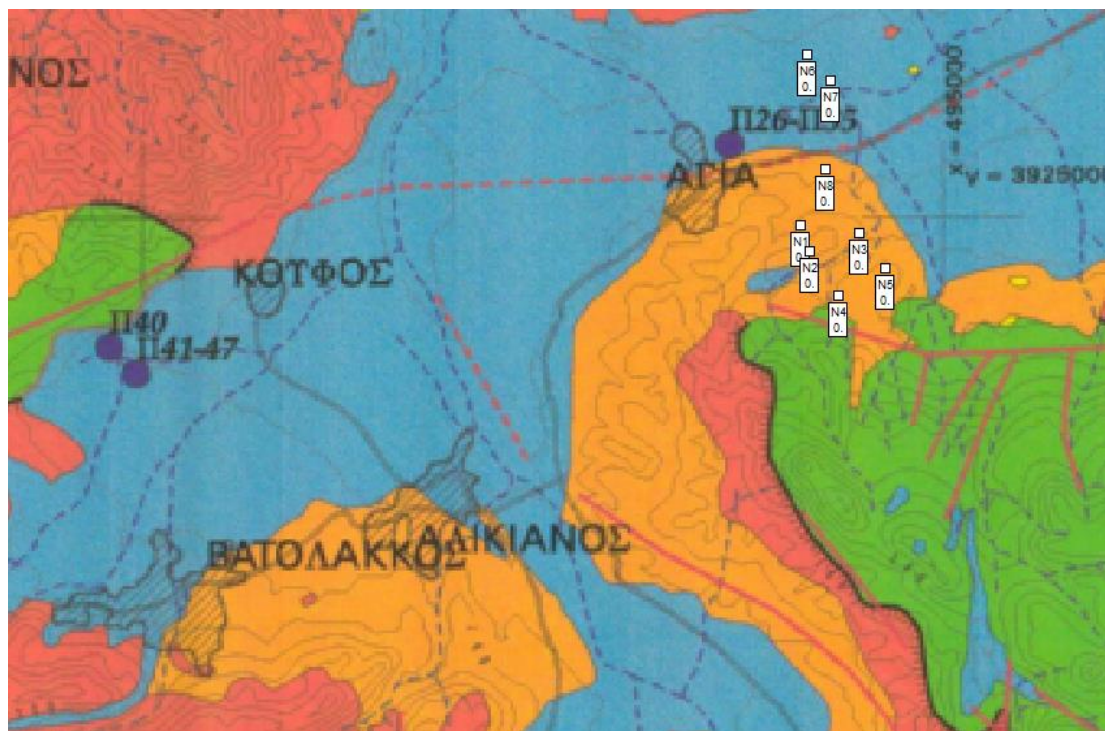
4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι αυξημένες υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες στην περιοχή, ειδικά κατά τη θερινή περίοδο, καθιστούν αναγκαία τη διάνοιξη νέων γεωτρήσεων.

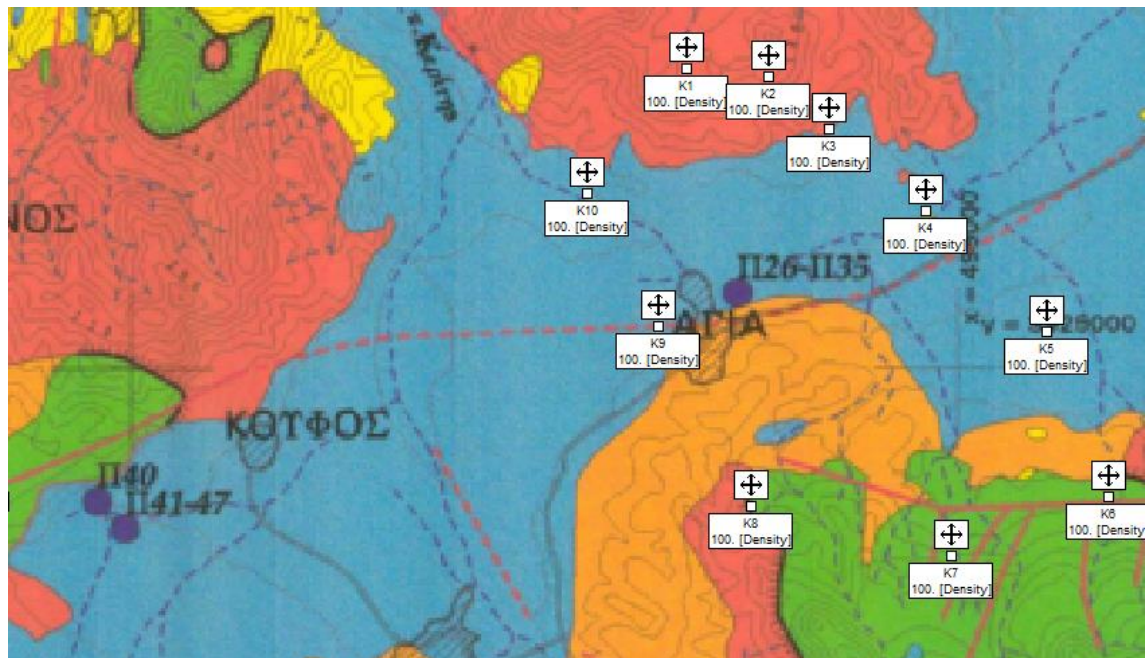
Αρχικά μελετάται το σενάριο διάνοιξης οκτώ γεωτρήσεων γύρω από τη λίμνη της Αγιάς κοντά στις ήδη υπάρχουσες γεωτρήσεις της ΔΕΥΑΧ.

Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παροχής άντλησης, χωρίς όμως η στάθμη του υδροφορέα να πέσει πάνω από το ένα μέτρο.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι προτεινόμενες τοποθεσίες των νέων γεωτρήσεων (N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8) και τα σημεία που επιλέχθηκαν για την παρατήρηση της πτώσης στάθμης, τα πηγάδια παρατήρησης Κ1 ως 10.



Εικόνα 4.1: Προτεινόμενες θέσεις γεωτρήσεων



Εικόνα 4.2: Πηγάδια παρατήρησης

Τα υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης χωρίς άντληση από τις νέες γεωτρήσεις έχουν ως εξής:

Πίνακας 3.1: Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης

Πηγάδια παρατήρησης	Υδραυλικά ύψη (m)
K1	53,53
K2	48,80
K3	45,32
K4	54,21
K5	43,45
K6	51,67
K7	41,53
K8	50,38
K9	42,95
K10	46,84

Σημειώνεται πως τα υδραυλικά ύψη αφορούν στο μήνα Οκτώβριο, τον τελευταίο μήνα δηλαδή που θα πραγματοποιείται άντληση.

Το άθροισμα των παροχών άντλησης ιδανικά θα είναι $800\text{m}^3/\text{h}$, ενώ η παροχή άντλησης της κάθε γεώτρησης δε γίνεται να είναι μικρότερη από μηδέν.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής:

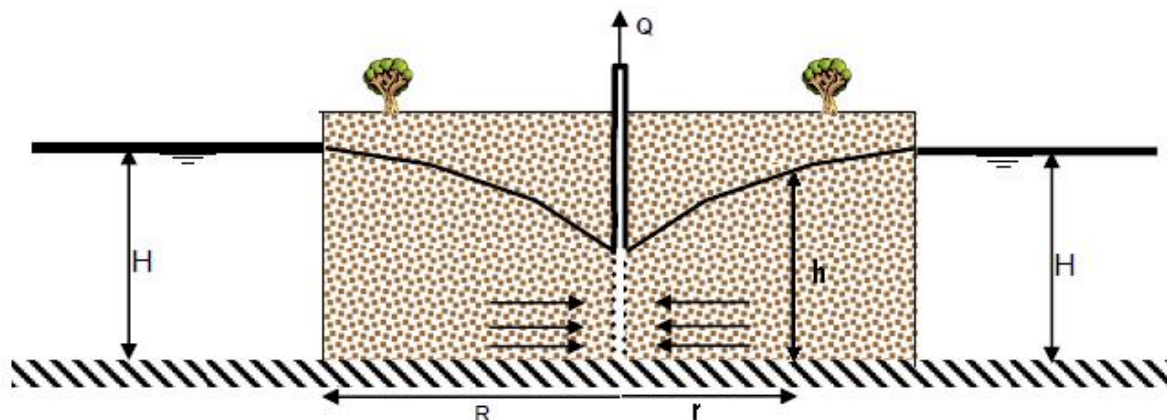
$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^8 q_i \quad & \text{subject to } h_{j\alpha\rho\chi} - h_{j\tau\epsilon\lambda} \leq 1 \\ q_i & \geq 0 \quad j=1,\dots,10 \\ i & = 1,\dots,8 \end{aligned}$$

Όπου:

q: οι παροχές άντλησης

h: τα υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης

Στους ελεύθερους υδροφορείς το υδραυλικό ύψος δεν ανταποκρίνεται γραμμικά στην άντληση.



Εικόνα 4.3: Ακτινωτή Ροή σε ελεύθερο υδροφορέα (Πηγή: Καρατζάς, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, 2003)

Η μαθηματική σχέση που συνδέει το υδραυλικό ύψος h σε τυχαίο σημείο με την παροχή άντλησης Q , την απόσταση του πηγαδιού από το σημείο αυτό r , το υδραυλικό ύψος H στο σημείο που δεν επηρεάζεται πλέον το σύστημα και την αντίστοιχη απόσταση από το πηγάδι R (ακτίνα επιρροής) είναι η εξής:

$$h^2 = H^2 + \ln\left(\frac{r}{R}\right) * \frac{Q}{\pi k} \quad (4.1)$$

$$\text{ή} \quad h = \sqrt{H^2 + \ln\left(\frac{r}{R}\right) * \frac{Q}{\pi k}} \quad (4.2)$$

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται Dupuit – Forchheimer και αναφέρεται σε ακτινική ροή του ύδατος σε ένα πηγάδι μεγάλου βάθους διείσδυσης σε ομογενή ελεύθερο υδροφόρα. Από τις παραγώγους εκμαιεύονται σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά της συνάρτησης ώστε να αναζητηθεί η κατάλληλη τεχνική βελτιστοποίησης.

Η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης υπολογίζεται ως:

$$\frac{\partial h}{\partial Q} = \frac{1}{2} \frac{\frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi k}}{\sqrt{H^2 + \ln\left(\frac{r}{R}\right) \frac{Q}{\pi k}}} \quad (4.3)$$

Και η δεύτερη:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial Q^2} = -\frac{1}{4} \frac{\left[\frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi k}\right]^2}{\sqrt{H^2 + \ln\left(\frac{r}{R}\right) \frac{Q}{\pi k}}} \quad (4.4)$$

Δεδομένου ότι οι όροι $\left[\frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi k}\right]^2$ και $\sqrt{H^2 + \ln\left(\frac{r}{R}\right) \frac{Q}{\pi k}}$ είναι θετικοί, η δεύτερη παράγωγος προκύπτει αρνητική που σημαίνει πως το υδραυλικό ύψος είναι κοίλη συνάρτηση της παροχής άντλησης.

Οι μέθοδοι που κρίνονται ικανές για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων είναι οι ακόλουθες:

- Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης: Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις που το υδραυλικό ύψος δεν παρουσιάζει έντονη μη γραμμικότητα σε σχέση με την άντληση. Ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος, το πάχος του γνωστό και συγκεκριμενοποιούνται τα όρια ελέγχου με στόχο την κατασκευή ενός πίνακα απόκρισης. Τα υδραυλικά ύψη που προκύπτουν εισάγονται ξανά στο σύστημα, τα όρια επαναπροσδιορίζονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη σύγκλιση. Μπορεί να θεωρηθεί πως η συνάρτηση προσεγγίζεται ως κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση.
- Μέθοδοι που χρησιμοποιούν την κλίση της συνάρτησης: Κινούνται με οδηγό την παράγωγο της εκάστοτε συνάρτησης προς την κατεύθυνση του ελαχίστου. Αρνητικές ή θετικές τιμές της παραγώγου δείχνουν προς ποια κατεύθυνση πρέπει να κινηθεί ο αλγόριθμος για την εύρεση του σημείου μηδενισμού της (Καρατζάς & Παπαδοπούλου, 2010).

- **Εναλλακτικές Μέθοδοι:** Πρόκειται για μεθόδους εντελώς διαφορετικής αντίληψης και προσέγγισης του προβλήματος. Βασίζονται σε στοχαστικές αναζητήσεις και η λειτουργία τους μπορεί να είναι εμπνευσμένη από συλλογικές συμπεριφορές πληθυσμών στη φύση (Νοημοσύνη Σμηνών), από λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου (Νευρωνικά Δίκτυα) ή από τη βιολογική εξέλιξη (Εξελικτικοί Αλγόριθμοι). Οι τεχνικές αυτές ανήκουν στον κλάδο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, η οποία κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στον τομέα της Πληροφορικής και της βελτιστοποίησης. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων έγκειται στην ικανότητα τους να επεξεργάζονται συναρτήσεις ασυνεχείς -όπου μέθοδοι που χρησιμοποιούν παραγώγους δε μπορούν να εφαρμοστούν- και στην ικανότητα διαχείρισης προβλημάτων με μεγάλο αριθμό μεταβλητών και μεγάλο χώρο εφικτών λύσεων. Επιπρόσθετα, οι τεχνικές Υπολογιστικής Νοημοσύνης είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν τους παράλληλους επεξεργαστές μειώνοντας θεαματικά το χρόνο αναζήτησης.

4.2 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ

Από τη δεκαετία του 1970 κι έπειτα έχει παρατηρηθεί αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Κοινό στοιχείο αυτών των συστημάτων είναι η κωδικοποίηση των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος και η επεξεργασία τους με διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου συστήματος, όπως επίσης ο Εξελικτικός Προγραμματισμός, οι Στρατηγικές Εξέλιξης, τα Συστήματα Ταξινόμησης και ο Γενετικός Προγραμματισμός. Όλα αυτά τα συστήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μια ευρύτερη ομάδα, τους Εξελικτικούς Αλγόριθμους.

Τα βασικά σημεία στα οποία ξεχωρίζουν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους βελτιστοποίησης είναι τα εξής:

- Πραγματοποιούν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο να εγκλωβιστεί η αναζήτηση σε μια περιοχή τοπικού ακρότατου και όχι ολικού.
- Δουλεύουν με κωδικοποίηση των παραμέτρων και όχι με αυτές καθ' αυτές τις παραμέτρους. Κάθε υποψήφια λύση αναπαριστάται με μια συμβολοσειρά ενός βοηθητικού αλφαβήτου. Το αλφάβητο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το δυαδικό.
- Χρησιμοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση για την εύρεση της βέλτιστης λύσης και δε χρησιμοποιούν βοηθήματα όπως παραγώγους.

- Τέλος, χρησιμοποιούν πιθανοκρατικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς, χωρίς αυτό βέβαια να σημαίνει πως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι εκτελούν μια τυχαία αναζήτηση στο χώρο των πιθανών λύσεων.

Τα χαρακτηριστικά αυτά κάνουν τους Γενετικούς Αλγόριθμους πιο εύρωστους από άλλες παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης (Goldberg E. D., 1989).

Οι γενετικοί αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John H. Holland τη δεκαετία του 1960 και αναπτύχθηκαν από το Πανεπιστήμιο του Michigan τις δεκαετίες του '60 και του '70. Αρχικός στόχος του Holland ήταν να μελετήσει το φαινόμενο προσαρμογής που παρατηρείται στη φύση και να αναπτύξει τρόπους με τους οποίους οι μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής θα μπορούσαν να εισαχθούν στα υπολογιστικά συστήματα. Ο Holland παρουσίασε τον Γενετικό Αλγόριθμο σαν ένα μέρος της βιολογικής εξέλιξης και έδωσε το θεωρητικό πλαίσιο για τη προσαρμογή χρησιμοποιώντας Γενετικούς Αλγόριθμους. Εντέλει, η κύρια εφαρμογή των Γενετικών Αλγόριθμων αποδείχθηκε η βελτιστοποίηση προβλημάτων.

4.2.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΝ

Ο τρόπος λειτουργίας των Γ.Α βασίζεται στους μηχανισμούς εξέλιξης και φυσικής επιλογής. Η φυσική επιλογή καθορίζει ποια μέλη ενός πληθυσμού επιβιώνουν και αναπαράγονται κι εξαρτάται από τις διάφορες συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον. Η θεωρία της φυσικής εξέλιξης διατυπώθηκε από το Δαρβίνο στα μέσα του 19^{ου} αιώνα και τάραξε τις μέχρι τότε θρησκευτικές αντιλήψεις για την προέλευση της ζωής. Η θεωρία υποστήριζε πως σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον με φυσικές δυσκολίες και περιορισμένους πόρους, οι ζωντανοί οργανισμοί είναι αναγκασμένοι να βρουν τρόπο να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν. Το μεγαλύτερο ποσοστό των οργανισμών που καταφέρνει να επιβιώσει είναι αυτό που ανταπεξήλθε καλύτερα στις υπάρχουσες δυσκολίες. Οι οργανισμοί αυτοί εφ' όσον επιβίωσαν, θα αναπαραχθούν και συνεπώς είναι πιθανότερο να αποκτήσουν απογόνους με καταλληλότερα χαρακτηριστικά για το υπάρχον περιβάλλον. Η θεωρία αυτή σε συνδυασμό με τη μετέπειτα διατύπωση των νόμων της κληρονομικότητας δίνουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την εξελικτική διαδικασία. Οι νόμοι της κληρονομικότητας ή νόμοι του Mendel (από τον Gregor Mendel στον οποίο ανήκει η πρώτη διατύπωση), εξηγούν τον τρόπο με τον οποίο κληρονομούνται τα χαρακτηριστικά των γονέων στα τέκνα. Μέσω της αναπαραγωγής δημιουργούνται νέοι οργανισμοί. Κάθε νέος οργανισμός έχει χαρακτηριστικά που προέρχονται από τους γονείς. Για τα χαρακτηριστικά αυτά, υπεύθυνα είναι τα χρωμοσώματα, τα οποία είναι διακριτές δομές του DNA. Τα χρωμοσώματα περιέχουν γονίδια στα οποία είναι αποθηκευμένες οι γενετικές πληροφορίες. Το 50% των γονιδίων κληρονομείται από τη μητέρα και το 50% από τον πατέρα. Μερικές φορές ένα γονίδιο μπορεί να πάθει μετάλλαξη και να γίνει αλλαγή στον τρόπο δομής ενός χρωμοσώματος. Η μετάλλαξη μπορεί να γίνει από λάθος αντιγραφή της γενετικής πληροφορίας κατά το διπλασιασμό του DNA ή να οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες (Holland J.H., 1975).

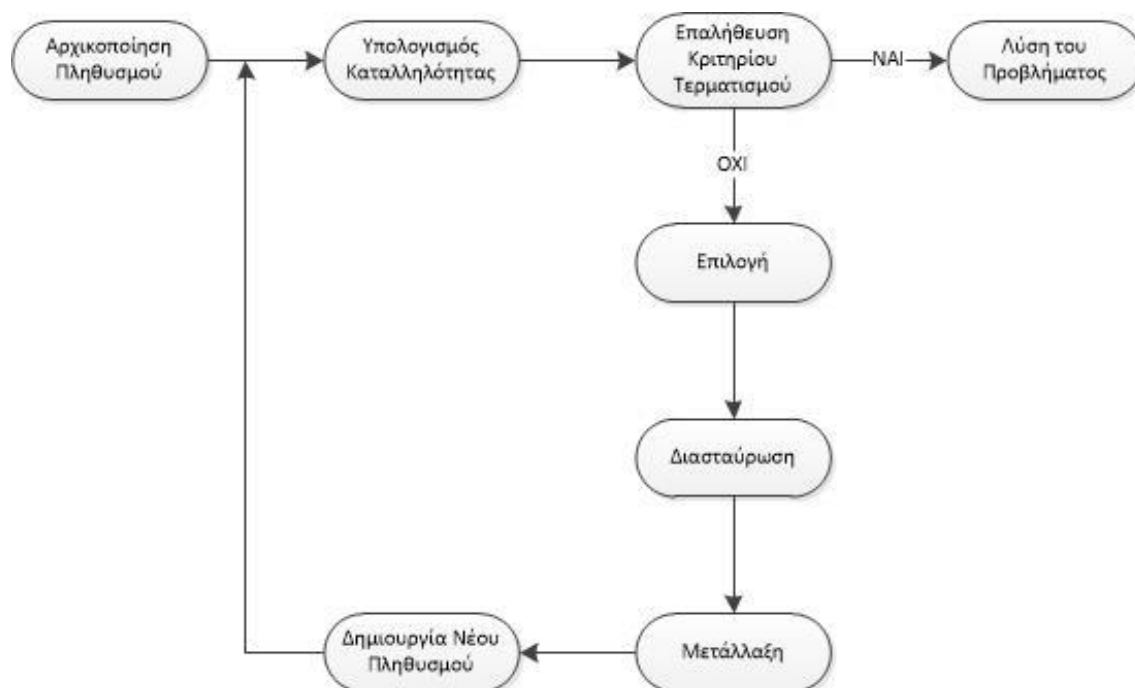
4.2.3 ΓΕΝΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι η αρχικοποίηση ενός πληθυσμού πιθανών λύσεων. Κάθε άτομο ή χρωμόσωμα αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος που έχει τεθεί. Το χρωμόσωμα αυτό είναι ένα διάνυσμα στο οποίο περιέχονται τιμές για τις μεταβλητές του προβλήματος. Ο αλγόριθμος δημιουργεί τυχαία ένα πλήθος χρωμοσωμάτων, δηλαδή ένα πλήθος πιθανών τιμών. Στη συνέχεια αξιολογεί τα άτομα βάσει των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος που το καθένα δίνει. Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στη φυσική επιλογή. Από τις τιμές που προκύπτουν ο αλγόριθμος κατατάσσει τα χρωμοσώματα βάσει της πιθανότητας τους να περάσουν στην επόμενη γενιά. Η πιθανότητα υπολογίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έδωσε το κάθε άτομο προς το άθροισμα των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των ατόμων.

Το επόμενο και χαρακτηριστικό βήμα του γενετικού αλγόριθμου είναι η δημιουργία τη επόμενης γενιάς πιθανών λύσεων, μέσω της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation). Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται και η ελιτίστικη επιλογή (elite count) για τη δημιουργία του πληθυσμού, η οποία είναι μια διαδικασία που δεν είναι εμπνευσμένη από τη φύση. Στόχος της είναι η εξασφάλιση πως ένα τουλάχιστον από τα καλύτερα μέλη του πληθυσμού θα περάσει στην επόμενη γενιά, βεβαιώνοντας έτσι πως σε περίπτωση που βρεθεί το ολικό ακρότατο, ο αλγόριθμος θα συγκλίνει σε αυτό. Έτσι, αρχικά επιλέγονται τα καλύτερα άτομα που θα περάσουν ως έχουν στην επόμενη γενιά. Από τα υπόλοιπα κάποια θα επιλεγθούν με πιθανότητα p_c για να υποστούν διασταύρωση και τα υπόλοιπα με πιθανότητα p_m θα υποστούν μετάλλαξη και θα αλλάξει η δομή τους, δηλαδή η τιμή που έχουν, με τυχαίο τρόπο (Coley D. A., 1999).

Ο νέος πληθυσμός αξιολογείται και ακολουθείται η ίδια διαδικασία μέχρι να ικανοποιηθεί μια συνθήκη τερματισμού.

Η διαδικασία αναπαριστάται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής εκτέλεσης ενός Γ.Α.

4.2.4 ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

- **Χρωμόσωμα-Γονίδιο:** Το χρωμόσωμα είναι ένα διάνυσμα στο οποίο είναι αποθηκευμένες οι πιθανές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος που έχει ορισθεί. Κάθε πιθανή τιμή αποτελεί ένα γονίδιο. Τα γονίδια συνεπώς ισούνται με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης.
- **Πληθυσμός-Γενιά:** Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων που παράγεται σε κάθε επανάληψη. Το σύνολο των χρωμοσωμάτων κάθε επανάληψης αποτελούν μια γενιά. Όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός τόσο καλύτερη εξερεύνηση γίνεται στο χώρο των πιθανών λύσεων.
- **Κωδικοποίηση:** Οι πιθανές τιμές που περιέχουν τα χρωμοσώματα κωδικοποιούνται βάσει κάποιου αλφαβήτου. Στόχος της κωδικοποίησης είναι η διευκόλυνση των μετέπειτα διαδικασιών του αλγόριθμου. Τα δεδομένα αποκωδικοποιούνται για να τα αξιολογήσει η αντικειμενική συνάρτηση.
- **Συνάρτηση καταλληλότητας:** Πρόκειται ουσιαστικά για την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Η συνάρτηση δέχεται την αποκωδικοποιημένη τιμή των χρωμοσωμάτων κάθε γενιάς ως είσοδο κι αφού τα αξιολογήσει επιστρέφει μια τιμή μες στο διάστημα $[0,1]$, που είναι μέτρο της καταλληλότητας τους. Τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν ακατάλληλα χρωμοσώματα, ενώ τα άτομα με τιμές κοντά στο 1 είναι αυτά που έδωσαν την καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Από την τιμή αυτή εξαρτάται η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα περάσουν στην επόμενη γενιά.

- **Επιλογή:** Αφορά στα άτομα που θα δημιουργήσουν την επόμενη γενιά. Κάποια θα επιλεγθούν να περάσουν αυτούσια στην επόμενη γενιά, άλλα θα επιλεγθούν ως γονείς. Μέρος αυτών θα υποστούν μετάλλαξη και κάποια - κατά κανόνα τα πλέον ακατάλληλα - θα απορριφθούν.
- **Διασταύρωση:** Ο συνδυασμός δύο χρωμοσωμάτων με σκοπό την αναπαραγωγή τέκνων με χαρακτηριστικά και από τους δύο γονείς.
- **Μετάλλαξη:** Τυχαιές αλλαγές σε ένα χρωμόσωμα. Βοηθάει στην καλύτερη αναζήτηση στο χώρο.

Ο εντοπισμός των σωστών ποσοστών μετάλλαξης και διασταύρωσης θα οδηγήσει τον αλγόριθμο σε ευρεία αναζήτηση στο χώρο των πιθανών λύσεων και σύγκλιση του αλγόριθμου σε εύλογο χρονικό διάστημα (Coley D. A., 1999). Εν γένει, μεγάλη πιθανότητα μετάλλαξης οδηγεί σε καθαρά τυχαία αναζήτηση, ενώ πολύ χαμηλή περιορίζει το χώρο σάρωσης του αλγόριθμου με κίνδυνο τον αποκλεισμό του ολικού ακρότατου από το πεδίο αναζήτησης.

4.2.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Τα πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγόριθμων είναι τα εξής:

- Λύνουν απαιτητικά προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι ικανοί να αντιμετωπίσουν προβλήματα των οποίων η λύση δύσκολα προσδιορίζεται, καθώς επίσης βρίσκουν εύκολα ακρότατα σε συναρτήσεις με έντονες διακυμάνσεις, όπου άλλες μέθοδοι αποτυγχάνουν.
- Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Μπορούν να υποστούν τροποποιήσεις και αλλαγές για να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε προβλήματος.
- Μπορούν να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Δεν απαιτείται η επανασχεδίαση των Γενετικών Αλγόριθμων για τη χρήση τους σε συνδυασμό με άλλα συστήματα και μοντέλα, καθώς χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της εκάστοτε διαδικασίας ή συνάρτησης που πρόκειται να βελτιστοποιήσουν, χωρίς να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της μέσα στο σύστημα.
- Είναι ευέλικτοι και μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους.
- Έχουν πολύ πιο ευρύ πεδίο εφαρμογών σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Οι τομείς εφαρμογής τους είναι πάρα πολλοί όπως η εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων, η οικονομία και ο σχεδιασμός μηχανών.

- Δεν απαιτείται η ύπαρξη περιορισμών στην αντικειμενική συνάρτηση που καλούνται να βελτιστοποιήσουν. Οι παραδοσιακές μέθοδοι αδυνατούν να επεξεργαστούν συναρτήσεις χωρίς περιορισμούς, όπως είναι η ύπαρξη παραγώγων ή η συνέχεια. Έτσι, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι κατάλληλοι για ευρύ πεδίο προβλημάτων.
- Βασικό τους στοιχείο είναι ο παραλληλισμός. Με τη χρήση της κωδικοποίησης ένα άτομο αντιπροσωπεύει πολλά άλλα με αποτέλεσμα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι να μπορούν να αναζητούν λύσεις σε μεγάλους χώρους σε σχετικά μικρούς χρόνους. Έχει υπολογιστεί ότι 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000.
- Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Η μόνη επικοινωνία του Γενετικού Αλγόριθμου με το περιβάλλον του είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Με αυτόν τον τρόπο είναι εξασφαλισμένη η εύρεση λύσης ανεξάρτητα από τη φύση του προβλήματος. Όπου οι Γενετικοί Αλγόριθμοι αποτυγχάνουν φταίει η φύση του χώρου που ερευνούν και όχι το πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος.
- Επιτυγχάνουν τον συνδυασμό της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης και της εκμετάλλευσης της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Το γεγονός αυτό καθιστά τους Γενετικούς Αλγόριθμους ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς για τους ερευνητές, καθώς είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί άλλη μέθοδος ικανή να συνδυάζει αυτά τα δύο χαρακτηριστικά. Συνήθως, με την τυχαία αναζήτηση γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου αλλά δε γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας. Από την άλλη, όπου γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, δεν επιτυγχάνεται επαρκής εξερεύνηση του χώρου.
- Δέχονται εύκολα παράλληλη υλοποίηση. Χαρακτηριστικό που εντοπίζεται σπάνια σε άλλες μεθόδους και καθιστά τους Γενετικούς Αλγόριθμους ακόμα πιο αποδοτικούς (Σ. Λυκοθανάσης, 2014).

4.2.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΕΝΕΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι δεν παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Ο λόγος που δεν είναι τόσο διαδεδομένοι είναι η μη εξοικείωση των ερευνητών στο πεδίο της Πληροφορικής με τη Γενετική. Οι όροι που είναι δανεισμένοι από την επιστήμη της Βιολογίας και ειδικότερα από τη Γενετική όμως, χρησιμοποιούνται μόνο επειδή η ανάπτυξη των Γενετικών Αλγορίθμων εμπνεύστηκε κυρίως από τους μηχανισμούς της εξέλιξης. Επιπλέον βοηθάνε στο να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους, αφού απέχει κατά πολύ από τις κλασικές μεθόδους αναζήτησης. Θα μπορούσε κάποιος κάλλιστα να μη διαθέτει καθόλου γνώσεις Βιολογίας και να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει έναν Γ.Α (Λυκοθανάσης Σ., 2014).

Σημείο που χρήζει προσοχής είναι ο σωστός σχεδιασμός των Γενετικών Αλγορίθμων προκειμένου να είναι κατάλληλοι για το κάθε πρόβλημα. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα, που είναι η προσαρμοστικότητα τους, συνεπάγεται και απαίτηση για ενδελεχή αναζήτηση των παραμέτρων εκείνων που θα καταστήσουν τον Γενετικό Αλγόριθμο ικανό για την εύρεση λύσης σε ένα πολύπλοκο πρόβλημα.

4.3 ΟΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΤΟ MATLAB

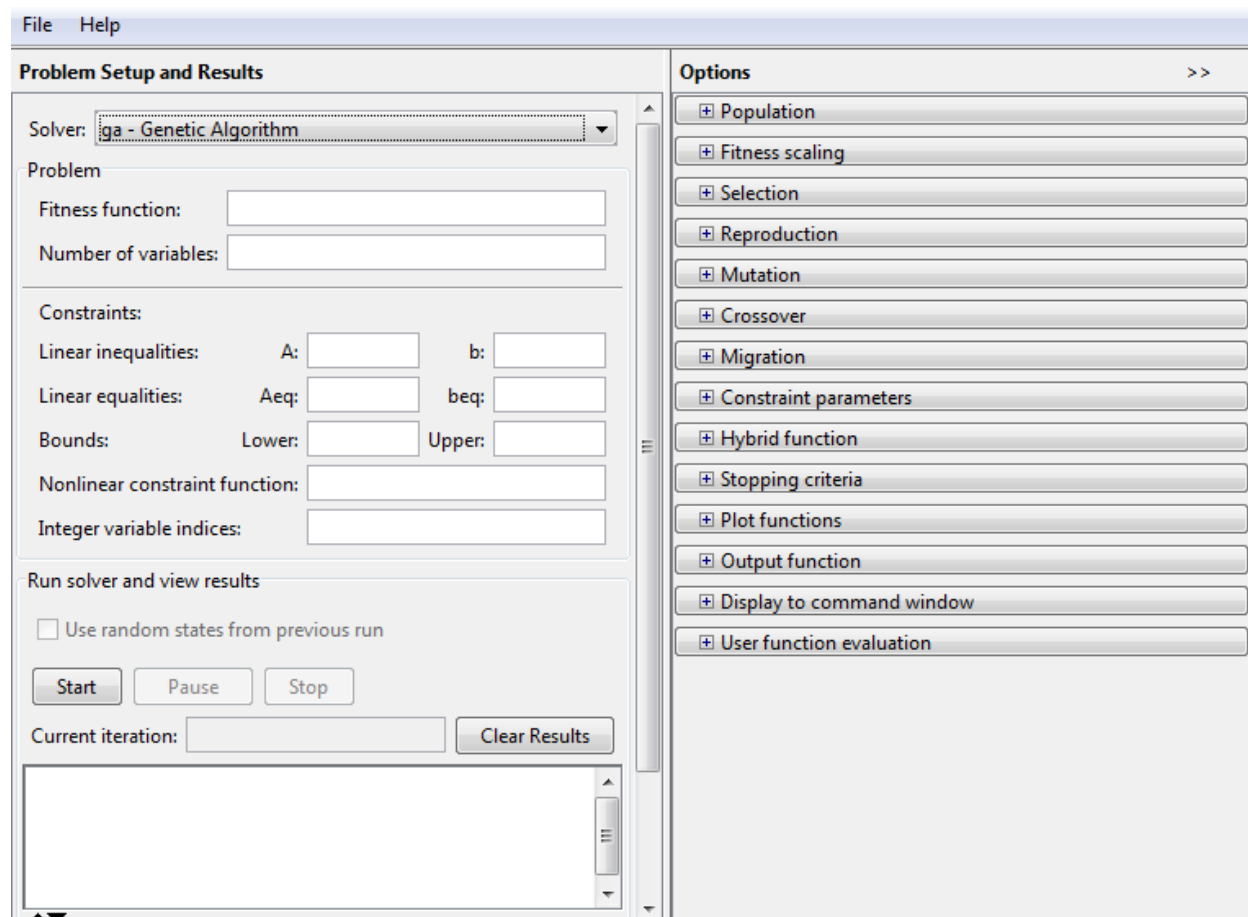
Το MATLAB (Matrix Laboratory) αποτελεί μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και ταυτόχρονα ένα διαδραστικό και εύχρηστο περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς, ανάπτυξη αλγορίθμων, ανάλυση δεδομένων και γραφική παρουσίαση. Διαθέτει επίσης ένα σύνολο πρόσθετων εξειδικευμένων προγραμματιστικών λύσεων, τις εργαλειοθήκες (toolboxes), οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών, όπως συμβολικοί υπολογισμοί (symbolic computation), επεξεργασία εικόνων (image processing), στατιστική (statistics), σχεδιασμός ελέγχου συστημάτων (control system design), νευρωνικά δίκτυα (neural networks), ασαφή λογική (fuzzy logic) και βελτιστοποίηση (global optimization).

Βασική δομική μονάδα του MATLAB αποτελούν οι πίνακες καθώς όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε πίνακες χωρίς αρχικές διαστάσεις. Ακόμα το MATLAB παρέχει δυνατότητες προγραμματισμού στη δική του γλώσσα προγραμματισμού.

Ανάμεσα στις εργαλειοθήκες του MATLAB για την επίλυση προβλημάτων, διακρίνεται και η εργαλειοθήκη των Γενετικών Αλγόριθμων με τους οποίους γίνεται αναζήτηση του ελαχίστου της συνάρτησης που θα δοθεί από το χρήστη.

Genetic Algorithm tool

Για τη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος ο χρήστης έχει τη δυνατότητα είτε να γράψει ένα δικό του κώδικα στο παράθυρο εντολών του MATLAB, χρησιμοποιώντας έτοιμες εντολές της, είτε να κάνει χρήση των μεθόδων που προσφέρει, μέσω γραφικού περιβάλλοντος. Από το command window (παράθυρο εντολών) μπορεί να καλεστεί η οποιαδήποτε μέθοδος, γράφοντας τη σύντμηση του ονόματος της. Έτσι, σε περίπτωση που η επιθυμητή μέθοδος είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, μέσω της εντολής» gatool ανοίγει το παρακάτω παράθυρο διαλόγου:



Εικόνα 4.4: MATLAB Optimization Tool

Στη συνέχεια αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για την προετοιμασία του εργαλείου.

Στο πεδίο **fitness function** εισάγεται το όνομα του αρχείου (script) που περιέχει την αντικειμενική συνάρτηση και στο **πεδίο Number of variables** συμπληρώνεται ο αριθμός των μεταβλητών της συνάρτησης που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί.

Στη δεξιά μεριά του παραθύρου βρίσκονται οι καρτέλες των options, που προσφέρουν μια πληθώρα από επιλογές για τις ρυθμίσεις των βασικών λειτουργιών του Γενετικού Αλγόριθμου. Η εύρεση του αποτελεσματικότερου συνδυασμού των ρυθμίσεων αυτών εντοπίζεται με δοκιμές και εξαρτάται από τη διαίσθηση του χρήστη για την κατεύθυνση που πρέπει να κινηθεί και από την εμπειρία του.

Ακολουθώς περιγράφονται τα options.

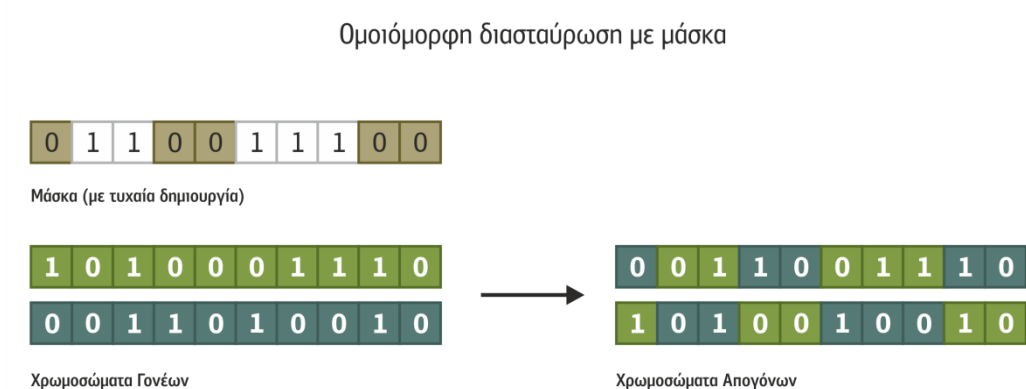
❖ **Population:** Αφορά στις διαδικασίες αρχικοποίησης του πληθυσμού.

- **Population type:** Ορίζεται ο τύπος των δεδομένων του πληθυσμού. Οι επιλογές που δίνονται είναι:
 - Double vector: Ο προκαθορισμένος τύπος δεδομένων.

- Bit string: Συμβολοσειρά δυαδικών ψηφίων.
- Custom: Ορίζεται από το χρήστη ο τύπος δεδομένων (π.χ. ακέραιοι). Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να δοθεί και η συνάρτηση δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.
- **Population size:** Καθορίζεται ο αριθμός των ατόμων κάθε γενιάς. Όπως προαναφέρθηκε όσο μεγαλύτερος είναι ο πληθυσμός τόσο καλύτερη αναζήτηση επιτυγχάνεται και αυξάνεται η πιθανότητα για την εύρεση ολικού ελαχίστου. Συγχρόνως όμως αυξάνεται και ο χρόνος εκτέλεσης. Για να γίνει σωστή αναζήτηση πάντως, ο πληθυσμός θα πρέπει να ξεπερνάει τον αριθμό των μεταβλητών.
- **Creation function:** Επιλέγεται ο τρόπος δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού. Οι συναρτήσεις που παρέχει το MATLAB είναι οι εξής:
 - Uniform: Σε περίπτωση απουσίας περιορισμών δημιουργείται ένας τυχαίος πληθυσμός με ομοιόμορφη κατανομή.
 - Constraint dependet: Δημιουργία πληθυσμού βασιζόμενη στους περιορισμούς.
 - Feasible: Η συνάρτηση που επιλέγεται σε περίπτωση που υπάρχουν γραμμικοί περιορισμοί.
- **Initial population:** Καθορίζεται ένας συγκεκριμένος αρχικός πληθυσμός από το χρήστη για να δοθεί στον αλγόριθμο μια κατεύθυνση στην αναζήτηση του. Εάν δε δοθεί ο αρχικός πληθυσμός, δημιουργείται μέσω της creation function .
- **Initial score:** Δίνονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τον αρχικό πληθυσμό.
- **Initial range:** Καθορίζεται η διακύμανση των τιμών στον αρχικό πληθυσμό.
- ❖ **Fitness scaling:** Γίνεται η προετοιμασία για την ορθή λειτουργία της διαδικασίας της επιλογής. Μέσω των παρακάτω συναρτήσεων τα χρωμοσώματα διαβαθμίζονται ανάλογα με το σκορ που πέτυχαν στην αντικειμενική συνάρτηση. Εάν υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ των τιμών που θα προκύψουν μέσα από την κατάταξη, θα αναπαραχθούν τα άτομα με τις υψηλότερες τιμές και ο αλγόριθμος θα συγκλίνει γρήγορα, κατά πάσα πιθανότητα σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Πιο ομοιόμορφη κατανομή στην κατάταξη των χρωμοσωμάτων θα αυξήσει το χρόνο εκτέλεσης αλλά ο αλγόριθμος θα σαρώσει καλύτερα το χώρο.
- Rank: Η προεπιλεγμένη συνάρτηση, στην οποία τα άτομα ταξινομούνται από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο, βάσει της τιμής της συνάρτησης αξιολόγησης. Ανάλογα με την κατάταξή του ατόμου προκύπτει και η καταλληλότητά του.

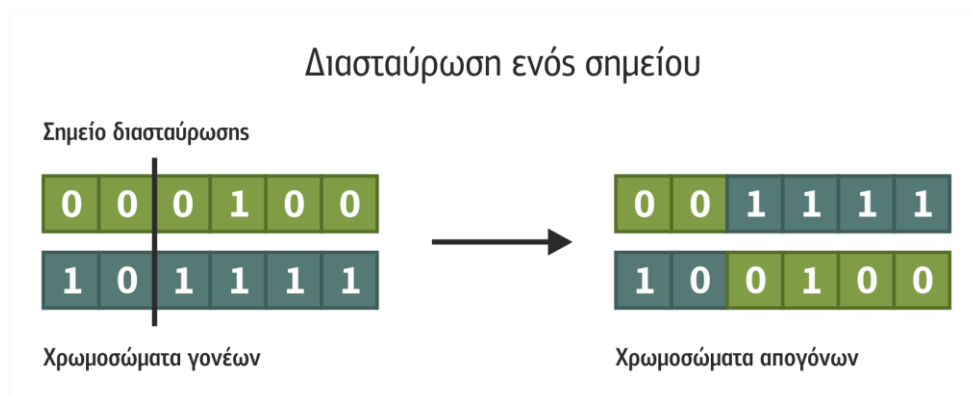
- **Proportional:** Δημιουργείται μια ταξινομημένη λίστα που αποτελείται από τα άτομα με βάση τις ικανότητές τους. Έπειτα εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός $s=f^k$, όπου k συνήθως είναι η κατάταξη του κάθε ατόμου στην ταξινομημένη λίστα και προκύπτει η νέα, εκθετικά διαβαθμισμένη ικανότητάς τους, s .
 - **Shift linear:** Γίνεται μετασχηματισμός των τιμών των ικανοτήτων του πληθυσμού βάσει της γραμμικής σχέσης: $s=a*f+b$, όπου οι τιμές των a και b υπολογίζονται κατάλληλα για τη διατήρηση του μέσου όρου των νέων ικανοτήτων στα ίδια επίπεδα με των προηγούμενων.
 - **Top:** Επιλέγεται ο αριθμός των ατόμων με την καλύτερη απόδοση που θα οδηγηθούν στην αναπαραγωγή. Τα υπόλοιπα άτομα αποκλείονται από τη διαδικασία (Farzad A., 2004).
- ❖ **Selection:** Μέσω της συνάρτησης επιλογής θα προκύψουν τα άτομα που θα γίνουν γονείς και θα μεταβιβάσουν χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Οι διαθέσιμες συναρτήσεις είναι οι εξής:
- **Stochastic uniform:** Η προεπιλεγμένη συνάρτηση κατά την οποία δημιουργείται μια ευθεία στην οποία τα άτομα καταλαμβάνουν συγκεκριμένα μήκη. Το μήκος κάθε ατόμου είναι αντίστοιχο της διαβάθμισής του. Ο αλγόριθμος κινούμενος με σταθερό βήμα πάνω στη γραμμή επιλέγει κάθε φορά το χρωμόσωμα που αντιστοιχεί στο σημείο που έχει σταματήσει.
 - **Remainder:** Το ακέραιο μέρος της διαβαθμισμένης τιμής του χρωμοσώματος καθορίζει τις φορές που θα γίνει γονέας.
 - **Uniform:** Επιλογή χρωμοσωμάτων με ομοιόμορφη κατανομή.
 - **Roulette:** Δημιουργείται τροχός με τμήματα ανάλογα της διαβαθμισμένης τιμής των ατόμων. Ο τροχός γυρίζει και επιλέγεται τυχαίος αριθμός τμημάτων.
 - **Tournament:** Τα άτομα χωρίζονται τυχαία σε ομάδες. Ο χρήστης επιλέγει το αριθμό των καλύτερων ατόμων της κάθε ομάδας που θα γίνουν γονείς (Goldberg D. E. & Deb K, 1991).
- ❖ **Reproduction:** Η αναπαραγωγή των τέκνων της επόμενης γενιάς.
- **Elite count:** Καθορίζεται ο αριθμός των ατόμων με την καλύτερη τιμή που θα περάσουν αυτόματα στην επόμενη γενιά.
 - **Crossover fraction:** Επιλέγεται το ποσοστό των τέκνων μιας γενιάς που θα προέλθουν από διασταύρωση.
- ❖ **Mutation:** Η διαδικασία της μετάλλαξης κατά την οποία ο αλγόριθμος αλλάζει τυχαία κάποιο γονίδιο ενός χρωμοσώματος. Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ των παρακάτω συναρτήσεων:

- Gaussian: Τυχαία αλλαγή στο διάνυσμα ενός χρωμοσώματος, βασισμένη στη κατανομή Gauss.
 - Uniform: Επιλέγεται τα χρωμόσωμα που θα υποστεί μετάλλαξη και ένα δεύτερο χρωμόσωμα που θα κατευθύνει τη μετάλλαξη. Από το πρώτο χρωμόσωμα κρατούνται τυχαία κάποια γονίδια στις θέσεις τους και τα υπόλοιπα, με ποσοστό που επιλέγεται από το χρήστη, αλλάζουν βάσει της τιμής τους στο δεύτερο χρωμόσωμα.
 - Adaptive feasible: Η συνάρτηση αυτή δημιουργεί τυχαία κατευθύνσεις που είναι προσαρμοστικές σε σχέση με την τελευταία επιτυχή ή ανεπιτυχή γενιά. Η συγκεκριμένη συνάρτηση αποτελεί προεπιλογή, σε περίπτωση ύπαρξης περιορισμών γραμμικών και ανισότητας, οι οποίοι οριοθετούν και την εφικτή περιοχή.
- ❖ **Crossover:** Καθορίζεται ο τρόπος διασταύρωσης των χρωμοσωμάτων-γονέων. Οι υπάρχουσες συναρτήσεις είναι οι ακόλουθες:
- Scattered : Η συνάρτηση αυτή δημιουργεί ένα τυχαίο δυαδικό διάνυσμα-μάσκα και στη συνέχεια, για τις θέσεις που υπάρχει ο αριθμός ένα (1) επιλέγεται γονίδιο από τον πρώτο γονέα, ενώ για τις θέσεις που είναι μηδέν (0) επιλέγεται γονίδιο από τον δεύτερο γονέα. Τα γονίδια συνδυάζονται και προκύπτει το νέο τέκνο. Με την αντίστροφη διαδικασία προκύπτει και το δεύτερο τέκνο.



Εικόνα 4.5: Διασταύρωση με μάσκα (Πηγή: Γεωργούλη Κ., 2015)

- Single point: Επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός x στο διάστημα $[1, n]$ όπου n ο αριθμός των μεταβλητών. Από το διάστημα 1 ως x επιλέγονται τα γονίδια του πρώτου γονέα και από $x+1$ ως n , τα γονίδια του δεύτερου και αντιγράφονται στο χρωμόσωμα-απόγονο. Ένας δεύτερος απόγονος δημιουργείται κληρονομώντας γονίδια από τον δεύτερο γονέα στο διάστημα $[1, x]$ και από τον πρώτο στο διάστημα $[x+1, n]$.



Εικόνα 4.6: Διασταύρωση ενός σημείου (Πηγή: Γεωργούλη Κ., 2015)

- Two point: Επιλέγονται 2 τυχαίοι αριθμοί x, m με $x < m$, στο διάστημα $[1, n]$. Από το διάστημα $[1, x]$ και από το διάστημα $[m+1, n]$ κληρονομούνται τα γονίδια του πρώτου γονέα και στο ενδιάμεσο διάστημα από το δεύτερο για το ένα τέκνο. Το ανάποδο ισχύει για το δεύτερο τέκνο.
 - Intermediate: Η αναπαραγωγή τέκνων γίνεται τυχαία με τη χρήση ενός τυχαίου σταθμισμένου μέσου όρου των γονέων. Δίνοντας τιμή στην παράμετρο Ratio, ορίζεται το βάρος.
 - Heuristic: Ο απόγονος δημιουργείται μέσω της συνάρτησης: $child = parent1 + Ratio * (parent1 - parent2)$. Όπου $parent1$ είναι ο γονέας με την καλύτερη απόδοση και η παράμετρος Ratio ορίζεται από το χρήστη.
 - Arithmetic: Τα τέκνα που δημιουργούνται είναι ο αριθμητικός μέσος όρος των γονέων τους. Μερικές φορές οι γονείς συμβάλλουν τη διαμόρφωση των τέκνων με διαφορετικά βάρη (Kaya Y., Uyar M., Tekin R., 2011).
- ❖ **Migration:** Η διαδικασία της μετανάστευσης επιτρέπει τη μετακίνηση ατόμων μεταξύ των πληθυσμών. Σκοπός της είναι η επαναφορά ατόμων που μπορεί να αποκλείστηκαν κατά τη διαδικασία της επιλογής, ενώ δεν ήταν ακατάλληλα. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει κάθε πόσες γενιές θα λαμβάνει χώρα αυτή η διαδικασία από το πεδίο interval. Επίσης μπορεί να καθορίσει την κατεύθυνση της μετακίνησης (πεδίο direction) και το ποσοστό των ατόμων που θα μεταναστεύσουν (πεδίο fraction).
- ❖ **Stopping criteria:** Σε αυτήν την καρτέλα ορίζονται τα κριτήρια τερματισμού του αλγόριθμου. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω:
- Generations: Ο αριθμός των γενιών που θα δημιουργήσει και θα αξιολογήσει ο αλγόριθμος αν δεν ικανοποιηθεί κάποιο από τα υπόλοιπα κριτήρια.

- **Time limit:** Ο μέγιστος χρόνος σε δευτερόλεπτα που θα εκτελείται ο αλγόριθμος.
 - **Fitness limit:** Το όριο της αντικειμενικής συνάρτησης στο οποίο θα σταματήσει ο αλγόριθμος.
 - **Stall generations:** Οι συνεχόμενες επαναλήψεις που θα κάνει υποχρεωτικά ο αλγόριθμος χωρίς να παρατηρείται βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση.
 - **Stall time limit:** Ο χρόνος που θα εκτελείται υποχρεωτικά ο αλγόριθμος χωρίς να βελτιώνεται η αντικειμενική συνάρτηση.
 - **Function tolerance:** Ο αλγόριθμος σταματά όταν η διαφορά των τιμών της αντικειμενική συνάρτησης δύο συνεχόμενων γενιών είναι μικρότερη από αυτό που θα οριστεί. Η προκαθορισμένη διαφορά είναι 10^{-6} .
- ❖ **Hybrid function:** Είναι δυνατή η χρήση μιας συνάρτησης ακόμα για τον έλεγχο της βελτιστοποίησης μετά το πέρας της αναζήτησης από τον Γενετικό Αλγόριθμο.
- ❖ **Plots:** Υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης διαφόρων διαγραμμάτων που αφορούν στις διαδικασίες της βελτιστοποίησης όπως το διάγραμμα Best fitness που απεικονίζει την καλύτερη και τη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε γενιά, το Best individual που δείχνει τα καλύτερα άτομα της κάθε γενιάς, το Distance που δείχνει τη μέση απόσταση μεταξύ των τιμών των ατόμων και πολλά άλλα.

Ο ελιτισμός και η μετανάστευση δεν ανήκουν στις κλασσικές διαδικασίες ενός Γενετικού Αλγόριθμου. Τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν έναν Γενετικό Αλγόριθμο είναι ένας πληθυσμός χρωμοσωμάτων, η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Πέρα από αυτά τα στοιχεία όμως έχουν προταθεί και αναπτυχθεί πολλές επιπλέον διαδικασίες, με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας των Γ.Α (Mitchell M.,1999).

4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Για τη λύση του προβλήματος είναι αναγκαία η ανάπτυξη ενός κώδικα που θα συνδέει το MATLAB με το μοντέλο PTC. Κάθε γενιά με πιθανές τιμές των παροχών άντλησης που θα παράγεται από τον αλγόριθμο στο περιβάλλον του MATLAB, θα πρέπει να εισάγεται στο PTC, αυτό να 'τρέχει' και να εξάγονται αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης. Οι τιμές των υδραυλικών υψών θα πρέπει να επιστρέφουν πίσω στο MATLAB και να ελέγχεται εάν η πτώση στάθμης είναι μεγαλύτερη από το ένα μέτρο. Η διαδικασία επιτυγχάνεται με την εισαγωγή και επεξεργασία των αρχείων που περιέχουν τις πληροφορίες για τις οριακές συνθήκες και τα υδραυλικά ύψη. Συγκεκριμένα, το αρχείο bcflow.dat περιέχει όλες τις πληροφορίες για τις οριακές συνθήκες 1^{ου} και 2^{ου} τύπου που έχουν εισαχθεί στο

PTC και το αρχείο heads s10.1 τα εξαχθέντα αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη στην περιοχή.

Επειδή η διαδικασία των Γ.Α δεν επιτρέπει την ύπαρξη εξωτερικών περιορισμών όπως γίνεται με άλλες μεθόδους, οι περιορισμοί που στην περίπτωση αυτή αφορούν στην πτώση στάθμης στα πηγάδια παρατήρησης πρέπει να ενσωματωθούν με κάποιον τρόπο στην αντικειμενική συνάρτηση. Χρησιμοποιείται λοιπόν ένας όρος που συναθροίζεται με την αντικειμενική συνάρτηση. Ο όρος αυτός λειτουργεί ως πέναλτι και αφού στη βελτιστοποίηση στόχος είναι πάντοτε η ελαχιστοποίηση, λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές σε περίπτωση που παραβιαστεί κάποιος περιορισμός.

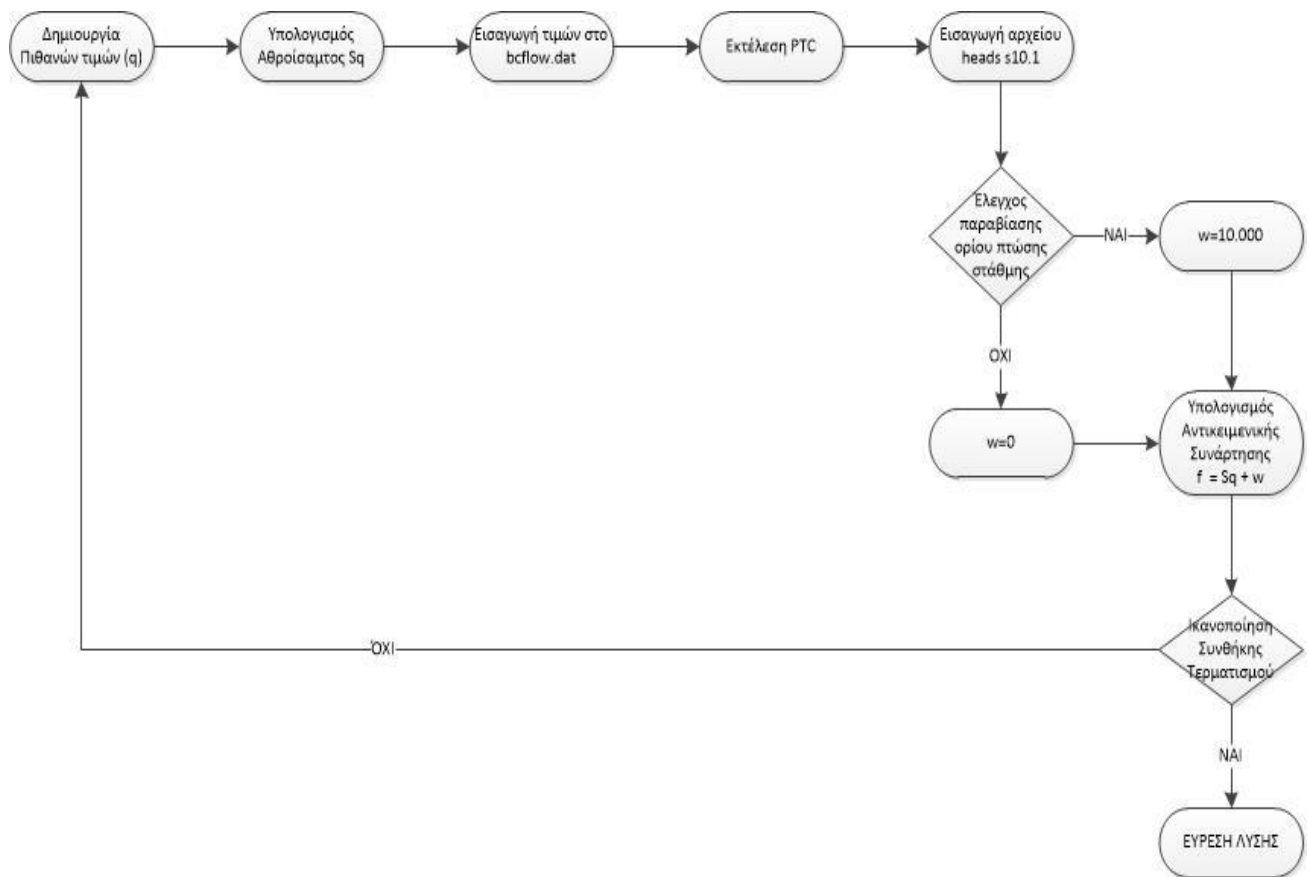
Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως ακολούθως:

$$\min f = \sum_{i=1}^8 q_i + W$$

Η τιμή της μεταβλητής w αρχικά ορίζεται ίση με μηδέν. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης εάν οι τιμές των παροχών άντλησης οδηγήσουν σε μεγάλη πτώση στάθμης, ο όρος w θα πάρει πολύ μεγάλη τιμή. Συνακόλουθα, θα αυξηθεί κατά πολύ η τιμή της f καθιστώντας το χρωμόσωμα που εξετάζεται ακατάλληλο.

Σημειώνεται πως οι παροχές λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Ως εκ τούτου, παρόλο που στόχος είναι η μεγιστοποίηση των παροχών άντλησης, πρόκειται για ελαχιστοποίηση αρνητικών μεταβλητών και δε χρειάζεται μετατροπή στην αντικειμενική συνάρτηση.

Η όλη διαδικασία αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής κώδικα

Επιπλέον, για να περιοριστεί ο χώρος αναζήτησης του αλγόριθμου μόνο στο πεδίο $[-\infty, 0]$ αφού οι παροχές δέχονται μόνο αρνητικές τιμές προστέθηκε ακόμα ένας όρος-πέναλτι που ενεργοποιείται σε περίπτωση που κάποια μεταβλητή λάβει θετική τιμή. Τελικώς, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη μορφή:

$$f = \sum_{i=1}^8 q_i + W + SP$$

Ο ολοκληρωμένος κώδικας έχει ως εξής:

```

function f=xristina(q)
sq=sum(q); %upologismos athroismatos paroxwn%
sp=0;
for i=1:8;
    if q(i)>=0;
        sp=10000
    end
end
    
```

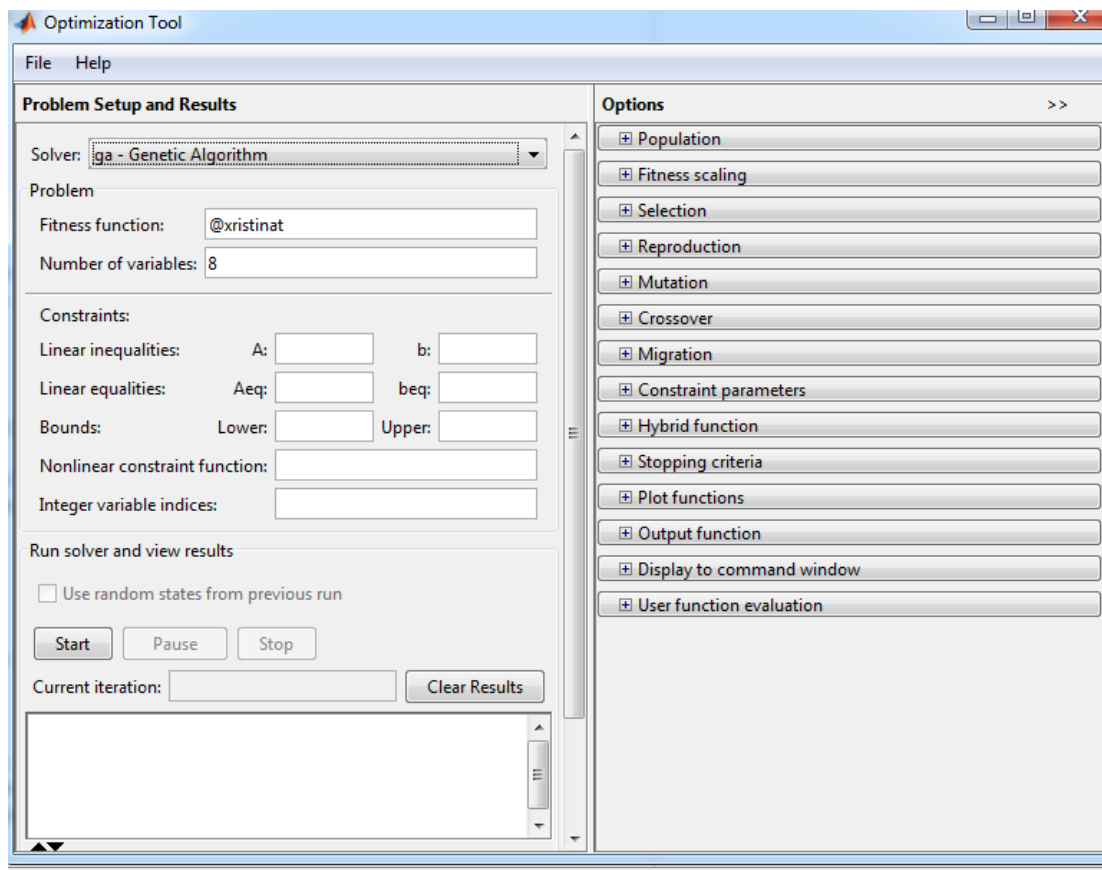
```
end

fileID=fopen('bcflow.dat'); %anagnwsh tou arxeiou dedomemvn oriakwn sunthikwn
tou ptc%
db=textscan(fileID, '%s %d %f');
komvoibcf=db{1};
paroxes=db{3};
tupos=db{2};
fileID=fopen('komvoia.txt'); %anoigma tou arxeiou me ta phgadia antlshs%
Komvoi=textscan(fileID, '%s');
komvoia=Komvoi{1};
for i=155:308:1387;
    for j=i:i+64;
        for c=1:8;
            tf=strcmp(komvoibcf(j),komvoia(c));
            if tf==1;
                paroxes(j)=q(c); %eisagwgh paroxwn%
            end
        end
    end
end
end
end
for i=1:1540;
    A{i,1}=komvoibcf(i);
    A{i,2}=tupos(i);
    A{i,3}=paroxes(i);
end
fileID=fopen('bcflow.dat','w'); %rewrite to arxeio bcflow me tis nees paroxes%
a=66;
b=110;
c=154;
for i = 1:1540;
    if i==a;
        fprintf(fileID,'%2s\r\n',komvoibcf{i});
        a=a+154;
    elseif i==b;
```

```
fprintf(fileID, '%2s\r\n', komvoibcf{i});  
b=b+154;  
elseif i==c;  
    fprintf(fileID, '%2s\r\n', komvoibcf{i});  
    c=154+154;  
else  
    fprintf(fileID, '%5s %1d %20e \r\n', komvoibcf{i}, tupos(i), paroxes(i));  
end  
end  
fclose('all');  
[status, cmdout]=system('run_ptc.bat'); % entolh ekteleshs tou ptc%  
observe= importdata('komvoibcf.txt');  
fileID=fopen('heads_s10.1'); %anagnwsh dedomenwn tw n udraulikwn upsw n%  
data=textscan(fileID, '%d %f');  
komvoi=data{1,1};  
heads=data{1,2};  
b=0;  
w(10)=zeros; % orismos penaltu=0%  
for i=2:2456;  
    for j=1:10;  
        if komvoi(i) == observe(j,1);  
            b=b+1;  
            if observe(j,2)-heads(i)>1; % elegxos ptwshs stathmhs%  
                w (j)= 10000*(observe(j,2)-heads(i)); % eisgwgh poinhs se periptvsh  
                paraviashs tou oriou ptwshs stathmhs%  
            end  
        end  
    end  
end  
w;  
sw=sum(w);  
end  
f=sq+sw+sp % upologismos antikeimenikh s sunarthshs%
```

Εισαγωγή δεδομένων

Στο πεδίο της fitness function εισάχθηκε το όνομα της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή το script- κώδικας που δημιουργήθηκε και ο αριθμός των μεταβλητών.



Εικόνα 4.7: Εισαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης

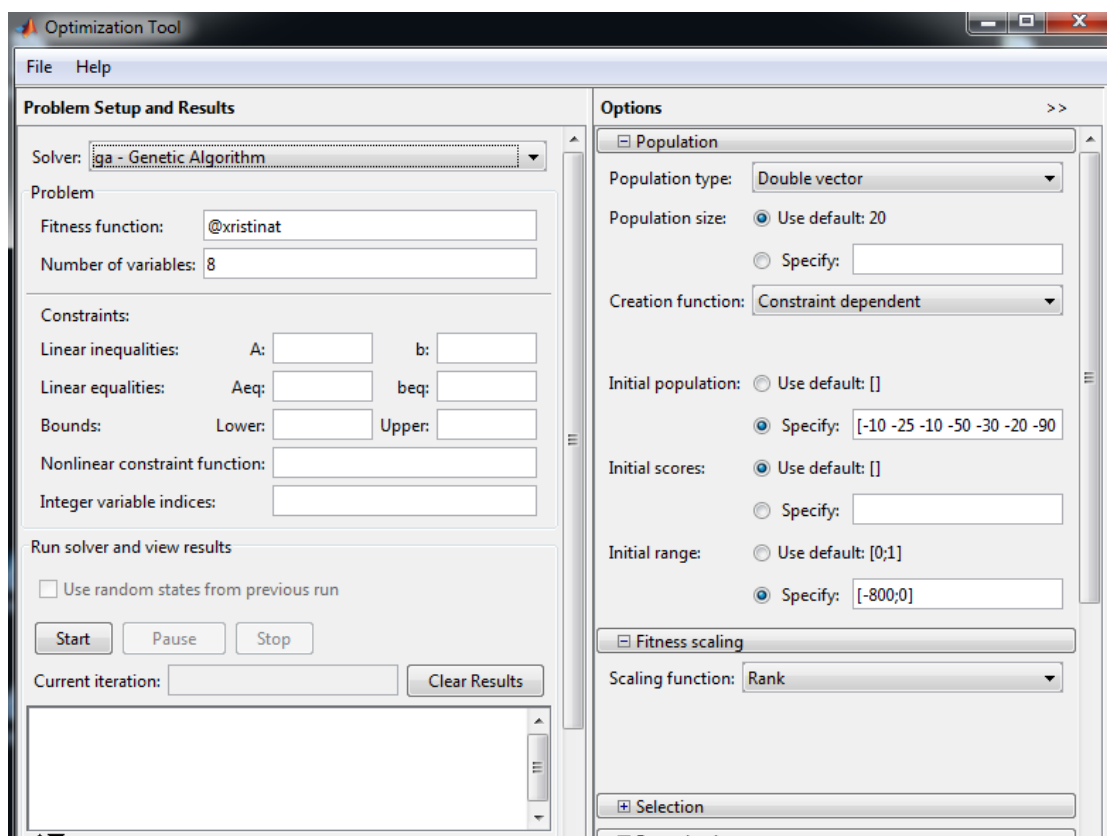
Μετά από αρκετές δοκιμές εντοπίστηκαν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για την ορθή λειτουργία του αλγόριθμου και για την εύρεση του ολικού ελαχίστου.

- Πρέπει να οριστεί ένας τυχαίος αρχικός πληθυσμός για να δοθεί μια κατεύθυνση στον αλγόριθμο. Το χρωμόσωμα που δόθηκε ήταν το εξής: [-10, -25, -10, -50, -30, -20, -90, -40]. Βάσει αυτού του ατόμου δημιουργήθηκε η πρώτη γενιά του αλγόριθμου.
- Το μέγεθος του πληθυσμού ορίστηκε ίσο με 20. Κρίθηκε καλό μέγεθος για τον πληθυσμό καθώς τα άτομα επαρκούν για την αξιολόγηση αρκετών διαφορετικών λύσεων, δεν επιβάρυναν όμως χρονικά τον αλγόριθμο.
- Creation function: Constrained dependent. Η συνάρτηση αυτή αποτελεί προεπιλογή στο MATLAB και η αλλαγή της δε φάνηκε να επηρεάζει αισθητά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.
- Initial range: [-800; 0]. Το εύρος τιμών των χρωμοσωμάτων της πρώτης γενιάς.
- Fitness scaling: Rank

- Selection function: Uniform
- Elite count: 2 και Crossover fraction: 0.8
- Mutation: Adaptive feasible
- Crossover function: Heuristic, Ratio 1.2

Η συγκεκριμένη συνάρτηση κρίθηκε ως η καλύτερη. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, σε συνδυασμό με πιθανότητα διασταύρωσης ίση με 0.8 και συνάρτηση μετάλλαξης την Adaptive feasible, έδειξαν πως έγινε η καλύτερη αναζήτηση στο χώρο των εφικτών λύσεων .

- Migration: Direction forward, Interval 20 και Fraction 0.2. Η μετανάστευση δεν αποτελεί κλασική λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων και βοηθάει τη διαδικασία σε δεύτερο επίπεδο. Χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις καθώς προτιμήθηκε να υλοποιείται ανά μεγάλο αριθμό γενιών.
- Generations: 100
- Fitness limit: -800



Εικόνα 4.8: Αρχικοποίηση πληθυσμού

The image shows a software interface for a Genetic Algorithm (GA) solver, divided into two main panels: 'Problem Setup and Results' on the left and 'Options' on the right.

Problem Setup and Results Panel:

- Solver:** A dropdown menu set to 'ga - Genetic Algorithm'.
- Problem:**
 - Fitness function:** A text input field containing '@xristinat'.
 - Number of variables:** A text input field containing '8'.
- Constraints:**
 - Linear inequalities:** Two input fields labeled 'A:' and 'b:'.
 - Linear equalities:** Two input fields labeled 'Aeq:' and 'beq:'.
 - Bounds:** Two input fields labeled 'Lower:' and 'Upper:'.
 - Nonlinear constraint function:** A text input field.
 - Integer variable indices:** A text input field.
- Run solver and view results:**
 - A checkbox labeled 'Use random states from previous run' is unchecked.
 - Three buttons: 'Start', 'Pause', and 'Stop'.
 - A text input field for 'Current iteration:'.
 - A 'Clear Results' button.
 - A large empty text area for results.

Options Panel:

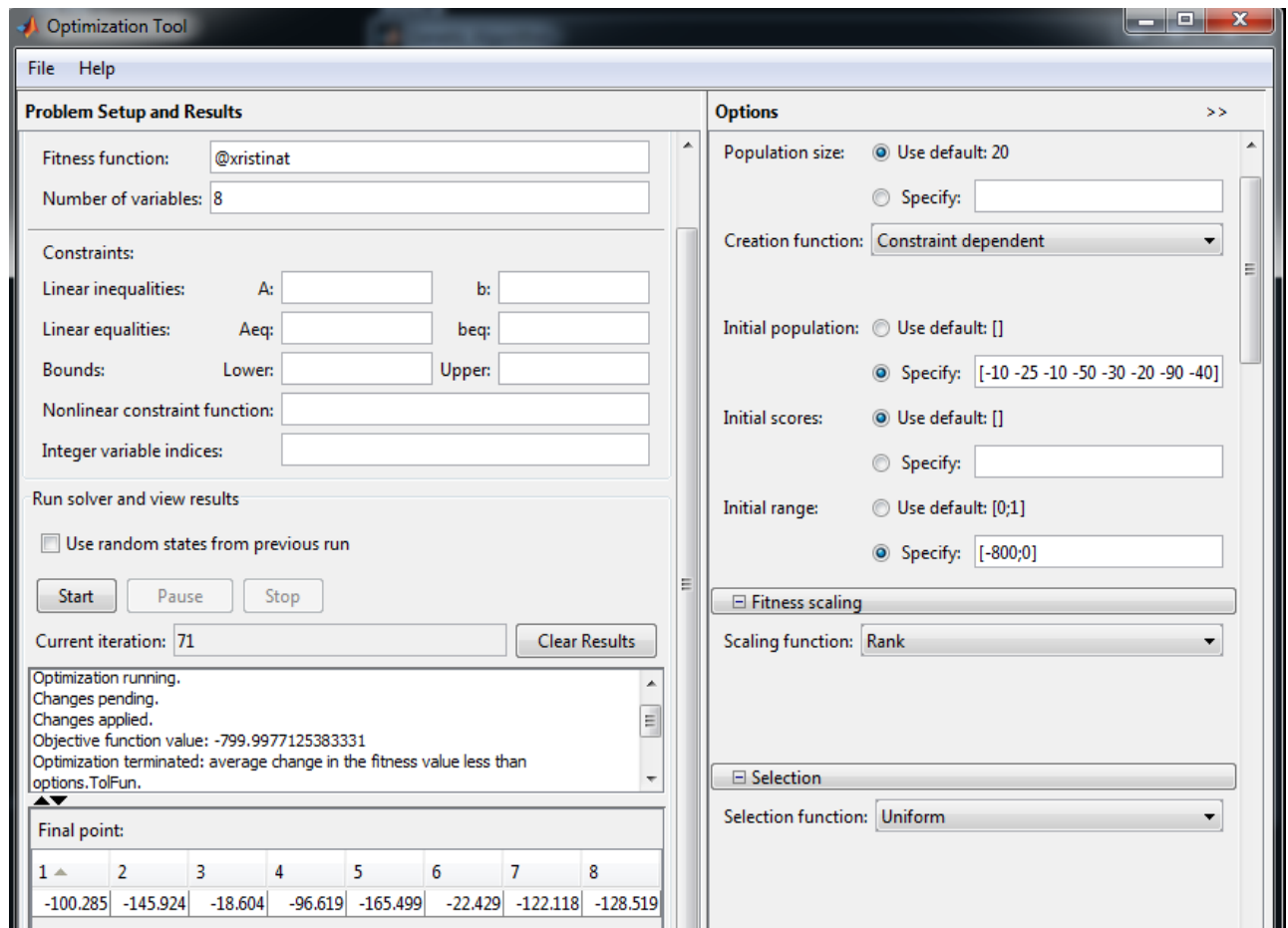
- Reproduction:** A section header.
- Mutation:** A section header.
- Crossover:**
 - Crossover function:** A dropdown menu set to 'Heuristic'.
 - Ratio:** Two radio buttons: 'Use default: 1.2' (selected) and 'Specify: 1.2'.
- Migration:**
 - Direction:** A dropdown menu set to 'Forward'.
 - Fraction:** Two radio buttons: 'Use default: 0.2' (selected) and 'Specify:'.
 - Interval:** Two radio buttons: 'Use default: 20' (selected) and 'Specify:'.
- Constraint parameters:** A section header.
- Hybrid function:** A section header.
- Stopping criteria:**
 - Generations:** Two radio buttons: 'Use default: 100' (selected) and 'Specify:'.
 - Time limit:** Two radio buttons: 'Use default: Inf' (selected) and 'Specify:'.

Εικόνα 4.9: Επιλογή ρυθμίσεων

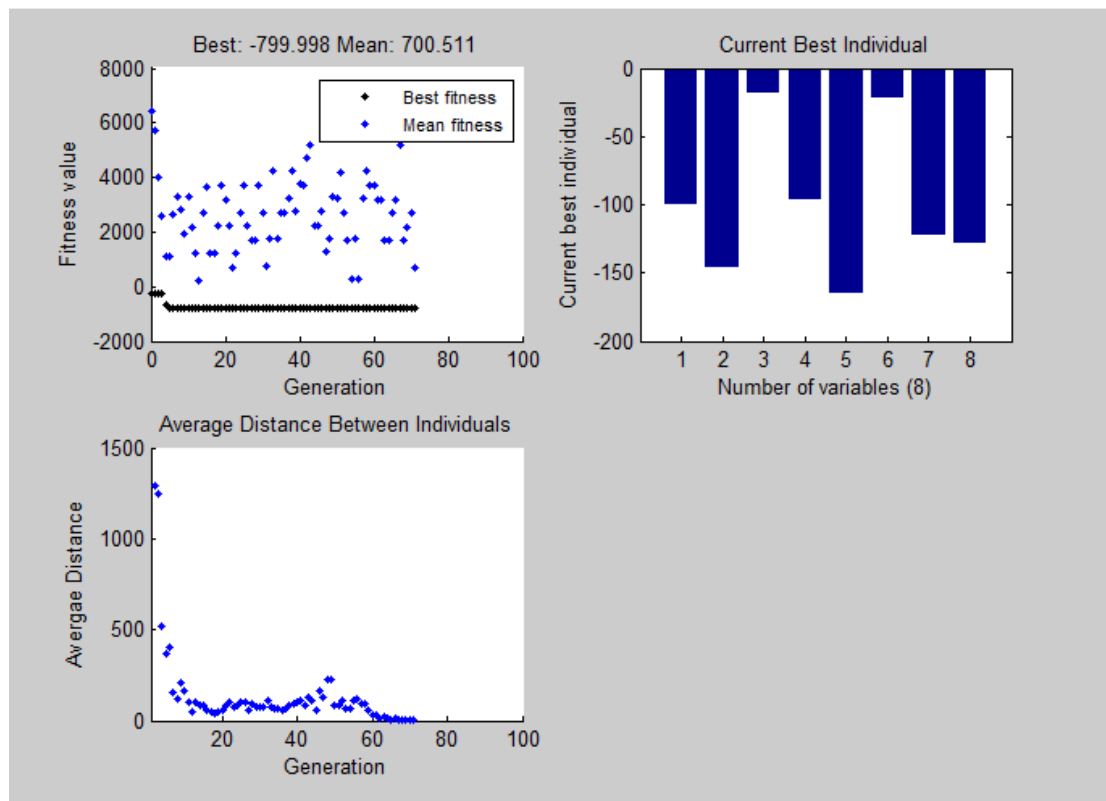
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο αλγόριθμος σταμάτησε στην 71^η επανάληψη καθώς δεν αναμενόταν περαιτέρω βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.1: Αποτελέσματα Γενετικού Αλγόριθμου



Εικόνα 5.2: Διαγράμματα Μέσης απόστασης, Τιμών αντικειμενικής συνάρτησης και καλύτερων ατόμων ανά γενιά

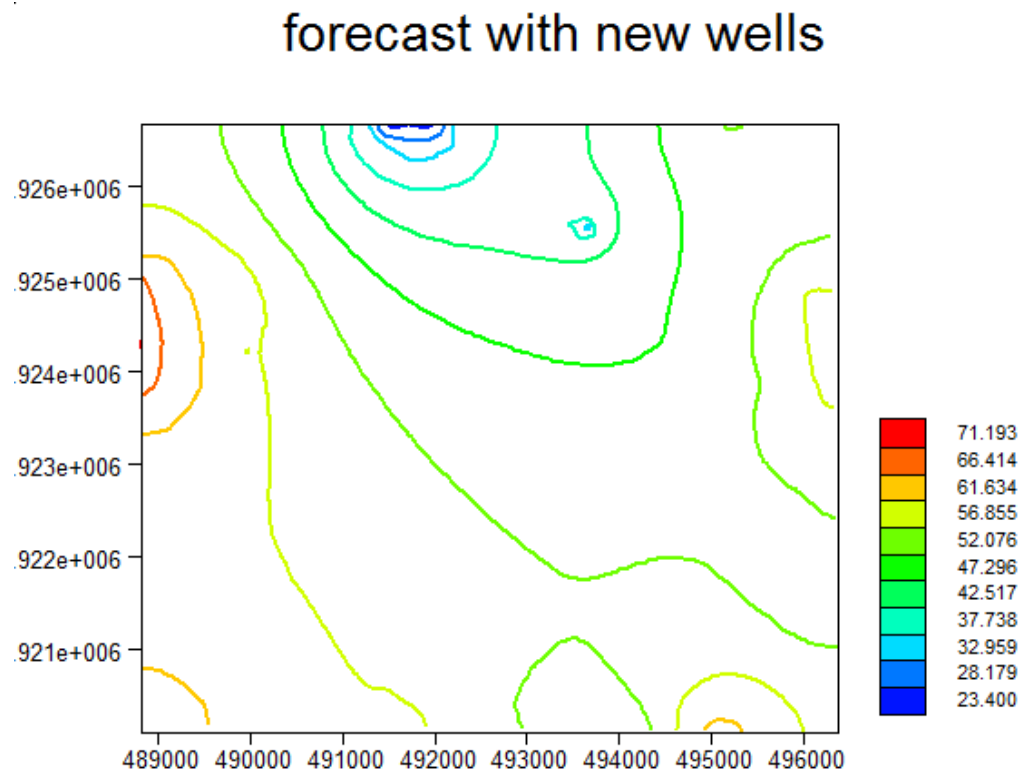
Οι βέλτιστες παροχές άντλησης στις οποίες κατέληξε ο αλγόριθμος είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 5.1: Βέλτιστες παροχές άντλησης

ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h)
N1	100,28
N2	145,92
N3	18,6
N4	96,62
N5	165,5
N6	22,43
N7	122,12
N8	128,52
Συνολική παροχή	799,99

Για επαλήθευση των αποτελεσμάτων οι παροχές εισήχθησαν στο μοντέλο PTC.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3: Αναμενόμενη κατάσταση με άντληση των νέων γεωτρήσεων

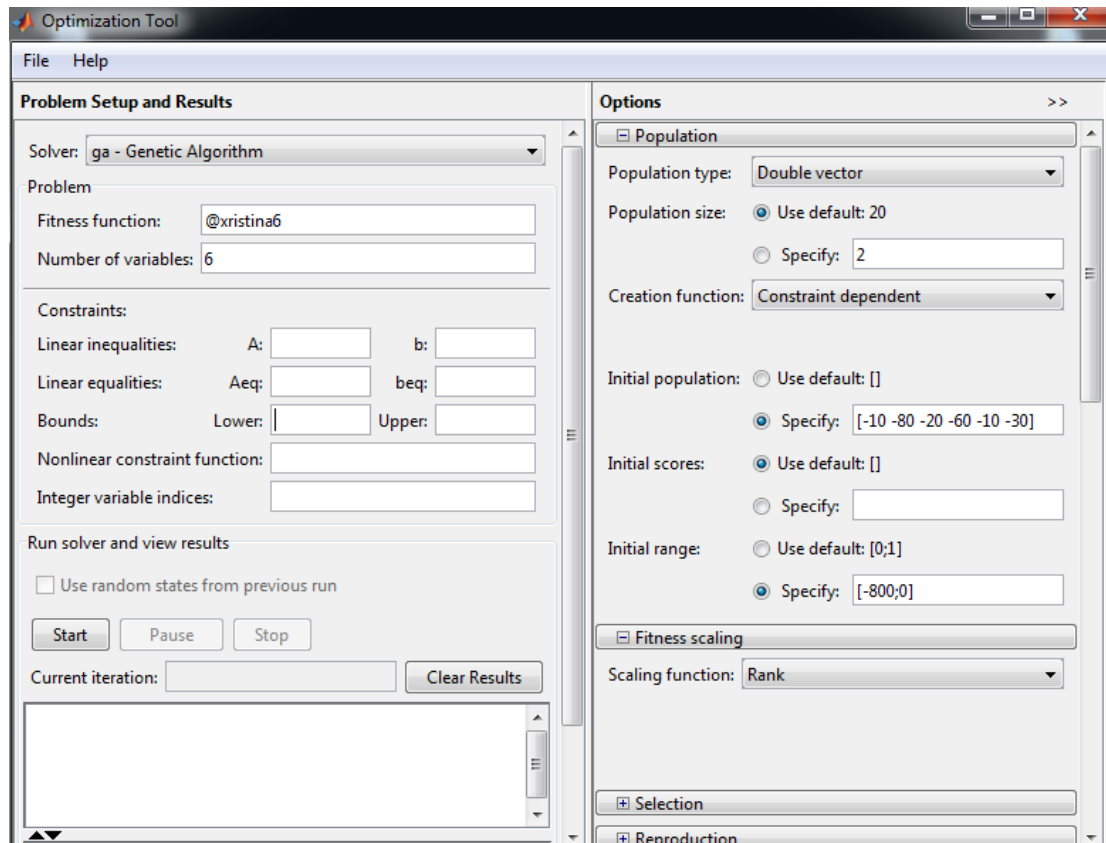
Η στάθμη στα πηγάδια παρατήρησης όντως είναι μέσα στα όρια που έχουν τεθεί.

Πίνακας 5.2: Υδραυλικά ύψη στα πηγάδια παρατήρησης και παρατηρούμενη πτώση στάθμης

Πηγάδια παρατήρησης	Υδραυλικά ύψη (m)	Πτώση στάθμης S(m)
K1	52,98	0,55
K2	48,11	0,69
K3	44,6	0,72
K4	54,01	0,2
K5	42,48	0,97
K6	51,15	0,52
K7	40,78	0,75
K8	49,44	0,94
K9	42,09	0,86
K10	45,84	1

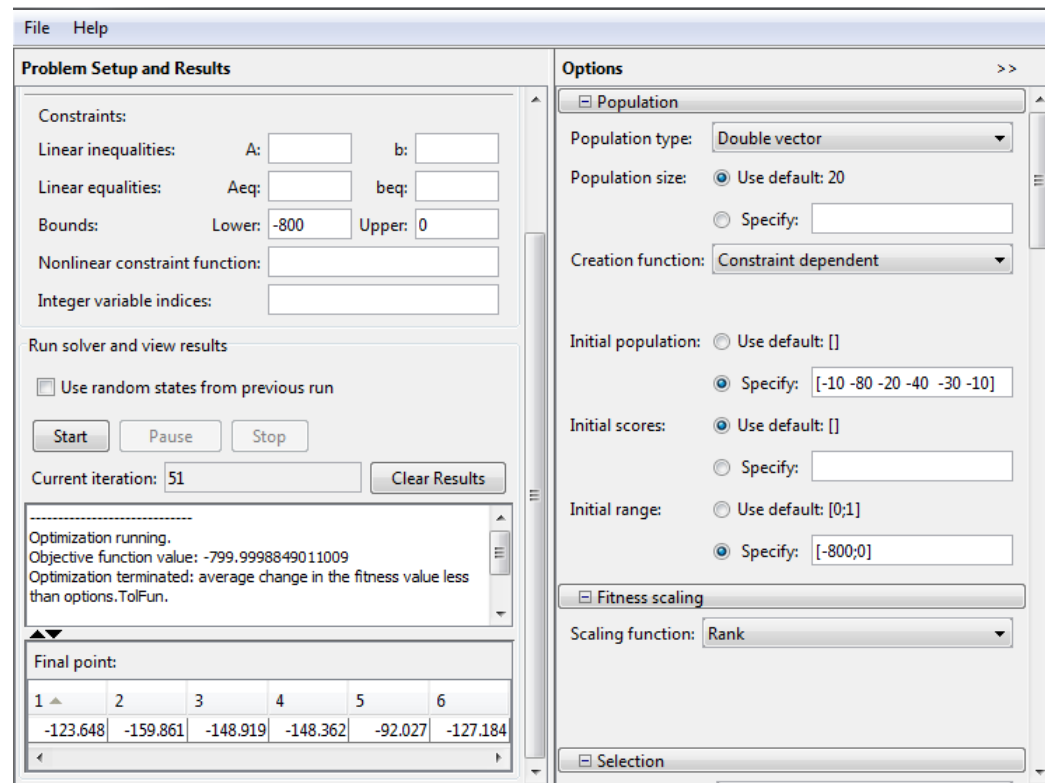
Οι βέλτιστες αντλήσεις για τα πηγάδια N3 και N6 είναι αρκετά χαμηλές οπότε εξετάστηκε και το σενάριο τοποθέτησης 6 γεωτρήσεων αντί για 8.

Και πάλι δόθηκε τυχαίος αρχικός πληθυσμός. Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις παρέμειναν ίδιες ενώ χρειάστηκαν μικρές τροποποιήσεις στον κώδικα.

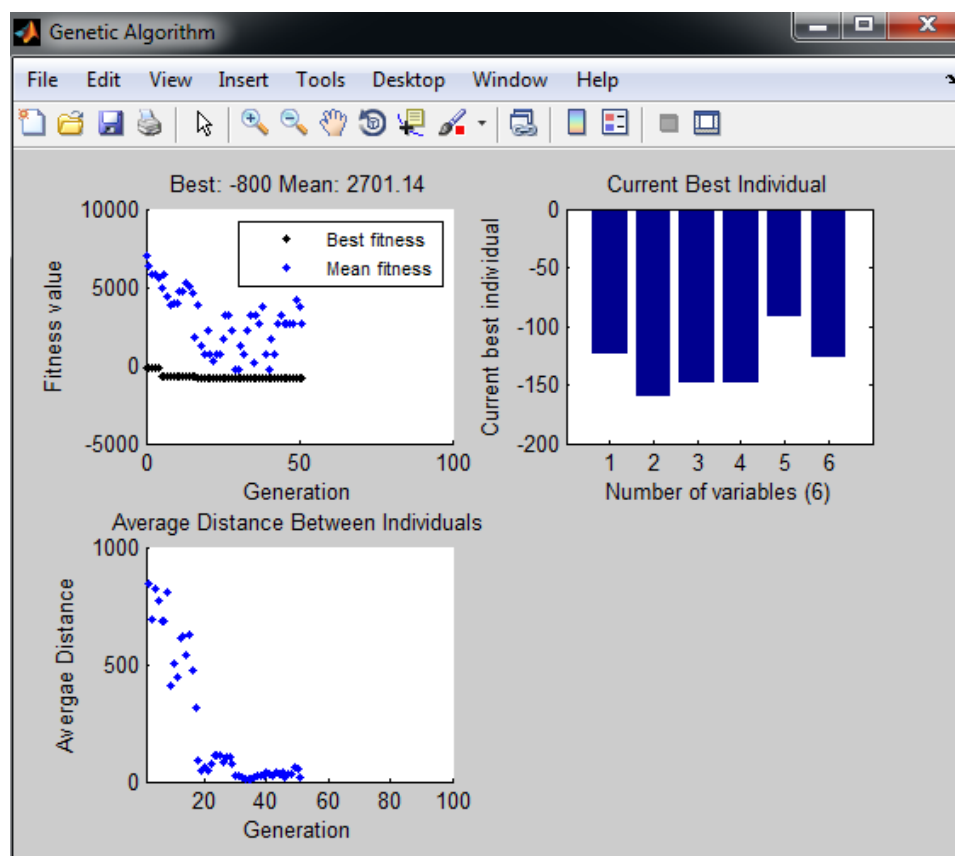


Εικόνα 5.4:Εισαγωγή συνάρτησης για 6 πηγάδια

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης φαίνονται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης



Εικόνα 5.6: Διαγράμματα Μέσης απόστασης, Τιμών αντικειμενικής συνάρτησης και καλύτερων ατόμων ανά γενιά για 6 μεταβλητές

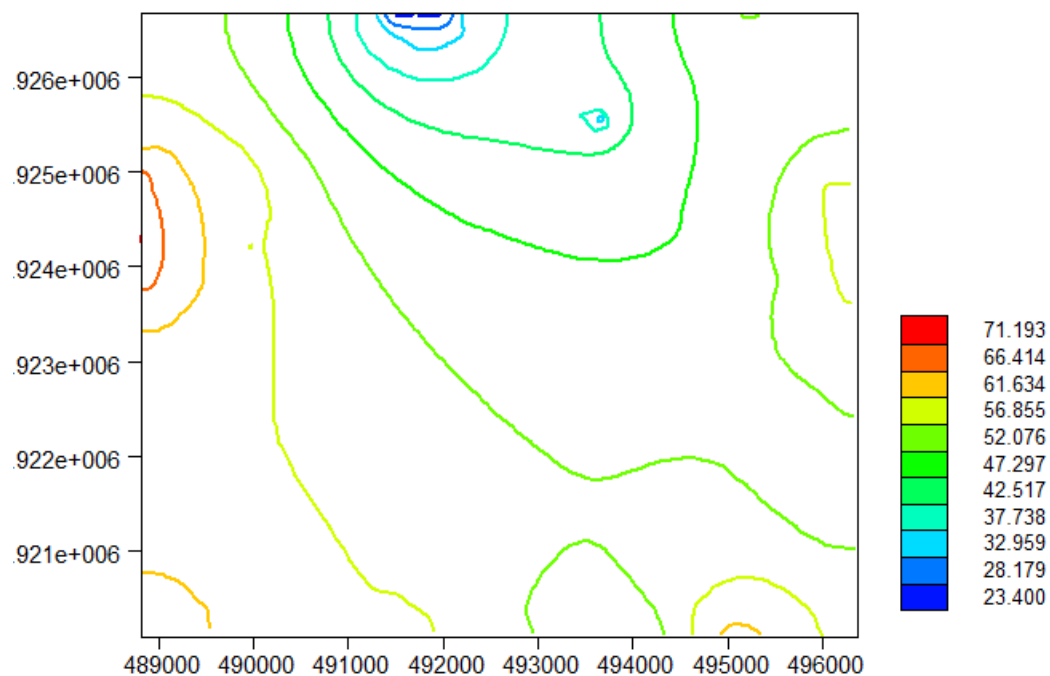
Οι βέλτιστες παροχές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Βέλτιστες παροχές άντλησης 6 πηγαδιών

ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h)
N1	123,65
N2	159,85
N4	148,92
N5	148,36
N7	92,03
N8	127,18
Συνολική παροχή	799,99

Με την εφαρμογή των παροχών αυτών στο PTC:

forecast-6 wells



Εικόνα 5.7: Αναμενόμενη κατάσταση με άντληση των νέων γεωτρήσεων

Πίνακας 5.4: Υδραυλικά ύψη μετά τη διάνοιξη των οκτώ γεωτρήσεων και η αντίστοιχη πτώση στάθμης

Πηγάδια παρατήρησης	Υδραυλικά ύψη (m)	Πτώση στάθμης S (m)
K1	52,98	0,55
K2	48,09	0,71
K3	44,59	0,73
K4	54,01	0,2
K5	42,76	0,69
K6	51,15	0,52
K7	40,78	0,75
K8	49,46	0,92
K9	42,09	0,86
K10	45,85	0,99

Η άντληση από έξι γεωτρήσεις αντί για οκτώ είχε ελάχιστη επιρροή στο σύστημα καθώς οι πτώσεις στάθμης στα πηγάδια παρατήρησης σχεδόν ταυτίζονται στις δύο περιπτώσεις.

Περαιτέρω μείωση στον αριθμό των γεωτρήσεων δε θα μελετηθεί και δε συνίσταται, παρά την καλή ανταπόκριση του συστήματος καθώς για την αποφυγή φαινομένων όπως η υφαλμύριση είναι προτιμητέο να υπάρχουν αρκετές γεωτρήσεις, κατά το δυνατόν διεσπαρμένες στο χώρο, με χαμηλότερη άντληση. Η απότομη πτώση στάθμης σε ένα σημείο λόγω υψηλής άντλησης είναι επισφαλής κατάσταση για την εισχώρηση αλμυρού νερού στον υπόγειο υδροφορέα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της μελέτης αυτής ήταν η εύρεση τρόπου σύνδεσης του μοντέλου προσομοίωσης PTC με το περιβάλλον MATLAB και συγκεκριμένα με το εργαλείο των Γενετικών Αλγόριθμων, με στόχο την εφαρμογή τους στη βέλτιστη διαχείριση του υδροφορέα της Αγυιάς. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ως προς την ικανότητα του αλγόριθμου είναι τα εξής:

- Τα αποτελέσματα που έδωσε ο αλγόριθμος είναι παραπάνω από ικανοποιητικά αφού βρήκε συνολική παροχή άντλησης ίση με την απαιτούμενη- μέγιστη. Κατά κάποιο τρόπο αυτό επιβεβαιώνει πως ο αλγόριθμος βρήκε το ολικό βέλτιστο της συνάρτησης που του είχε ορισθεί.
- Χρειάστηκε αρκετός χρόνος και προσπάθεια για τον εντοπισμό των ρυθμίσεων και παραμέτρων που θα καθιστούσαν τον αλγόριθμο ικανό για τη λύση του παρόντος προβλήματος. Μετά τον εντοπισμό τους όμως η διαδικασία ήταν αρκετά εύκολη, χωρίς ανάγκη για παρέμβαση κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης.
- Αναμενόταν χρόνος εκτέλεσης γύρω στις 72 ώρες. Ο αλγόριθμος ήρθε σε σύγκλιση σε λιγότερο από 36 ώρες στην περίπτωση των 8 πηγαδιών και σε λιγότερο από 24 στην περίπτωση των 6.
- Ο συνδυασμός του μοντέλου PTC με Γενετικούς Αλγόριθμους μπορεί να θεωρηθεί ένα εύχρηστο και αποτελεσματικό εργαλείο για προβλήματα καθορισμού των βέλτιστων παροχών άντλησης σε υπόγειους υδροφορείς.
- Ενδιαφέρουσα θα ήταν η ανάπτυξη ενός κώδικα που να χρησιμοποιεί εξειδικευμένες λειτουργίες Γενετικών Αλγορίθμων, προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες των προβλημάτων διαχείρισης υδροφορέων, όπως αυτό που μελετήθηκε.
- Ο αλγόριθμος θα μπορούσε να επεκταθεί χρησιμοποιώντας περισσότερες μεταβλητές απόφασης όπως το κόστος άντλησης.

Ως προς το σύστημα του υπόγειου υδροφορέα της Αγυιάς:

- Οι εισροές στο σύστημα των υπόγειων υδάτων λαμβάνουν χώρα από την ανατολική, από τη νότια πλευρά και από τη βορειοδυτική πλευρά, όπου υπάρχουν μεγάλοι ορεινοί όγκοι.
- Με τα ισχύοντα δεδομένα, δεν αναμένεται μεγάλη αλλαγή στα υπόγεια ύδατα της περιοχής στο άμεσο μέλλον.
- Τα αρχικά υδραυλικά ύψη της περιοχής είναι αρκετά πάνω από το επίπεδο της θάλασσας γι αυτό το σύστημα ανταποκρίνεται καλά στις αντλήσεις. Η πτώση στάθμης που παρατηρείται είναι αρκετά χαμηλή και αφορά στα υπόγεια ύδατα της ανατολικής περιοχής, γύρω από τα σημεία εγκατάστασης των γεωτρήσεων.
- Η διάνοιξη οκτώ ή έξι γεωτρήσεων έφερε τα ίδια αποτελέσματα στις στάθμες των πηγαδιών παρατήρησης.

Η μελέτη έδειξε πολύ καλά αποτελέσματα για την ενδεχόμενη εγκατάσταση νέων γεωτρήσεων. Καθώς όμως η περιοχή βρίσκεται πολύ κοντά στα παράλια του Νομού κι εξυπηρετεί υδρευτικές και αρδευτικές ανάγκες της γύρω περιοχής και των Χανίων, είναι επιτακτική η ανάγκη σωστής διαχείρισης προκειμένου να μην έρθει αντιμέτωπη με προβλήματα ερημοποίησης ή υφαλμύρισης, που πλήττουν την ανατολική πλευρά του νησιού. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται ενδελεχής έρευνα- μελέτη προτού παρθούν αποφάσεις για τη διαχείριση υπόγειων συστημάτων.

- Για πιο ολοκληρωμένη μελέτη προτείνεται η συλλογή περισσότερων στοιχείων, σχετικών με την υδρολογία της περιοχής. Παράμετροι όπως η υδραυλική αγωγιμότητα επηρεάζουν κατά πολύ τη συμπεριφορά του συστήματος.
- Επιπλέον, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν περισσότερες μετρήσεις στην περιοχή ώστε να επιτευχθεί καλύτερη βαθμονόμηση στο μοντέλο.
- Θα μπορούσε επίσης να γίνει μελέτη διαφόρων σεναρίων μείωσης της βροχόπτωσης και να καταγραφεί η απόκριση του συστήματος σε αυτά.
- Μια κατά το δυνατόν πληρέστερη καταγραφή των ενεργών γεωτρήσεων, θα έδινε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση των υδάτων και μια πιο ακριβή εικόνα του μέλλοντος.
- Η μελέτη θα πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με τον υπολογισμό των αναμενόμενων αναγκών σε νερό βάσει σεναρίων αύξησης πληθυσμού και τουριστικής δραστηριότητας.
- Προτείνεται επίσης, η βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης όλων των γεωτρήσεων της περιοχής λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ανάγκες που εξυπηρετεί η κάθε μία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

- Coley David A., 1999. An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers.
- Goldberg David E., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.
- Goldberg David E., Deb Kalyanmoy, 1991. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms, Foundations of genetic algorithms.
- D. Ahlfeld, A., Mulligan Ann, 2000. Optimal Management of Flow Groundwater Systems, Academic Press.
- Mitchell Melanie, 1999. An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press.
- J.H. Holland, 1975. "Adaptation in Natural and Artificial Systems", MIT Press.
- Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox for use with MATLAB, User's Guide, version 1.
- Farzad A. Sadjadi, 2004. Comparison of fitness scaling functions in genetic algorithms with applications to optical processing, The International Society for Optical Engineering.
- Yilmaz KAYA, Murat UYAR & Ramazan Tekin, 2011. A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover.
- Anderson, M. P., & Woessner W. W., 1992. Applied Groundwater Modelling: Simulation of Flow and Adjective Transport. Academic Press.
- Babu, D., Pinder, G., Niemi, A., Ahlfeld, D., & Stotholf, S., 1997. Chemical transport by three-dimensional groundwater flows.
- Olivares, J.-L., 1999. Argus ONE-PTC interface, v. 2.2 User's guide.
- Pinder, G. F. & Gray W. G., 1977. Finite element simulation in surface and subsurface hydrology. New York: Academic Press, Inc.
- Gray W., 1984. Comparison of finite difference and finite element methods, Mechanics of fluids in porous media - New Approach in Research, University of Delaware.
- Bear J., Cheng A. H.-D., 2010. Modelling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Καρατζάς Γ., 2003. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων.
- Καρατζάς Γ., 2010. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Βελτιστοποίηση Περιβαλλοντικών Συστημάτων.
- Καρατζάς Γ. & Νικολαΐδης Ν., 2010. Ειδικό Σχέδιο Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων για τις Λεκάνες Απορροής των Ποταμών Κερίτη-Θερίσου και Κουιάρη, Χανιά.
- Καββαδάς Μ., 2007. Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής.
- Λιονής Μ. & Περγλέρος Β., 2001. Υδρολογική Μελέτη Κάμπου Χανίων. Υπ. Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Γεωργικών Διαρθρώσεων.
- Καλλέργης Γ., 1999. Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία.
- Λυκοθανάσης & ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ, 2014. Πανεπιστημιακές παραδόσεις Υπολογιστικής Νοημοσύνης.
- Γεωργούλη Κ., 2015. Τεχνητή Νοημοσύνη, μια εισαγωγική προσέγγιση.
- Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Διπλωματικές

- Τσάιμος Γ., 2009. Διαχειριστική μελέτη υδατικών πόρων στις λεκάνες απορροής Κερίτη-Θερίσου.
- Ταπόγλου Ε., 2010. Διαχείριση Υπόγειου Υδροφορέα με χρήση Μοντέλου 3-D στην ευρύτερη Περιοχή Πηγών Αγυιάς Χανίων.

Διαδικτυακές Πηγές

- <https://kyocp.wordpress.com/2012/04/25/groundwater/>
- http://www.water.ca.gov/groundwater/groundwater_basics/hydrologic_cycle.cfm
- <https://www.google.gr/maps>
- <http://www.platanias.gr/>
- <http://water.noaa.gov/>