



Πολυτεχνείο
Κρήτης

Βέλτιστη διαχείριση του φαινομένου της υφαλμύρισης στον υδροφορέα Κατάπολων της νήσου Αμοργού με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου

Διπλωματική Εργασία

Εξεταστική Επιτροπή

Καρατζάς Γιώργος (Επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος

Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος

Χριστοφορίδου Μαρία
Χανιά, Οκτώβριος 2016

*Στην Θεία μου Μάρθα,
τους γονείς και τον αδερφό μου.*

Περίληψη

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης αποτελεί ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα σε παράκτιους υδροφορείς, ενώ στις περιπτώσεις των νησιών το πρόβλημα εντείνεται λόγω αδυναμίας εύρεσης εναλλακτικής λύσης στην προμήθεια νερού. Επιπλέον πίεση ασκείται από την αυξανόμενη ζήτηση νερού λόγω της τουριστικής ανάπτυξης που γνωρίζουν τα ελληνικά νησιά. Η Αμοργός, αποτελεί μια τέτοια περίπτωση νησιού, όπου οι ανάγκες σε νερό, κατά την θερινή περίοδο, ικανοποιούνται μέσω μεταφοράς νερού. Η επέμβαση στην διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων είναι επιτακτική, καθώς ο κίνδυνος μόνιμης ρύπανσης των υπόγειων υδάτων είναι υπαρκτός. Για τον λόγο αυτό, προτείνονται τέσσερα σχέδια διαχείρισης του υδροφορέα των Κατάπολων Αμοργού έτσι ώστε να μπορέσει να περιοριστεί το φαινόμενο. Τα σχέδια αυτά δημιουργήθηκαν μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Για την εύρεση της βέλτιστης, ή προσεγγιστικής στη βέλτιστη, λύσης, συνδυάστηκε το μοντέλο προσομοίωσης του Argus One και κώδικα PTC, με το εργαλείο βελτιστοποίησης της MATLAB και τους Γενετικούς Αλγόριθμους. Το ήδη υπάρχον μοντέλο προσομοίωσης του υδροφορέα (Σιάκα, 2015), προσαρμόστηκε ώστε, κάτω από ορισμένες συνθήκες άντλησης, να προβλέπει τα υδραυλικά ύψη της περιοχής για τα επόμενα πέντε χρόνια (2016-2020) και λειτούργησε αξιολογώντας τις παραμέτρους εισόδου (παροχές άντλησης) που δημιουργούνταν από τις διαδικασίες της επιλογής, της αναπαραγωγής και της μετάλλαξης βάσει των οποίων λειτουργούν οι Γενετικοί Αλγόριθμοι. Το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας ορίστηκε ως το πέρας 100 γενεών με 27 άτομα σε κάθε πληθυσμό. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ενδέχεται να μην καταλήγουν στις βέλτιστες τιμές.

Abstract

Salt water intrusion is considered as one of the most common issues in costal aquifers, while, in case of islands, the problem is magnified by the lack of alternative solution for water supply. Additional pressure is applied due to tourism and increased water demand. This is the case for many Greek islands. Amorgos is one of those islands and as a result, the island has to receive water quantities through shipping during summertime. The management of costal aquifers is crucial because of the underlying danger of permanent degradation of the aquifer. As a solution, four different plans are suggested and examined so that the salt water intrusion is constrained. These strategies were created through optimization process. In order to achieve global optimal, or near global optimal, a groundwater simulation model (Argus One – PTC) is being coupled with an optimization technique (Genetic Algorithm – MATLAB optimization tool). The initial groundwater model (Σιάκας, 2015) was adjusted so that it can predict the hydraulic heads, calculated for specific pumping rates, for the next five years (2016-2020). This simulation model is being used as an evaluation method of the fitness of various sets of pumping rates which are created from the Genetic Algorithm. The algorithm creates these sets of pumping rates through selection, crossover and mutation operators. The stopping criteria of the algorithm were set to be the maximum number of 100 generation. Each generation consists of 27 individuals in every population. As a result, the outcome of the optimization may not have yet reached a near optimal solution.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα	5
1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Προέλευση του Νερού.....	7
1.2 Υδατικό Ισοζύγιο	8
1.3 Διαχείριση Υδατικών Πόρων.....	9
1.4 Σκοπός Παρούσας Εργασίας.....	10
2. Φαινόμενο Υφαλμύρισης	11
2.1 Μηχανισμός Υφαλμύρισης	11
2.1.1 Κώνος Ανύψωσης (up-coning)	12
2.2 Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Υφαλμύρισης	14
2.3 Αντιμετώπιση της Υφαλμύρισης.....	18
3. Περιοχή Μελέτης	19
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	19
3.2 Κλιματολογικά Στοιχεία	20
3.3 Γεωλογία και Υδρογεωλογία.....	24
4. Προσομοίωση Υπόγειας Ροής.....	28
4.1 Μοντέλα Προσομοίωσης Υπόγειας Ροής	28
4.2 Μοντέλο PTC - Χρησιμοποιούμενο Μοντέλο Προσομοίωσης	28
4.3 Εφαρμογή του PTC στο Πρόβλημα Βελτιστοποίησης - Μοντέλο Πρόβλεψης.....	30
4.3.1 Υφιστάμενη Κατάσταση.....	30
4.3.2 Μοντέλο Πρόβλεψης – Μελλοντική Προσομοίωση.....	33
4.4 Χρήσεις Γης	35
4.5 Διαχείριση Υδάτινων Πόρων στην Περιοχή Μελέτης.....	36
5. Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στη Διαχείριση Υπόγειων Υδάτων	38
5.1 Κατηγοριοποίηση Μοντέλων.....	38
5.2 Μοντέλα Βελτιστοποίησης	39
5.3 Βελτιστοποίηση Υπόγειων Υδάτων.....	39
5.3.1 Δομή Μη Γραμμικού Προβλήματος.....	39
5.3.2 Μέθοδοι Επίλυσης Μη Γραμμικών Προβλημάτων	40
5.4 Γενετικοί Αλγόριθμοι	41

5.4.1	Εισαγωγή στους Γ.Α.	41
5.4.2	Βιολογικό Υπόβαθρο.....	42
5.4.3	Διαδικασία Εφαρμογής Γ.Α. (Αδαμίδης, 1999) (Λυκοθανάσης, 2001).....	43
5.4.4	Πλεονεκτήματα Γ.Α.	46
6.	Εφαρμογή Βελτιστοποίησης με Γ.Α. στο Υπό Μελέτη Πρόβλημα.....	48
6.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι στο λογισμικό της MATLAB.....	48
6.2	Διαδικασία Επίλυσης του Υπό Μελέτη Προβλήματος (MATLAB)	54
6.2.1	Στρατηγική Επίλυσης	54
6.2.2	Κώδικας Βελτιστοποίησης (MATLAB editor)	57
6.2.3	Επιλεγόμενοι Παράμετροι Γενετικών Αλγορίθμων (MATLAB ga toolbox)	59
7.	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....	60
7.1	Αποτελέσματα	60
7.1.1	1 ^ο σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης	61
7.1.2	2 ^ο Σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης και Περιορισμένο Νότιο Άκρο	62
7.1.3	3 ^ο Σενάριο - Πράσινη Ζώνη Βελτιστοποίησης και Περιορισμένο Νότιο Άκρο	63
7.1.4	4 ^ο Σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης, Μηδενική Άντληση G14/W1 και Αλλαγή Εύρους Τιμών Άντλησης	65
7.2	Συμπεράσματα.....	69
7.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	70
	Βιβλιογραφία	72
	Ξένη Βιβλιογραφία	72
	Ελληνική Βιβλιογραφία	73
	Διαδικτυακές Πηγές.....	74
	Παράρτημα	75

1. Εισαγωγή

1.1 Προέλευση του Νερού

Το νερό, κατά τα πρώτα στάδια διαμόρφωσης του πλανήτη, δεν υπήρχε με την μορφή που παρουσιάζεται σήμερα, αυτή της υδρόσφαιρας (ωκεανοί, θάλασσες, λίμνες, ποταμοί, υπόγεια ύδατα και υδρατμοί της ατμόσφαιρας). Αντίθετα, ήταν δεσμευμένο στις γεωλογικές δομές, με την μορφή των στοιχείων που το αποτελούν (κυρίως H_2 και ελάχιστο O_2). Τα στοιχεία αυτά, μαζί με άλλα αέρια όπως υδρατμοί, CO_2 , CO , N_2 , H_2 , H_2S , SO_2 , εκλύθηκαν λόγω ηφαιστειακών γεγονότων που οφείλονταν σε σεισμούς οι οποίοι, με την σειρά τους, προκλήθηκαν λόγω της συνεχούς κίνησης των γεωλογικών στρωμάτων του εσωτερικού της Γης. Το ελεύθερο οξυγόνο, αρχικά, υπήρχε σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Κύρια πηγή δημιουργίας του ήταν η διαδικασία της φωτοσύνθεσης και της ανάπτυξης του φυτικού κόσμου. Λόγω της φωτοσύνθεσης, οι φυτικοί οργανισμοί, διασπούν το υπερισχύον αέριο CO_2 , σε C και O_2 , δίνοντας έτσι την ευκαιρία να συνδυαστεί το ελεύθερο οξυγόνο με το υδρογόνο των ηφαιστειακών εκρήξεων και να δημιουργηθεί νερό (Καλλέργης, 1999).

Το νερό σήμερα μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ατμοσφαιρικό (Μετεωρικό): πρόκειται για νερό βροχής, χιόνι και υγρασία
- Επιφανειακό: πρόκειται για νερό που βρίσκεται σε στερεή ή υγρή μορφή και είτε είναι τρεχούμενο, υδρογραφικό δίκτυο, είτε είναι στάσιμο, θάλασσες και λίμνες.
- Υπόγειο: πρόκειται για ποσότητες νερού που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς (Καρατζάς, 2015)

Η ποσότητα του νερού θεωρείται πρακτικά σταθερή και ανέρχεται στα $1600 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Ένα μέρος της ποσότητας αυτής, βρίσκεται δεσμευμένο στο μανδύα της Γης ($230 \cdot 10^6 \text{ km}^3$), και ελαττώνεται κάθε χρόνο καθώς εξέρχεται στην επιφάνεια της γης και αυξάνει την ποσότητα του επιφανειακού και υπόγειου νερού. Το νερό αυτό ονομάζεται νεαρό νερό (Juvenile). Η υδρόσφαιρα δημιουργήθηκε με νεαρό νερό και έχει ενδιαφέρον να αναλογιστεί κανείς την κλίμακα του χρόνου, την ηλικία της γης (4,6 δις. χρονών), σε σχέση με την ποσότητα του νερού της υδρόσφαιρας. Τελικά το ελεύθερο νερό ανέρχεται στα $1370 \cdot 10^6 \text{ km}^3$. Η τεράστια αυτή ποσότητα αποτελείται κατά 97,2% από θαλασσινό νερό, 2,1% από χιόνι και πάγο και 0,001% είναι υδρατμοί. Το υπόλοιπο μέρος της συνολικής ποσότητας (0,6 %), δηλαδή μόλις τα $8,2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, είναι γλυκό νερό. Λόγω διάφορων απωλειών, όπως το μεγάλο βάθος των υδροφορέων, ο άνθρωπος μπορεί να εκμεταλλευτεί περίπου το $0,1 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ του επιφανειακού νερού και το $3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ του υπόγειου νερού. Συνεπώς, είναι ξεκάθαρο πλέον, ότι το νερό δεν αποτελεί έναν πόρο αλλά είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος, οδηγεί ή δημιουργεί περιβαλλοντολογικά προβλήματα και συχνά προσφέρει ένα μέσον για περιβαλλοντικές λύσεις (Καλλέργης, 1999).

1.2 Υδατικό Ισοζύγιο

Με βάση την πορεία και την κυκλοφορία του νερού στην Γη, όπως αυτή περιγράφεται με τον υδρολογικό κύκλο (Εικόνα 1.1), ορίζεται και το ισοζύγιο μάζας του νερού (Εξίσωση 1.1). Ο υδρολογικός κύκλος ουσιαστικά, δεν έχει κάποια συγκεκριμένη αφετηρία των διεργασιών του, παρά το γεγονός ότι, για λόγους ευκολίας, ως αρχή λαμβάνεται το νερό των ωκεανών, όπου γίνεται εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρά. Μαζί με την εξάτμιση των ωκεανών, πραγματοποιείται εξάτμιση νερού από την επιφάνεια του εδάφους, από τις λίμνες και τα ποτάμια, από την διαπνοή των φυτών όπου μαζί με την εξάχνωση των στερεών μορφών του νερού (χιόνι και πάγος), συγκεντρώνεται η συνολική ποσότητα υδρατμών της ατμόσφαιρας. Στη συνέχεια, λόγω ανέμων, οι υδρατμοί μεταφέρονται σε τμήματα της ατμόσφαιρας με μικρή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η ικανότητα του αέρα να συγκρατεί κάποια μάζα υδρατμών μειώνεται. Έτσι, οι υδρατμοί οδηγούνται στη συμπύκνωσή τους, δημιουργώντας τα σύννεφα, και τελικά κατακρημνίζονται υπό την μορφή της βροχής και του χιονιού. Ακόμα, το νερό, στην υγρή μορφή, μπορεί να δημιουργηθεί εξαιτίας του λιώσιμου του πάγου. Τελικά, η ροή του νερού γίνεται προς τους ωκεανούς αλλά και προς τις αποθήκες γλυκού νερού (ποτάμια και λίμνες). Τέλος, ένα μέρος του νερού που απορρέει, διηθείται στους γεωλογικούς σχηματισμούς του εδάφους και είτε αποθηκεύεται στο υπέδαφος είτε καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς.



Εικόνα 1.1 – Υδρολογικός Κύκλος Πηγή: United State Geological Survey (USGS)

Με βάση την παραπάνω διαδικασία, το ισοζύγιο που περιγράφει την ύπαρξη νερού, παρουσιάζεται παρακάτω (Καρατζάς, 2015):

$$\text{Εισροή} - \text{Εκροή} \pm \text{Διαφορά Μάζας} = \text{Συσώρευση Μάζας}$$

$$P - (E + R + I) \pm \text{Reaction} = S \quad (1.1)$$

E → Ρυθμός Εξατμισοδιαπνοής (evaporation/transpiration)

R → Ρυθμός Επιφανειακής Απορροής (runoff)

I → Ρυθμός Διήθησης (Κατείσδυση) (infiltration)

Reaction → Ρυθμός Αντίδρασης

P → Ρυθμός Κατακρήμνισης (precipitation)

1.3 Διαχείριση Υδατικών Πόρων

Η διαχείριση των αποθεμάτων γλυκού νερού είναι μια πολύπλοκη διαδικασία λόγω του γεγονότος ότι το γλυκό νερό αποτελεί ανανεώσιμο αλλά και περιορισμένο πόρο ταυτόχρονα. Ανανεώσιμος, με την έννοια ότι ακολουθεί μια συγκεκριμένη πορεία, αυτή που περιγράφεται από τον υδρολογικό κύκλο, ενώ η έννοια του περιορισμένου πόρου αναφέρεται στη συγκριτικά μικρή ποσότητα πόσιμου νερού η οποία είναι διαθέσιμη. Επιπλέον, λόγω των μη στρατηγικών ανθρωπογενών επεμβάσεων, οι ποσότητες γλυκού νερού υποβαθμίζονται και τελικά περιορίζονται περαιτέρω.

Σε περιπτώσεις όπου η διαχείριση αφορά νησιά, η δυσκολία είναι ακόμα πιο μεγάλη. Τα νησιά, ειδικότερα αυτά του ελλαδικού χώρου, χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο και απότομες υψομετρικές μεταβολές (μεγάλη κλίση του εδάφους) γεγονός που συνεπάγεται της γρήγορης επιφανειακής απορροής των νερών των βροχοπτώσεων και, συνεπώς, τα ποσοστά κατείσδυσης γλυκού νερού είναι μικρά. Τελικά, ο φυσικός εμπλουτισμός των υδροφορέων είναι περιορισμένος. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί η χαμηλή βροχόπτωση, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η οποία περιορίζει ακόμα περισσότερο τις ποσότητες νερού που κατεισδύουν. Επίσης, σημαντική πρόκληση αποτελεί η αυξανόμενη ζήτηση νερού λόγω της παροδικής αύξησης του πληθυσμού (τουρισμός) σε περιόδους κατά τις οποίες η ανανέωση των αποθεμάτων των υδροφορέων είναι ελάχιστη (θερινή περίοδος). Τέλος, αναφέρεται το γεγονός ότι οι υπόγειοι υδροφορείς των νησιών είναι σε επικοινωνία με το θαλασσινό νερό (ανοικτοί) και, συνεπώς, υφίστανται την ποιοτική υποβάθμιση μέσω της υφαλμύρισης.

1.4 Σκοπός Παρούσας Εργασίας

Αναγνωρίζοντας το έντονο πρόβλημα υφαλμύρισης που υπάρχει κατά την θερινή περίοδο στην περιοχή μελέτης, τα Κατάπολα (Σιάκα, 2015), μελετήθηκε η ανάπτυξη ενός σχεδίου διαχείρισης των υπόγειων υδάτινων πόρων ώστε να περιοριστεί το μέτωπο της υφαλμύρισης, μέσα στα επόμενα 5 χρόνια. Ο βαθμός στον οποίο θα περιοριστεί το μέτωπο αυτό, εξαρτάται από την βούληση των αρμόδιων φορέων, καθώς, στη παρούσα εργασία, θα προταθούν διάφορα σενάρια διαχείρισης με γνώμονα διάφορες ζώνες οι οποίες ορίζουν και τον περιορισμό της υφαλμύρισης. Ανάλογα με το πόσο κοντά ή όχι στην ακτή σχεδιάστηκαν αυτές οι ζώνες, τόσο μικρότερες ή μεγαλύτερες, αντίστοιχα, είναι οι επιτρεπόμενες παροχές άντλησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάθε σενάριο, αναζητείται μια βέλτιστη λύση ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη περιορισμού της υφαλμύρισης αλλά και να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα αντλούμενου νερού. Η δημιουργία του μοντέλου της μελλοντικής προσομοίωσης για τα έτη 2016-2020 (μοντέλο πρόβλεψης) βασίστηκε στην εργασία της Σιάκα Μαρκέλλας, κατά την οποία προσομοιώνεται η υπόγεια ροή του υδροφορέα των Κατάπολων για τα χρονικά διάστημα από το 1997-2015. Για την βελτιστοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Γενετικών Αλγόριθμων μέσα από την εργαλειοθήκη του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Δημιουργία ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής των Κατάπολων
- Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης μέσα στα επόμενα 5 χρόνια
- Δυνατότητα επιλογής του βαθμού περιορισμού του φαινομένου

2. Φαινόμενο Υφαλμύρισης

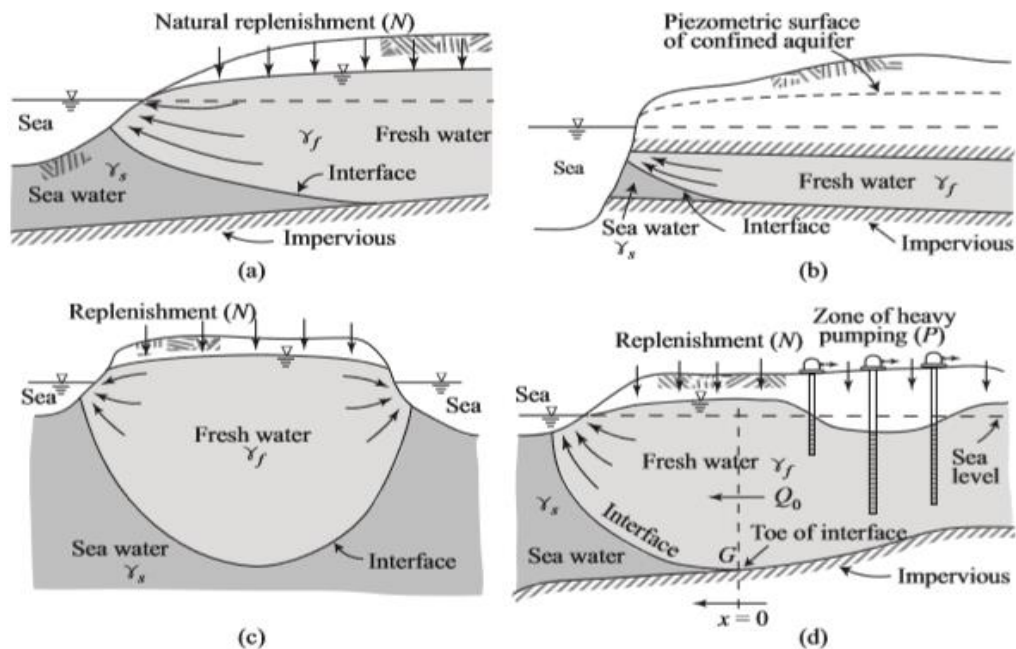
Το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι πλέον ευρέως παρατηρούμενο στα ελληνικά νησιά. Αυτό οφείλεται από την μία στην έντονη ξηρασία που επικρατεί κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, η οποία δεν επιτρέπει ούτε τον φυσικό ούτε τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα, αλλά και στις αυξημένες ανάγκες σε νερό, λόγω του τουρισμού και της άρδευσης. Συνεπώς, η υφαλμύριση είναι αποτέλεσμα της υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων για την κάλυψη των αναγκών σε νερό. Ωστόσο, είναι δυνατόν, κάποια παράκτια σημεία να παρουσιάζουν φυσική υφαλμύριση, καθώς υπάρχει θαλασσινό νερό σε κατώτερα γεωλογικά στρώματα. Η αποκατάσταση ενός υφαλμυρισμένου υδροφορέα είναι εξαιρετικά δύσκολη λόγω της ιδιότητας του αλμυρού νερού να προσροφάται στην επιφάνεια των γεωλογικών στρωμάτων (Καλλέργης, 2000). Έτσι, ακόμη και μικρές συγκεντρώσεις αλμυρού νερού είναι ικανές να καταστήσουν το υπόγειο νερό υποβαθμισμένο και ακατάλληλο για άρδευση και πόση ενώ παράλληλα υφίσταται ο κίνδυνος ρύπανσης του εδάφους με συνέπειες που επηρεάζουν την αγροτική καλλιέργεια. Σήμερα, ωστόσο, μελετάται έντονα η δυνατότητα ανάπτυξης κάποιων συγκεκριμένων καλλιεργειών κάτω από συνθήκες αυξημένης αλατότητας (Katerji, 1999).

Εξαιτίας της ουσιαστικής κατανόησης ότι το νερό δεν αποτελεί ανεξάντλητο πόρο και βάσει τις Ευρωπαϊκής Οδηγίας του 2000, στοχοθετήθηκε η προστασία, η αναβάθμιση και η αποκατάσταση όλων των υπόγειων υδατικών συστημάτων, με την διασφάλιση ισορροπίας μεταξύ των εκφορτίσεων (φυσικές ή μέσω αντλήσεων) και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων το αργότερο μέχρι το 2015. Σε περιπτώσεις ωστόσο όπου η κατάσταση του υδροφορέα δεν αναμένεται να βελτιωθεί χωρίς την εφαρμογή συμπληρωματικών μέτρων, δόθηκαν κάποια περιθώρια εξαιρέσης. Μία τέτοια περίπτωση αποτελεί και ο υδροφορέας των Κατάπολων της Αμοργού (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

2.1 Μηχανισμός Υφαλμύρισης

Όπως είναι γνωστό, το γλυκό νερό έχει πυκνότητα ίση με 1 gr/cm^3 , ενώ αντίθετα το θαλασσινό νερό έχει υψηλότερη πυκνότητα ίση με $1,025 \text{ gr/cm}^3$. Η διαφορά αυτή μπορεί να μοιάζει μικρή αλλά είναι αυτή που οδηγεί το θαλασσινό νερό να εισέρχεται κάτω από το στρώμα του γλυκού νερού. Είναι γεγονός πως η υδραυλική κλίση του γλυκού νερού αυξάνεται όσο αυτό πλησιάζει την ακτή, δημιουργώντας έτσι μια αντίσταση του γλυκού νερού έναντι στο πυκνότερο θαλασσινό νερό. Το πόσο έντονη θα είναι αυτή η αντίσταση, και συνεπώς πόσο θα εισχωρήσει το λεγόμενο πόδι της σφήνας (πόδι διεπιφάνειας), εξαρτάται από την κατάσταση του υδροφορέα. Αν υπάρχει επαρκής εμπλουτισμός του υδροφορέα μέσα από βροχόπτωση ή κάποιου είδους τεχνητό εμπλουτισμό (φράγμα, λιμνοδεξαμενή), η ισορροπία των δύο φάσεων παρατηρείται σχετικά κοντά στην ακτή. Αν, όμως, ο ρυθμός εκμετάλλευσης του υδροφορέα είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό ανανέωσης και εμπλουτισμού του, τότε παρατηρείται εισχώρηση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου της ανύψωσης (up-coning) που παρατηρείται κατά την λειτουργία των πηγαδιών άντλησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Το φαινόμενο του κώνου ανύψωσης εξετάζεται στην συνέχεια.

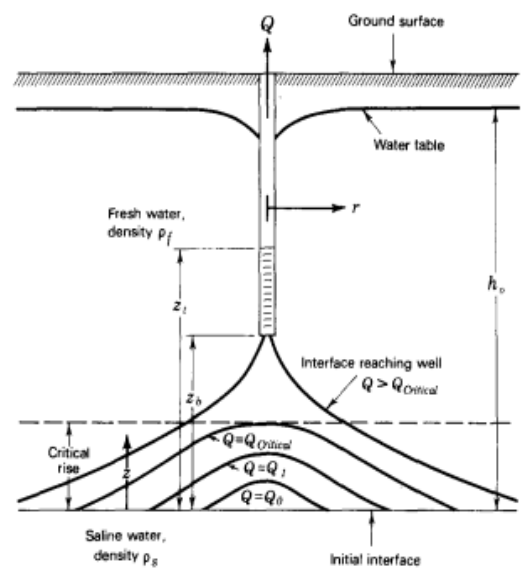
Τα νησιά αποτελούν μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περίπτωση όσον αφορά τον μηχανισμό της υφαλμύρισης. Σε περιπτώσεις όπου το νησί αποτελείται από υδατοπερατούς σχηματισμούς σε όλη την έκτασή του, τότε η υπόγεια αποθήκη γλυκού νερού παρουσιάζεται σαν φακός κάτω από την επιφάνεια του εδάφους του νησιού. Τα αποθέματα γλυκού νερού είναι ιδιαίτερα περιορισμένα, λόγω της πλήρους εξάρτησής τους από τις βροχοπτώσεις. Ουσιαστικά, ο φακός του γλυκού νερού επιπλέει πάνω από το υφάλμυρο νερό. Στην Εικόνα 2.1 (c), παρουσιάζεται μια τέτοια περίπτωση.



Εικόνα 2.1 - Τυπικές κάθετες τομές εισχώρησης της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς, (α) Ελεύθερος υδροφορέας με εμπλουτισμό, (b) Περιορισμένος υδροφορέας, (c) Φακός γλυκού νερού, (d) Περιορισμένος υδροφορέας με αντλήσεις Πηγή: Bear και Cheng, 2010

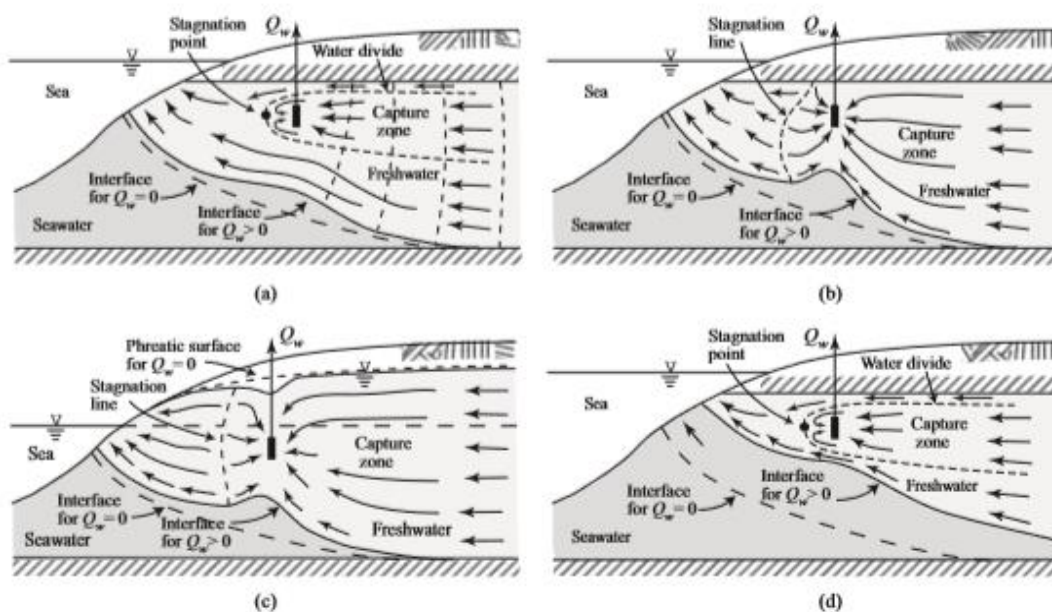
2.1.1 Κώνος Ανύψωσης (up-coning)

Το φαινόμενο του Κώνου Ανύψωσης παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου η παροχή άντλησης είναι μεγάλη και διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι δεν δίνεται η δυνατότητα στον υδροφορέα να επανέλθει και τελικά, ο κώνος αυτός που δημιουργήθηκε, αυξάνεται με το χρόνο και εντείνεται το επίπεδο εισχώρησης του θαλασσινού νερού (T.E. Reilly και A.S. Goodman, 1986). Κάτω από συνθήκες ορθολογικής εκμετάλλευσης του υδροφορέα, όπου ο ρυθμός άντλησης είναι χαμηλότερος από μια κρίσιμη τιμή, είναι δυνατή η εξάλειψη αυτού του φαινομένου. Η κρίσιμη τιμή άντλησης μπορεί να υπολογιστεί με βάσει τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.



Εικόνα 2.2- Κώνος Ανύψωσης Πηγαδιού Άντλησης Πηγή: Reilly και Goodman, 1986

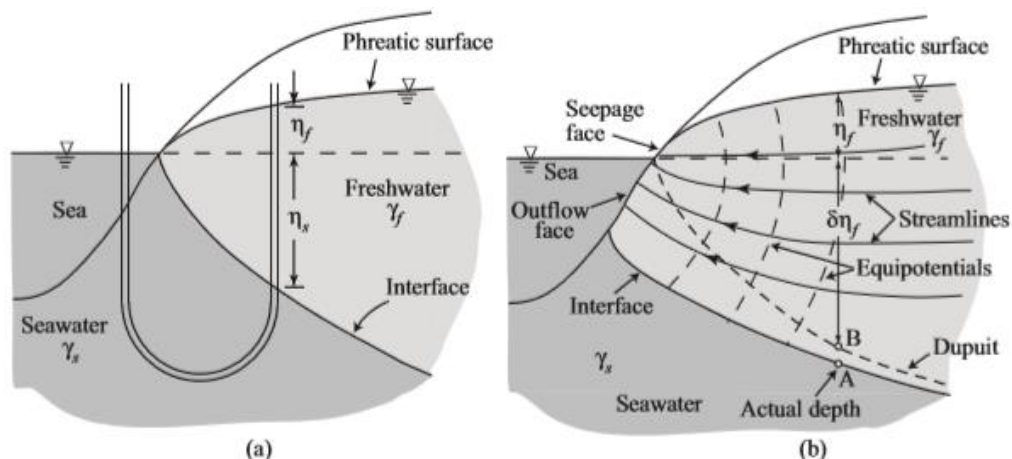
Όπως έχει διατυπωθεί και από τους Bear, Cheng (Bear και Cheng, 2010), αν η άντληση γίνεται σε ικανοποιητική απόσταση από την διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού ή η άντληση είναι σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, τότε παρατηρείται μια μικρή τάση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού προς τα επάνω αλλά δεν υπάρχει σε καμία περίπτωση το φαινόμενο της ανύψωσης. Συνεπώς, η άντληση είναι λειτουργική και προσφέρει γλυκό νερό (Εικόνα 2.3 (α)). Στις Εικόνες 2.3 (b) και (c), παρατηρείται έντονα ο κώνος ανύψωσης, πράγμα που οφείλεται είτε στην υπεράντληση του υδροφορέα είτε στο ότι το πηγάδι βρίσκεται κοντά στην διεπιφάνεια. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της Εικόνας 2.3 (c), έχουμε ελεύθερο υδροφορέα και άρα παρατηρείται και μια πτώση της πιεζομετρικής στάθμης του υδροφορέα. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι εάν μοιραστεί κατάλληλα η παροχή άντλησης σε μια οριζόντια σειρά πηγαδιών (οριζόντια άντληση), ώστε να υπάρχει αλληλοεπίδραση των μεταξύ τους κώνων ανύψωσης, χωρίς βέβαια ο ρυθμός άντλησης να υπερβαίνει το ρυθμό εισροής γλυκού νερού στη θάλασσα, γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των αποθεμάτων χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί κώνος ανύψωσης που θα οδηγούσε στην άντληση υφαλμυρού νερού. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια μέθοδο που βασίζεται στην άντληση μικρών ποσοτήτων νερού που βρίσκονται κατά μήκος της παράκτιας γραμμής και οριακά κοντά στην διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 (d). Τέτοιες εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί στο Ισραήλ και το Πακιστάν (Bear και Cheng 2010).



Εικόνα 2.3-Ανύψωση θαλασσινού νερού γύρω από πηγάδια άντλησης τα οποία βρίσκονται πάνω από την διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού, (a), (b), (c) τρισδιάστατη ροή, (d) δισδιάστατη ροή (σειρά πηγαδιών παράλληλα προς την ακτή) Πηγή: Bear και Cheng, 2010

2.2 Μαθηματική Προσέγγιση Φαινομένου Υφαλμύρισης

Υπάρχουν δύο τρόποι προσομοίωσης της υφαλμύρισης, όπου ανάλογα με την θεώρηση που γίνεται για την διεπιφάνεια μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, επιλέγεται και το αντίστοιχο μοντέλο. Έτσι, ο ένας τρόπος είναι να θεωρηθεί ότι η διεπιφάνεια είναι διακριτή (sharp interface), έχει μικρό πάχος σχετικά με το πάχος του υδροφορέα και συνεπώς δεν υπάρχει ανάμιξη μεταξύ των δυο ρευστών. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητά του σε συνδυασμό με τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που προσφέρει. Κατά την δεύτερη μεθοδολογία αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρισης, γίνεται λόγος για ζώνη ανάμιξης, στην οποία ουσιαστικά τα δύο ρευστά αναμιγνύονται. Η πυκνότητα της ζώνης αυτής διαφέρει και από τις δύο ζώνες που την περικλείουν, ενώ το πάχος της δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Η περιγραφή της πραγματικότητας είναι αρκετά ακριβής αλλά απαιτείται πλήθος παραμέτρων που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν.



Εικόνα 2.4 - Μοντέλο διακριτής διεπιφάνειας (α) Ghyben-Herzberg με βάση τις παραδοχές Dupuit (χωρίς μέτωπο εκροής), (b), Πραγματική απεικόνιση (με μέτωπο εκροής) Πηγή: Bear και Cheng, 2010

Μεγάλη σημασία στα μοντέλα διακριτής επιφάνειας παίζει το αν ισχύει ή όχι η παραδοχή του Dupuit, δηλαδή αν γίνεται η θεώρηση ότι το γλυκό νερό κινείται οριζοντίως, θεωρώντας ότι το πάχος του υδροφορέα είναι αμελητέο συγκριτικά με τις διαστάσεις του. Με άλλα λόγια, η παραδοχή του Dupuit αγνοεί την ύπαρξη της τρίτης διάστασης και συνεπώς δεν μπορεί να περιγράψει την εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα, δίνοντας επιβαρυνμένα αποτελέσματα σχετικά με το μέτωπο της υφαλμύρισης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζεται η παραδοχή αυτή και η κάθετη συνιστώσα είναι υπαρκτή, επιτρέποντας τον υπολογισμό του μετώπου εκροής, παρατηρείται ότι το πραγματικό βάθος του γλυκού νερού είναι μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίζεται όταν ισχύει η παραδοχή Dupuit (Εικόνα 2.4 (b)).

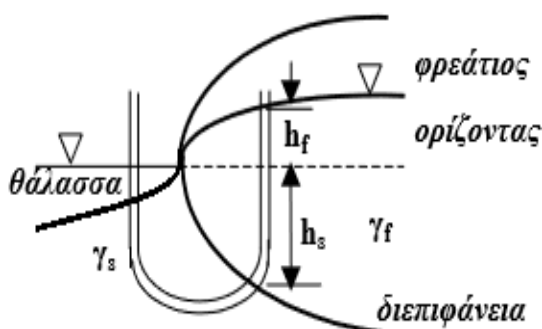
Νόμος Ghyben-Herzberg

Οι Ghyben και Herzberg, ήταν αυτοί που, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, κατέληξαν στο ότι η υφάλμυρη ζώνη βρίσκεται περίπου 40 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, για κάθε μέτρο του υδροφόρου ορίζοντα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Θεωρώντας ότι τα δύο ρευστά, υφάλμυρο και γλυκό νερό, δεν αναμιγνύονται λόγω διαφοράς πυκνότητας (sharp interface), η ισορροπία των δύο ρευστών επέρχεται στα σημεία μιας διεπιφάνειας (Καλλέργη, 2000). Υπάρχει ένα σημείο όπου η διεπιφάνεια, η στάθμη της θάλασσας και του υδροφόρου ορίζοντα αλλά και η επιφάνεια του εδάφους ταυτίζονται. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ροή από το τμήμα του γλυκού νερού προς την θάλασσα. Κάτι τέτοιο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αλλά αποτελεί μια απλουστευμένη μορφή της (παραδοχή Dupuit). Από το σημείο αυτό, έστω Α, και για όλη την επιφάνεια της θάλασσας, το ύψος της θάλασσας παραμένει σταθερό και ίσο με h_s . Ακόμα, στο σημείο όπου ταυτίζεται η διεπιφάνεια με την βάση του υδροφορέα, το λεγόμενο πόδι της διεπιφάνειας ή της σφήνα, βρίσκεται το σημείο Β. Τα δύο σημεία βρίσκονται σε υδροστατική ισορροπία, αν θεωρήσουμε την ύπαρξη ενός θεωρητικού εμβόλου U , καθώς και μόνιμες συνθήκες, με στάσιμη διεπαφή. Συνεπώς, οι πιέσεις στα σημεία αυτά είναι ίσες.

Έτσι οδηγούμαστε στις εξής σχέσεις:

$$\left. \begin{aligned} P_A &= P_B \\ P_A &= \rho_s g h_s \\ P_B &= \rho_f g z + \rho_f g h_f \end{aligned} \right\} \quad \begin{aligned} \rho_s g h_s &= \rho_f g h_s + \rho_f g h_f \\ \rho_s h_s &= \rho_f (h_s + h_f) \\ h_s &= \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \end{aligned}$$

$$h_s = 40 h_f \quad \text{ή} \quad h_s = \frac{h_f}{\varepsilon}, \quad \varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} = 0.0243$$



Εικόνα 2.5 – Μοντέλο Ghyben-Herzberg Πηγή:
Νάνου, 2001

$h_f \rightarrow$ ύψος ανάμεσα στην στάθμη της
θάλασσας και τον υδροφόρο ορίζοντα

$\gamma_s = \rho_s g \rightarrow$ ειδικό βάρος θαλασσινού νερού

$\gamma_f = \rho_f g \rightarrow$ ειδικό βάρος γλυκού νερού

$h_s \rightarrow$ ύψος ανάμεσα στην στάθμη της
θάλασσας και την διεπιφάνεια σε ένα σημείο

Η εξίσωση Ghyben-Herzberg, μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε σημείο του παράκτιου υδροφόρα για το οποίο γνωρίζουμε την απόσταση ανάμεσα στον υδροφόρο ορίζοντα και την στάθμη της θάλασσας. Με άλλα λόγια, ορίζεται ως επίπεδο αναφοράς η επιφάνεια της θάλασσας και πρακτικά, για κάθε 1 m υδραυλικού ύψους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, υπάρχουν άλλα 40 m, κάτω από αυτήν, τα οποία διαθέτουν γλυκό νερό. Αυτό που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ωστόσο, είναι ο υπολογισμός της σφήνας. Το πόδι της σφήνας αποτελεί το μέτωπο της υφαλμύρισης, δηλαδή την απόσταση στην οποία σταματά πλέον να εισχωρεί θαλασσινό νερό. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6, η απόσταση L ορίζεται μεταξύ της ακτής και του σημείου όπου συμπίπτουν ο πυθμένας του υδροφόρα με την διεπιφάνεια υφάλμυρου-γλυκού νερού.



Εικόνα 2.6 – Πόδι της διεπιφάνειας Πηγή: Καλλέργης, 2000

Οι εξισώσεις που αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό του L από τον Bear, το 1979 (Καλλέργη, 2000) ήταν οι ακόλουθες:

$$L = D \sqrt{\frac{k}{cR}}$$

$$Q_L = \left(\frac{kD^2}{2cL} \right) - \frac{RL}{2}$$

$$Q_0 = \left(\frac{kD^2}{2cL} \right) + \frac{RL}{2}$$

$$L_{opt} = \sqrt{\frac{kD^2}{cR}}$$

$k \rightarrow$ υδραυλική αγωγιμότητα

$D \rightarrow$ βάθος του στεγανού πυθμένα

$L \rightarrow$ απόσταση του ποδιού της σφήνας από την ακτή

$R \rightarrow$ εμπλουτισμός της μοναδιαίας λορίδας

$Q_L \rightarrow$ εισροές στον υδροφόρο από τα ανάντη

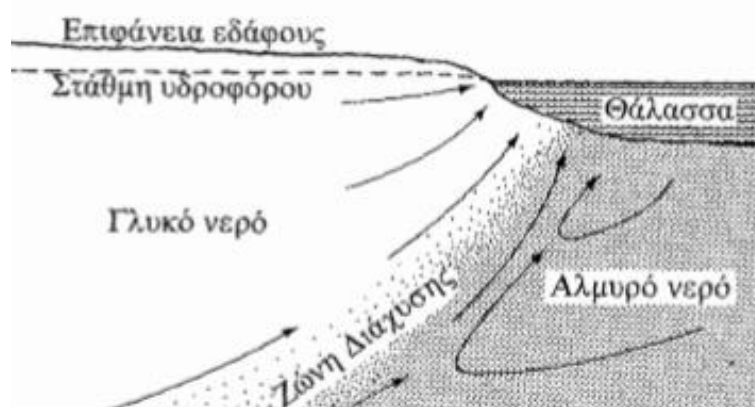
$Q_0 \rightarrow$ εκροές από τον υδροφόρο προς τη θάλασσα

$L_{opt} \rightarrow$ απόσταση ποδιού ακτής ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εκροή Q_0

$$c \rightarrow \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

Συντελεστής Διόρθωσης Ghyben-Herzberg

Ο νόμος του Ghyben-Herzberg, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, σε συνδυασμό με την παραδοχή του Dupuit, είναι ένα πολύ καλό εργαλείο για μια πρώτη εκτίμηση του μετώπου της υφαλμύρισης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή, αδυνατεί να εισαγάγει στους υπολογισμούς της την υδροδυναμική διασπορά που λαμβάνει χώρα κατά την ανάμιξη των δύο ρευστών. Στην πραγματικότητα τα δύο ρευστά, γλυκό και θαλασσινό νερό, αναμιγνύονται και δημιουργούν μια ζώνη ανάμιξης, μέσα στην οποία το υφάλμυρο νερό διαχέεται και τελικά επιστρέφει στην θάλασσα μαζί με τη ροή του γλυκού νερού. Η ζώνη αυτή, ανταποκρίνεται διαφορετικά από την διεπιφάνεια, στην άντληση και τον εμπλουτισμό εξαιτίας της διασποράς. Έχοντας υπόψη ότι το υπόγειο νερό με περιεκτικότητα άνω του 4% σε θαλασσινό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (Καλλέργης, 2000), η ζώνη διασποράς προσομοιάζει καλύτερα το μέτωπο της υφαλμύρισης σε σχέση με την θεώρηση διεπιφάνειας, όπου η εισχώρηση της υφαλμύρισης υπερεκτιμάται και οι μέγιστες παροχές άντλησης υποεκτιμούνται (Pool και Carrera, 2011).



Εικόνα 2.7- Κίνηση Θαλασσινού νερού από και προς τη θάλασσα Πηγή: Καλλέργης, 2000

Έτσι, οι Pool και Carrera, κατάφεραν να εισάγουν τις έννοιες της υδροδυναμικής διασποράς στην εξίσωση των Ghyben-Herzberg σαν έναν συντελεστή διόρθωσης. Στην εμπειρική αυτή σχέση, την θέση του λόγου ε , παίρνει ο συντελεστής ε^* και ισχύουν τα παρακάτω:

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= \varepsilon \left[1 - \left(\frac{a_T}{b} \right)^{\frac{1}{6}} \right] & a_L &\rightarrow \text{σταθερά διαμήκους υδροδυναμικής διασπορά [L]} \\ a_T &= 0.1 a_L & a_T &\rightarrow \text{σταθερά εγκάρσιας υδροδυναμικής διασποράς [L]} \\ a_L &= 0.83 (\log_{10} L)^{2.414} & L &\rightarrow \text{απόσταση του σημείου μέτρησης από την πηγή ρύπανσης [L]} \\ h_s &= \frac{h_f}{\varepsilon^*} & b &\rightarrow \text{πάχος υδροφορέα [L]} \end{aligned}$$

Στην παρούσα εργασία, για την βελτιστοποίηση των ρυθμών άντλησης ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί ο διορθωμένος νόμος των Ghyben-Herzberg. Όπως ανεφέρθηκε πριν, με τον τρόπο αυτό εκτιμάται καλύτερα και πιο ρεαλιστικά το

μέτωπο της υφαλμύρισης ενώ η χρήση του συντελεστή αυτού, προτείνεται και από τους δημιουργούς της για περιπτώσεις μελετών οι οποίες αποσκοπούν στην ανάπτυξη ενός βιώσιμου σχεδίου διαχείρισης παράκτιων υδροφορέων (Pool και Carrera, 2011) όπως και η παρούσα εργασία. Γνωρίζοντας ότι το πάχος του υδροφορέα στην περιοχή των Κατάπολων της Αμοργού είναι 20 m, και ότι η μέση απόσταση των 27 πηγαδιών από την ακτή είναι 380 m (Σιάκα, 2015) βρίσκουμε ότι:

$$a_L = 0.83(\log_{10} L)^{2.414} = 0.83(\log_{10} 380)^{2.414} = 8.18 \text{ m}$$

$$a_T = 0.1a_L = 0.818 \text{ m}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{a_T}{b} \right)^{\frac{1}{6}} \right] = 0.02439 \left[1 - \left(\frac{0.818}{20} \right)^{\frac{1}{6}} \right] = 0.010074$$

$$h_s = \frac{h_f'}{\varepsilon^*} \Rightarrow h_f' = h_s * \varepsilon^* = 20 * 0.010074 = 0.20148 \approx 0.2 \text{ m}$$

$$h_f' = 0.2 \text{ ή } 20.2 \text{ m}$$

Η πρακτική σημασία του ορίου αυτού είναι ότι πλέον θεωρείται ότι τα πηγάδια με υδραυλικό ύψος μικρότερο των 20.2 m είναι υφάλμυρα, ενώ αντίθετα αν το υδραυλικό ύψος ξεπερνά την τιμή του κατωφλιού, τότε αντλείτε γλυκό νερό.

2.3 Αντιμετώπιση της Υφαλμύρισης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αντιμετώπισης της υφαλμύρισης. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η δυνατότητα ανάκαμψης του υδροφορέα έπειτα από ρύπανση με υφάλμυρο νερό είναι μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα αφενός λόγω της ρύπανσης των πετρωμάτων με θαλασσινό νερό, καθώς αυτό προσροφάται από τους γεωλογικούς σχηματισμούς, και αφετέρου λόγω της αργής κίνησης των υδάτων. Παρόλα αυτά, υπάρχουν τρόποι για τον σταδιακό περιορισμό της υφαλμύρισης. Σε περιπτώσεις όπου η άντληση είναι οριζόντια, και όχι κάθετη, ώστε να αντλείται μόνο η ανώτερη στρώση γλυκού νερού από ευρεία έκταση, περιορίζεται το φαινόμενο της ανύψωσης και συνεπώς η πιθανότητα άντλησης υφάλμυρου νερού. Ακόμα, άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Καλλέργης, 2000):

- Κατασκευή γεωτρήσεων έκχυσης και λιμονοδεξαμενών (τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέα)
- Κατασκευή υπόγειων φραγμάτων και γεωτρήσεων άντλησης αλμυρού νερού (απομόνωση του θαλασσινού νερού)
- Αλλαγή του σχεδίου άντλησης, ώστε με μεταβολές τόσο στις παροχές άντλησης αλλά και στην θέση των πηγαδιών να επιτευχθεί μεγαλύτερη υδραυλική κλίση προς την ακτή

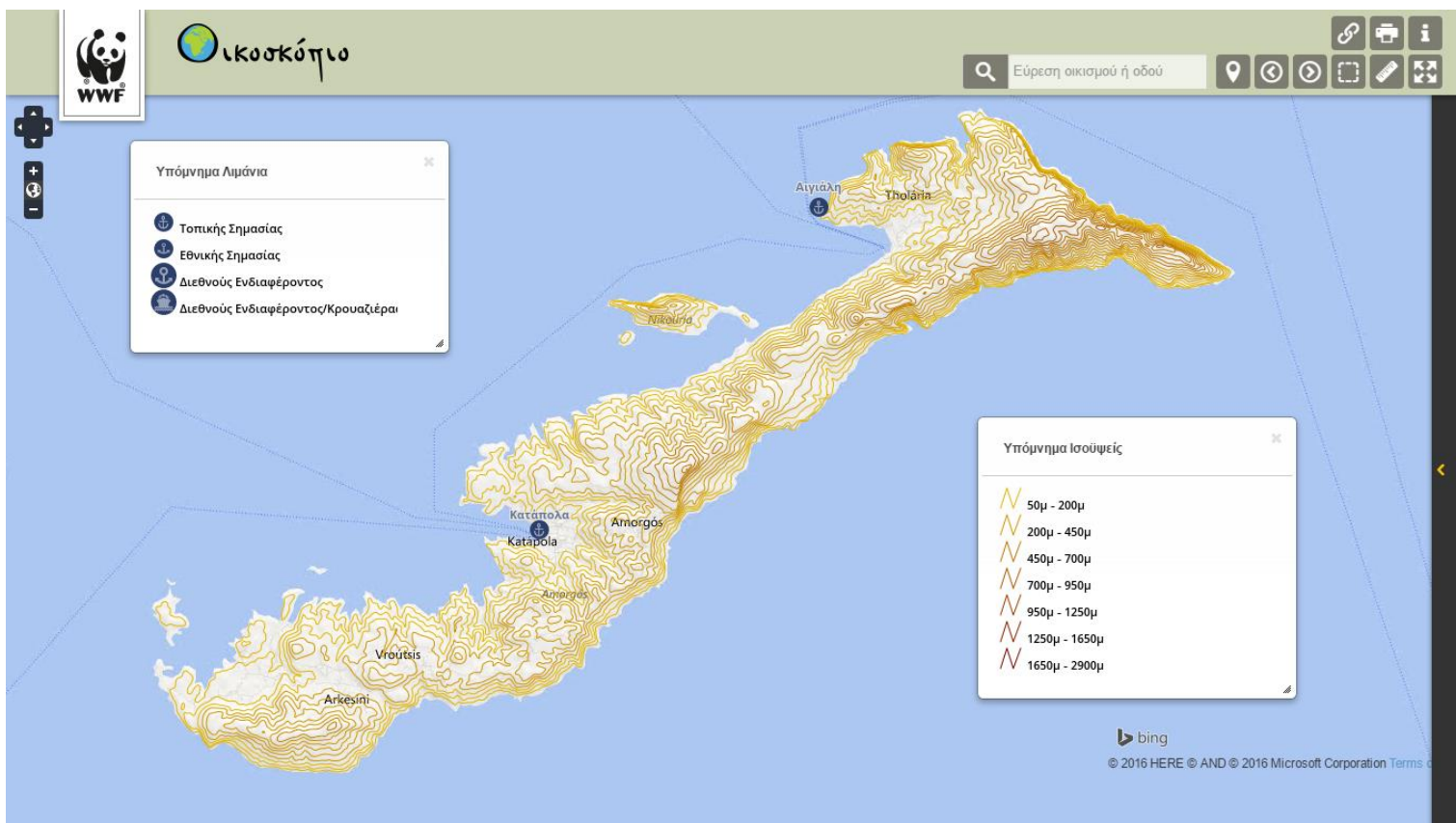
Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε μια τροποποίηση του σχεδίου άντλησης, καθώς μεταβλήθηκαν οι ρυθμοί άντλησης των υφιστάμενων πηγαδιών.

3. Περιοχή Μελέτης

3.1 Γενικά Στοιχεία

Η Αμοργός, αποτελεί νησί των Κυκλάδων και βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, ενώ γεωγραφικά ανήκει στο διαμέρισμα των Νησιών του Αιγαίου Πελάγους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προέλευση του ονόματος του νησιού, καθώς οφείλεται στο φυτό αμοργίς, ένα είδος λιναριού, με το οποίο κατασκευάζονταν διάφανοι χιτώνες, οι επονομαζόμενοι «άλικοι αμοργίδες».

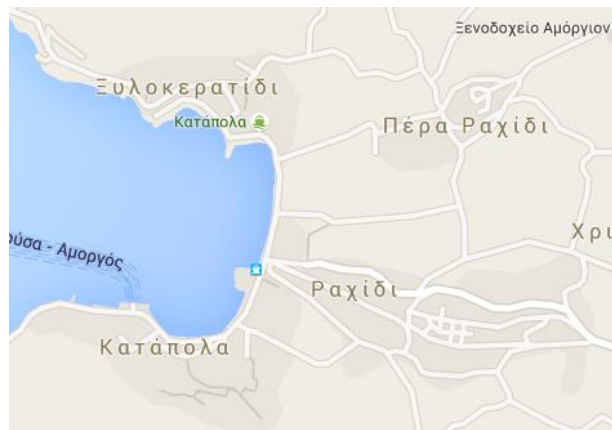
Εκτείνεται σε επιφάνεια 121 km^2 , με την μορφολογία του εδάφους να είναι απότομα ορεινή με υψηλότερη κορυφή αυτή του Κρίκελου, στα 823 m . Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 3.1*, υπάρχουν δύο φυσικά λιμάνια τοπικής σημασίας, τα Κατάπολα και η Αιγιάλη, με το πρώτο να είναι το κύριο λιμάνι του Νησιού.



Χάρτης 3.1 – Ισοϋψής Χάρτης νήσου Αμοργού με Λιμάνια Πηγή: <http://www.oikoskopio.gr/map/>

Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων, τα νησιά του Αιγαίου αποτελούν το υδατικό διαμέρισμα G14 και πιο συγκεκριμένα τα νησιά των Κυκλάδων αποτελούν την Λεκάνη Απορροής GR37. Ως Λεκάνη Απορροής έχει ορισθεί η εδαφική έκταση από την οποία αποστραγγίζεται το σύνολο της απορροής μιας περιοχής προς την τελική παροχέτευση του στη θάλασσα (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015).

Στον δήμο Αμοργού υπάγονται οι Τοπικές Κοινότητες Αμοργού (Χώρα), Αιγιάλης, Αρκεσίνης, Βρούτση, Θολαρίων και Κατάπολων. Στην παρούσα μελέτη, και βάσει της μοντελοποίησης του υπογείου υδροφορέα που έχει προηγηθεί από την Σιάκα Μαρκέλλα, επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης αυτή των Κατάπολων, με συνολικό πληθυσμό 485 κατοίκους και τους τρεις μεγαλύτερους οικισμούς να είναι το Ραχίδι (148), τα Κατάπολα (128) και το Ξυλοκερατίδι (107). Ο αριθμός των κατοίκων ολόκληρου του Δήμου Αμοργού ανέρχεται στους 1.973 σύμφωνα με την τελευταία απογραφή του 2011.



Χάρτης 3.2 –Χάρτης Περιοχής Μελέτης Πηγή: <https://www.google.gr/maps/@36.8291003,25.8670418,15.5z>

3.2 Κλιματολογικά Στοιχεία

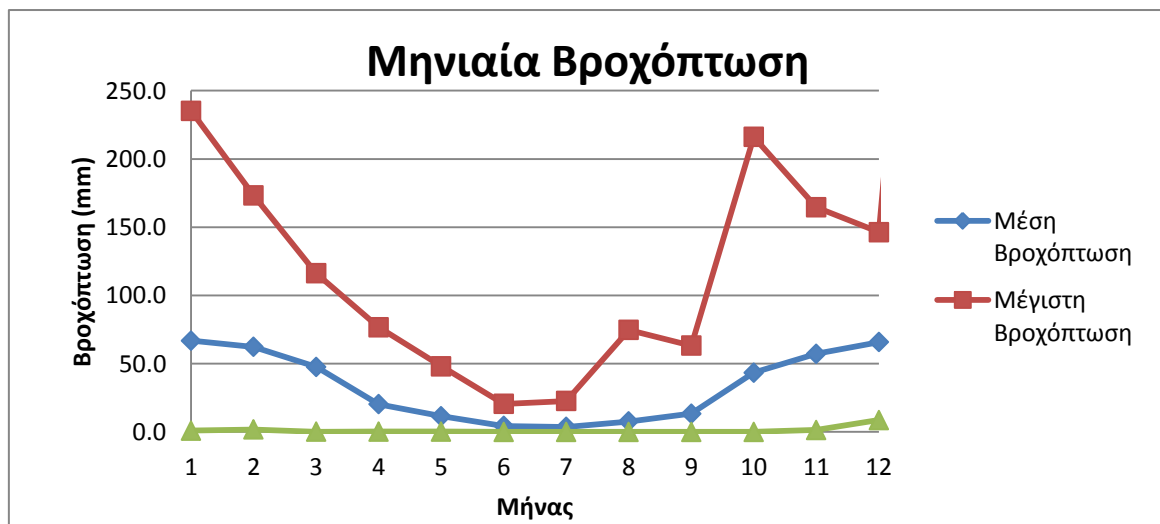
Το κλίμα που επικρατεί στην Αμοργό είναι το εύκρατο Μεσογειακό, όπως και σε όλα τα νησιά της Μεσογείου. Οι Κυκλάδες είναι σχετικά ξηρές περιοχές συγκριτικά με την υπόλοιπη Ελλάδα κατά την χειμερινή περίοδο, παρά την ύπαρξη της θάλασσας, ενώ κατά την διάρκεια του καλοκαιριού η σχετική υγρασία των Κυκλαδίων Νησιών εμφανίζεται μεγαλύτερη από αυτήν της Ηπειρωτικής Ελλάδας. Πολλά νησιά των Κυκλάδων, συμπεριλαμβανομένης και της Αμοργού, αποτελούν τις ξηρότερες περιοχές της Ελλάδας αλλά και τις πιο ανεμοδαρμένες (<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/database/kykladon/pr30ge.pdf>).

Η Αμοργός, αν και πρόσφατα τέθηκε σε λειτουργία ο μετεωρολογικός σταθμός στην περιοχή της Αιγιάλης, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις που καταγράφηκαν στον σταθμό της γειτονικής Νάξου (Γ. Μήκος (Lon) 25°22'23" , Γ. Πλάτος (Lat) 37°06'05", Ύψος 9.00μ.).

Κατακρημνίσεις

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω των χαμηλών ετήσιων επιπέδων βροχόπτωσης στα νησιά των Κυκλάδων, δεν ευνοείται ο σχηματισμός και ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων αλλά ούτε και η εμφάνιση επιφανειακών υδάτων. Επίσης, υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης πλυμμηρικών φαινομένων λόγω ισχυρών βροχοπτώσεων και μεγάλης επιφανειακής απορροής. Το γεγονός αυτό της ανισοκατανομής των βροχοπτώσεων (λίγες και καταρρακτώδεις) στη διάρκεια του χρόνου, σε συνδυασμό με την έλλειψη νερού, θα μπορούσε να κατευθύνει την διαχείριση των υδάτινων πόρων σε μεθόδους αξιοποίησης των πλυμμηρικών νερών.

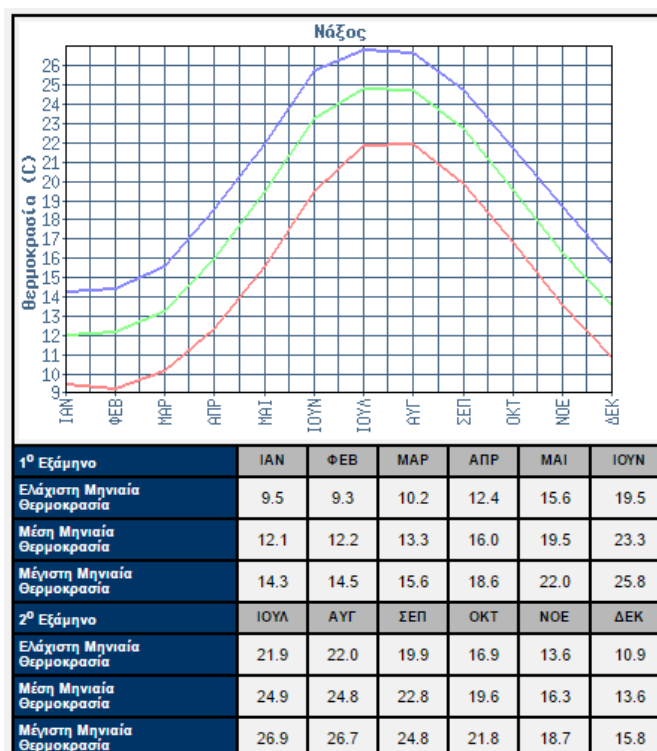
Σύμφωνα με τα βροχομετρικά στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ), για την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1970 έως και τον Απρίλιο του 2015, παρατηρούμε τον έντονο διαχωρισμό μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου (Dry και Wet Period), ο οποίος κρίθηκε απαραίτητος και στην διαδικασία της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής των υδάτων. Έτσι το διάστημα των πέντε μηνών μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου, θεωρήθηκε η ξηρή περίοδος, ενώ ο υπόλοιπος χρόνος θεωρείται η υγρή περίοδος (Σιάκα, 2015). Στο *Διάγραμμα 3.1* που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της βροχόπτωσης ανά μήνα (μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή) για τα έτη από το 1970 έως το 2015, με βάση τα στοιχεία της Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Ο παραπάνω διαχωρισμός αιτιολογείται από το διάγραμμα καθώς παρατηρείται μια πτώση της έντασης των βροχοπτώσεων, σε επίπεδα κάτω των 50mm όταν πρόκειται για τις μέσες τιμές βροχόπτωσης, κατά τους θερινούς μήνες μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου (dry period). Στον *Πίνακα Π.1* του Παραρτήματος φαίνονται αναλυτικά οι τιμές της βροχόπτωσης σε χιλιοστά.



Διάγραμμα 3.1 –Μηνιαία Βροχόπτωση για τα έτη 1970-2015, Πηγή: ΕΜΥ

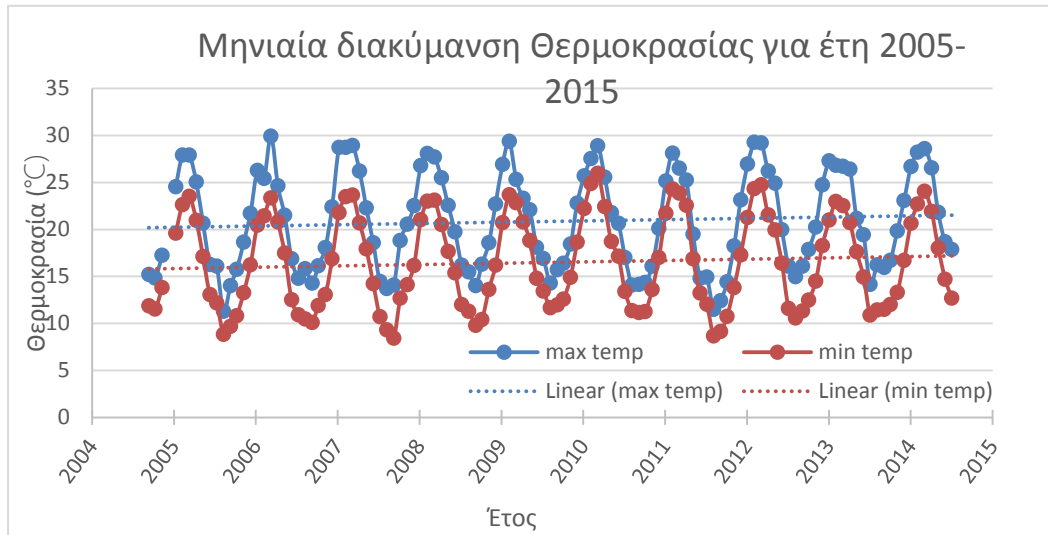
Θερμοκρασία

Γενικότερα, οι Κυκλάδες, και κατ' επέκταση και η Αμοργός, παρουσιάζουν ήπιους χειμώνες και δροσερά καλοκαίρια λόγω των μετεωρίων, με θερμοκρασίες που σπάνια ξεπερνούν τους 35°C. Πιο συγκεκριμένα, για την περιοχή της Νάξου και κατ' επέκταση της Αμοργού, η διακύμανση της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στην παρακάτω *Εικόνα 3.1*, με τις ελάχιστες, μέσες και μέγιστες θερμοκρασίες για τα έτη από 1955-1997.



Εικόνα 3.1 –Ελάχιστη, Μέση και Μέγιστη Θερμοκρασία για τους μήνες μεταξύ των ετών 1955-1997 Πηγή: ΕΜΥ

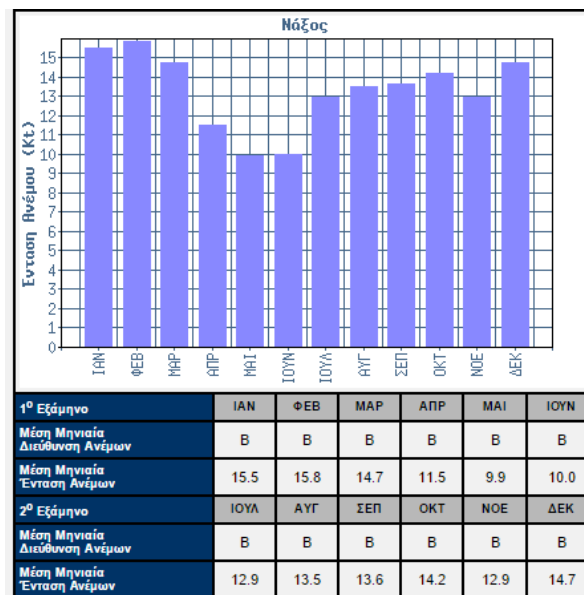
Γενικότερα, παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία δεν ξεπερνάει τους 30°C ενώ η διακύμανσή της από έτος σε έτος παραμένει αρκετά σταθερή. Αυτό φαίνεται και από το *Διάγραμμα 3.2* όπου παρατηρείται το γεγονός ότι οι πρώτοι και οι τελευταίοι μήνες του έτους ξεκινούν με θερμοκρασίες από 5 έως 15°C ενώ στους ενδιάμεσους μήνες (Ιούνιος και Ιούλιος) οι τιμές της θερμοκρασίας αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους.



Διάγραμμα 3.2- Μηνιαία Διακύμανση Θερμοκρασίας για τα έτη 2005-2015 Πηγή: EMY

Ανεμολογικά Στοιχεία

Η περιοχή των Κυκλάδων αποτελεί μια από τις πιο ανεμοδαρμένες περιοχές της Ελλάδας με τον αριθμό των νηνεμιών να είναι πολύ μικρός. Οι άνεμοι πνέουν βορειοανατολικοί-βορειοδυτικοί και πιο σπάνια νότιοι και νοτιοδυτικοί. Την θερινή περίοδο, επικρατούν τα μελέτμια που, ουσιαστικά, πρόκειται για ανέμους με βορειοανατολική-βορειοδυτική κατεύθυνση. Τέτοιοι άνεμοι ξεκινούν να πνέουν από τις αρχές του Μαΐου έως τον Οκτώβριο, με αυξημένη ένταση και συχνότητα τους μήνες μεταξύ Ιουλίου και Σεπτεμβρίου (<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/database/kykladon/pr30ge.pdf>). Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι παρατηρήσεις των ανέμων από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νάξου. Η ένταση του ανέμου μετράται σε knot ($1.852\text{km/h} = 0.51444\text{m/s}$).



Εικόνα 3.2 - Μέση Μηνιαία Διεύθυνση και Ένταση Ανέμου για τους μήνες μεταξύ των ετών 1955-1997 Πηγή: EMY

3.3 Γεωλογία και Υδρογεωλογία

Γενικότερα, για να μπορέσει να κατανοηθεί πλήρως η υδρογεωλογία μιας περιοχής, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στα γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής αυτής. Η ύπαρξη ρηγμάτων μπορεί να αποτελέσει την αιτία είτε της επικοινωνίας των υδατικών πόρων είτε της απομόνωσής τους.

Με βάση την μελέτη του Διεπιστημονικού Ινστιτούτου Περιβαλλοντικών Ερευνών για την Αμοργό, οι γεωλογικές σειρές της Αμοργού οφείλονται σε ιζήματα και κάποια ηφαιστειακά πετρώματα χαμηλής μεταμόρφωσης και είναι τα εξής (Μάργαρης, 2008):

1. Κατώτερη σειρά σχιστόλιθων και κροκαλοπαγών - Τριαδικό.

Πρόκειται για αργιλικούς και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους σε συνδυασμό με φακούς κροκαλοπαγών.

2. Ανθρακική σειρά - Τριαδικό, Ιουραστικό, Ηωκαινό.

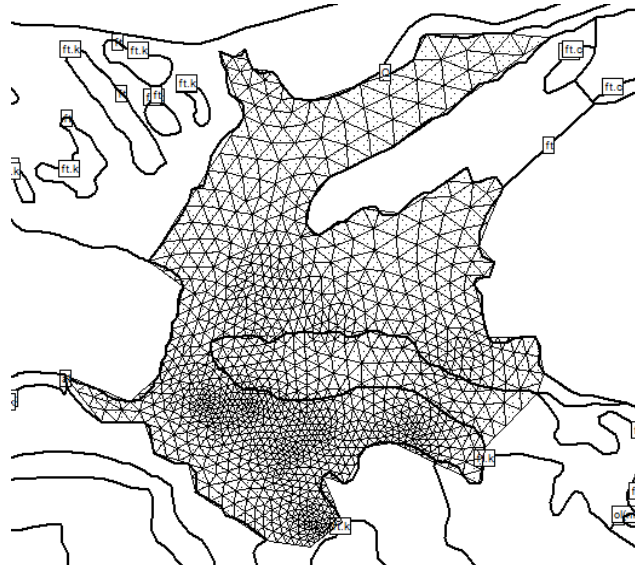
Πρόκειται για τη σειρά από που αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού. Στα κατώτερα μέρη παρατηρούνται εναλλαγές κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και δολομιτών με μαργαϊκούς ασβεστόλιθους ενώ στα ανώτερα τμήματα του νησιού παρατηρούνται είτε στρωματώδεις έως συμπαγείς κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, τεφροκυανοί με κονδύλους ή στρώσεις πυριτόλιθων και βωξιτικούς φακούς, για την Βορειοανατολική Αμοργό, είτε πλακώδεις ασβεστόλιθοι και δολομίτες με κονδύλους πυριτόλιθων καθώς και παρεμβολές μαργαϊκών σχιστόλιθων, στην Νοτιοδυτική Αμοργό.

3. Ανώτερη σχιστολιθική σειρά, Φλύσχης – Παλαιογενές.

Πρόκειται για φλύσχη, τυπικού είδους, που αποτελείται από εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμμιτών αλλά και κροκαλοπαγών και αφόρα στεγανά ή ημιπερατά πετρώματα. Ωστόσο, σε κάποια σημεία, αναπτύσσεται δευτερογενές πορώδες λόγω της έντονης τεκτονικής καταπόνησης, γεγονός που οδηγεί στην δημιουργία μιας μικρής υδροφορίας κατά τόπους η οποία εμφανίζεται είτε ως πηγή είτε ως υδροφορέα [5].

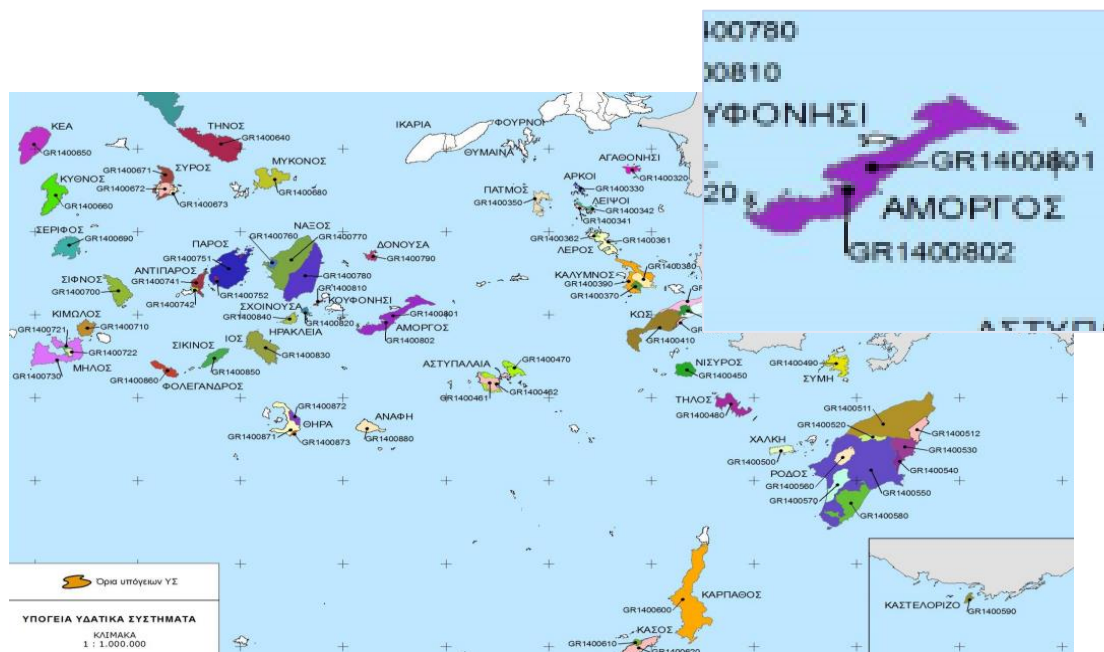
4. Τεταρτογενείς (αλλουβιακές) αποθέσεις.

Η σειρά αυτή δεν παρουσιάζει έντονη ανάπτυξη αλλά παρόλα αυτά, θεωρείται σημαντική λόγω του ότι περιλαμβάνει ποικίλου τύπου και προέλευσης σχηματισμούς όπως αλλουβιακές προσχώσεις χειμαρρώδους προέλευσης, πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων κ.α.



Εικόνα 3.3-Περιοχή Μελέτης και Διαφορετικά Γεωλογικά Είδη στο μοντέλο προσομοίωσης (PTC)

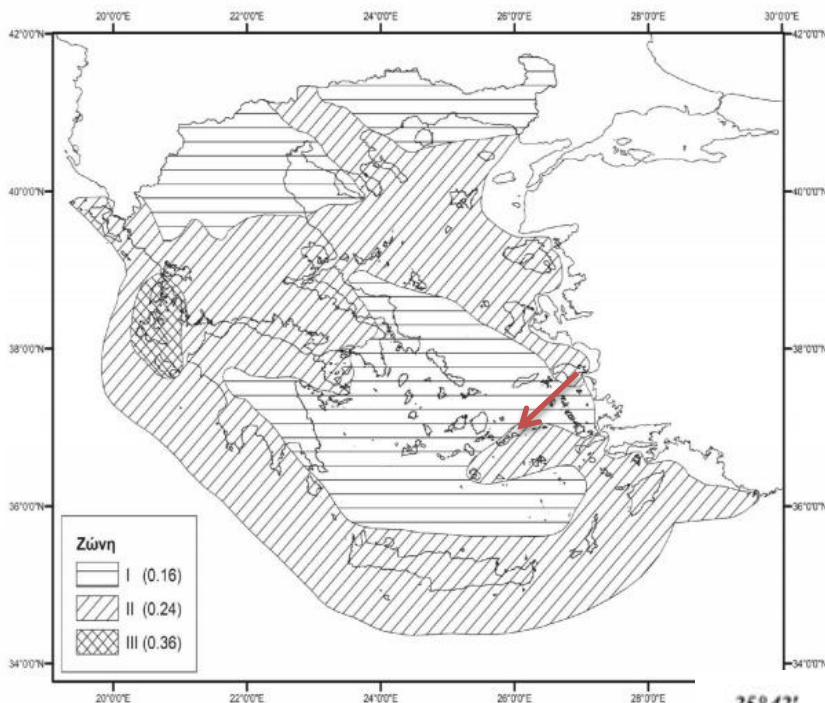
Σύμφωνα με τα στοιχεία του ΥΠΕΚΑ, η Αμοργός διαθέτει δυο λεκάνες απορροής όπου και οι δύο βρίσκονται στην περιοχή των Κατάπολων (Σύστημα Κατάπολων (Α) και (Β)), με τους υδροφορείς να χαρακτηρίζεται ως ρωγματικός και κοκκώδης σε έκταση 120,7 και 0,6 km² αντίστοιχα. Η περιοχή μελέτης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία επηρεάζεται άμεσα από το (Β) Σύστημα των Κατάπολων (GR1400802), η κατάσταση του οποίου ορίζεται ως κακή, τόσο σχετικά με την ποιοτική κατάσταση των υδάτων αλλά και την ποσοτική κατάστασή τους. Σημειώνεται, επίσης, η υπερεκμετάλλευση που έχει υποστεί ο υδροφορέας με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου της υφαλμύρισης, γεγονός που εκ των πραγμάτων, δικαιολογεί την αδυναμία επίτευξης του περιβαλλοντικού στόχου για καλή κατάσταση εντός του 2015.



Χάρτης 3.4-Υπόγεια Υδατικά Συστήματα στο ΥΔ Νήσων Αιγαίου, Νότιο Αιγαίο Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων

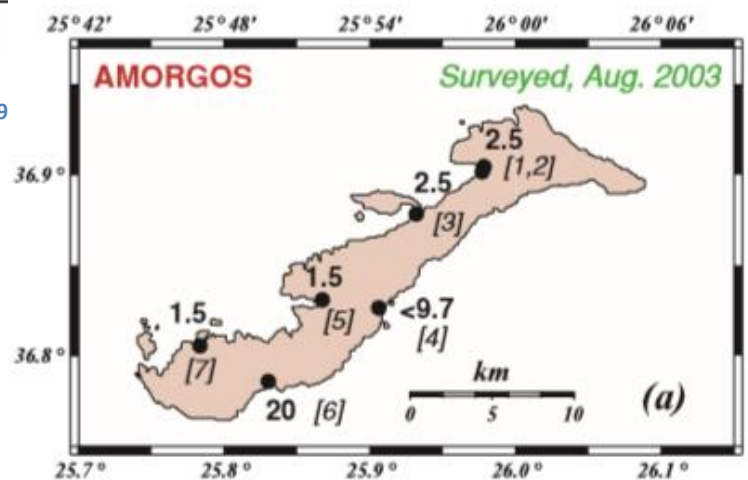
Σεισμικότητα

Το νησί της Αμοργού χαρακτηρίζεται από σεισμικότητα αντίστοιχη με αυτήν της ευρύτερης περιοχής των Κυκλάδων-Δωδεκανήσων. Είναι από τα λίγα νησιά των Κυκλάδων που δεν ανήκουν στη ζώνη σεισμικότητας Ι, σύμφωνα με τον παρακάτω Χάρτη 3.5, αλλά στη ζώνη ΙΙ. Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ο μεγάλος σεισμός της 9^{ης} Ιουλίου του 1956, που έπληξε την Αμοργό, με 53 θύματα και 100 τραυματίες, καθώς και τα γειτονικά νησιά όπως την Σαντορίνη, την Αστυπάλαια και την Νάξο. Συγκεκριμένα, ο σεισμός προκάλεσε την ολίσθηση του εδάφους και κατ' επέκταση την δημιουργία τσουνάμι, όπου στην περιοχή των Κατάπολων, έφτασε το 1,5 m (Χάρτης 2.6) (Okal et. al., 2009).



Χάρτης 3.5– Χάρτης Ζωνών Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλάδας, Πηγή: Εφημερίδα Κυβέρνησης τεύχος δεύτερο, αρ. φύλλου 1154 12 Αύγουστου 2003

Χάρτης 3.6 – Ύψος Ανόδου κυμάτων τσουνάμι σε m Πηγή: Okal et. al., 2009



4. Προσομοίωση Υπόγειας Ροής

4.1 Μοντέλα Προσομοίωσης Υπόγειας Ροής

Όπως είναι γνωστό, η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να οδηγήσει είτε σε αναλυτικές είτε σε αριθμητικές λύσεις. Στα μοντέλα προσομοίωσης, αναζητούνται οι αριθμητικές λύσεις των εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή με σκοπό τον πρακτικό προσδιορισμό της κατάστασης της υπόγειας ροής. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται ο επακριβής προσδιορισμός της χωρικής και χρονικής κατανομής των μεταβλητών κατάστασης του προβλήματος, όπως γίνεται στη περίπτωση των αναλυτικών λύσεων. Έτσι, με τις αριθμητικές λύσεις, ο προσδιορισμός των μεταβλητών κατάσταση γίνεται για κάποια συγκεκριμένα σημεία (κόμβοι), ενώ τα υπόλοιπα σημεία του χώρου ενδιαφέροντος προσδιορίζονται μέσω άλλων μεθόδων.

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής γίνεται με την χρήση, κυρίως, δύο τύπων μοντέλων, αν και υπάρχουν και άλλες μέθοδοι προσομοίωσης. Οι δύο βασικοί τύποι μοντέλων είναι:

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (finite difference method)
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method)

Πιο συγκεκριμένα (Papadopolou et. al., 2009), (Καρτεράκης, 2005), όσον αφορά τις πεπερασμένες διαφορές, ο χώρος μελέτης διακριτοποιείται μέσω ενός ορθογωνικού πλέγματος, όπου η επίλυση των εξισώσεων γίνεται πάνω στους κόμβους, είτε στο κέντρο κάθε κελιού είτε στις κορυφές του κελιού. Βασικό γνώρισμα της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών είναι το γεγονός ότι στην εξίσωση του υπολογισμού του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, εμπεριέχεται ένας όρος για κάθε γειτονικό κόμβο. Ο όρος αυτός ορίζεται ως το γινόμενο του εκάστοτε υδραυλικού ύψους και μιας συνάρτησης που περιγράφει την υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ των κόμβων, ενώ στην εξίσωση λαμβάνεται υπόψη και η αποθηκευτικότητα του κόμβου που μελετάται. Ωστόσο, η διακύμανση του υδραυλικού ύψους από κόμβο σε κόμβο, δεν λαμβάνεται υπόψη. Από την άλλη, στην περίπτωση των πεπερασμένων στοιχείων, ο χώρος ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα σύνολο υποπεριοχών (στοιχείων) και πραγματοποιείται τμηματική προσέγγιση του χώρου. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται στις κορυφές κάθε στοιχείου, δηλαδή στους κόμβους. Κατά την μέθοδο αυτή, γίνεται χρήση συναρτήσεων παρεμβολής ώστε σε κάθε σημείο του στοιχείου να αντιστοιχεί μία τιμή για το υδραυλικό ύψος. Με την μέθοδο αυτή, γίνεται ακριβέστερος προσδιορισμός πολυγωνικών ή ακανόνιστων περιοχών, καθώς είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία.

4.2 Μοντέλο PTC - Χρησιμοποιούμενο Μοντέλο Προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε μέσω του κώδικα του PTC (Princeton Transport Code). Το πρόγραμμα αυτό, επιλύει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που παρουσιάζονται παρακάτω, μέσω των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, ώστε να αναπαρασταθεί η υπόγεια ροή και η μεταφορά των ρύπων. Οι εξισώσεις αυτές, έχουν προκύψει από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy και παρουσιάζονται με την σειρά που υπολογίζονται (Babu et al., 1997).

$$\nabla(K\nabla h) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \rightarrow \text{Υπόγεια Ροή} - \text{Προσδιορισμός των Υδραυλικών Υψών}$$

$$v = -\frac{K}{n} \nabla h \rightarrow \text{Νόμος του Darcy} - \text{Υπολογισμός Ταχύτητας Ροής}$$

$$\nabla(D\nabla c) - \nabla(vc) + \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \rightarrow \text{Μεταβολή Συγκέντρωση του ρύπου με το χρόνο}$$

$D \rightarrow$ συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς [$M^2 L^{-1}$]

$K \rightarrow$ συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας [LT^{-1}]

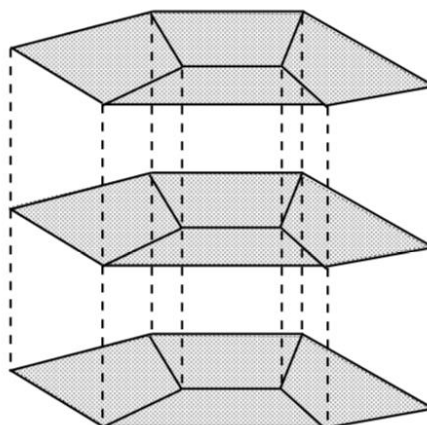
$h \rightarrow$ υδραυλικό ύψος [L]

$v \rightarrow$ ταχύτητα Darcy μέσω πορώδους μέσου [LT^{-1}]

$c \rightarrow$ συγκέντρωση ρυπου [ML^{-3}]

Ο τρόπος με τον οποίο επιλύονται αυτές οι εξισώσεις και για τις τρεις διαστάσεις αποτελεί έναν συνδυασμό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών. Ουσιαστικά, ο χώρος του πεδίου διαχωρίζεται σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα για τα οποία λύνονται οι εξισώσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα, γίνεται η σύνδεση των οριζόντιων επιπέδων με την επίλυση των εξισώσεων κάθετα, με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Με άλλα λόγια, ακολουθούνται δύο βήματα και αρχικά εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των οριζόντιων επιπέδων, ενώ κατά το δεύτερο βήμα, συνδέονται κάθετα τα οριζόντια επίπεδα με τις πεπερασμένες διαφορές (Εικόνα 4.1).

Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει μεταξύ τριών τύπων οριακών συνθηκών. Κατά την μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης από την Σιάκα (Σιάκα, 2015), χρησιμοποιήθηκαν οι δύο πρώτοι τύποι των οριακών συνθηκών. Η οριακή συνθήκη Τύπου 1 περιγράφει σημεία όπου το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό (Diriclet) ενώ η Τύπου 2 θεωρεί ότι το υδραυλικό ύψος μεταβάλλεται σταθερά με τον χρόνο και ακολουθεί μια εξίσωση σταθερής ροής (Neumann).

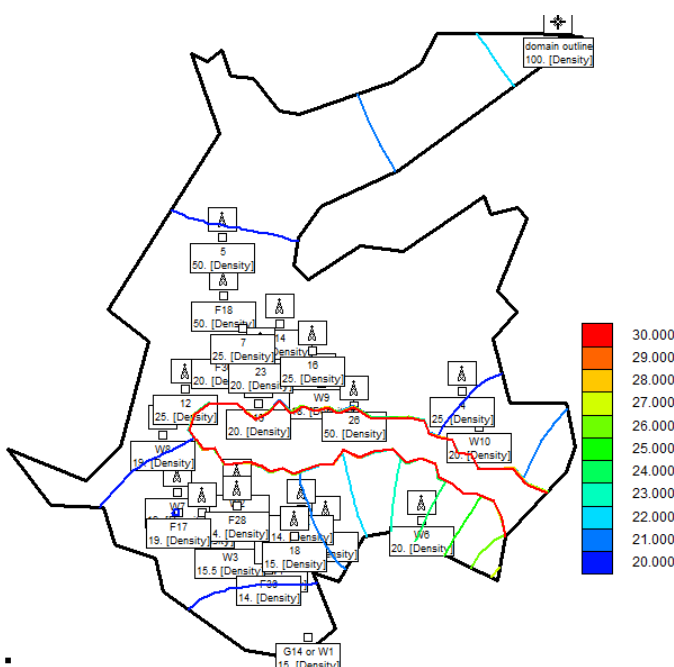


Εικόνα 4.1 – Τρισδιάστατος Χώρος Οριζόντιων Πλεγμάτων
Πεπερασμένων Στοιχείων σε στοιβες Πηγή: Babu, 1997

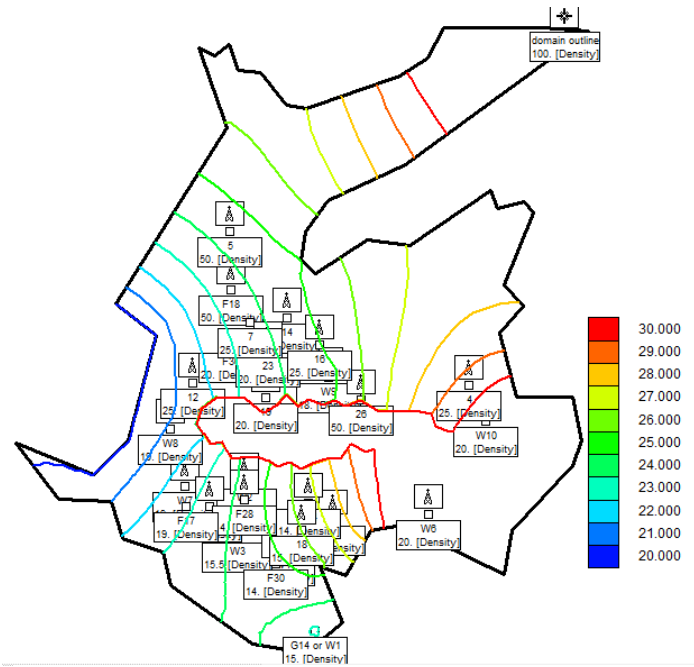
4.3 Εφαρμογή του PTC στο Πρόβλημα Βελτιστοποίησης - Μοντέλο Πρόβλεψης

4.3.1 Υφιστάμενη Κατάσταση

Η παρούσα μελέτη, όπως έχει αναφερθεί, έχει βασιστεί στο μοντέλο της Σιάκα Μαρκέλλας, για την υπόγεια ροή της Αμοργού. Ξεκινώντας λοιπόν από το αρχικό μοντέλο, παρατηρούμε την έντονη εξάπλωση του φαινομένου της υφαλμύρισης κατά την θερινή περίοδο του 2014 (Εικόνα 4.2, Εικόνα 4.4) ενώ αντίθετα, την χειμερινή περίοδο, το φαινόμενο παρουσιάζεται ιδιαίτερα περιορισμένο κοντά στην ακτή (Εικόνα 4.3 Εικόνα 4.5). Στην διαδικασία της βελτιστοποίησης, ως μέτωπο υφαλμύρισης ορίζεται το μέτωπο με υδραυλικό ύψος χαμηλότερο των 20.2 m, σύμφωνα με τον διορθωμένο συντελεστή Ghyben-Herzberg (Pool και Carrera, 2011).

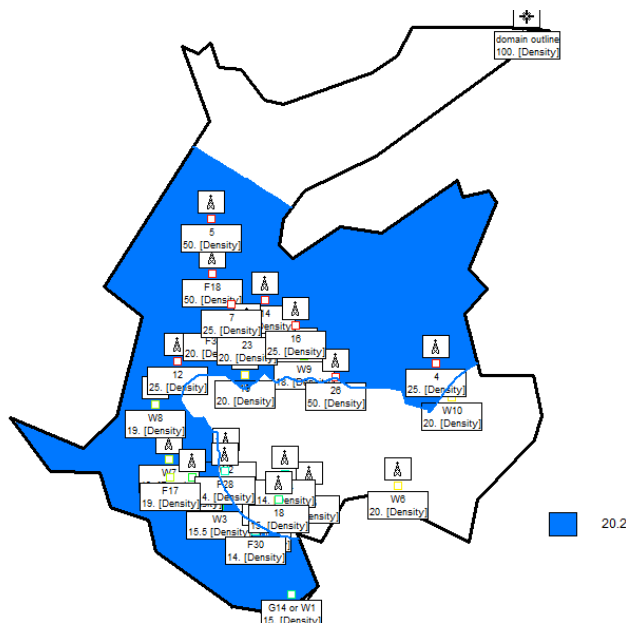


Εικόνα 4.2- Απεικόνιση Ισοδυναμικών Γραμμών Υδραυλικού Ύψους στην περιοχή των Κατάπολων για την περίοδο από Μάιο έως Σεπτέμβριο του 2014 (34s Dry)

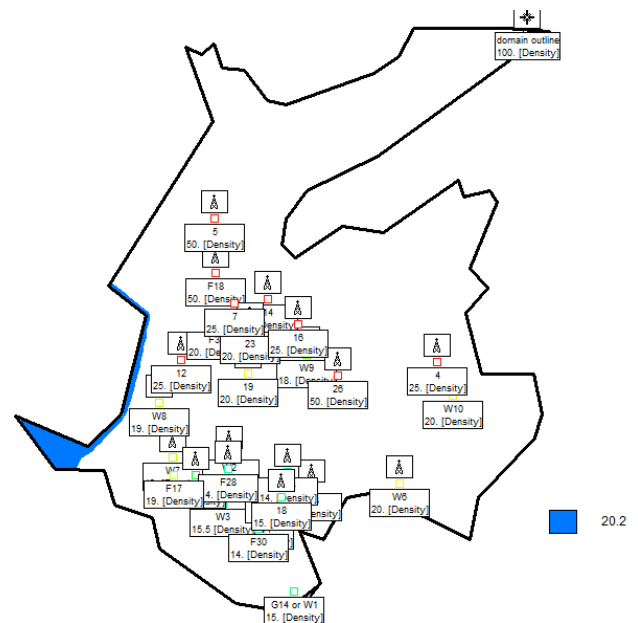


Εικόνα 4.3- Απεικόνιση Ισοδυναμικών Γραμμών Υδραυλικού Ύψους στην περιοχή των Κατάπολων για την περίοδο από Οκτώβριο 2014 έως Απρίλιο 2015 (35s Wet).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην προσομοίωση της σημερινής κατάστασης, παρουσιάζει το φαινόμενο της αντιστροφής ροής. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.2 και 4.3, στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο ίδιες ισοδυναμικές γραμμές σε κάθε Εικόνα (ισοδυναμική των 20m για την θερινή περίοδο του 2014 και ισοδυναμικές των 24m και 23m για την χειμερινή περίοδο του 2014). Με άλλα λόγια, αντιστρέφεται η ροή λόγω της αυξημένης άντλησης του πηγαδιού που βρίσκεται στην περιοχή αυτή (G14/W1). Η διαπίστωση αυτή αποτελεί μια προειδοποίηση σχετικά με τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, καθώς είναι πολύ πιθανό να συμβεί κάτι αντίστοιχο και μετά την βελτιστοποίηση. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό και συνεπώς, πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για την αποφυγή του φαινομένου.



Εικόνα 4.4- Απεικόνιση πρόσχωσης μετώπου υφαλμύρισης στην περιοχή των Κατάπολων για την περίοδο από Μάιο έως Σεπτέμβριο του 2014 (34s Dry)

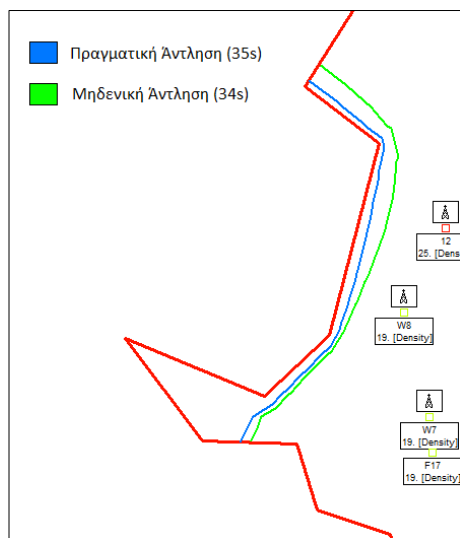


Εικόνα 4.5-Απεικόνιση πρόσχωσης μετώπου υφαλμύρισης στην περιοχή των Κατάπολων για την περίοδο από Οκτώβριο 2014 έως Απρίλιο 2015 του 2015 (35s Wet).

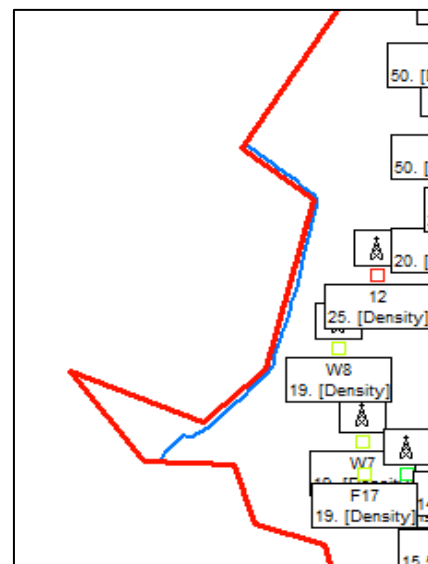
Όπως είναι κατανοητό, έπρεπε να ορισθεί ένα εύρος μέσα στο οποίο θα έχει νόημα η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για τον λόγο αυτό, και θεωρώντας ως περίοδο αναφοράς την θερινή περίοδο του 2014 (34s dry) λόγω του αυξημένου μετώπου της υφαλμύρισης που παρουσιάζει, έγινε μια ακόμα προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, αυτή την φορά για μηδενική άντληση για όλα τα πηγάδια για την χρονική περίοδο του καλοκαιριού του 2014 (34s). Με αυτό τον τρόπο, ουσιαστικά, έγινε μια εκτίμηση του μέχρι πόσο μπορεί να αναχαιτιστεί η επίδραση της υφαλμύρισης εάν αποφασιστεί, καθολικά, η παύση της εκμετάλλευσης του υδροφορέα. Κάτι τέτοιο βέβαια, δεν είναι ρεαλιστικό και εξυπηρετεί σκοπούς καθαρά διαδικαστικούς. Στην Εικόνα 4.6 που ακολουθεί, φαίνονται συνδυαστικά τα μέτωπα της υφαλμύρισης, για την περίοδο 34s (θερινή περίοδος του 2014), στην περίπτωση μηδενικής άντλησης συγκριτικά με την πραγματική (σημερινή) παροχή άντλησης.

Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 4.7*, κάτω από συνθήκες μηδενικής άντλησης κατά την θερινή περίοδο, το μέτωπο της υφαλμύρισης πλησιάζει πολύ το μέτωπο που δημιουργείται κάτω από τις πραγματικές συνθήκες για την χειμερινή περίοδο. Το γεγονός ότι η ζώνη υφαλμύρισης της πραγματικής άντλησης όπου λειτουργούν τρία πηγάδια (F34, G14/W1 και W9) με συνολική παροχή $1150 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$ (μπλε γραμμή) στην χειμερινή περίοδο, είναι πιο μικρή από την ζώνη που δημιουργείται κάτω από συνθήκες μηδενικής άντλησης για την ξηρή περίοδο (πράσινη γραμμή) δικαιολογείται λόγω της έλλειψης βροχοπτώσεων κατά τους θερινούς μήνες.

Ακόμα, πρέπει να σημειωθεί ότι στην *Εικόνα 4.8* παρουσιάζεται η φυσική υφαλμύριση που οφείλεται στην γεωλογία της περιοχής και την επικοινωνία που υπάρχει μεταξύ της θάλασσας και του υδροφορέα. Υπολογίστηκε, μέσω της προσομοίωσης, για μηδενική άντληση καθ' όλη την διάρκεια των τελευταίων 17 χρόνων. Συγκρίνοντας τις δυο Εικόνες, μπορούμε να συμπεραίνουμε ότι το επίπεδο της υφαλμύρισης κατά την χειμερινή περίοδο είναι πολύ κοντά στο επίπεδο της φυσικής υφαλμύρισης και συνεπώς, δεν υπάρχει ανάγκη βελτιστοποίησης για την υγρή περίοδο.



Εικόνα 4.7 – Σύγκριση Πραγματικής και Μηδενικής Άντλησης για Υγρή και Θερινή Περίοδο αντίστοιχα



Εικόνα 4.8 – Φυσική Υφαλμύριση

Ακόμα παρουσιάζονται και οι ζώνες περιορισμού της υφαλμύρισης καθώς και η εισχώρηση του φλύσχη στην περιοχή μελέτης (*Εικόνα 4.9*), με βάση τις οποίες θα πραγματοποιηθεί η βελτιστοποίηση στην παρούσα εργασία. Έχοντας κατά νου τον τρόπο λειτουργίας των Γ.Α., οι ζώνες αυτές ορίζουν αν στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα επιβληθεί ποινή ή όχι, ανάλογα με το αν οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στην επιμέρους ζώνη έχουν μεγαλύτερο ή μικρότερο υδραυλικό ύψος από το ελάχιστο επιτρεπτό. Κατά την δημιουργία των ζωνών αυτών, δόθηκε έμφαση στο να λειτουργήσουν ως μια ενδιάμεση λύση μεταξύ της, περιβαλλοντικής, καλύτερης λύσης (πλήρης περιορισμός υφαλμύρισης) και της σημερινής κατάστασης που επιβάλλει στα περισσότερα πηγάδια, 15 από τα 27 (μπλε χρώμα), να αντλούν υφάλμυρο νερό. Σημειώνεται ότι το κατώφλι κάτω από το οποίο θεωρείται ύπαρξη υφαλμύρισης, είναι αυτό των 20,2 m, όπως προέκυψε από τον διορθωμένο συντελεστή Ghyben-Herzberg.

Έτσι, για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε ότι η τροφοδοσία της λεκάνης για τα επόμενα 5 χρόνια προσομοίωσης θα είναι ίδια με την τροφοδοσία των τελευταίων 5 ετών (τελευταία 10 stresses), όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του υδροφορέα, σύμφωνα με τη Σιάκα Μαρκέλλα (Σιάκα, 2015). Το μοντέλο προσομοίωσης τρέχει, χωρίς να έχουν ορισθεί κάποιες συγκεκριμένες τιμές παροχής άντλησης καθώς αυτές είναι που θα μεταβάλλονται και θα αξιολογούνται κάθε φορά από τον γενετικό αλγόριθμο. Το Γραφικό Περιβάλλον του PTC έχει μετατρέψει πλέον όλα εκείνα τα στοιχεία που δοθήκαν ως δεδομένα, σε αρχεία δεδομένων (.dat, .txt, .bat αρχεία). Τα αρχεία αυτά, θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια από την MATLAB, μέσω της οποίας θα κληθεί το μοντέλο προσομοίωσης (πρόβλεψης) και θα εξάγει αρχεία αποτελεσμάτων (.1, .fin αρχεία). Με βάση τα εξαγόμενα αρχεία θα γίνεται κάθε φορά η αξιολόγηση της υποψήφιας λύσης. Με το πρώτο τρέξιμο του μοντέλου πρόβλεψης δημιουργήθηκαν τα εξής αρχεία:

- | | | |
|--------------|---------------------|--|
| • adsor.dat | | |
| • bcflow.dat | • ini_c.dat | • PTC_Mesh_yvel_s1.fin
(για όλες τις περιόδους (10)) |
| • bcleak.dat | • ini_h.dat | • PTC_Mesh_xvel_s1.fin (για όλες
τις περιόδους (10)) |
| • bctran.dat | • poros.dat | • PTC_Mesh_heads_s1.fin (για
όλες τις περιόδους (10)) |
| • condx.dat | • rain.dat | • PTC_Mesh_concs_s1.fin (για όλες
τις περιόδους (10)) |
| • condy.dat | • stor.dat | • heads_s1.1 (για όλες τις
περιόδους (10) και όλα τα
στρώματα(1) |
| • condz.dat | • ptc.mbf | |
| • dispx.dat | • ptc.mbm | |
| • dispy.dat | • ptc.out | |
| • dispz.dat | • PTC_Mesh.run | |
| • elev.dat | • PTC_Mesh_Mesh.inc | |
| | • run_ptc.bat | |

Το αρχείο run_ptc.bat είναι το εκτελέσιμο αρχείο. Προκειμένου να τρέχει αλληπάλληλα, έπρεπε να διαγραφεί από το αρχείο αυτό, η εντολή pause έτσι ώστε να γίνει εφικτή η αυτοματοποίηση της διαδικασίας χωρίς εμπλοκή του χρήστη.

4.4 Χρήσεις Γης

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι εκτάσεις των καλλιεργειών που υπάρχουν σε ολόκληρο το νησί. Είναι φανερό ότι οι Αροτραίες αποτελούν το κύριο είδος που καλλιεργείται στην περιοχή της Αμοργού, ενώ ακολουθούν καλλιέργειες Ελαιώνων και Αμπελώνων. Παρατηρείται επίσης, ότι μια μεγάλη συνολική έκταση λειτουργεί ως βοσκότοπος. Σύμφωνα με τις χρήσεις γης Corine 2000, όπως φαίνονται στην *Εικόνα 3.4*, παρατηρούμε ότι η περιοχή μελέτης συνορεύει με φυσικούς βοσκότοπους χωρίς όμως να υπάρχει κάποιος βοσκότοπος εντός της.

Διοικητική Διαίρεση	Σύνολο Καλλιεργούμενων Εκτάσεων	Αρδευόμενες Καλλιεργούμενες Εκτάσεις	Ποσοστό Αρδευόμενων Εκτάσεων	Βοσκότοποι (στρ.)	Αρδευόμενοι Βοσκότοποι (στρ.)
Δήμος Αμοργού	4.017,8	61,5	2%	35.579,8	3206,6

Πίνακας 3.1- Συνολικές Καλλιεργούμενες Εκτάσεις και Βοσκότοποι και αντίστοιχες Αρδευόμενες Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων

Διοικητική Διαίρεση	Ελαιώνες		Αμπελώνες		Αροτραίες		Κηπευτικά		Δενδρώδοι	
	Σύνολο (στρ.)	Αρδευόμενοι (στρ.)	Σύνολο (στρ.)	Αρδευόμενοι (στρ.)	Σύνολο (στρ.)	Αρδευόμενοι (στρ.)	Σύνολο (στρ.)	Αρδευόμενοι (στρ.)	Σύνολο (στρ.)	Αρδευόμενοι (στρ.)
Δήμος Αμοργού	1.040,7	16,3	125,1	32,0	2.837,5	41,0	11,3	1,0	3,2	0

Πίνακας 3.2-Είδος Καλλιεργειών και αντίστοιχες συνολικές και αρδευόμενες εκτάσεις Πηγή: Ειδική Γραμματεία Υδάτων

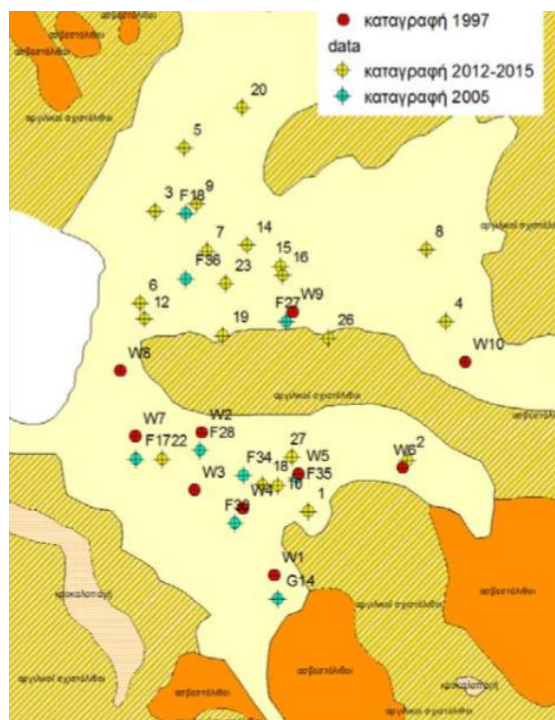


Εικόνα 3.4-Χρήσεις Γης Corine 2000 Πηγή: <http://www.oikoskopio.gr/map/>

- 1 Σκληροφυλλική Βλάστηση
- 2 Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
- 3 Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
- 4 Φυσικοί βοσκότοποι

4.5 Διαχείριση Υδάτινων Πόρων στην Περιοχή Μελέτης

Παρά το γεγονός ότι σε ορισμένα νησιά του Νότιου Αιγαίου, η κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό γίνεται από την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, με την χρήση μονάδων αφαλάτωσης, στην περίπτωση της Αμοργού, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει. Είναι γνωστό ότι τα νησιά, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου τα φαινόμενα ξηρασία είναι έντονα και οι βροχοπτώσεις μειωμένες, ώστε να εμπλουτιστούν φυσικά οι υδροφορείς, αντιμετωπίζουν ιδιαίτερο πρόβλημα αν αναλογιστεί κανείς και την αύξηση του πληθυσμού, και κατ' επέκταση την αύξηση της ζήτησης σε πόσιμο νερό, λόγω των καλοκαιρινών διακοπών. Η Σύρος αποτελεί ένα νησί που καλύπτει πλήρως τις ανάγκες του σε πόσιμο νερό από μονάδες αφαλάτωσης ενώ στην περίπτωση της Αμοργού, γίνεται μεταφορά νερού με πλοία από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ, αν και υπάρχει μια μονάδα αφαλάτωσης στην περιοχή της Αιγιάλης η οποία δεν είναι έτοιμη για χρήση. Πρόσφατα, προτάθηκε η κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης και στην περιοχή μελέτης, με δυναμικότητα 500 m³ /ημέρα (ΥΠΕΚΑ). Η ποσότητα του νερού που χρειάστηκε να μεταφερθεί στο νησί, το 2014, έφτασε τα 33.936 m³, ενώ η μέγιστη ποσότητα που έχει μεταφερθεί, παρατηρείται για το 2009 και ανέρχεται στα 53.838 m³. Το κόστος για κάθε m³ που μεταφέρεται ανέρχεται περίπου στα 11 ευρώ. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάστηκε το 2001, το φράγμα των Κατάπολων, έτσι ώστε να γίνει εφικτός ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδάτων με νερά απορροής. Η χωρητικότητα του φράγματος σχεδιάστηκε στα 110.000 m³ (Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015). Μια ακόμη τεχνική που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση νερών βροχής, είναι η κατασκευή λιμνοδεξαμενών. Τέτοιες δεξαμενές είναι στην φάση της κατασκευής στην περιοχή μελέτης, στα Κατάπολα, και θα έχουν χωρητικότητα 2.000 m³.



Εικόνα 3.5 – Γεωαναφερόμενος Γεωλογικός Χάρτης Περιοχής Μελέτης – Πηγάδια Άντλησης Πηγή: Σιάκα, 2015

Στην περιοχή των Κατάπολων, υπάρχουν συνολικά 35 πηγάδια, σύμφωνα με την Ειδική Γραμματεία Υδάτων. Στον Πίνακα Π.2 του Παραρτήματος, παρουσιάζονται οι ρυθμοί άντλησης των 27 πηγαδιών άντλησης όπως συγκεντρώθηκαν από υδρολογική μελέτη του 1997, μελέτη του ΙΓΜΕ το 2005 και απογραφή της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου το 2012-2015 (Σιάκκα,2015). Η γενικότερη εικόνα που προκύπτει μέσα από τα στοιχεία αυτά είναι ότι τα βασικά πηγάδια υδροδότησης είναι το G14 (υδροδότηση Κατάπολων) και ακολουθούν τα F34 και W3 (υδροδότηση Χώρας της Αμοργού). Το πηγάδι W3 λειτουργεί μόνο την ξηρή περίοδο ενώ τα πηγάδια G14 και F34 λειτουργούν τόσο τους καλοκαιρινούς μήνες όσο και την χειμερινή περίοδο. Και τα τρία πηγάδια είναι υπό την διοίκηση του Δήμου. Όλα τα υπόλοιπα πηγάδια αντλούν νερό για αρδευτική χρήση, με αρκετά μικρές ποσότητες (πλην του F36 και του W9, τα οποία αντλούν νερό με παροχές γύρω στα 100 και -900 m³ /ημέρα αντίστοιχα). Συνεπώς, κατά την διάρκεια του χειμώνα, όπου οι αρδευτικές ανάγκες είναι σχεδόν ανύπαρκτες, όλα τα πηγάδια άρδευσης, εκτός από το W9 (δημοτικό), δεν λειτουργούν (μηδενική παροχή άντλησης). Ωστόσο, υπάρχουν 8 μη καταγεγραμμένα πηγάδια και θεωρήθηκε ότι υπάρχουν 4 πηγάδια πλησίον του G14 και 4 πλησίον του W9. Τελικά, για την μοντελοποίηση της περιοχής, θεωρήθηκε ότι τα πηγάδια G14 και W9 αντλούν με παροχές 1000 m³/d και 900 m³/d αντίστοιχα ενώ στον Πίνακα 3.3 έχουν καταγραφεί οι αντλήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του υδροφορέα (Σιάκκα, 2015).

Ονομασία	Παροχή (m ³ /d)	Κόμβοι	Χρήση	Ιδιοκτησία	Ονομασία	Παροχή (m ³ /d)	Κόμβοι	Χρήση	Ιδιοκτησία
(Π4) 4	12.9	887	Άρδευση	Ιδιωτική	F28	0	265	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π5) 5	4	897	Άρδευση	Ιδιωτική	F30	19.5	90	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π7) 7	2.6	782	Άρδευση	Ιδιωτική	F34	150	474	Υδρευση	Δημοτική
(Π12) 12	0.4	541	Άρδευση	Ιδιωτική	F36	100	690	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π14) 14	1.3	833	Άρδευση	Ιδιωτική	W2	60	352	Άρδευση	Δημοτική
(Π16) 16	4	787	Άρδευση	Ιδιωτική	W3	100	112	Υδρευση	Δημοτική
(Π18) 18	2.3	318	Άρδευση	Ιδιωτική	W4	14	163	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π19) 19	6.5	621	Άρδευση	Ιδιωτική	W5	22	359	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π22) 22	0.3	216	Άρδευση	Ιδιωτική	W6	3	626	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π23) 23	4.5	731	Άρδευση	Ιδιωτική	W7	0.3	292	Άρδευση	Ιδιωτική
(Π26) 26	3.5	638	Άρδευση	Ιδιωτική	W8	0.6	420	Άρδευση	Δημοτική
F17	60	175	Άρδευση	Ιδιωτική	W9	900	740	Άρδευση	Δημοτική
F18	0.4	777	Άρδευση	Ιδιωτική	W10	0	918	Άρδευση	Δημοτική
					G14/W1	1000	129	Υδρευση	Δημοτική

Πίνακας 3.3 – Παροχές Άντλησης όπως διαμορφώθηκαν για την Μοντελοποίηση του Υδροφορέα

5. Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στη Διαχείριση Υπόγειων Υδάτων

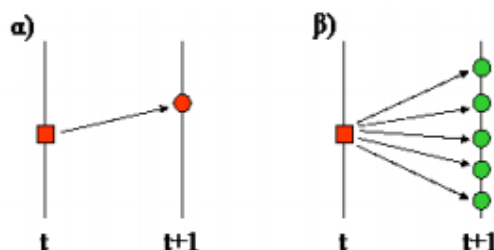
5.1 Κατηγοριοποίηση Μοντέλων

Η βελτιστοποίηση αποτελεί κομμάτι της επιστήμης των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Ωστόσο, λόγω της δυνατότητας των μεθόδων βελτιστοποίησης να επιλύουν περίπλοκα προβλήματα με πολλές παραμέτρους, τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει επικρατήσει σε πρακτικά προβλήματα μηχανικής, οικονομίας αλλά και άλλων τομέων. Ουσιαστικά, το πρόβλημα αναπαριστάται με τη μορφή μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης (αντικειμενική συνάρτηση) η οποία εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους (μεταβλητές απόφασης), οι οποίες με την σειρά τους είτε υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς είτε όχι.

	Προσδιοριστικά Μοντέλα	Στοχαστικά Μοντέλα
Μαθηματικά Μοντέλα	Διαφορικές Εξισώσεις (Αναλυτικές – Αριθμητικές Λύσεις)	Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις Προσομοίωση Monte Carlo
Μοντέλα Βελτιστοποίησης	Γραμμικός και Μη Γραμμικός Προγραμματισμός Ακέραιος Προγραμματισμός Δυναμικός Προγραμματισμός	Στοχαστικός Προγραμματισμός

Πίνακας 5.1 – Μεθοδολογίες Επίλυσης Μαθηματικών Μοντέλων και Μοντέλων Βελτιστοποίησης Πηγή: Καρατζάς, 2014

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1, τα μοντέλα μπορεί να είναι είτε Προσδιοριστικά, είτε Στοχαστικά. Η βασική τους διαφορά έγκειται στον τρόπο εύρεσης των λύσεων. Στην περίπτωση των Προσδιοριστικών Μοντέλων, υπάρχει μια αιτιοκρατική σχέση μεταξύ των τιμών των μεταβλητών απόφασης και της περιγραφής του συστήματος. Από την άλλη, στα Στοχαστικά Μοντέλα εισάγεται η έννοια της αβεβαιότητας ως προς τις τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν τα φαινόμενα. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχει ένα σύνολο τιμών για κάθε παράμετρο που προσδιορίζει το σύστημα (Εικόνα 5.1). Με την μέθοδο αυτή κάθε παράμετρος λαμβάνει πολλαπλές τυχαίες τιμές μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας.



Εικόνα 5.1 – Τιμές Παραμέτρων α) σε Προσδιοριστικά και β) σε Στοχαστικά μοντέλα Πηγή: Καρατζάς, 2014

5.2 Μοντέλα Βελτιστοποίησης

Τα μοντέλα βελτιστοποίησης, χαρακτηρίζονται και κατηγοριοποιούνται με βάση την μαθηματική μορφή τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης όσο και της συνάρτησης των περιορισμών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.2. Σημειώνεται ότι για να θεωρηθεί κάποιο πρόβλημα γραμμικό, όλες οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του θα πρέπει να είναι γραμμικές.

Μοντέλα Βελτιστοποίησης	
Αντικειμενική Συνάρτηση	Συνάρτηση Περιορισμών
➤ Γραμμική	➤ Χωρίς Περιορισμούς
➤ Μη Γραμμική	➤ Με Περιορισμούς Ορίων
➤ Μη Γραμμική Συνεχής	➤ Γραμμικοί Περιορισμοί
	➤ Μη Γραμμικοί Περιορισμοί

Πίνακας 5.2 – Κατηγοριοποίηση Μοντέλων Βελτιστοποίησης Πηγή: Καρατζάς, 2014

5.3 Βελτιστοποίηση Υπόγειων Υδάτων

Σχετικά με την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης στον τομέα της περιβαλλοντικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ αντλήσεων και υδατικών αποθεμάτων δεν μπορεί να περιγραφεί ως μια γραμμική συνάρτηση, κυρίως σε περιπτώσεις ελεύθερων υδροφορέων. Αυτό οφείλεται στην μη γραμμική απόκριση του υδατικού συστήματος στις αντλήσεις (Καρτεράκης, 2005). Η μη γραμμικότητα αυτή αντικατοπτρίζεται και στη μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το υδραυλικό ύψος για ακτινική ροή (Εξ. 5.1):

$$h = \sqrt{H^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}{\pi K} * Q} \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

Συνεπώς, η πλειοψηφία των προβλημάτων που αφορούν στην διαχείριση υπόγειων υδάτων βελτιστοποιείται σύμφωνα με τον Μη Γραμμικό προγραμματισμό.

5.3.1 Δομή Μη Γραμμικού Προβλήματος

Ένα Μη Γραμμικό πρόβλημα δε διαφέρει δομικά με ένα πρόβλημα Γραμμικού προγραμματισμού αλλά διαφέρει ως προς την μορφή των μαθηματικών εξισώσεων είτε της αντικειμενικής συνάρτησης είτε των περιορισμών της είτε και των δύο. Στον Μη Γραμμικό προγραμματισμό, η περιοχή στην οποία βρίσκονται οι λύσεις του προβλήματος (εφικτή περιοχή), δεν μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο από ευθύγραμμα τμήματα λόγω της μη γραμμικότητας τουλάχιστον μίας μαθηματικής έκφρασης. Έτσι η τυπική δομή των προβλημάτων είναι η εξής:

$$\min \text{ ή } \max f(q_1, q_2, \dots, q_i, X_1, X_2, \dots, X_i, h_1, h_2, \dots, h_i)$$

$$\text{υπό τους περιορισμούς: } g_k(q_1, q_2, \dots, q_i, X_1, X_2, \dots, X_i, h_1, h_2, \dots, h_i) \leq \text{ ή } = \text{ ή } \geq 0$$

$f \rightarrow$ αντικειμενική συνάρτηση

$q_i \rightarrow$ παροχές άντλησης (για i μεταβλητές απόφασης)

$X_i \rightarrow$ συγκεντρώσεις ενδιαφέροντος (για i μεταβλητές απόφασης)

$h_i \rightarrow$ υδραυλικά ύψη (για i μεταβλητές απόφασης)

$g_k \rightarrow$ συναρτήσεις περιορισμών (για αριθμό περιορισμών k)

5.3.2 Μέθοδοι Επίλυσης Μη Γραμμικών Προβλημάτων

Για την επίλυση των Μη Γραμμικών προβλημάτων δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη μέθοδος που να αποδίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλο το εύρος των προβλημάτων, όπως αντίθετα συμβαίνει στα Γραμμικά προβλήματα (μέθοδος Simplex). Έτσι, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση κάποιου προβλήματος εξαρτάται πλήρως από την φύση του προβλήματος που μελετάται. Για τον λόγο αυτό δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην κυρτότητα και την συνέχεια των συναρτήσεων. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής (Καρτεράκης, 2005):

➤ *Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης*

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και μέθοδος Χωριζόμενων Μεταβλητών. Αφορά προβλήματα Μη Γραμμικού Προγραμματισμού αλλά στηρίζει την λειτουργία της στην μετατροπή των προβλημάτων αυτών σε μικρότερα Γραμμικά Προβλήματα (γραμμικοποίηση). Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις διαχείρισης υπόγειων υδάτων, η εφαρμογή της μεθόδου αυτής προϋποθέτει ότι όλοι οι περιορισμοί περιγράφονται από γραμμικές εξισώσεις ενώ το ύψος του υδροφορέα περιγράφεται με εξισώσεις ελεύθερου υδροφορέα, δηλαδή με μη γραμμικές εξισώσεις (Καρτεράκης, 2005).

➤ *Μέθοδοι που βασίζονται στην κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης*

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η κυρτότητα μιας συνάρτησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του αντίστοιχου προβλήματος. Για περιπτώσεις όπου μία συνάρτηση είναι κυρτή, ο υπολογισμός της παραγώγου της συνάρτησης αυτής αποδίδει πληροφορίες σχετικά με την θέση του ολικού ακρότατου. Το τοπικό ακρότατο αποτελεί και ολικό ακρότατο λόγω της κυρτότητας, ενώ αρνητικές τιμές τις παραγώγου υποδεικνύουν ότι το ακρότατο βρίσκεται δεξιά του σημείου που επιλέχθηκε. Αντίθετα οι θετικές τιμές υποδεικνύουν ότι το ακρότατο βρίσκεται αριστερά του σημείου.

➤ *Μέθοδοι που δεν βασίζονται στην κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης*

Με τις μεθόδους αυτές επιλύονται μη γραμμικά προβλήματα των οποίων η συνάρτηση είναι μη κυρτή. Με άλλα λόγια, οι συναρτήσεις αυτές δεν παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά ως προς την κυρτότητά τους με αποτέλεσμα να αδυνατούν οι παραπάνω μέθοδοι να αποδώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι το ότι δεν απαιτούν συνεχείς συναρτήσεις. Αν και δεν υπάρχει σαφής ένδειξη ότι καταλήγουν σε ολικά ακρότατα, θεωρείται ότι αποφεύγουν αποτελεσματικά τα τοπικά ακρότατα. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς και μεγάλος χρόνος επεξεργασίας. Η πιο άμεση μέθοδος είναι αυτή της Αναρρίχησης Λόφων (Hill Climbing), που μπορεί να μην καταλήξει σε απόλυτα βέλτιστες τιμές αλλά δίνει ικανοποιητικές λύσεις σε περιπτώσεις με περιορισμένο χρόνο. Άλλες τέτοιες μέθοδοι είναι η Προσομοιωμένη Ανασκόπηση (Simulated Annealing), η Αναζήτηση με

Απαγορευμένες Καταστάσεις (Tabu Search) και οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, με τις Εξελικτικές Στρατηγικές, τον Εξελικτικό Προγραμματισμό και τους Γενετικούς Αλγόριθμους όπως θα αναλυθούν διεξοδικά στην επόμενη παράγραφο.

5.4 Γενετικοί Αλγόριθμοι

5.4.1 Εισαγωγή στους Γ.Α.

Η συνεχής διεύρυνση της υπολογιστικής ισχύος σε συνδυασμό με την αδυναμία των κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης να επιλύσουν τα πολύπλοκα φυσικά προβλήματα των τελευταίων ετών, οδήγησε στην δημιουργία μιας καινοτόμας μορφής βελτιστοποίησης, αυτής των εξελικτικών αλγορίθμων. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (Ε.Α.) περιλαμβάνουν τρεις κατηγορίες: τους Γενετικούς Αλγόριθμους (Γ.Α.), τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Ε.Π.) και τις Εξελικτικές Στρατηγικές (Ε.Σ.). Και οι τρεις αυτές μορφές των εξελικτικών αλγορίθμων, βασίζονται στο μοντέλο της φυσικής επιλογής του Δαρβίνου, που δημοσιεύτηκε στο έργο του «The Origin of Species» το 1859. Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων έγινε σαν μια προσπάθεια από βιολόγους να χρησιμοποιήσουν υπολογιστικά μέσα στην προσομοίωση διάφορων βιολογικών συστημάτων, για να καταλήξει ο πρωτοπόρος του είδους, John Henry Holland, το 1975, στην τελική μορφή των γενετικών αλγορίθμων που έχει επικρατήσει.

Έντονη έρευνα στον τομέα των Ε.Α., σχετίζεται με την ικανότητά τους να ισορροπούν την αποδοτικότητά τους με την δυνατότητα εφαρμογής τους σε ευρύ φάσμα εφαρμογών, χωρίς την απαίτηση πολύπλοκων και δαπανηρών προσαρμογών. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται ευρωστία (robustness) και αλγόριθμοι με καλή ευρωστία συνεπάγονται μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν αποδοτικά.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που αποδεικνύουν την ευρωστία των Γ.Α. είναι αυτά που τους διαφοροποιούν από τις κλασσικές μεθόδους βελτιστοποίησης (Μέθοδοι βασισμένες στη μαθηματική ανάλυση, Απαριθμητικές ή Τυχαίες μέθοδοι, Μέθοδοι επαναληπτικής αναζήτησης). Τα βασικά χαρακτηριστικά όπως αυτά διατυπώθηκαν από τον D.Goldberg είναι τα εξής (D. Goldberg, 1999):

1. Οι Γ.Α. λειτουργούν με κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές.
2. Οι Γ.Α. πραγματοποιούν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα.
3. Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία
4. Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν πιθανοκρατικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς

Ουσιαστικά, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι στοχαστικά μοντέλα που δίνουν λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα, μεγάλου όγκου, εκτελώντας μια αναζήτηση στο εύρος των πιθανών λύσεων, με τελικό σκοπό την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Παρά το γεγονός ότι κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σαν μια μέθοδος βελτιστοποίησης, οι εφαρμογές τους δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε αυτό.

5.4.2 Βιολογικό Υπόβαθρο

Με βάση την θεωρία του Δαρβίνου, η επιβίωση των ειδών σε βάθος χρόνου εξαρτάται από την ικανότητά τους να προσαρμόζονται στις μεταβολές του περιβάλλοντος και να προσδίδουν οι γονείς στις επόμενες γενιές χαρακτηριστικά που ευνοούν την ευκολότερη προσαρμογή τους. Το περιβάλλον, επιβάλλοντας αντιξοότητες ή ευκαιρίες, καθορίζει ποιοι οργανισμοί θα ζήσουν και κατ'επέκταση, θα αναπαραχθούν. Όσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του μέλους του πληθυσμού στο περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερος ο αριθμός των απογόνων που μπορεί να αφήσει και έτσι τα άτομα προσαρμόζονται και εξελίσσονται με βάση το περιβάλλον. Για τον παραπάνω λόγο, ο διαχωρισμός σε ανώτερους και κατώτερους οργανισμούς μέσα στο ίδιο είδος είναι αφελής και εσφαλμένος, καθώς το περιβάλλον αναμένεται να μεταβληθεί και τα αρχικά ικανότερα άτομα να μην μπορούν πλέον να επιβιώσουν.

Είναι γεγονός ότι για τους περισσότερους που ασχολούνται με την Επιστήμη των Υπολογιστών, οι έννοιες της θεωρίας της εξέλιξης είναι γενικές και συγκεχυμένες. Είναι σημαντικό να αποσαφηνιστεί το ότι δεν υπάρχει συσχέτιση της Γενετικής και της Βιολογίας με το κομμάτι των Γ.Α.. Η βασική ιδέα γύρω από τους Γενετικούς Αλγόριθμους είναι εμπνευσμένη από τον τρόπο που λειτουργεί η φύση, παρέχοντας την δυνατότητα παρέκκλισης από αυτή. Ουσιαστικά, οι Γ.Α. μιμούνται αφαιρετικά κάποιες διαδικασίες της φύσης χωρίς καμία έμφαση στις λεπτομέρειες και σε καμία περίπτωση δεν απαιτείται κανένα βιολογικό γνωστικό υπόβαθρο (Λυκοθανάσης, 2001)

Στους Γενετικούς Αλγόριθμους, όπως αναφέρεται και παραπάνω, η ορολογία που χρησιμοποιείται είναι δανεισμένη από τον χώρο της βιολογίας, χωρίς να υπάρχει σύνδεση γνώσεων μεταξύ των δύο τομέων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η βασική βιολογική ορολογία ώστε να είναι ευκολότερη η κατανόηση του συμβολισμού μεταξύ Βιολογίας και Γενετικών Αλγορίθμων:

- **Χρωμόσωμα (Chromosome):** Είναι πολύπλοκες οργανικές δομές στις οποίες βρίσκονται κωδικοποιημένα τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ατόμου.
- **Γονίδιο (Genes):** Μικρότερες δομές που απαρτίζουν τα χρωμοσώματα, υπεύθυνες για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των ατόμων. Σε κάθε χρωμόσωμα υπάρχουν δύο γονίδια που δύνανται να επηρεάσουν το εκάστοτε χαρακτηριστικό. Αλληλόμορφα γονίδια (alleles) ονομάζονται τα γονίδια που διεκδικούν την ίδια θέση σε ένα χρωμόσωμα και συνεπώς είναι υπεύθυνα για το ίδιο χαρακτηριστικό. Επικρατές ή Κυρίαρχο (dominant) είναι το ένα εκ των δύο γονιδίων που καθορίζει τελικά το χαρακτηριστικό, ενώ το άλλο ονομάζεται υπολειπόμενο (recessive).
- **Γονότυπος (Genotype):** το σύνολο της γενετικής πληροφορίας που βρίσκεται στα γονίδια.
- **Φαινότυπος (Phenotype):** Πρόκειται για το σύνολο των χαρακτηριστικών τα οποία είναι πλέον ορατά και έχουν προέλθει από την αποκωδικοποίηση του γονότυπου.
- **Γονιδίωμα (Genome):** Το σύνολο όλων των χρωμοσωμάτων ενός κυττάρου του οργανισμού.

- **Επιλογή (Selection):** Πρόκειται για την διαδικασία η οποία ενεργεί επί των ατόμων και επηρεάζει την σχέση μεταξύ του γονότυπου και του περιβάλλοντος και τελικά, επιδρά στο φαινότυπο.
- **Αναπαραγωγή (Reproduction):** Έχει ως στόχο την δημιουργία ενός νέου οργανισμού, ο οποίος αποτελείται από χρωμοσώματα και συνεπώς από γονίδια. Η συνεισφορά των γονέων σε γονίδια είναι μοιρασμένη, ώστε για κάθε χαρακτηριστικό του ατόμου να υπάρχουν δύο γονίδια, ένα από κάθε γονέα.
- **Μετάλλαξη (Mutation):** Πρόκειται για την διαδικασία μεταβολής της δομή των χρωμοσωμάτων, με τρόπο τυχαίο, λόγω λανθασμένης αντιγραφής των βιολογικών μορίων είτε λόγω επίδρασης εξωγενών παραγόντων (ακτινοβολία). Μπορεί να επιδράσει και θετικά και να ευνοήσει την προοδευτική εξέλιξη.
- **Διασταύρωση (Crossover):** Αφορά την διαδικασία κατά την οποία αναμιγνύεται το γενετικό υλικό των δύο γονέων για την αναπαραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της κυτταρικής διαίρεσης, κάθε γονέας παράγει τα εξειδικευμένα αναπαραγωγικά του κύτταρα, τους γαμέτες, τα οποία φέρουν το μισό αριθμό χρωμοσωμάτων από ότι τα υπόλοιπα κύτταρα του γονέα, καθώς υπάρχει ένα γονίδιο για κάθε χαρακτηριστικό (απλοειδή κύτταρα). Έτσι, οι γαμέτες των γονέων συνενώνονται και δημιουργείται ένα διπλοειδές κύτταρο. Σε περιπτώσεις απλοειδούς διασταύρωσης τα γονίδια ανταλλάσσονται μεταξύ των χρωμοσωμάτων των δύο γονέων.

5.4.3 Διαδικασία Εφαρμογής Γ.Α. (Αδαμίδης, 1999) (Λυκοθανάσης, 2001)

Αρχικά, οι Γ.Α. διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων για το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται και πάνω στον πληθυσμό αυτό γίνεται η αξιολόγηση της κάθε λύσης έτσι ώστε να δοθεί, στη συνέχεια, κατεύθυνση προς την βέλτιστη τιμή. Αυτό, προϋποθέτει την καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των κατευθύνσεων, είτε «καλών» είτε «κακών». Έπειτα, με βάση τους γενετικούς τελεστές, ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη, ώστε στις επόμενες γενιές να εξασφαλίζεται η αναπαραγωγή των ικανοποιητικών λύσεων αλλά και η απομάκρυνση των λύσεων που δεν ικανοποιούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες που καθορίζει ο σχεδιαστής. Οι συνθήκες αυτές υπεισέρχονται στο πρόβλημα με την μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, μιας μαθηματικής μορφής συνθήκη που αποδίδει το βαθμό ικανοποίησης.

Η διαδικασία εφαρμογής των γενετικών αλγόριθμων, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης, ξεκινάει με την κωδικοποίηση των πιθανών λύσεων ως μια συμβολοσειρά δυαδικών ψηφίων πεπερασμένου μήκους, ενώ νεότερες τεχνολογίες λειτουργούν και με άλλης μορφής κωδικοποιήσεις. Η **αρχικοποίηση** του πληθυσμού των πιθανών λύσεων γίνεται μέσω παραγωγής ενός πεπερασμένου αριθμού χρωμοσωμάτων, με τυχαίες τιμές για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες δημιουργούνται με γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια μιας γενιάς t , υπάρχει ένας πληθυσμός πιθανών λύσεων $P(t)$ που απαρτίζεται από άτομα/ μέλη (individuals) για τα οποία ισχύει ότι $P(t) = \{x_1t, \dots, x_{nt}\}$. Κάθε πιθανή λύση του πληθυσμού,

δηλαδή κάθε χρωμόσωμα, **κωδικοποιείται** κατάλληλα. Ουσιαστικά, πρόκειται για το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης.

Έχοντας ολοκληρώσει αυτό το κομμάτι, στο επόμενο βήμα πρέπει να οριστούν όλες εκείνες οι απλές λειτουργίες, βάσει των οποίων ο αρχικός πληθυσμός κατευθύνεται και αποδίδει βελτιωμένους απογόνους με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, η πρώτη διαδικασία είναι αυτή της αξιολόγησης ολόκληρου του πληθυσμού των πιθανών λύσεων, των κωδικοποιημένων χρωμοσωμάτων, μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Η **Αντικειμενική Συνάρτηση**, ως δείκτης της καταλληλότητας της εκάστοτε λύσης, ανάλογα με την τιμή της, επηρεάζει την κατανομή της πιθανότητας συνεισφοράς ενός ή περισσότερων απογόνων στην επόμενη γενιά ($t+1$). Ουσιαστικά, αποτελεί το ρυθμιστή της ζωής (εξέλιξης) και του θανάτου (απομάκρυνση).

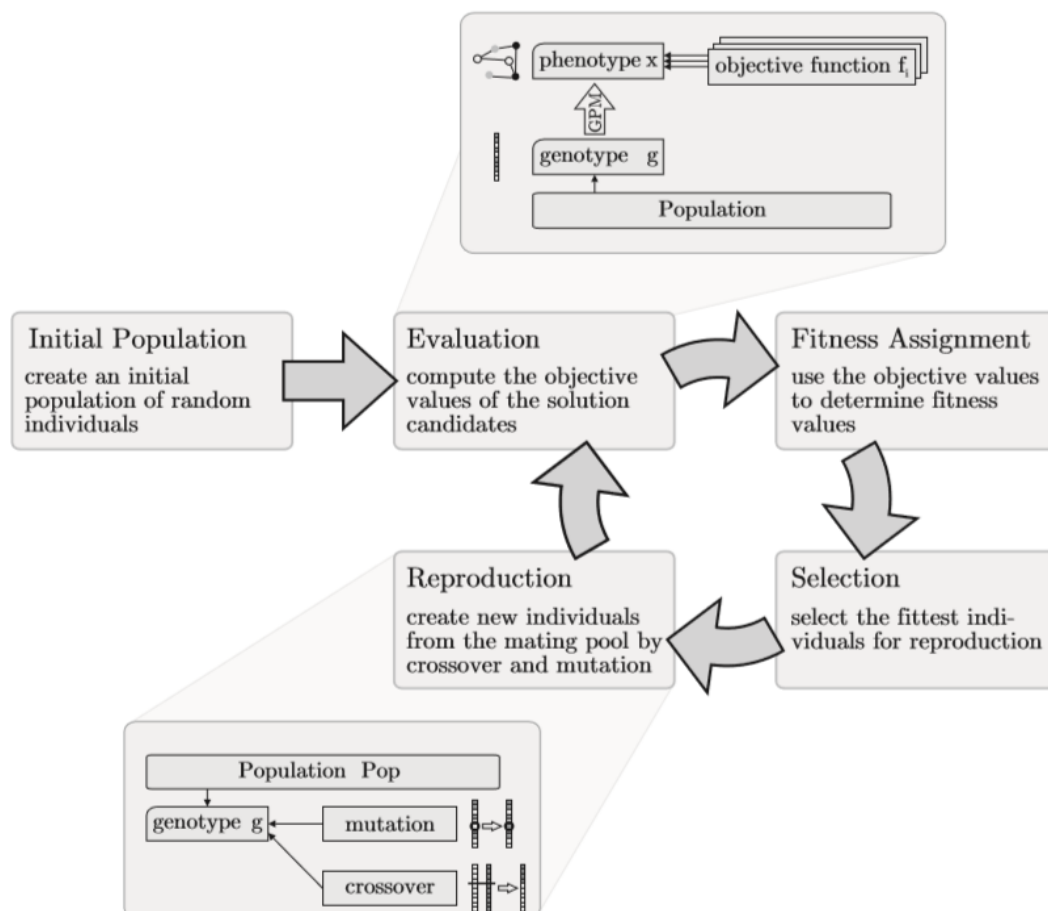
Αναλυτικότερα, η διαδικασία αυτή της **Επιλογής (Selection)** λειτουργεί ως εξής: αρχικά υπολογίζονται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το κάθε χρωμόσωμα ξεχωριστά αλλά και η συνολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των χρωμοσωμάτων. Έπειτα υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής του κάθε χρωμοσώματος για την επόμενη γενιά ως το κλάσμα της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για το συγκεκριμένο χρωμόσωμα προς την συνολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού. Ακόμη, υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα για την κατανομή των χρωμοσωμάτων στο διάστημα μεταξύ 0 και 1 (μέθοδος Τροχού Ρουλέτας). Είναι ξεκάθαρο ότι η διαδικασία της επιλογής είναι πιθανοκρατική με τις πιθανότητες να ευνοούν την αναπαραγωγή χρωμοσωμάτων με καλύτερη προσαρμογή. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την πραγματοποίηση της διαδικασίας της Επιλογής οι οποίες λειτουργούν ελαφρώς διαφοροποιημένα αλλά όλες συγκρίνουν την καταλληλότητα των χρωμοσωμάτων.

Ένα ακόμα στοιχείο που έχει ιδιαίτερη σημασία για την επιλογή, είναι ο *Ελιτισμός*. Πρόκειται για μία μέθοδο με συμπληρωματική, προς τις άλλες διαδικασίες της Επιλογής, δράση. Αυτό που διαφυλάσσεται μέσα από την λειτουργία αυτή, είναι το γεγονός ότι η επόμενη γενιά θα διαθέτει τουλάχιστον μία λύση ίσης καταλληλότητας με την προηγούμενη γενιά. Με άλλα λόγια, εξασφαλίζει το γεγονός ότι τουλάχιστον το ένα καλύτερο μέλος του πληθυσμού (ή και παραπάνω, ανάλογα με τις επιλογές του χρήστη) θα διατηρηθεί αναλλοίωτο στην επόμενη γενιά, με αποτέλεσμα να μην χαθούν οι καλές λύσεις μιας γενιάς. Χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις με υψηλούς τελεστές διασταύρωσης ή μετάλλαξης, σε περιπτώσεις, δηλαδή, που αυξάνεται η πιθανότητα να μην υπάρχει χρωμόσωμα της προηγούμενης γενιάς. Εγγυάται σύγκλιση αλλά υπάρχει κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα, γεγονός που αντιμετωπίζεται με την αποθήκευση του καλύτερου χρωμοσώματος κάθε γενιάς και την σύγκρισή τους με την βέλτιστη δομή στο τέλος της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

Στην συνέχεια, πριν όμως ολοκληρωθεί η δημιουργία της επόμενης γενιάς, κάθε χρωμόσωμα που έχει επιλεγεί, αντιγράφεται και οδηγείται στην *Δεξαμενή Διασταύρωσης* (mating pool) όπου τα διάφορα αντιγραμμένα χρωμοσώματα συνταιριάζονται τυχαία. Ο συνταιριασμός αυτός, μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων κάθε φορά (πατέρας - μητέρα), γίνεται μέσω της διαδικασίας της **Διασταύρωσης**. Στην διασταύρωση ουσιαστικά, πραγματοποιείται μια ανταλλαγή των κωδικοποιημένων πληροφοριών των χρωμοσωμάτων, δημιουργώντας έτσι δύο απογόνους με στοιχεία και από τους δύο γονείς. Το σημείο ή τα σημεία (Single – Two Point) του χρωμοσώματος

στο οποίο θα γίνει η ανταλλαγή της πληροφορίας επιλέγεται τυχαία ενώ υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την υλοποίηση της διαδικασίας. Ακόμα, πρέπει να οριστεί και η πιθανότητα των χρωμοσωμάτων να υποστούν διασταύρωση (P_c , crossover fraction).

Για την ολοκλήρωση της **Αναπαραγωγής**, αυτό που απομένει να ορισθεί είναι η πιθανότητα των χρωμοσωμάτων να υποστούν μετάλλαξη (P_m). Η **Μετάλλαξη** (mutation), τόσο στον τομέα των Γ.Α. αλλά και στη βιολογία, διαδραματίζει έναν δευτερεύοντα ρόλο. Ουσιαστικά, είναι ο τελεστής που αποτρέπει την διαφυγή κάποιου χρήσιμου γενετικού υλικού που μπορεί να συμβεί λόγω «υπερβάλλοντα ζήλου» των διαδικασιών της Επιλογής και της Διασταύρωσης για να καταλήξουν γρήγορα. Η Μετάλλαξη εφαρμόζεται τυχαία, ώστε να μετατραπεί κάποιο γονίδιο του χρωμοσώματος από 0 σε 1 ή αντίστροφα (δυναμική κωδικοποίηση). Γενικότερα, πρέπει να σημειωθεί ότι η πιθανότητα μετάλλαξης είναι ιδιαίτερα μικρή, της τάξης της μίας μετάλλαξης ανά χίλιες θέσεις, και είναι μικρότερη από την πιθανότητα διασταύρωσης. Η διαφορά μεταξύ του τελεστή της μετάλλαξης και της διασταύρωσης είναι το γεγονός ότι η πρώτη προσφέρει μια εξερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων ενώ η δεύτερη, μαζί βέβαια με την διαδικασία της επιλογής, ωθεί τον αλγόριθμο στην εύρεση της βέλτιστης λύσης. Και στην περίπτωση του τελεστή της μετάλλαξης, υπάρχουν διάφορες τεχνικές που δύναται να χρησιμοποιηθούν.



Εικόνα 4.1-Ο βασικός κύκλος των Γ.Α. Πηγή: <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf> (Global Optimization Algorithms – Theory and Application- Thomas Weise 2009)

5.4.4 Πλεονεκτήματα Γ.Α.

Η ευρεία χρήση των Γενετικών Αλγόριθμων τα τελευταία χρόνια οφείλεται κατά κύριο λόγο στα πλεονεκτήματά τους (Γεωργόπουλος και Λυκοθανάσης, 1999) που παρουσιάζονται παρακάτω:

Επίλυση δύσκολων προβλημάτων γρήγορα και αξιόπιστα. Είναι γεγονός ότι οι Γ.Α. έχουν μεγάλη αποδοτικότητα κάτι που φαίνεται, τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά, από το ότι μπορούν να αντιμετωπίσουν καλύτερα πολύπλοκα προβλήματα με πολλές και δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις. Για συναρτήσεις με μεγάλες διακυμάνσεις, στις οποίες οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν ανταποκρίνονται στην εύρεση των ακρότατών τους, οι Γ.Α. λειτουργούν χωρίς καμία δυσκολία.

Εύκολη συνεργασία με προϋπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Το πλεονέκτημα αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό, καθώς η χρήση των αλγορίθμων γίνεται προσθετικά σε άλλα μοντέλα χωρίς να πρέπει αυτά να επανασχεδιαστούν. Αυτό συμβαίνει για τον απλό λόγο ότι χρησιμοποιούνται πληροφορίες που αφορούν την συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί χωρίς να ενδιαφέρει πώς αυτή λειτουργεί μέσα στο σύστημα.

Εύκολη επέκταση και εξέλιξή τους. Οι Γ.Α., παρά το γεγονός ότι είναι εμπνευσμένοι από την φύση, δεν περιορίζονται στους νόμους της αλλά έχουν την ικανότητα να αλλάζουν και να επεκτείνονται με βάση την κρίση του σχεδιαστή. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι αλλαγές αυτές είναι αναγκαίες για χάρη της βελτίωσης της απόδοσης.

Δυνατότητα συμμετοχής σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Παρά το ευρύ φάσμα εφαρμογής των Γ.Α., δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο να έχουν μικρότερη αποδοτικότητα από άλλες μεθόδους που παρουσιάζουν κάποιου είδους εξειδίκευση. Για την εύρεση της βέλτιστης τιμής, οι Γ.Α., μπορούν να συνδυαστούν με κάποια άλλη μέθοδο και να λειτουργήσει ένα υβριδικό σύστημα βελτιστοποίησης. Συνεπώς, είναι φανερό η μεγάλη ευελιξία που διαθέτουν οι Γ.Α..

Μεγάλο εύρος εφαρμογών συγκριτικά με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι το ότι υπάρχει ελευθερία στον προσδιορισμό των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνητό περιβάλλον. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την Οικονομία μέχρι την εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων και την Μηχανική Σχεδίαση.

Δεν απαιτείται ο προσδιορισμός περιορισμών των επεξεργαζόμενων συναρτήσεων. Οι Γ.Α. λειτουργούν με βάση αποκλειστικά και μόνο την αντικειμενική συνάρτηση, στην οποία οι περιορισμοί υπεισέρχονται με μια διαφορετική μορφή, αυτή της ποινής (penalty). Έτσι, αποφεύγεται το πρόβλημα των παραδοσιακών μεθόδων που απαιτούν περιορισμούς για ύπαρξη παραγώγων και συνέχειας. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και το πλεονέκτημα αυτό ενισχύει το εύρος χρήσης των αλγορίθμων.

Δεν επηρεάζονται από την φυσική σημασία του προβλήματος που εξετάζεται. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μόνη επικοινωνία μεταξύ αλγορίθμου και περιβάλλοντος είναι αυτή που καθορίζει ο σχεδιαστής μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς καμία πληροφορία για τη φύση του προβλήματος που πρόκειται να λυθεί. Συνεπώς, η αδυναμία που μπορεί να παρουσιάσει ένας Γ.Α., δεν οφείλεται στο πληροφοριακό περιεχόμενο του προβλήματος αλλά στη φύση του χώρου που ερευνάται.

Υπάρχει το στοιχείο του παραλληλισμού. Σε κάθε βήμα, οι Γ.Α., επεξεργάζονται μεγάλο όγκο πληροφορίας καθώς κάθε άτομο (χρωμόσωμα) αντιπροσωπεύει, όπως έχει υπολογιστεί, 100 άτομα. Η αναλογία είναι, δηλαδή, της τάξης του $O(n^3)$. Γενικότερα, τα άτομα που επεξεργάζονται, θεωρούνται αντιπρόσωποι ολόκληρων κλάσεων και, συνεπώς, είναι εύκολα αντιληπτό ότι καλύπτονται μεγάλοι χώροι αναζήτησης αποδοτικά σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα. Το «πρόβλημα του χρόνου» στάθηκε εμπόδιο στην εξάπλωση της νέας τεχνολογίας καθώς θεωρήθηκε ότι είναι αδύνατο μια μέθοδος που βασίζεται στην εξέλιξη, μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα με αργούς ρυθμούς, να μπορεί να δώσει αποτελέσματα σε ικανοποιητικούς χρόνους. Ο μύθος αυτός καταρρίπτεται τόσο από το στοιχείο του παραλληλισμού όσο και από το γεγονός ότι η εξέλιξη, αυτή καθαυτή, δεν είναι αργή αλλά οι μεταβολές του περιβάλλοντος είναι αυτές που καθορίζουν αν τον ρυθμό της εξέλιξης. Γρήγορες μεταβολές του περιβάλλοντος συνεπάγονται και γρήγορη εξέλιξη.

Πραγματοποιείται ταυτόχρονη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο χαρακτηριστικών, σπάνια συναντάται σε κάποια άλλη μέθοδο και συνήθως τα χαρακτηριστικά αυτά λειτουργούν ανταγωνιστικά. Ωστόσο, το επιθυμητό είναι να λειτουργούν ταυτόχρονα και προς όφελος της όλης διαδικασίας, κάτι που λαμβάνει χώρα μόνο στην περίπτωση των Γ.Α., καθιστώντας τους ακόμα πιο ελκυστικούς και αποδοτικούς. Με την τυχαία αναζήτηση γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου αλλά όχι εκμετάλλευση της πληροφορίας. Από την άλλη με την μέθοδο της Αναρρίχησης Λόφων (Hill Climbing) γίνεται το ακριβώς αντίθετο, καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας αλλά όχι καλή εξερεύνηση του χώρου.

Δυνατότητα παράλληλης υλοποίησης. Μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών και υλοποιηθούν παράλληλα με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητάς τους, πράγμα που συναντάται σπάνια σε άλλες μεθόδους.

6. Εφαρμογή Βελτιστοποίησης με Γ.Α. στο Υπό Μελέτη Πρόβλημα

6.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι στο λογισμικό της MATLAB

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, υπάρχουν διάφορες τεχνικές σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει ένας γενετικός αλγόριθμος, δίνοντας διαφορετικά αποτελέσματα άλλοτε πιο ικανοποιητικά και άλλοτε όχι. Συγκεκριμένα στο πρόγραμμα της MATLAB, δίνεται η δυνατότητα επιλογής των εξής ρυθμίσεων (The MathWorks, 2014):

➤ Population Options (Ορισμός Πληθυσμού)

Επιλογές σχετικά με τον αρχικό πληθυσμό. Επηρεάζει την ποικιλομορφία (diversity) του γενετικού αλγόριθμου καθώς παρέχεται η δυνατότητα να ορισθεί το αρχικό εύρος τιμών του πληθυσμού (initial range). Το επιτρεπτό αυτό εύρος, εφαρμόζεται αποκλειστικά και μόνο στον αρχικό πληθυσμό χωρίς να περιορίζει την πορεία του γενετικού αλγορίθμου σε άλλα μονοπάτια. Σε γενικές γραμμές όμως, είναι προτιμητέο να περιλαμβάνεται η προσδοκώμενη λύση του προβλήματος μέσα στο εύρος αυτό. Προκειμένου ένας αλγόριθμος να βρει την λύση σε κάποιο πρόβλημα, αν υπάρχει ικανοποιητική ποικιλομορφία, μπορεί να οδηγηθεί σε αποτελέσματα που δεν περιλαμβάνονται στο εύρος που δόθηκε. Ο αριθμός του πληθυσμού (population size) ορίζει τον αριθμό των χρωμοσωμάτων - ατόμων που θα αξιολογηθούν στην διάρκεια κάθε γενιάς. Αν και προτείνεται η χρήση τουλάχιστον τόσων χρωμοσωμάτων όσος και ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης, ώστε να εξερευνάται όλος ο χώρος αναζήτησης, σε περιπτώσεις με πολλές μεταβλητές απόφασης αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος βελτιστοποίησης του προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση όμως, υψηλός αριθμός πληθυσμού παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Μια ακόμη παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί είναι και η διαδικασία με την οποία θα δημιουργηθεί ο αρχικός πληθυσμός. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζεται μια σύντομη αναφορά σε κάθε διαδικασία.

Τεχνικές Δημιουργίας Αρχικού Πληθυσμού (Creation Function)	
<i>Constraint Dependent</i>	-συμβατή με τους περιορισμούς και τα όρια (εάν υπάρχουν)
<i>Uniform</i>	-προεπιλογή για μη γραμμικούς ή/και ακέραιους περιορισμούς (εάν υπάρχουν) -εφαρμογή κανονικής κατανομής είτε στο αρχικό εύρος τιμών (initial range) είτε στα όρια (εάν υπάρχουν)
<i>Feasible Population</i>	-προεπιλογή για γραμμικούς ή/και μη ακέραιους περιορισμούς (εάν υπάρχουν) -δημιουργεί πληθυσμό διεσπαρμένο μεταξύ των ορίων (εάν υπάρχουν), -αγνοεί το αρχικό εύρος τιμών του πληθυσμού (initial range)
<i>Custom</i>	-δυνατότητα δημιουργίας συνάρτησης στο λογισμικό από τον χρήστη

Πίνακας 6.1-Σύντομη Περιγραφή Τεχνικών Δημιουργίας Αρχικού Πληθυσμού (Creation Function)

➤ **Fitness Scaling Options (Ορισμός Μεθόδου Αξιολόγησης Λύσεων)**

Επιλογές σχετικά με την μετατροπή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης σε μορφή που να μπορεί να αξιοποιηθεί από την διαδικασία της Επιλογής. Ουσιαστικά πρόκειται για την φάση μεταξύ της αξιολόγησης των πιθανών λύσεων που έπεται του υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης και προηγείται της διαδικασίας επιλογής των γονέων για την δημιουργία της επόμενης γενιάς (Selection Options). Αξίζει να σημειωθεί ότι και με τις επιλογές αυτές είναι δυνατόν να επηρεαστεί η απόδοση του πληθυσμού. Η μέθοδος της αξιολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να εξασφαλίζει την εξερεύνηση όλου του χώρου των πιθανών λύσεων. Κάτι τέτοιο απαιτεί σωστή επιλογή μεθόδου ώστε το εύρος των νέων τιμών της συγκριτικής αξιολόγησης όλων των ατόμων να μην είναι ούτε μεγάλο αλλά ούτε και μικρό. Σε περιπτώσεις με μεγάλα εύρη παρατηρείται γρήγορη εξάπλωση συγκεκριμένων γονέων με αποτέλεσμα να μην εξετάζεται επαρκώς ο χώρος των πιθανών λύσεων ενώ, αντίθετα, όταν το εύρος είναι μικρό όλα τα άτομα έχουν σχεδόν την ίδια πιθανότητα αναπαραγωγής και συνεπώς ο αλγόριθμός προχωρά με αργά βήματα.

Τεχνικές Αξιολόγησης Λύσεων (Fitness Scaling)	
<i>Rank</i>	-προεπιλογή -κατάταξη των ατόμων με βάση την καθαρή τιμή της καταλληλότητάς τους υπολογιζόμενη μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης (r) -πιθανότητα αναπαραγωγής για κάθε άτομο ίση με $1/\sqrt{r}$ (για το άτομο με την καλύτερη προσαρμογή ισχύει $r=1$)
<i>Proportional</i>	-απόδοση τιμής ανάλογη με την τιμή της καθαρής τιμής καταλληλότητας κάθε ατόμου
<i>Top</i>	-απόδοση ίδια τιμής σε έναν αριθμό καταλληλότερων ατόμων (quantity, προεπιλεγμένη τιμή 0,4) -απόδοση τιμής ίσης με το 0 στα υπόλοιπα άτομα, τα οποία δεν θα παράγουν απογόνους -μειώνει σημαντικά την ποικιλομορφία του πληθυσμού
<i>Shift Linear</i>	-η καθαρή τιμή καταλληλότητας προσαρμόζεται ώστε στο καταλληλότερο άτομο να δίνεται τιμή ίση με την μέση τιμή καταλληλότητας και ενός συντελεστή μέγιστου ρυθμού επιβίωσης (max survival rate)
<i>Custom</i>	-δυνατότητα δημιουργίας συνάρτησης στο λογισμικό από τον χρήστη

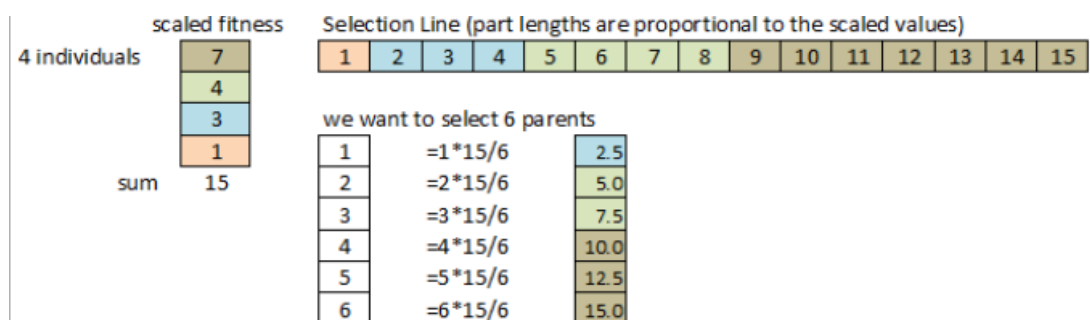
Πίνακας 6.2-Σύντομη Περιγραφή Τεχνικών Αξιολόγησης Λύσεων (Fitness Scaling)

➤ **Selection Options (Ορισμός Μεθόδου Επιλογής Γονέων)**

Επιλογές σχετικά με το πώς επιλέγεται ένα άτομο ως γονέας, βάσει της συγκριτικής αξιολόγησης όλων των ατόμων μίας γενιάς. Ένα άτομο είναι δυνατόν να επιλεγεί ως γονέας για περισσότερες από μία φορές, γεγονός που σημαίνει ότι θα αποδώσει κάποια από τα γονίδια του, σύμφωνα με την τεχνική του ανασυνδυασμού (Crossover Options) που θα ορισθεί από τον σχεδιαστή, για περισσότερα από ένα παιδιά.

Τεχνικές Επιλογής Γονέων (Selection)	
<i>Stochastic Uniform</i>	<ul style="list-style-type: none"> -προεπιλογή -δημιουργία γραμμής η οποία είναι χωρισμένη σε μικρότερα, ίσα μεταξύ τους, τμήματα -ο αριθμός των τμημάτων είναι ίσος με το άθροισμα των νέων τιμών της συγκριτικής αξιολόγησης καταλληλότητας (fitness scaling) όλων των ατόμων -κάθε τμήμα αντιπροσωπεύει κάποιο άτομο-γονέα -ο αριθμός των τμημάτων που αντιπροσωπεύουν έναν γονέα είναι ίσος με την νέα τιμή της συγκριτικής αξιολόγησης (fitness scaling) του εκάστοτε ατόμου -ανάλογα με τον αριθμό των γονέων, ο αλγόριθμος οδηγείται στα άτομα-γονείς (Εικόνα 6.1)
<i>Remainder</i>	<ul style="list-style-type: none"> -επιλογή γονέων βάσει της νέας τιμής της συγκριτικής αξιολόγησης (fitness scaling) του εκάστοτε ατόμου -πρώτο στάδιο (ντετερμινιστικά): το κάθε άτομο θα γίνει γονέας ανάλογα με το ακέραιο τμήμα της τιμής της συγκριτικής αξιολόγησής του -δεύτερο στάδιο (στοχαστικά): ανάλογα με το δεκαδικό τμήμα της τιμής της συγκριτικής αξιολόγησής του κάθε ατόμου, θα επιλεγούν άτομα-γονείς μέσω του προσομοιωμένου τροχού της ρουλέτας
<i>Uniform</i>	<ul style="list-style-type: none"> -επιλογή γονέων βάσει της νέας τιμής της συγκριτικής αξιολόγησης (fitness scaling) του εκάστοτε ατόμου και του αριθμού των γονέων που εισάγονται από τον χρήστη -χρήσιμο εργαλείο για δοκιμές και διορθώσεις -μη αποδοτική μέθοδος σε πρακτικά προβλήματα
<i>Roulette</i>	<ul style="list-style-type: none"> -προσομοίωση τροχού ρουλέτας -διαχωρισμός πίτας της ρουλέτας σε τμήματα ανάλογα με την νέα τιμή της συγκριτικής αξιολόγησης (fitness scaling) του εκάστοτε ατόμου -η πιθανότητα να επιλεγεί κάποιο άτομο ως γονέας είναι αντίστοιχη της επιφάνειας του τροχού
<i>Tournament</i>	<ul style="list-style-type: none"> -ορισμός των παικτών του τουρνουά από τον σχεδιαστή (προεπιλογή = 4 και ελάχιστος αριθμός = 2) -τυχαία επιλογή του ορισμένου αριθμού των παικτών από τον πληθυσμό της τρέχουσας γενιάς -επανάληψη της διαδικασίας για να συμμετέχουν όλα τα άτομα του πληθυσμού σε ένα τουρνουά -επιλογή του καλύτερου ατόμου ως γονέα από το κάθε σετ
<i>Custom</i>	-δυνατότητα δημιουργίας συνάρτησης στο λογισμικό από τον χρήστη

Πίνακας 6.3-Σύντομη Περιγραφή Τεχνικών Επιλογής Γονέων (Selection)



Εικόνα 6.1-Μέθοδος Stochastic Uniform για 6 γονείς Πηγή: http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/genetic_algorithms/GAs.pdf

➤ **Reproduction Options (Ορισμός Στοιχείων Αναπαραγωγής)**

Επιλογές σχετικές με το πώς ο γενετικός αλγόριθμος δημιουργεί την επόμενη γενιά, όπου ορίζεται ένας αριθμός ατόμων που θα αντιγραφούν στην επόμενη γενιά χωρίς καμία μεταβολή των γονιδίων τους λόγω της υψηλής προσαρμογής τους συγκριτικά με τα υπόλοιπα άτομα (Ελιτισμός). Ακόμα ορίζεται ποιο ποσοστό (Crossover fraction), επί του συνόλου των ατόμων που απομένουν μετά τον ελιτισμό, θα υποστεί ανασυνδυασμό και τελικά θα οδηγηθεί στην αναπαραγωγή. Όταν το ποσοστό αυτό ισούται με το 0, συνεπάγεται ότι όλοι οι απόγονοι υφίστανται μετάλλαξη ενώ αν είναι ίσο με το 1, τότε όλοι οι απόγονοι προέρχονται από την διαδικασία του ανασυνδυασμού, έκτος βέβαια των απογόνων που πέρασαν στην επόμενη γενιά μέσω της διαδικασίας του Ελιτισμού.

➤ **Mutation Options (Ορισμός Μεθόδου Μετάλλαξης)**

Επιλογές σχετικά με την μέθοδο που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή τυχαίων αλλαγών σε ένα συγκεκριμένο άτομο της τρέχουσας γενιάς που πρόκειται να αναπαραχθεί. Η Μετάλλαξη επηρεάζει την ποικιλομορφία του πληθυσμού και συνεπώς επηρεάζει την πιθανότητα να δημιουργηθούν άτομα που ικανοποιούν όλο και περισσότερο την αντικειμενική συνάρτηση και τελικά, να βρεθεί η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Η σημασία της μετάλλαξης γίνεται κατανοητή αν αναλογισθεί κανείς την λειτουργία των γενετικών αλγόριθμων χωρίς την ύπαρξή της. Τα νέα άτομα θα αποτελούνταν από ένα υποσύνολο ανασυνδυασμένων γονιδίων του αρχικού πληθυσμού.

<i>Τεχνικές Μετάλλαξης (Mutation)</i>	
<i>Constraint Dependent</i>	-συμβατή με τους περιορισμούς και τα όρια (εάν υπάρχουν)
<i>Gaussian</i>	-προεπιλογή για προβλήματα χωρίς περιορισμούς (ακατάλληλο για προβλήματα με όρια ή/και περιορισμούς) -σε κάθε γονίδιο του χρωμοσώματος του γονέα αντιστοιχεί κάποια πιθανότητα μετάλλαξης, η οποία προκύπτει από Γκαουσιανή Κατανομή με μέσο το 0 -οι παράμετροι Scale και Shrink καθώς και το Initial range που ορίστηκε προηγουμένως, καθορίζουν την τυπική απόκλιση που θα έχει η κατανομή
<i>Uniform</i>	-ακατάλληλη για όρια και γραμμικούς περιορισμούς -πρώτο στάδιο: επιλογή ενός ή περισσότερων γονιδίων του ατόμου, ανάλογα με ένα ποσοστό (Rate), το οποίο ορίζεται από τον σχεδιαστή -δεύτερο στάδιο: αντικατάσταση των επιλεγόμενων γονιδίων με τυχαίους αριθμούς που βρίσκονται μέσα στο εύρος τιμών
<i>Adaptive Feasible</i>	-προεπιλογή για προβλήματα με περιορισμούς (γραμμικούς και μη) και όρια -δημιουργείται τυχαία μια πορεία ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί και τα όρια
<i>Custom</i>	-δυνατότητα δημιουργίας συνάρτησης στο λογισμικό από τον χρήστη

Πίνακας 6.4-Σύντομη Περιγραφή Τεχνικών Μετάλλαξης (Mutation)

➤ Crossover Options (Ορισμός Μεθόδου Ανασυνδιασμού)

Επιλογές σχετικά με το πώς ανασυνδυάζονται τα γονίδια των δύο γονέων για την δημιουργία του τελικού απογόνου. Με τον τρόπο αυτό, ο αλγόριθμος μπορεί να ανασυνδυάσει τα ικανότερα γονίδια από δύο άτομα και να δημιουργήσει ένα ακόμα πιο ικανό παιδί-απόγονο.

Τεχνικές Ανασυνδιασμού (Crossover)	
<i>Scattered</i>	-προεπιλογή για προβλήματα χωρίς γραμμικούς περιορισμούς -δημιουργεί τυχαίο δυαδικό διάνυσμα όπου το ψηφίο 1 σηματοδοτεί τον πρώτο γονέα ενώ το ψηφίο 0 τον δεύτερο
<i>Single Point</i>	-εφαρμογή σε προβλήματα χωρίς γραμμικούς περιορισμούς -επιλέγεται τυχαία ένας ακέραιος αριθμός (n) μεταξύ του 1 και του συνολικού αριθμού των μεταβλητών -για τα γονίδια του απογόνου, τα οποία βρίσκονται σε θέσεις μικρότερες ή ίσες με τον τυχαίο αριθμό n, αποτελούνται από τον πρώτο γονέα, -τα υπόλοιπα από τον δεύτερο -ένα σημείο ανταλλαγής πληροφορίας -Εικόνα 6.2
<i>Two Point</i>	-εφαρμογή σε προβλήματα χωρίς γραμμικούς περιορισμούς -επιλέγονται τυχαία δύο ακέραιοι αριθμοί (m και n) μεταξύ του 1 και του συνολικού αριθμού των μεταβλητών -για τα γονίδια του απογόνου, τα οποία βρίσκονται σε θέσεις μικρότερες ή ίσες με τον τυχαίο αριθμό m, αποτελούνται από τον πρώτο γονέα -για τα γονίδια του απογόνου, τα οποία βρίσκονται σε θέσεις μεταξύ του m+1 και n, αποτελούνται από τον δεύτερο γονέα -τα υπόλοιπα γονίδια αποτελούνται από τον πρώτο γονέα -δύο σημεία ανταλλαγής πληροφορίας -Εικόνα 6.2
<i>Intermediate</i>	-προεπιλογή για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς και όρια -δημιουργία απογόνων ως το σταθμισμένο μέσο των γονέων -η στάθμιση ορίζεται από τον χρήστη (Ratio) $\text{child} = \text{parent2} + R * (\text{parent1} - \text{parent2})$
<i>Heuristic</i>	-ο απόγονος βρίσκεται σε μια μικρή απόσταση από τον καταλληλότερο γονέα και έχει κατεύθυνση αντίθετη αυτής του σχετικά ακατάλληλου γονέα -η απόσταση μεταξύ απογόνου και καταλληλότερου γονέα ορίζεται από τον χρήστη (Ratio) $\text{child} = \text{parent2} + R * (\text{parent1} - \text{parent2})$
<i>Arithmetic</i>	-κατάλληλη για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς και όρια -δημιουργία απογόνων ως τον σταθμισμένο αριθμητικό μέσο των δύο γονέων
<i>Custom</i>	-δυνατότητα δημιουργίας συνάρτησης στο λογισμικό από τον χρήστη

Πίνακας 6.5-Σύντομη Περιγραφή Τεχνικών Ανασυνδιασμού (Crossover)



Fig. 3.5.a: Single-point Crossover (SPX).



Fig. 3.5.b: Two-point Crossover (TPX).

➤ **Migration Options (Ορισμός Στοιχείων Μετανάστευσης)**

Επιλογές σχετικά με το πώς τα άτομα κινούνται ανάμεσα στους υποπληθυσμούς. Ουσιαστικά, πρόκειται για την διαδικασία κατά την οποία τα καταλληλότερα άτομα ενός υποπληθυσμού αντιγράφονται και αντικαθιστούν τα χειρότερα άτομα ενός άλλου υποπληθυσμού. Η κατεύθυνση (Direction) που επιλέγεται μπορεί είτε να οδηγεί την μετανάστευση προς τον επόμενο υποπληθυσμό ($n+1$) είτε να γίνεται προς δύο κατευθύνσεις, δηλαδή τον επόμενο αλλά και τον προηγούμενο υποπληθυσμό ($n-1$ και $n+1$). Ακόμα, ορίζεται ένα διάστημα (Interval) το οποίο ελέγχει κάθε πόσες γενιές θα πραγματοποιείται η μετανάστευση. Τέλος, ορίζεται το ποσοστό (Fraction) των ατόμων που μεταναστεύουν στους υποπληθυσμούς.

➤ **Hybrid Function Options (Υβριδικές Εφαρμογές Γ.Α.)**

Στην περίπτωση αυτή, δίνεται η δυνατότητα στο σχεδιαστή να εφαρμόσει συνδυαστικά με τον Γενετικό Αλγόριθμο και άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Μετά την ολοκλήρωση του Γ.Α., εφαρμόζεται μία ακόμα μέθοδος ώστε να βελτιωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όσο το δυνατό περισσότερο. Άλλωστε η δυνατότητα αυτή, αποτελεί ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Γ.Α.

➤ **Stopping Criteria Options (Ορισμός Κριτηρίων Τερματισμού Αλγορίθμου)**

Επιλογές που αφορούν τις συνθήκες κάτω από τις οποίες επιτρέπεται στον αλγόριθμο να τερματίσει την λειτουργία του. Έτσι ο σχεδιαστής καλείται να ορίσει τον αριθμό των γενεών που πρέπει να περάσουν (Generations), το μέγιστο επιτρεπτό χρονικό διάστημα λειτουργίας του αλγορίθμου (time limit), την επιθυμητή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μετά την εύρεση της οποίας ο αλγόριθμος να σταματά (Fitness limit) καθώς και τον χρόνο (stall time) αλλά και τις γενιές που εξετάζεται το πρόβλημα χωρίς να υπάρχει καμία βελτίωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (stall generations).

➤ **Plot Function Options (Ορισμός Στοιχείων Διαγραμμάτων)**

Επιλογές που αφορούν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε ένα συγκεκριμένο αριθμό γενεών που ορίζεται από τον σχεδιαστή (συνήθως επιλέγεται ίσο με 1, δηλαδή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε γενιά). Δίνεται η δυνατότητα να σχεδιαστούν τα διαγράμματα κατά την διάρκεια πραγματοποίησης του Γ.Α. για την καλύτερη τιμή προσαρμογής της αντικειμενικής συνάρτησης, συναρτήσει του αριθμού της γενιάς (best fitness), το καταλληλότερο άτομο σε κάθε γενιά (best individual), τον αναμενόμενο αριθμό απογόνων με την καθαρή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε γενιά (expectation) καθώς και αρκετά ακόμα διαγράμματα όπως score diversity, stopping, genealogy, scores, distance, range και selection.

Με βάση τα παραπάνω, είναι κατανοητό, το πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος της ποικιλομορφίας στην απόδοση του Γ.Α. Ένας καλός τρόπος ελέγχου της ποικιλομορφίας από τον χρήστη, είναι μέσω του διαγράμματος 'distance' όπου παρουσιάζονται οι μέσες αποστάσεις μεταξύ των μελών του πληθυσμού για κάθε γενιά. Για τον λόγο αυτό, συγκεντρώνονται όλοι εκείνοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποικιλομορφία ενός πληθυσμού. Αυτοί είναι:

- Αρχικό εύρος πληθυσμού (Initial Range)
- Μέθοδος Αξιολόγησης Λύσεων: με την μέθοδο Top Scaling να μειώνει σημαντικά την ποικιλομορφία λόγω της λογικής της μεθόδου να αναπαράγει τα καλύτερα άτομα.
- Ποσοστό Ανασυνδιασμού (Crossover Fraction)
- Ποσοστό Μετάλλαξης (Mutation Fraction)

Η απόδοση των Γενετικών Αλγόριθμων, παρά την απλοϊκότητα της βασικής ιδέας, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους κάτω από τις οποίες λειτουργούν οι τελεστές τους. Όπως αναφέρθηκε και σε παραπάνω κεφάλαιο, οι έννοιες της ποικιλομορφίας (diversity) και της πίεσης για την καλύτερη επιλογή (selective pressure) αντικρούονται και πρέπει να ισορροπηθούν ανάλογα με το πρόβλημα που κάθε φορά εξετάζεται ώστε να προκύπτει ολικό βέλτιστο σε εύλογο χρονικό διάστημα (Mohan, Chaudhary και Mehrotra, 2014). Ωστόσο, η εύρεση της βέλτιστης σχέσης μεταξύ των δύο αυτών χαρακτηριστικών είναι μια εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, καθώς κάποιες δοκιμές απορρίπτονται γρήγορα λόγω περιορισμένης ποικιλομορφίας και γρήγορης εξάπλωσης μιας λύσης, ενώ άλλες με αυξημένη ποικιλομορφία απαιτούν μεγάλα χρονικά διαστήματα προκειμένου να καταλήξουν

6.2 Διαδικασία Επίλυσης του Υπό Μελέτη Προβλήματος (MATLAB)

6.2.1 Στρατηγική Επίλυσης

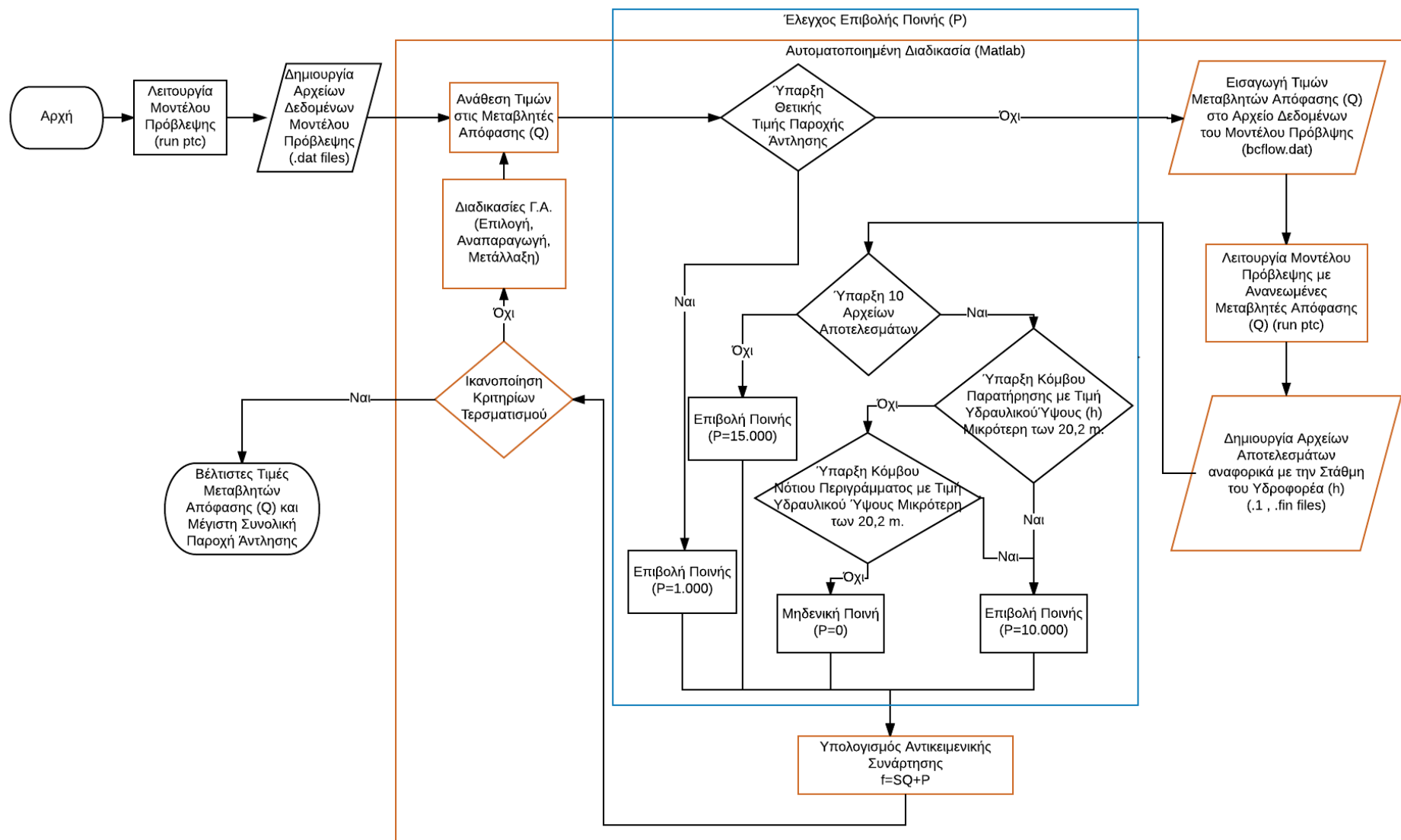
Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία που έπρεπε να ακολουθηθεί, απαιτούσε την συνεργασία του μοντέλου προσομοίωσης με την εργαλειοθήκη της MATLAB για τους γενετικούς αλγόριθμους. Ουσιαστικά, ο ρόλος του μοντέλου προσομοίωσης (μοντέλο πρόβλεψης) ήταν να αξιολογεί εάν η υφαλμύριση έχει περιοριστεί στα επιθυμητά επίπεδα ή όχι, ανάλογα με τις παροχές άντλησης που δημιουργεί ο γενετικός αλγόριθμος. Η μόνη επαφή του χρήστη με τις διαδικασίες που ακολουθεί η MATLAB για να λύσει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, πέρα των επιλογών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Έτσι, μέσα στην αντικειμενική συνάρτηση, κλήθηκε να τρέξει το μοντέλο προσομοίωσης και να αξιολογηθούν, στην συνέχεια, τα αποτελέσματά του. Στις παραδοσιακές μορφές βελτιστοποίησης, όπως έχει αναφερθεί, η αντικειμενική συνάρτηση υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς. Αντίθετα, στην περίπτωση των Γ.Α., οι περιορισμοί αυτοί, παίρνουν την μορφή ποινής, η οποία υποβάλλεται επί της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και δίνεται η τελική τιμή της αξιολόγησης της κάθε σειράς λύσεων.

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από δύο όρους, το άθροισμα των παροχών άντλησης (ΣQ) και την ποινή (P). Το άθροισμα των παροχών άντλησης έχει ορισθεί να είναι μη θετικός αριθμός ενώ η τιμή της ποινής μη αρνητικός αριθμός. Γνωρίζοντας ότι η MATLAB υπολογίζει το

ελάχιστο βέλτιστο, η αντικειμενική συνάρτηση είναι αυτή της *Εξίσωσης 6.1*. Έτσι, εξασφαλίζεται η απομάκρυνση του αλγορίθμου από τιμές άντλησης οι οποίες οδηγούν στην επιβολή ποινής.

$$\min f = P + \sum_{i=1}^{27} (Q_i) \quad \text{Εξ. 6.1}$$

Στην *Εικόνα 6.3* παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που δημιουργήθηκε ώστε να είναι δυνατή η επικοινωνία του μοντέλου προσομοίωσης και του γενετικού αλγόριθμου.



Εικόνα 6.3 – Διάγραμμα Ροής Στρατηγικής Επίλυσης Προβλήματος

Πρέπει να σημειωθεί η ιδιαίτερη σημασία της επιβολής ποινής. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, η ποινή επιβάλλεται στην συνολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ενός χρωμοσώματος εάν έστω και ένας κόμβος παρατήρησης παρουσιάζει υδραυλικό ύψος χαμηλότερο των 20,2 m. Αυτό, πραγματοποιείται μέσω του ελέγχου των υδραυλικών υψών των κόμβων παρατήρησης (ανάλογα με την ζώνη βελτιστοποίησης, κόκκινη-πράσινη-κίτρινη) όπως αυτά προέκυψαν από το μοντέλο πρόβλεψης. Ακόμα, για να αποφευχθεί η αντιστροφή της ροής, κρίθηκε αναγκαία η επιβολή ποινής και στην περίπτωση που το περίγραμμα του νότιου τμήματος της περιοχής μελέτης έχει υδραυλικό ύψος μικρότερο των 20,2m. Τέλος, λόγω αδυναμίας του μοντέλου προσομοίωσης να εξάγει αρχεία αποτελεσμάτων σε περιπτώσεις υψηλών τιμών άντλησης, κρίθηκε αναγκαία και η επιβολή μιας ακόμη υψηλότερης τιμής ποινής ώστε να μην επιλέγονται τέτοιες τιμές. Αν και η επιλογή των τιμών αυτών δεν είναι ιδιαίτερα πιθανή, καθώς θα χρησιμοποιηθεί αρχικός πληθυσμός, προστέθηκε για λόγους ασφάλειας. Η επιβολή της ποινής αυτής είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου δεν χρησιμοποιείται αρχικός πληθυσμός. Στο επόμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά ο κώδικας που δημιουργήθηκε.

6.2.2 Κώδικας Βελτιστοποίησης (MATLAB editor)

Για την αξιολόγηση της κάθε πιθανής λύσης, δημιουργήθηκε η παρακάτω συνάρτηση στο λογισμικό της MATLAB. Στην συνάρτηση αυτή, πραγματοποιείται, αρχικά, η αλλαγή των παροχών άντλησης στο αρχείο δεδομένων του μοντέλου πρόβλεψης, έπειτα εξάγονται τα αρχεία αποτελεσμάτων του μοντέλου και τελικά δίνεται η τιμή της αξιολόγησης της εκάστοτε λύσης. Οι διαδικασίες της αναπαραγωγής και της μετάλλαξης, πραγματοποιούνται στην συνέχεια από την έτοιμη εργαλειοθήκη της MATLAB, με τον χρήστη να έχει περιορισμένη δυνατότητα εμπλοκής. Τελικά, δημιουργούνται νέα σετ λύσεων τα οποία, με την σειρά τους, αξιολογούνται. Ο κώδικας είναι ο εξής:

```
function [f]=kitrino(Q)%αντίστοιχα για πράσινο και κόκκινο
P=0;%αρχικοποίηση τιμών
SQ=0;%αρχικοποίηση τιμών
SQ=sum(Q); %άθροισμα παροχών όπως προέκυψαν από τις διαδικασίες του
Γ.Α.
for i=1:27
    if Q(i)>0 %έλεγχος για θετικές τιμές άντλησης
        P=1000;%επιβολή ποινής
    end
end
if P==0;%αρνητικές τιμές άντλησης
    fileId=fopen('bcflow.dat'); %εισαγωγή αρχείου τιμών οριακών
    συνθηκών
    db=textscan(fileID,'%s %f %f');
    komvoibcf=db{1};
    paroxesbcf=db{3};
    typosbcf=db{2};
    fileId=fopen('komvoiantlisis(oloi).txt'); %εισαγωγή αρχείου
    κόμβων άντλησης
    Nodes=textscan(fileid,'%s');
    nodes=Nodes{1};
    g=65;%αρχή πρώτης θερινής περιόδου
    l=128;%τέλος πρώτης θερινής περιόδου
```

```
for i=1:5
    for e=g:1; %έλεγχος αλλαγής παροχών μόνο για τις ξηρές
        περιόδους
            for j=1:27;
                tf=strcmp(komvoibcf(e),nodes(j));%έλεγχος ταύτισης
                κόμβων άντλησεις στα αρχεία bcflow.dat και
                komvoiantlisis(oloi).txt
                if tf==1; %ύπαρξη ταύτισης
                    paroxesbcf(e)=Q(j); % αλλαγή παροχής
                end
            end
        end
    end
    g=g+128; %παράκαμψη των χειμερινών περιόδων
    l=l+128;
end
fclose('all');
fileID=fopen('bcflow.dat','w'); %άνοιγμα bcflow.dat με
δυνατότητα εγγραφής
g=64; %γραμμή ολοκλήρωση μιας περιόδου
for i=1:640;
    if i==g;
        fprintf(fileID,'%2s\r\n',komvoibcf{i}); %εγγραφή 0/,
        σύμβολο ptc για ολοκλήρωση μιας περιόδου
        g=g+64;
    else
        fprintf(fileID,'%5s %1d %20e \r\n', komvoibcf{i},
            typosbcf(i), paroxesbcf(i)); %εγγραφή όλων των υπολοίπων
            στοιχείων όπως διαμορφώθηκαν προηγουμένως
    end
end
fclose('all');
[status,cmdout]=system('run_ptc.bat'); %λειτουργία του ptc
ptcinfo = dir('*.1'); %έλεγχος φακέλου για ποσότητα αρχείων
αποτελεσμάτων
A=size(ptcinfo);
if A(1,1)==10 % σωστή λειτουργία ptc
    observe = importdata('observe(kitrino).txt'); %εισαγωγή
    κόμβων παρατήρησης (αντίστοιχα για πράσινη και κόκκινη ζώνη
    βελτιστοποίησης)
    fileID=fopen('heads_s10.1'); %εισαγωγή αποτελεσμάτων
    υδραυλικών υψών για την τελευταία θερινή περίοδο
    data=textscan(fileID,'%f %f');
    komvoi=data{1};
    ypsoi=data{2};
    notos=importdata('notos.txt'); εισαγωγή κόμβων νότιου
    περιγράμματος
    for i=2:1079;
        for j=1:27;
            if komvoi(i)== observe(j,1); %έλεγχος ταύτισης
                κόμβων στα αρχεία heads_s10.1 και
                observe(kitrino).txt
                    if ypsoi(i)<=20.2; %σύγκριση υδραυλικού ύψους
                        συγκεκριμένου κόμβου
                            P=10000; %επιβολή ποινής
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    for k=1:21
```

```

        if komvoi(i)==notos(k) %έλεγχος ταύτισης κόμβων στα
        αρχεία heads_s10.1 και notos.txt
            if ypsoi(i)<=20.2; %σύγκριση υδραυλικού ύψους
                συγκεκριμένου κόμβου
                    P=10000; %επιβολή ποινής
            end
        end
    end
    end
    end
    fclose('all');
    delete('heads_s10.1'); %διασφάλιση ότι το ptc λειτουργεί
    σωστά σε κάθε επανάληψη
else
    P=15000; %μη σωστή λειτουργία ptc
end
f=SQ+P; %υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης
end

```

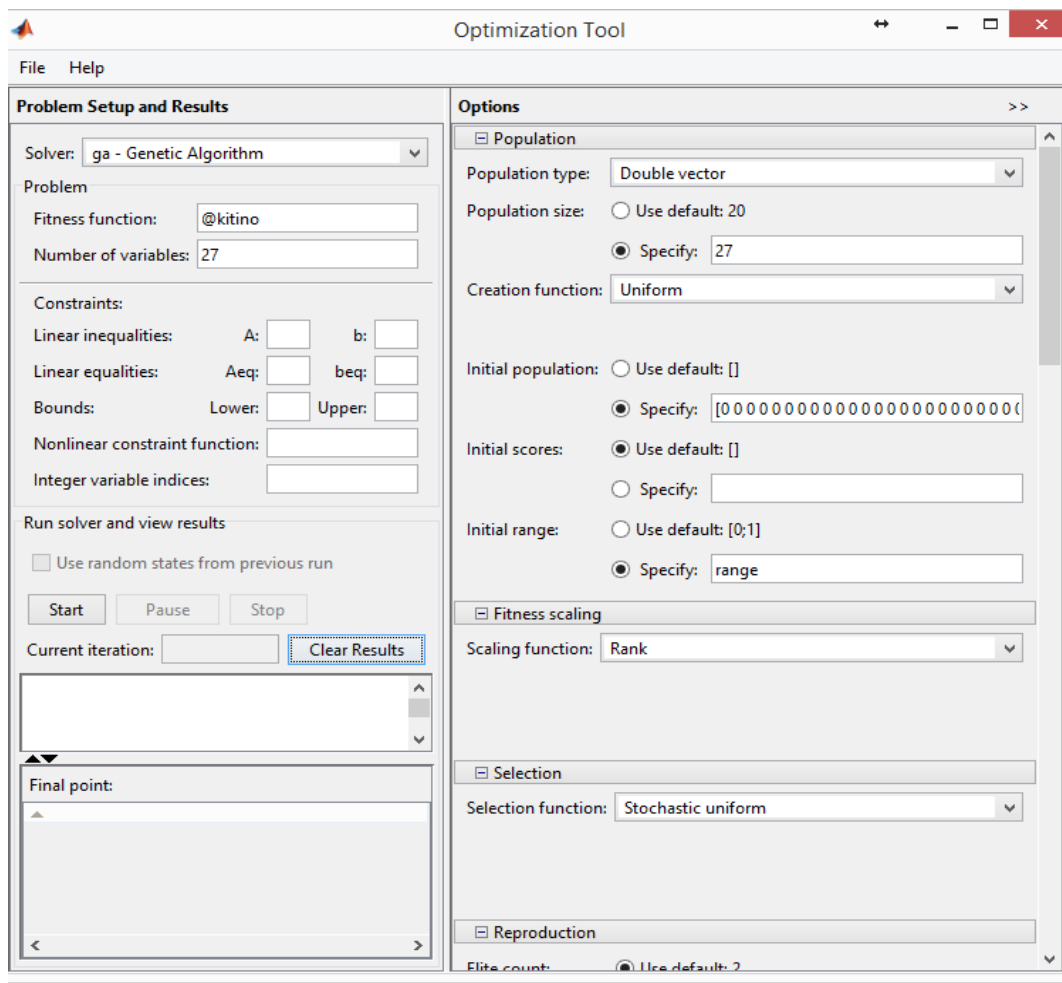
6.2.3 Επιλεγόμενοι Παράμετροι Γενετικών Αλγορίθμων (MATLAB ga toolbox)

Αρχικά, έχοντας δημιουργήσει την αντικειμενική συνάρτηση, ορίσαμε τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης στο 27, όσα και τα πηγάδια άντλησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να μην υπάρξει διαφοροποίηση της χρήσης των πηγαδιών, κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε ότι κάθε πηγάδι θα μπορούσε να αντλεί οριακά έως και 10% περισσότερο από τον σημερινό ρυθμό (κατώτατο όριο) με μόνες εξαιρέσεις τα πηγάδια W9 και G14/W1, ενώ τα πηγάδια με μηδενική άντληση (F28 και W10) παρέμειναν κλειστά . Ως ανώτερο όριο άντλησης για κάθε πηγάδι ορίστηκε το 0. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα Π.2. Όσον αφορά στις επιλογές του πληθυσμού, ορίστηκε το πλήθος κάθε γενιάς να αποτελείται από 27 άτομα, ενώ η διαδικασία δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού να βασίζεται στα όρια που έχουν δοθεί (εύρος τιμών). Ακόμα, κρίθηκε αναγκαία η χρήση ενός ατόμου (initial population) με μηδενικές τιμές άντλησης ώστε να μην παγιδευτεί ο αλγόριθμος σε περιοχές όπου επιβάλλεται ποινή.

Οι υπόλοιπες παράμετροι, έπειτα από πολλές δοκιμές και σφάλματα, επιλέχθηκαν ως εξής:

Επιλογή	Τεχνική	
Fitness Scaling	Rank	
Selection	Stochastic Uniform	
Reproduction	Elite	Crossover Fraction
	2	0.8
Mutation	Uniform	
	0.1	
Crossover	Scattered	

Πίνακας 6.6 –Επιλεγόμενες Παράμετροι Βελτιστοποίησης με Γ.Α. στο Λογισμικό της MATLAB



Εικόνα 6.4 – Εργαλείο Βελτιστοποίησης με Γ.Α. στο Λογισμικό της MATLAB

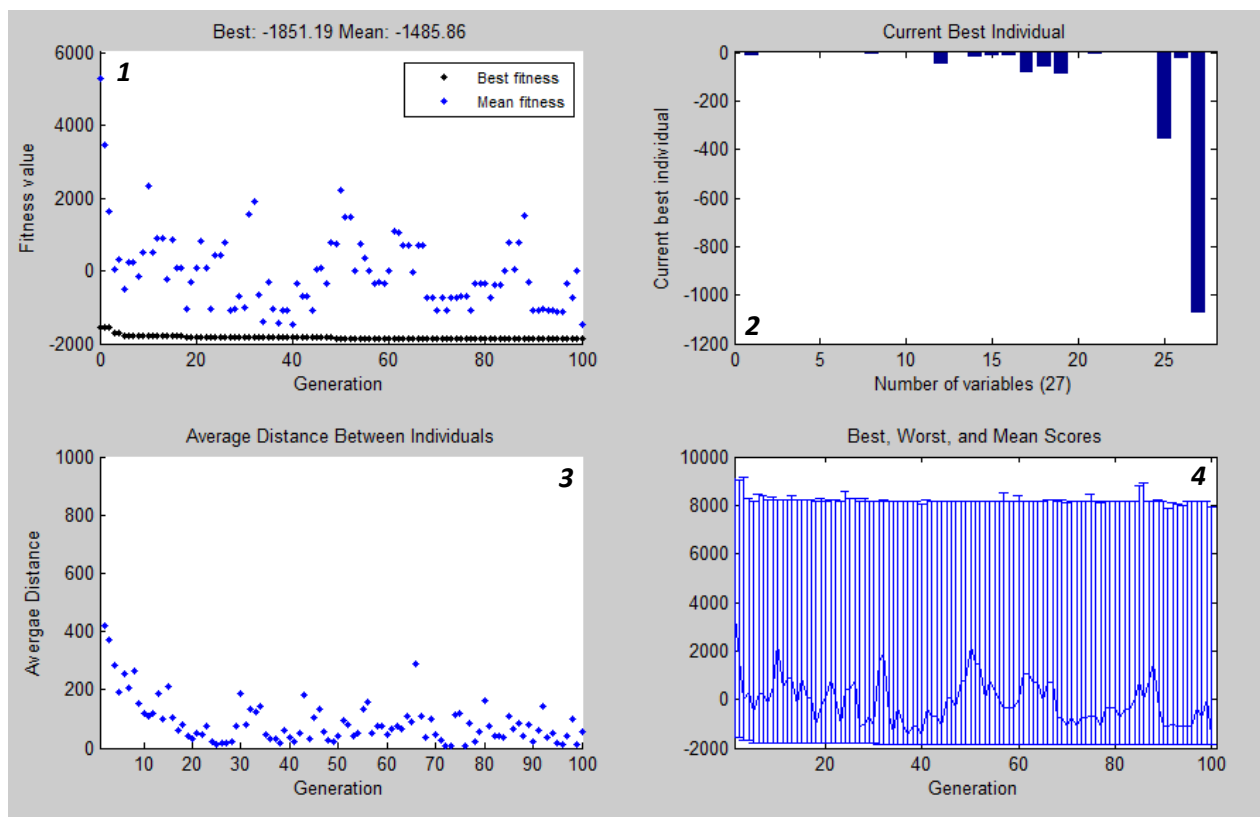
7. Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

7.1 Αποτελέσματα

Εφόσον αποφασίστηκε ποιες παράμετροι θα χρησιμοποιηθούν για την βελτιστοποίηση των αντλήσεων, σειρά είχε η ολοκλήρωση της διαδικασίας και η εκκίνηση των Γενετικών Αλγόριθμων και της MATLAB. Αξίζει να σημειωθεί πως η ολοκλήρωση της αναζήτησης προσανατολίστηκε κυρίως από τον μέγιστο αριθμό των γενεών και σε δεύτερη φάση από την σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης. Με τον όρο σύγκλιση, γενικότερα στους εξελικτικούς αλγόριθμους, νοείται η κατάσταση στην οποία η εξέλιξη σταματά εξαιτίας του ότι ολόκληρος ο πληθυσμός αποτελείται από ίδια άτομα. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από συνθήκες μηδενικής μετάλλαξης (όλα τα άτομα, πλην των ελιτιστικών, θα υποστούν διασταύρωση). Ωστόσο, είναι αρκετά σύνηθες και έτσι χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία, η σύγκλιση να αναφέρεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Μετά από περίπου 27 ώρες και το πέρας 100 γενεών, δόθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

7.1.1 1^ο σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης

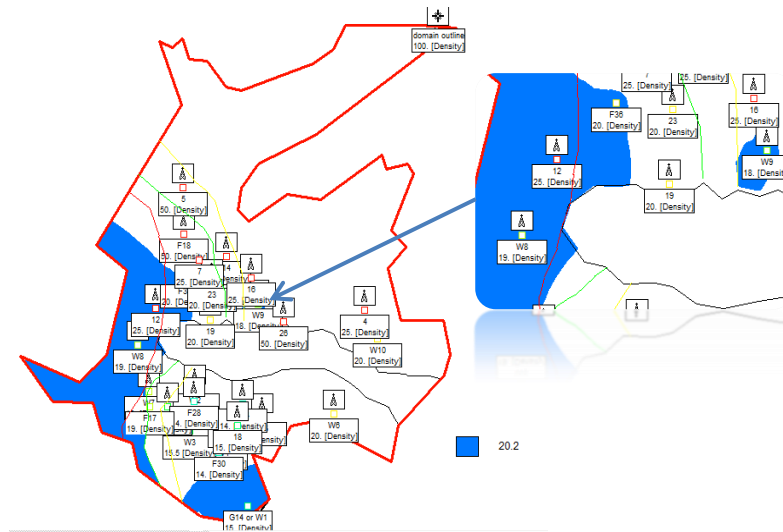
Αρχικά, δοκιμάστηκε η βελτιστοποίηση της άντλησης με σημεία παρατήρησης αυτά της κίτρινης ζώνης. Ακόμη, δεν περιορίστηκε το νότιο άκρο της περιοχής μελέτης με αποτέλεσμα να υπάρχει αντίστροφη ροή, όπως και ήταν αναμενόμενο. Έτσι, το λογισμικό της MATLAB έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα και η απόδοση του αλγορίθμου κρίθηκε ικανοποιητική. Η ποικιλομορφία του πληθυσμού (Διάγραμμα 3 Εικόνας 7.1) είναι αποδεκτή αλλά επιδέχεται κάποιας ακόμη βελτίωσης. Όσον αφορά τη σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης, αυτή πραγματοποιείται από την 50^η γενιά και από την πρώτη επανάληψη, προσεγγίζεται η βέλτιστη τιμή της, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 1. Τέλος, παρατηρείται η επιβολή ποινής σε κάθε γενιά (Διάγραμμα 4).



Εικόνα 7.1 – Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MATLAB για το 1^ο Σενάριο

Έχοντας πλέον τα αποτελέσματα, μπορούμε να επαληθεύσουμε την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για τον λόγο αυτό, έτρεξε το μοντέλο πρόβλεψης κάτω από τις συνθήκες της βέλτιστης άντλησης. Οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου για την 10^η περίοδο, καταλήξαμε στην Εικόνα 7.2. Όπως φαίνεται, η υφαλμύριση έχει περιοριστεί, κατά κύριο λόγο, στο επίπεδο της πράσινης ζώνης βελτιστοποίησης. Ωστόσο, υπάρχει ένας φακός υφάλμυρης ζώνης οριακά πάνω και πίσω από την κίτρινη ζώνη, όπου αντλεί το πηγάδι W9 (360.25 m³/d). Ο φακός αυτός, είναι τοπικής σημασίας και παρατηρείται δίπλα από το τμήμα του φλύσχη, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα. Ωστόσο, στα επόμενα σενάρια, το εύρος των τιμών της παροχής άντλησης του πηγαδιού αυτού, περιορίστηκε περαιτέρω. Στα νότια της περιοχής μελέτης όπου βρίσκεται το πηγάδι G14/W1, με την μεγαλύτερη παροχή άντλησης (1072,25 m³/d), παρατηρείται επίσης υφαλμύριση και αντίστροφη ροή. Συνολικά, υπάρχουν 5 πηγάδια εντός της

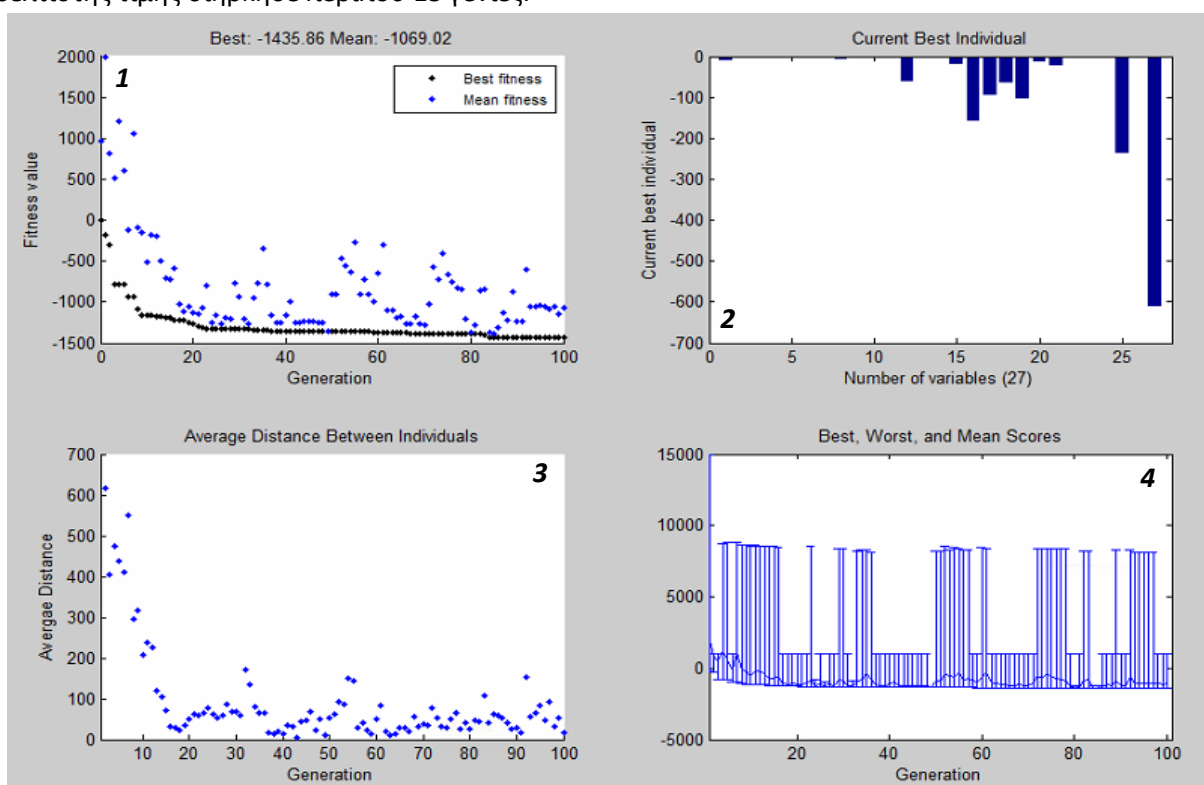
υφάλμυρης ζώνης τα οποία όμως αντλούν συνολικά $1567,2 \text{ m}^3/\text{d}$, την στιγμή που τα υπόλοιπα 20 αντλούν μόλις $284,0 \text{ m}^3/\text{d}$.



Εικόνα 7.2 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για την 10η περίοδο για το 1^ο Σενάριο

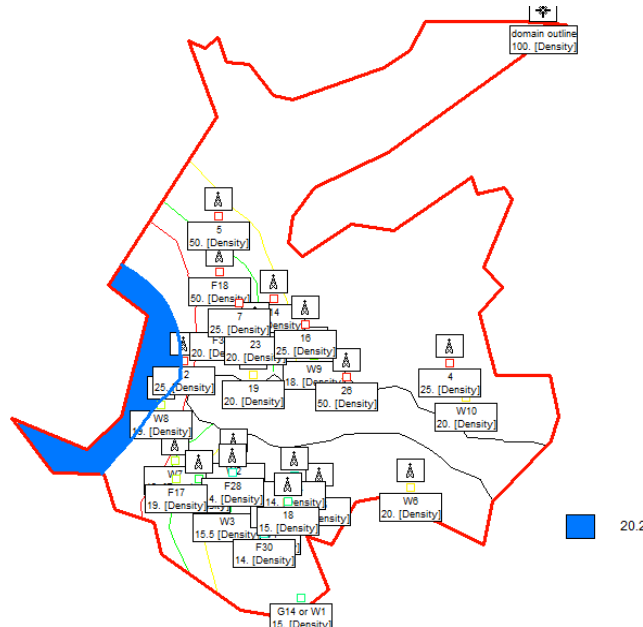
7.1.2 2^ο Σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης και Περιορισμένο Νότιο Άκρο

Στην περίπτωση αυτή, και λόγω της διεύρυνσης του μετώπου της υφαλμύρισης στο νότιο άκρο και την αντίστροφη ροή, δοκιμάστηκε ο περιορισμός του νοτίου άκρου. Ακόμα, μειώθηκε το εύρος πιθανών τιμών άντλησης του πηγαδιού W9 (από 1100 σε $250 \text{ m}^3/\text{d}$), ώστε να μειωθεί η, τοπικής σημασίας, πτώση στάθμης γύρω από αυτό (1ο Σενάριο). Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 1 της Εικόνας 7.3, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σταθεροποιείται στις τελευταίες 17 γενιές. Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι είναι αρκετά πιθανό να μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω η τιμή της αντικειμενικής, καθώς η προτελευταία σταθεροποίηση της βέλτιστης τιμής διήρκεσε περίπου 15 γενιές.



Εικόνα 7.3 – Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MATLAB για το 2^ο Σενάριο

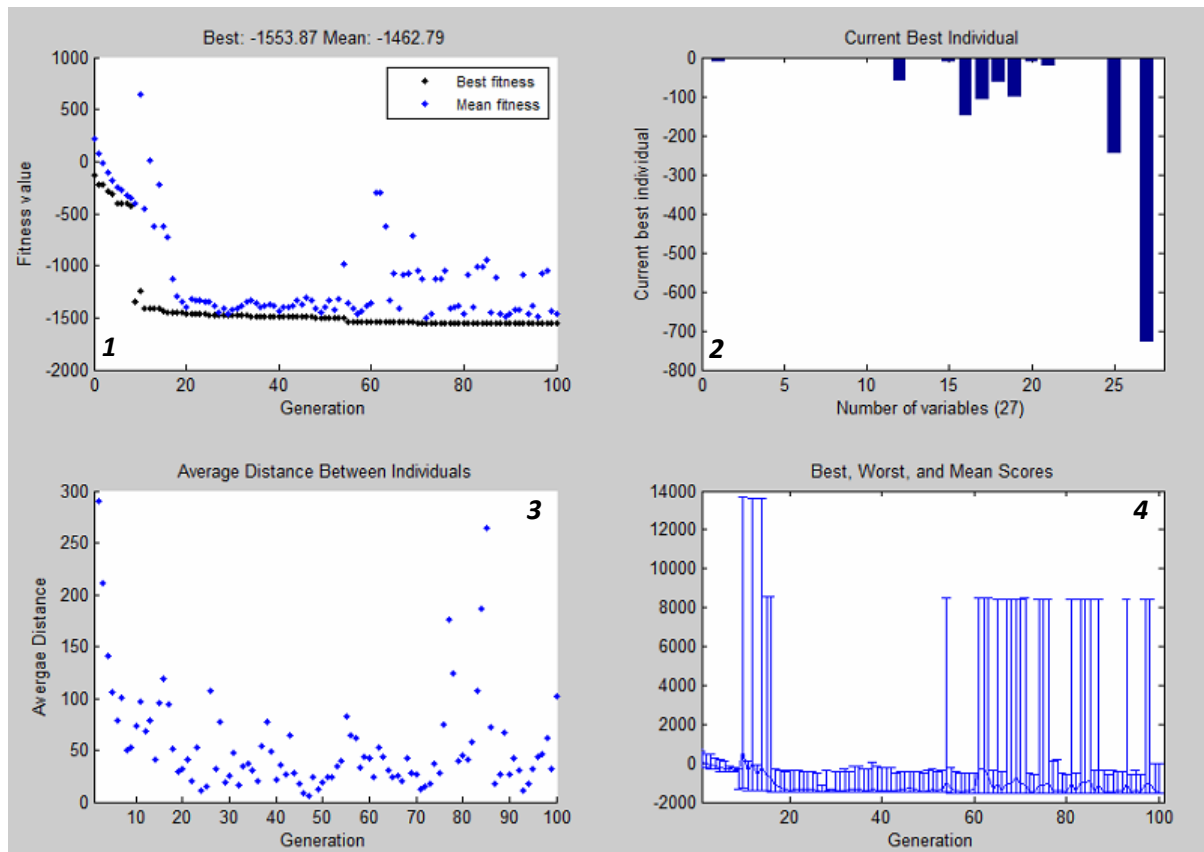
Κατά την προσομοίωση της βέλτιστης άντλησης, μέσω του μοντέλου πρόβλεψης, δημιουργήθηκε η Εικόνα 7.4. Αυτό που είναι εμφανές, είναι ότι κανένα πηγάδι δεν αντλεί υφάλμυρο νερό. Ωστόσο, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο αυστηροί περιορισμοί ώστε να μην είναι δυνατή η εύρεση καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την απόδοση του αλγόριθμου (Εικόνα 7.3), υπονοεί ότι ο αλγόριθμος τερματίστηκε σε τοπικό βέλτιστο.



Εικόνα 7.4 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για την 10η περίοδο για το 2°

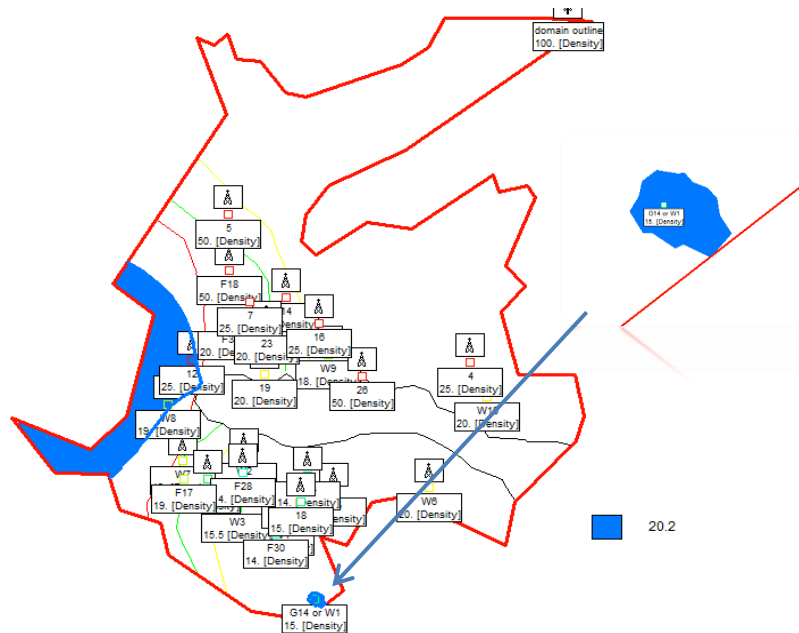
7.1.3 3ο Σενάριο - Πράσινη Ζώνη Βελτιστοποίησης και Περιορισμένο Νότιο Άκρο

Στο σενάριο αυτό, περιορίστηκε και πάλι το μέτωπο της υφαλμύρισης του νότιου άκρου της περιοχής μελέτης, ενώ για το πηγάδι W9 το όριο άντλησης παρέμεινε στα 250 m³/d. Στα αποτελέσματα της πράσινης ζώνης (Εικόνα 7.5), παρατηρούμε ότι η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης επιτυγχάνεται γύρω στην 70^η γενιά, καθώς δεν υπάρχει βελτίωση της τιμής της για τις επόμενες 25 γενιές. Σχετικά με την ποικιλομορφία του πληθυσμού (Διάγραμμα 3), παρατηρούμε πως υπάρχει μια αρκετά καλή ποικιλομορφία η οποία επιτρέπει στον αλγόριθμο να εξερευνήσει καινούργιες περιοχές λύσεων. Ακόμα, φαίνεται ξεκάθαρα, στα Διαγράμματα 1 και 4, η επιβολή της ποινής (τιμές μεγαλύτερες του μηδενός) εξαιτίας είτε της μη σωστής λειτουργίας του μοντέλου πρόβλεψης (P=15.000), είτε των αυξημένων τιμών άντλησης (P=10.000). Μία ακόμη αιτία επιβολής ποινής ήταν και η επιλογή θετικών τιμών για τα πηγάδια άντλησης από τον αλγόριθμο (P=1.000). Στις πρώτες γενιές ο αλγόριθμος κινούνταν σε θετικές τιμές άντλησης, έπειτα χρησιμοποιήθηκαν μικρές αρνητικές τιμές άντλησης και αργότερα, με μια απότομη καθοδική μεταβολή, προσεγγίστηκε η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Εικόνα 7.5 - Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MATLAB για το 3^ο Σενάριο

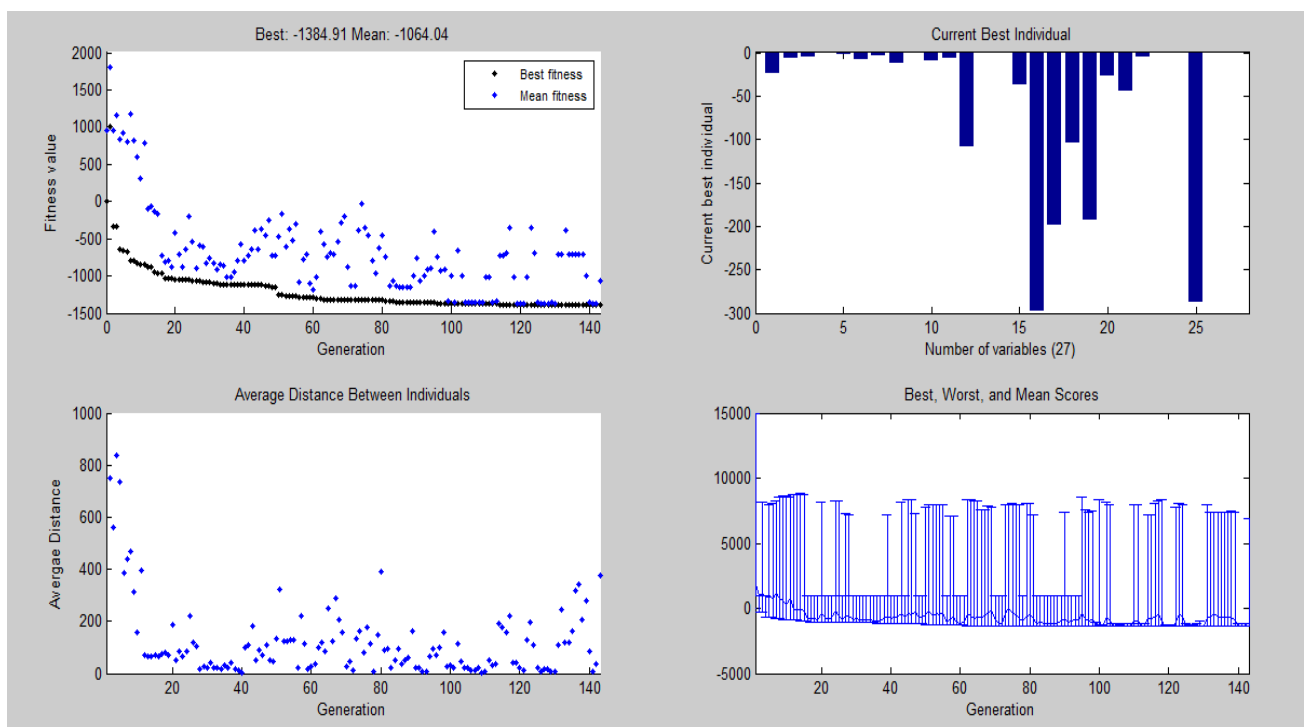
Επαληθεύοντας την διαδικασία της βελτιστοποίησης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πρόβλεψης κάτω από τις συνθήκες της βέλτιστης άντλησης. Οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου για την 10^η περίοδο, καταλήξαμε στην Εικόνα 7.6. Όπως φαίνεται, η υφαλμύριση έχει περιοριστεί στο επίπεδο της κόκκινης ζώνης βελτιστοποίησης. Ωστόσο, υπάρχει ένας φακός υφάλμυρης ζώνης στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Πρόκειται για το σημείο το οποίο ευθύνεται, κατά κύριο λόγο, για την αντίστροφη ροή. Ωστόσο, πλέον η πτώση στάθμης έχει περιοριστεί σε τοπικό επίπεδο και δεν επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή και το μέτωπο της υφαλμύρισης. Συνολικά, υπάρχουν τρία πηγάδια εντός της υφάλμυρης ζώνης (12, W8 και G14/W1) τα οποία όμως αντλούν συνολικά 729,92 m³/d, την στιγμή που τα υπόλοιπα 22 (εκτός των δύο μηδενικών πηγαδιών) αντλούν 823,94 m³/d μη ρυπασμένου νερού. Αξίζει να σημειωθεί το ότι, σύμφωνα με τους περιορισμούς που τέθηκαν για το νότιο άκρο, η τιμή άντλησης του πηγαδιού G14/W1 οδηγεί σε υδραυλικά ύψη που οριακά ικανοποιούν τους περιορισμούς.



Εικόνα 7.6 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για την 10η περίοδο για το 3^ο Σενάριο

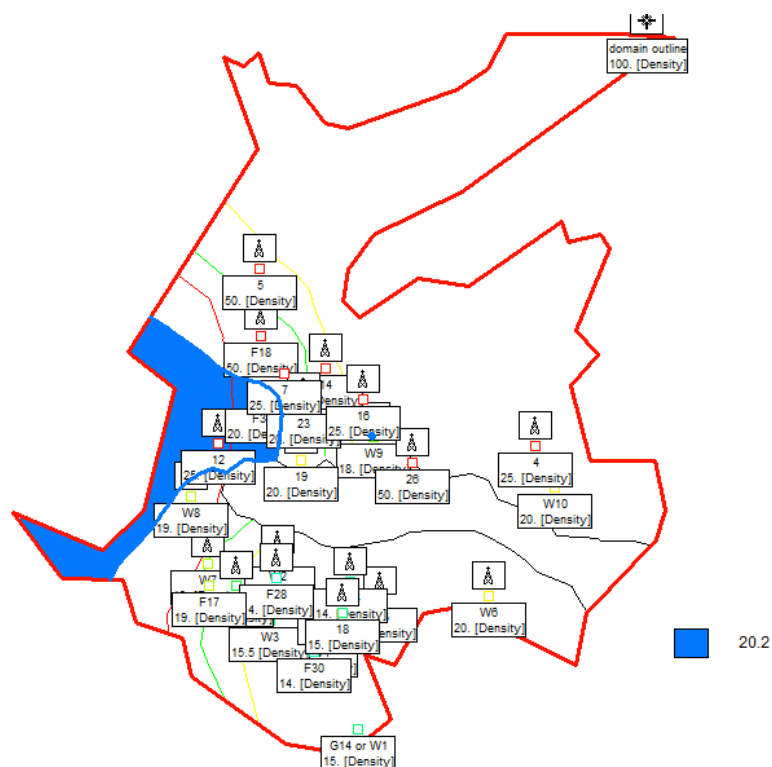
7.1.4 4^ο Σενάριο - Κίτρινη Ζώνη Βελτιστοποίησης, Μηδενική Άντληση G14/W1 και Αλλαγή Εύρους Τιμών Άντλησης

Στην περίπτωση του 4^{ου} Σεναρίου, εξετάστηκε η απόκριση του μετώπου υφαλμύρισης σε περίπτωση μηδενικής άντλησης του πηγαδιού G14/W1. Ο αλγόριθμος, φαίνεται να απέδωσε αρκετά ικανοποιητικά. Εξαιτίας μιας σταδιακής βελτίωσης της αντικειμενικής συνάρτησης, κρίθηκε σκόπιμη η επέκταση του χρόνου λειτουργίας του. Στο Διάγραμμα 1 της Εικόνας 7.7, παρατηρείται σύγκλιση της συνάρτησης περίπου στην γενιά 115. Στο Διάγραμμα 2, παρατηρείται μια περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή των αντλήσεων σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια.



Εικόνα 7.7 - Διαγράμματα Αποτελεσμάτων MATLAB για το 4^ο Σενάριο

Εισάγοντας τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στο μοντέλο πρόβλεψης, δημιουργήθηκε η Εικόνα 7.8. Στο πηγάδι W9, παρουσιάζεται ένας μικρός φακός υφαλμύρισης, που βρίσκεται οριακά στην γραμμή των πηγαδιών παρατήρησης (κίτρινη ζώνη). Η συνολική παροχή άντλησης ανέρχεται στα 1384,91 m³/d, με τα 898,71 m³ να αντλούνται από περιοχές με υδραυλικό ύψος μεγαλύτερο του ορίου των 20,2 m. Και στην περίπτωση αυτή, είναι αρκετά πιθανό να μην έχει προσεγγιστεί το ολικό βέλτιστο καθώς δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί.



Εικόνα 7.8 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για την 10η περίοδο για το 4^ο Σενάριο

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα των Γενετικών Αλγόριθμων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 που ακολουθεί.

Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων										
Ονομασία	Κόμβοι Άντλησης	Παροχές Άντλησης Μοντελοποίησης 2015 (m ³ /d)	1ο Σενάριο		2ο Σενάριο		3ο Σενάριο		4ο Σενάριο	
			Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης (m ³ /d)	Ποσοτό Μείωσης (%)	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης (m ³ /d)	Ποσοτό Μείωσης (%)	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης (m ³ /d)	Ποσοτό Μείωσης (%)	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης (m ³ /d)	Ποσοτό Μείωσης (%)
(Π4) 4	887	12.9	13.62	-5.54	11.17	13.40	12.44	3.58	24.56	-90.39
(Π5) 5	897	4	4.37	-9.30	3.81	4.66	4.21	-5.25	6.68	-66.95
(Π7) 7	782	2.6	2.12	18.33	2.76	-6.06	2.71	-4.29	5.01	-92.85
(Π12) 12	541	0.4	0.38	4.29	0.40	-0.81	0.44	-8.76	0.65	-62.85
(Π14) 14	833	1.3	1.35	-3.69	1.37	-5.17	1.42	-8.99	2.23	-71.26
(Π16) 16	787	4	4.18	-4.50	4.11	-2.86	4.38	-9.61	7.33	-83.29
(Π18) 18	318	2.3	0.89	61.12	2.04	11.31	2.22	3.60	4.36	-89.44
(Π19) 19	621	6.5	7.06	-8.61	7.01	-7.77	6.21	4.44	12.46	-91.75
(Π22) 22	216	0.3	0.26	14.22	0.33	-9.18	0.31	-1.82	0.47	-55.22
(Π23) 23	731	4.5	4.20	6.68	3.77	16.12	4.31	4.13	8.82	-95.97
(Π26) 26	638	3.5	2.66	24.02	3.83	-9.52	3.00	14.30	6.39	-82.64
F17	175	60	51.75	13.75	63.22	-5.37	60.66	-1.09	108.63	-81.05
F18	777	0.4	0.41	-2.61	0.44	-9.02	0.40	-0.64	0.53	-31.36
F28	265	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
F30	90	19.5	13.20	32.31	20.53	-5.28	12.96	33.53	37.83	-93.98
F34	474	150	15.46	89.69	157.93	-5.29	149.96	0.03	298.26	-98.84
F36	690	100	81.96	18.04	94.02	5.98	110.00	-10.00	198.44	-98.44
W2	352	60	63.12	-5.21	64.45	-7.41	62.39	-3.99	104.42	-74.03
W3	112	100	89.25	10.75	104.85	-4.85	101.87	-1.87	192.83	-92.83
W4	163	14	4.01	71.34	14.36	-2.59	12.15	13.25	27.63	-97.33

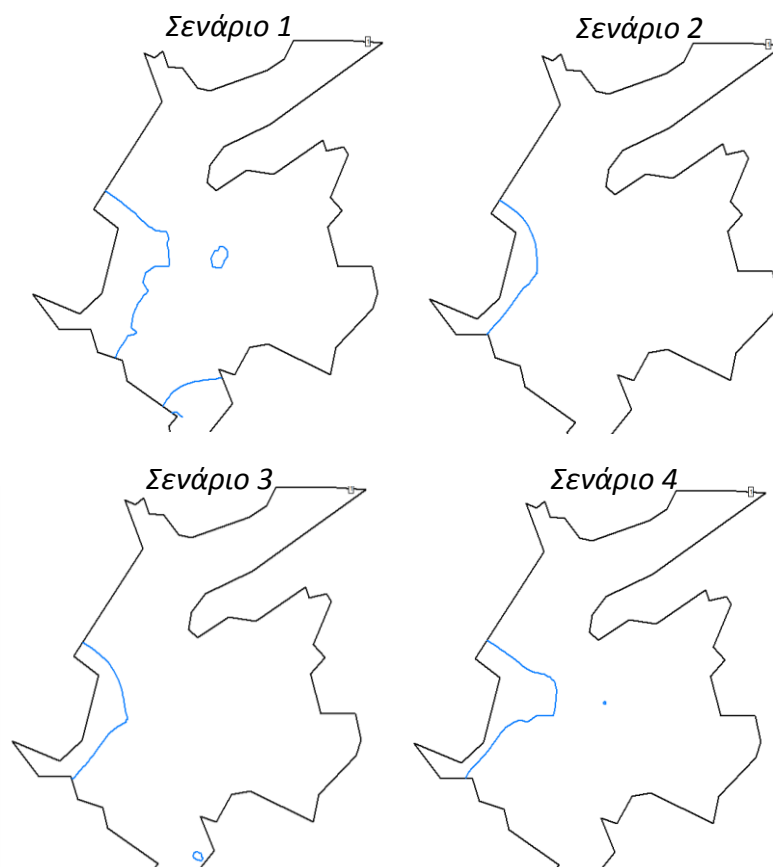
W5	359	22	10.02	54.47	23.17	-5.34	22.64	-2.90	43.79	-99.06
W6	626	3	2.11	29.52	2.81	6.37	3.14	-4.79	4.91	-63.57
W7	292	0.3	0.25	16.56	0.30	-1.21	0.16	45.50	0.57	-90.25
W8	420	0.6	0.61	-1.52	0.60	0.00	0.58	3.79	1.02	-69.60
W9	740	1000	360.25	63.97	237.12	76.29	246.41	75.36	287.11	71.29
W10	918	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G14/W1	129	1000	1072.25	-7.22	611.45	38.86	728.91	27.11	0.00	100.00
	Σύνολο	2572.1	1851.19	28.03	1435.86	44.18	1553.87	39.59	1384.91	46.16
		Σύνολο Υφάλμυρου Νερού	1567.20		0.00		729.92		486.20	
		Σύνολο Γλυκού Νερού	283.99		1435.86		823.94		898.71	

Πίνακας 7.1 – Συγκεντρωτικός Πίνακας Αποτελεσμάτων Βελτιστοποίησης μέσω Γενετικών Αλγόριθμων

7.2 Συμπεράσματα

Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων, Πίνακας 7.1, φαίνεται ξεκάθαρα ότι το 1^ο Σενάριο αποδίδει την μεγαλύτερη συνολική ποσότητα νερού (μικρότερο ποσοστό μείωσης) αλλά και την μικρότερη ποσότητα γλυκού νερού. Αν και περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό το μέτωπο της υφαλμύρισης, το σενάριο αδυνατεί να αποτρέψει την αντίστροφη ροή του νότιου άκρου της περιοχής μελέτης. Το τμήμα αυτό, αποτελεί κομμάτι του μετώπου και δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.

Τα υπόλοιπα τρία σενάρια, αποτελούν ποσοτικά παρόμοιες λύσεις. Αξίζει να σημειωθεί η ότι το 2^ο σενάριο φαίνεται να είναι το πιο απομακρυσμένο από το ολικό βέλτιστο καθώς δεν έχει φτάσει κοντά ούτε στους περιορισμούς που αφορούν το νότιο άκρο αλλά ούτε και σε αυτούς τις κίτρινης ζώνης. Ακόμη ένα στοιχείο που ακυρώνει το σενάριο αυτό είναι το επόμενο σενάριο, το 3^ο σενάριο. Με μια προσεκτική ματιά στα αποτελέσματα τις βελτιστοποίησης του 3^{ου} σεναρίου, παρατηρείται ότι η μόνη διαφορά μεταξύ 3^{ου} και 2^{ου} είναι η παροχή άντλησης του πηγαδιού G14/W1. Οι τιμές που αποδίδει ο αλγόριθμος στο πηγάδι αυτό είναι 611.45 και 728.91 m³/d για το 2^ο και το 3^ο σενάριο αντίστοιχα, ενώ το άθροισμα των παροχών όλων των υπόλοιπων πηγαδιών είναι σχεδόν ίδια (824.407 και 824.956147 m³/d αντίστοιχα). Με άλλα λόγια, η διαφορά της συνολικής παροχής οφείλεται στην διαφορά των παροχών άντλησης του G14/W1. Παρόλα αυτά, το 2^ο σενάριο είναι χρήσιμο αν επιλέγει στρατηγική άντλησης από τμήματα του υδροφόρα με υδραυλικό ύψος μεγαλύτερο των 20.2 m για όλα τα πηγάδια.



Εικόνα 7.9 – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για την 10η περίοδο για όλα τα σενάρια

Όσον αφορά το τελευταίο σενάριο, είναι αυτό που αντλεί με την χαμηλότερη συνολική παροχή. Η άντληση, και εδώ, δεν έχει φτάσει στα βέλτιστα επίπεδα καθώς υπάρχει ένα εύρος μεταξύ του ορίου υφαλμύρισης και των περιορισμών.

Τελικά, αυτό που παρουσιάζεται πιο ελκυστικό είναι το 3^ο σενάριο. Με το σενάριο αυτό περιορίζεται το μέτωπο της υφαλμύρισης στο νότιο άκρο και αποδίδεται η μεγαλύτερη συνολική παροχή. Ωστόσο, υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης καθώς δεν προσεγγίζεται η πράσινη ζώνη βελτιστοποίησης και συνεπώς, μπορούν να ανατεθούν μεγαλύτερες παροχές άντλησης στα πηγάδια.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε γενικές γραμμές, η παρούσα εργασία αποτελεί μια αντιπροσωπευτική και ρεαλιστική εικόνα της πραγματικότητας. Ωστόσο περιθώρια βελτίωσης των αποτελεσμάτων υπάρχουν σε όλα τα επίπεδα της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να διαχωρίσουμε τις δυνατές βελτιώσεις σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα:

1. Απεικόνιση της Πραγματικότητας (Σημερινή Κατάσταση)

Η μοντελοποίηση του υδροφορέα που χρησιμοποιήθηκε, αποτελεί μια εξαιρετική αναπαράσταση της πραγματικότητας. Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική αξιολόγηση του χρησιμοποιούμενου μοντέλου με κάποιο άλλο μοντέλο προσομοίωσης. Ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση ενός μοντέλου με διαφορετική θεώρηση σχετικά με την διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού (Διεπιφάνεια Πεπερασμένου Πάχους). Τέλος, το μέτωπο της υφαλμύρισης θα μπορούσε να προσδιοριστεί μέσω άμεσων μεθόδων όπου απαιτούνται μετρήσεις πεδίου στο υπόγειο νερό και το έδαφος. Όπως είναι κατανοητό, οι φυσικές και χημικές αυτές μετρήσεις αποτελούν μια δαπανηρή διαδικασία που προϋποθέτει οργανωμένο σχέδιο παρακολούθησης και ελέγχου. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι το γεγονός ότι το μέτωπο της υφαλμύρισης θα μπορέσει να βελτιστοποιηθεί πιο αποδοτικά με βάση την απόσταση του από την ακτή.

2. Μοντέλο Πρόβλεψης (Μελλοντική Κατάσταση)

Προκειμένου να σχεδιαστεί η στρατηγική διαχείρισης ενός οποιουδήποτε υδροφορέα, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις σχετικά με τα κλιματολογικά χαρακτηριστικά (βροχόπτωση, κατείσδυση, θερμοκρασία) που αναμένεται να επηρεάσουν τον υπόγειο υδροφορέα. Στην παρούσα εργασία, θεωρήθηκε ότι τα χαρακτηριστικά αυτά θα είναι ίδια με αυτά των τελευταίων ετών. Ωστόσο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο πρόβλεψης κλιματικής αλλαγής σύμφωνα με το οποίο, γίνονται θεωρήσεις για διάφορες παραμέτρους μέσα από τις οποίες επηρεάζεται, έμμεσα ή άμεσα, η εκπομπή αέριων του θερμοκηπίου και συνεπώς το κλίμα. Τέτοιες παράμετροι μπορεί να είναι οικονομικές, δημογραφικές, πολιτισμικές αλλά και τεχνολογικές. Τέτοια σενάρια και μοντέλα έχουν προταθεί τόσο από οργανισμούς, όπως η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), όσο και από την ακαδημαϊκή κοινότητα (μοντέλο 2052, Jorgen Randers). Φυσικά, τα μοντέλα πρόβλεψης δεν μπορούν να παρέχουν βεβαιότητα αλλά εκμεταλλεύονται τις τάσεις που δημιουργούνται σε βάθος χρόνου.

3. Απόδοση Γενετικών Αλγόριθμων

Η απόδοση των Γ.Α. είναι ένας τομέας που επιδέχεται αρκετής βελτίωσης στην παρούσα εργασία καθώς κανένα σενάριο δεν προσεγγίζει τα επιτρεπτά όρια υφαλμύρισης. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές τεχνικές που ενισχύουν την απόδοση και την ποικιλομορφία, οδηγώντας στην καλύτερη εξερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων. Τέτοιες μέθοδοι είναι αυτές του Συνωστισμού (εξάλειψη όμοιων ατόμων ή αντικατάσταση αυτών -Crowding method), της Ημέρα της Κρίσης (μόνο το πιο κατάλληλο άτομο παραμένει αναλλοίωτο στην επόμενη γενιά ενώ όλα τα υπόλοιπα άτομα του πληθυσμού δημιουργούνται τυχαία – Judgment Day), της Τυχαίας Δημιουργίας Απογόνων (Random Offspring Generation) και άλλα (Mohan, Chaudhary και Mehrotra, 2014)(Squillero και Tonda, 2016). Παρά το αυξημένο ενδιαφέρον που παρουσιάζουν οι τεχνικές αυτές, δεν ήταν εύκολο να δοκιμαστούν στην παρούσα εργασία λόγω της περίπλοκης κωδικοποίησής τους. Η εύρεση του ολικού βέλτιστου δεν είναι κάτι το οποίο μπορεί να εγγυηθεί η μέθοδος των Γενετικών Αλγόριθμων. Ωστόσο, όσο πιο διεξοδικά αναζητείται ο χώρος των λύσεων, τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν ώστε να υπάρξει σύγκλιση προς μια τιμή κοντά στην βέλτιστη. Αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και παράλληλη επεξεργασία, θα απέδιδαν μεγαλύτερη ταχύτητα στον αλγόριθμο και περισσότερες δυνατότητες εξερεύνησης του χώρου των λύσεων και συνεπώς προσέγγιση του βέλτιστου. Στην παρούσα εργασία, υπήρχαν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με τον χρόνο εκτέλεσης της βελτιστοποίησης με αποτέλεσμα να δίνεται μεγαλύτερο βάρος στο πέρας ενός συγκεκριμένου αριθμού γενεών. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθεί σε μεγαλύτερο βάθος γενεών η αντίδραση του προβλήματος στην βελτιστοποίηση. Τέλος, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κάποιο άλλο μοντέλο βελτιστοποίησης όπως η βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Karatzas και Dokou, 2015), ώστε τα αποτελέσματα να συγκριθούν και να επιλεγεί το αποδοτικότερο.

4. Διαχειριστικές Δυνατότητες

Είναι γεγονός ότι ο υδροφορέας παρουσιάζει έντονη υφαλμύριση κατά τους θερινούς μήνες όπου τα επίπεδα εξατμισοδιαπνοής είναι αυξημένα ενώ, παράλληλα, οι βροχοπτώσεις είναι μειωμένες και υπάρχει μεγάλη ζήτηση νερού. Στην παρούσα εργασία, προτάθηκαν τρόποι-σενάρια περιορισμού της υφαλμύρισης τα οποία όμως, επικεντρώθηκαν στην διαχείριση των υπάρχοντων πηγαδιών. Παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον η εφαρμογή και η δοκιμή σεναρίων που να στοχεύουν στην εκμετάλλευση τόσο των πλημμυρικών νερών όσο και των αποθεμάτων νερού που δημιουργούνται στον υδροφορέα κατά τους χειμερινούς μήνες. Άλλοι τρόποι τεχνητού εμπλουτισμού που θα μπορούσαν να εξεταστούν είναι η δημιουργία κάποιου υπόγειου φράγματος αλλά και η χρήση πηγαδιών έγχυσης ώστε να εμπλουτίζονται τμήματα του υδροφόρου συστήματος με μεγαλύτερη ευαισθησία στην άντληση.

Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- Alajmi, A., and Wright, J. 2014. Selecting the Most Efficient Genetic Algorithm Sets in Solving Unconstrained Building Optimization Problem. *International Journal of Sustainable Built Environment* 3(1): 18–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.07.003>.
- Babu, D.K., Pinder, G.F., Niemi, A., Ahlfeld, D.P., and Stotho, S.A., 1997. Chemical Transport by three-dimensional Groundwater Flows
- Bear, J., and Cheng, A.H.-D., 2010. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer Dordrecht Heidelberg London New York
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA
- Karatzas, G.P., and Dokou, Z. 2015. Optimal Management of Saltwater Intrusion in the Coastal Aquifer of Malia, Crete (Greece), Using Particle Swarm Optimization. *Hydrogeology Journal* (July). <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-015-1286-6>
- Katerji, N., Van Hoorn, J.W., Hamdy, A., and Mastrorilli, M. 2000. Salt Tolerance Classification of Crops according to Soil Salinity and to Water Stress Day Index. *Agricultural Water Management* 43: 99–109.
- Mohan, H., Chaudhary, A., and Mehrotra, D. 2014. Review Article A Comparative Review of Approaches to Prevent Premature Convergence in GA. *Applied Soft Computing Journal* 24: 1047–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.08.025>.
- Okal, E.A., Synolakis, C.E., Uslu, B., Kalligeris, N., Voukouvalas, E. 2009. The 1956 Earthquake and Tsunami in Amorgos, Greece. *Geophysical Journal International* 178(3): 1533–54.
- Papadopoulou, M. P., Varouchakis, E.A., and Karatzas, G.P. 2009. Simulation of Complex Aquifer Behavior Using Numerical and Geostatistical Methodologies. *DES* 237(1–3): 42–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.021>.
- Pool, M., and Carrera, J., 2011. “A Correction Factor to Account for Mixing in Ghyben - Herzberg and Critical Pumping Rate Approximations of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers.” *WATER RESOURCES RESEARCH* 47: 1–9. doi:10.1029/2010WR010256
- Squillero, G., and Tonda, A.. 2016. Divergence of Character and Premature Convergence : A Survey of Methodologies for Promoting Diversity in Evolutionary. *Information Sciences* 329: 782–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2015.09.056>.
- The MathWorks, 2014. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox User’s Guide. The MathWorks Inc.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αδαμίδης Π., 1999. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, Εισαγωγή, Πανεπιστημιακές Διαλέξεις, Τμήμα Πληροφορικής, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2015. Σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου (GR14).
- Καλλέργη Γ.Α., 1999. Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία Τόμος 1, Αθήνα, Εκδόσεις ΤΕΕ
- Καλλέργη Γ.Α., 2000. Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία Τόμος 2, Αθήνα, Εκδόσεις ΤΕΕ
- Καρατζάς Γ., 2015. Ροή Υπόγειων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρατζάς Γ., Παπαδοπούλου Μ., 2014. Βελτιστοποίηση Περιβαλλοντικών Συστημάτων, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρτεράκης Σ., 2005. Διαχείριση των Υπόγειων Υδάτων με χρήση συνδιασμού μεθόδων Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κολοκοτσά, Δ., Σπυριδάκη, Α., 2014. Γενετικοί Αλγόριθμοι και Βελτιστοποίηση, Πανεπιστημιακές Διαλέξεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Λυκοθανάσης, Σ., 2001. Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Πληροφορικής, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Μάργαρης Κ., 2008. Έρευνα για την αειφορία ανάπτυξη στο νησί της Αμοργού, Δίκτυο Αειφόρων Νήσων «ΔΑΦΝΗ»
- Νάνου-Γιάνναρου, Α., 2001. Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων, Πρακτικά από Συμπόσιο «ΑΙΓΑΙΟ-ΝΕΡΟ-ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ», Ιούλιος 2001, Πάρος.
- Παπαδόπουλος Ν., Παρίσης Σ., 1997. Μελέτη Φραγμάτων Ανάσχεσης σε Νησιά των Κυκλάδων – Οριστική Γεωλογική-Υδρογεωλογική Μελέτη, Τεύχος 1^ο: Κατάπολα Αμοργού, Αθήνα
- Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, Γενική Διεύθυνση Περιφερειακής Αγροτικής Οικονομίας και Κτηνιατρικής. Επιχειρησιακό Σχέδιο Αγροτικής Ανάπτυξης 2014-2020, Αμοργός.
- Σιάκα Μ., 2015. Μελέτη της υπόγειας ροής και του φαινομένου της υφαλμύρισης στον προσχωματικό υδροφορέα Καταπόλων της νήσου Αμοργού, με τη χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής PTC (Princeton Transport Code), Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΦΕΚ 1154/12.8.2003, 2003. Τροποποίηση Διατάξεων του «Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ-2000» λόγω αναθεώρησης του Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας, Αθήνα.

Διαδικτυακές Πηγές

<https://en.wikipedia.org/>

http://library.tee.gr/digital/m2067/m2067_valassopoulos.pdf

<http://www.ypeka.gr/>

<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/database/kykladon/pr30ge.pdf>

<http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>

http://rad.ihu.edu.gr/fileadmin/labsfiles/decision_support_systems/lessons/genetic_algorithms/GAs.pdf

<http://www.oikoskopio.gr/map/>

<https://www.google.gr/maps/>

Βέλτιστη διαχείριση του φαινομένου της υφαλμύρισης στον υδροφορέα Κατάπολων της νήσου
Αμοργού με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου

Παράρτημα

Σταθμός Νάξου (WMO No 16 732)													
Μηνιαίο Ύψος Υετού (mm)													
Έτος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Συνολο
1970	45.80	48.90	93.70	4.80	28.60	12.50		0.20		76.00	30.50	54.50	395.50
1971	138.50	106.30	56.70	7.20	1.30	0.20	4.70		0.20	3.20	19.40	33.10	370.80
1972	27.90	36.20	116.30	25.90	12.40		11.20	74.80		106.00	29.00	44.00	483.70
1973	152.30	43.40	28.30	71.70	0.60				0.60	26.10	26.90	31.70	381.60
1974	14.20	117.20	54.60	10.00	1.90				10.10	9.70	90.00	28.50	336.20
1975	59.00	65.70	35.10	38.30	4.40	20.60				6.00	91.20	69.50	389.80
1976	24.60	56.00	77.80	36.40	4.20	3.20	0.60	2.20	0.50	197.00	73.20	57.50	533.20
1977	32.70	6.40	0.60	8.60					24.80	33.30	13.50	57.80	177.70
1978	130.60	112.80	75.70	28.30	31.40				63.30	61.20	21.10	44.30	568.70
1979	50.40	66.90	17.20	2.00	1.00					60.30	93.40	94.30	385.50
1980	72.60	62.80	100.40	16.70	8.50					111.80	20.30	90.00	483.10
1981	235.30	103.60	3.10	19.80	8.00					0.80	139.20	146.40	656.20
1982	74.90	147.30	105.90	47.10	18.40	3.10				12.00	61.40	42.30	512.40
1983	9.50	70.60	37.20	5.60	2.70	0.30	0.20		0.60	14.30	96.00	113.90	350.90
1984	120.40	68.40	60.80	71.10	0.70						40.10	75.50	437.00
1985	131.80	49.90	65.00		2.00					37.60	26.30	61.20	373.80
1986	55.10	51.80	6.70	5.90	5.50	2.90			0.50	84.70	10.60	19.80	243.50
1987	35.10	35.60	77.00	14.20						14.20	92.70	48.00	316.80
1988	55.60	56.50	56.90	16.70	0.70					8.60	118.20	80.50	393.70
1989	1.00	5.30	74.70		22.30	3.80			2.80	54.90	31.10	15.00	210.90
1990		21.70	1.10	7.80		0.20		4.00	4.20	1.30	45.30	120.20	205.80
1991	58.30	40.40	34.70	32.30	18.70					38.90	52.60	81.10	357.00
1992	11.20	37.40	30.70	19.20	6.60					0.10	26.00	87.90	219.10
1993	52.10	75.10	26.70	14.10	17.80	11.10	0.00	0.00	0.50	0.00	164.60	12.60	374.60
1994	61.70	100.00	20.70	10.60	12.90	8.00				156.70	39.00	75.80	485.40
1995	69.40	1.80	41.80	17.80				0.70		14.70	112.70	49.00	307.90
1996	71.00	74.50	41.20	1.70	3.10			-	15.00	23.10	20.80	124.40	374.80
1997	48.20	98.50	61.50	19.50	3.30	0.00		0.50		18.80	62.10	41.10	353.50
1998	60.70	2.00	101.70	27.00	17.40				27.10	7.00	89.60	96.40	428.90
1999	115.20	66.60	67.50	8.30					35.00	22.00	23.20	42.60	380.40
2000	16.60	18.50	43.10	2.30	0.90					46.60	46.50	45.90	220.40
2001	43.70	30.10	0.20	13.50	7.40						68.00	118.00	280.90
2002	70.60	24.20	66.30	9.90	21.10		1.10		39.90	39.20	98.40	93.70	464.40
2003	78.90	148.00	99.80	76.70	16.80				0.40	16.80	37.80	95.20	570.40
2004	151.40	30.60	3.00	14.80	9.30	0.40				40.72	59.14	67.40	376.76
2005	69.89	59.46	21.10	21.50	19.80		22.70	5.60	40.20	10.40	134.70	29.20	434.55
2006	70.60	39.10	45.90	10.90	0.30	0.60				216.10	30.80	8.70	423.00
2007	5.50	43.60	33.80	0.30	48.10					58.00	70.10	50.20	309.60
2008	62.90	173.20	36.70	48.90	4.50				21.50	3.60	14.00	53.30	418.60
2009	65.80	105.40	67.00	22.30	25.40				23.70	46.00	65.80	132.20	553.60
2010	85.60	85.80	4.50	1.30	0.30	15.10			0.60	81.80	19.00	74.90	368.90
2011	39.20	54.00	7.60	23.20	45.20	0.20	0.00	3.60	0.00	57.20	1.40	49.80	281.40
2012	27.40	62.00	11.00	17.00	13.80	0.00	0.00	0.20	0.00	22.40	26.40	38.40	218.60
2013	67.60	67.20	36.20	5.60	5.20	2.00	0.00	0.00	0.00	14.60	117.80	24.40	340.60
2014	62.00	28.80	30.60	32.20	9.80	0.20	0.00	0.00	11.20	31.00	26.00	134.80	366.60
2015	72.00	74.00	113.00	6.00									265.00
Average	66.77	62.47	47.63	20.34	11.56	4.44	3.68	7.65	13.45	43.83	57.24	65.67	377.86

Πίνακας Π.1 –Μέσο Μηνιαίο Ύψος Υετού σταθμού Νάξου Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, Διεύθυνση Γ/Τομέας Υδρολογίας

Παρατήρηση: Ο Σταθμός δεν λειτούργησε από 3-9-2004 μέχρι 20-2-2005 λόγω προβλεπόμενης μετεγκατάστασης, η οποία τελικά δεν έγινε. Οι τιμές της βροχόπτωσης για τους μήνες αυτούς, θεωρήθηκε ίση με τον μέσο όρο τον προηγούμενων ετών.

Όνομα Πηγαδιού	Κόμβος	Παροχή Άντλησης (m ³ /d)	Παροχή Άντλησης Μοντελοποίησης (m ³ /d)	Χρήση	Ιδιοκτησία	Κατώτερο Όριο Άντλησης (m ³ /d)	Κατώτερο Όριο Άντλησης (Σενάρια 3-4) (m ³ /d)	Ανώτερο Όριο Άντλησης (m ³ /d)
(Π4) 4	887	13	12.9	Άρδευση	Ιδιωτική	14.19	25.8	0
(Π5) 5	897	4	4	Άρδευση	Ιδιωτική	4.4	8	0
(Π7) 7	782	3	2.6	Άρδευση	Ιδιωτική	2.86	5.2	0
(Π12) 12	541	0.4	0.4	Άρδευση	Ιδιωτική	0.44	0.8	0
(Π14) 14	833	1.3	1.3	Άρδευση	Ιδιωτική	1.43	2.6	0
(Π16) 16	787	4	4	Άρδευση	Ιδιωτική	4.4	8	0
(Π18) 18	318	2.3	2.3	Άρδευση	Ιδιωτική	2.53	4.6	0
(Π19) 19	621	7	6.5	Άρδευση	Ιδιωτική	7.15	13	0
(Π22) 22	216	0.3	0.3	Άρδευση	Ιδιωτική	0.33	0.6	0
(Π23) 23	713	5	4.5	Άρδευση	Ιδιωτική	4.95	9	0
(Π26) 26	638	4	3.5	Άρδευση	Ιδιωτική	3.85	7	0
F17	175	60	60	Άρδευση	Ιδιωτική	66	120	0
F18	777	0.4	0.4	Άρδευση	Ιδιωτική	0.44	0.8	0
F28	265	0	0	Άρδευση	Ιδιωτική	0	0	0
F30	90	20	19.5	Άρδευση	Ιδιωτική	21.45	39	0
F34	474	150	-150	Υδρευση	Δημοτική	165	300	0
F36	690	100	-100	Άρδευση	Ιδιωτική	110	200	0
W2	621	60	60	Άρδευση	Δημοτική	66	120	0
W3	112	100	-100	Υδρευση	Δημοτική	110	200	0
W4	163	14	14	Άρδευση	Ιδιωτική	15.4	28	0
W5	359	22	22	Άρδευση	Ιδιωτική	24.2	44	0
W6	626	3	3	Άρδευση	Ιδιωτική	3.3	6	0
W7	292	0.3	0.3	Άρδευση	Ιδιωτική	0.33	0.6	0
W8	420	0.6	0.6	Άρδευση	Δημοτική	0.66	1.2	0
W9	740	100	1000	Άρδευση	Δημοτική	250	2000	0
W10	918	0	0	Άρδευση	Δημοτική	0	0	0
G14/W1	129	350	1000	Υδρευση	Δημοτική	1100	0	0

Πίνακας Π.2 – Καταγεγραμμένα Πηγάδια Καταπόλων από καταγραφές της Περιφέρειας ΟΝοτίου Αιγαίου το 2012-2015 (πηγάδια «Π»), του ΙΓΜΕ (πηγάδια «F») και από την υδρογεωλογική μελέτη του 1997 (πηγάδια «W») και Όρια Μελλοντικής Άντλησης