

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

---

**Διπλωματική εργασία**

**Βέλτιστος σχεδιασμός αναχαίτισης της υφαλμύρισης με χρήση μοντέλων  
προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και MATLAB –Εφαρμογή πεδίου  
στην περιοχή Τροιζήνα Αττικής**



**Βραχνού Κούλλα**

**Εξεταστική Επιτροπή**

Καρατζάς Γεώργιος, Καθηγητής (επιβλέπων)

Νικολαΐδης Νικόλαος, Καθηγητής

Δρ. Βαρουχάκης Εμμανουήλ

Χανιά, Ιούνιος 2018



*Αφιερωμένο στους γονείς μου,*

*Κυριάκο και Στέλλα*

*και στα αδέρφια μου,*

*Μαρία και Γιάννη*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Π. Καρατζά, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την πολύτιμη καθοδήγησή του και την σημαντική συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον κύριο Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφερε, την συνεχή βοήθεια του για την εκπόνηση της εργασίας αυτής, τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε καθώς και για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Επίσης, πολύ σημαντική ήταν η βοήθεια του Δρ. Τριχάκη Ιωάννη, του οποίου η παρουσία και οι συμβουλές του έπαιξαν σημαντικό ρόλο, και τον ευχαριστώ ιδιαίτερος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικολαΐδη Νικόλαο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και τον Επίκουρο Καθηγητή Παρανυχιανάκη Νικόλαο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή ως αναπληρωτής καθηγητής.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ.....	4
1.1    Βασικές έννοιες - Υπόγεια ύδατα και υδροφορείς.....	4
1.1.1    Υπόγεια ύδατα .....	4
1.1.2    Υδροφορείς.....	5
1.2    Διαχείριση υπόγειων υδάτων στην αρχαία Αθήνα.....	5
1.3    Βασικές αρχές αξιοποίησής υδατικών πόρων και εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων .....	6
1.4    Επιπτώσεις από την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων .....	7
1.5    Το φαινόμενο της υφαλμύρισης υπόγειων υδροφορέων.....	8
1.5.1    Ο μηχανισμός της υφαλμύρισης.....	8
1.5.2    Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην Ελλάδα .....	11
1.5.3    Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ-ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	16
2.1    Μαθηματικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης.....	16
2.2    Προσομοίωση κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης .....	18
2.3    Βασικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας.....	18
2.3.1    Μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων .....	19
2.3.2    Μοντέλα μεταφοράς μάζας υπογείων υδάτων.....	19
2.4    Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης.....	21
2.4.1    Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών .....	22
2.4.2    Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	22
2.5    Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης.....	23
2.5.1    Το μοντέλο MODFLOW .....	23
2.5.2    Το μοντέλο MT3DMS .....	23
2.5.3    Το μοντέλο FEFLOW.....	24
2.5.4    Το μοντέλο SUTRA.....	24
2.5.5    Το μοντέλο PTC .....	24
2.5.6    Το μοντέλο FEMWATER .....	25
2.6    Μοντέλα βελτιστοποίησης .....	25
2.6.1    Μη γραμμικά μοντέλα .....	25

2.6.2	Δυναμικά μοντέλα .....	26
2.6.3	Μοντέλα γενετικών αλγόριθμων .....	26
2.6.4	Μοντέλα προσομοιωμένης ανόπτησης .....	26
2.6.5	Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN) .....	26
2.6.6	Μοντέλα τεχνικών κοπής.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΡΤC ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE.....		27
3.1	Βασικές εξισώσεις του μοντέλου ΡΤC.....	27
3.2	Ο αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου ΡΤC .....	28
3.3	Οριακές συνθήκες .....	29
3.3.1	Καθορισμένο υδραυλικό ύψος.....	30
3.3.2	Καθορισμένη ροή .....	30
3.3.3	Ροή εξαρτημένη από το υδραυλικό ύψος .....	30
3.4	Πρόγραμμα Argus ONE.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 –ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....		32
4.1	Γενικά στοιχεία περιοχής μελέτης.....	32
4.2	Χλωρίδα και πανίδα .....	33
4.3	Μετεωρολογικά στοιχεία .....	33
4.4	Γεωλογία – Υδρογεωλογία περιοχής .....	34
4.4.1	Γεωλογία.....	34
4.4.2	Υδρογεωλογία.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΡΤC ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....		37
5.1	Εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο .....	37
5.2	Διαδικασία βαθμονόμησης.....	47
5.3	Αποτελέσματα μοντέλου .....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....		52
6.1	Ορισμός του προβλήματος .....	52
6.2	Προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού .....	54
6.2.1	Δομή μη γραμμικών προβλημάτων .....	55
6.3	Μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων .....	56
6.3.1	Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης .....	56
6.3.2	Μέθοδοι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης .....	57
6.3.3	Μέθοδοι που δεν είναι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης.....	58
6.4	Προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού.....	59
6.4.1	Μαθηματικοί ορισμοί του γραμμικού προγραμματισμού .....	59

6.4.2	Διαδικασία μοντελοποίησης .....	60
6.4.3	Συνθήκες εφαρμογής μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού .....	61
6.5	Μέθοδος Simplex .....	62
6.5.1	Μετατροπή του γραμμικού προβλήματος στην πρότυπη μορφή .....	63
6.5.2	Θεωρητικό υπόβαθρο .....	63
6.6	Επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος με χρήση γραμμικού προγραμματισμού.....	64
6.6.1	Μεθοδολογία αλγόριθμου .....	64
6.6.2	Εφαρμογή του αλγόριθμου στο υπό μελέτη πρόβλημα.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....		79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		82

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη εργασία έχει σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρισης στην περιοχή Τροιζήνα που ανήκει στην περιφέρεια Αττικής, το οποίο δημιουργείται λόγω άντλησης των πηγαδιών της περιοχής.

Αρχικά αναφέρονται κάποια γενικά στοιχεία για τα υπόγεια ύδατα και αναλύεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Έπειτα, γίνεται μια γενική αναφορά στις μεθόδους και στα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται με σκοπό την προσομοίωση των υπόγειων υδάτων, και ακολουθεί μια πιο λεπτομερή ανάλυση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Γίνεται ανάλυση του μοντέλου PTC με το οποίο προσομοιώνεται η ροή των υπόγειων υδάτων στην περιοχή για το χρονικό διάστημα 4 χρόνων και υπολογίζεται η θέση του μετώπου υφαλμύρισης με βάση τα υπάρχοντα πηγάδια άντλησης και τους πραγματικούς ρυθμούς άντλησης.

Στη συνέχεια, γίνεται μια γενική περιγραφή της περιοχής μελέτης και συγκεντρώνονται βασικά γεωγραφικά, γεωλογικά, υδρολογικά και κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής. Έπειτα, δημιουργείται το μοντέλο της περιοχής και πραγματοποιείται βαθμονόμηση της ροής των υπογείων υδάτων με την χρήση δεδομένων υδραυλικών υψών. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές για την εξέταση σεναρίων βελτιστοποίησης που σκοπό έχουν την βελτίωση της κατάστασης της υφαλμύρισης.

Σαν αρχικό σενάριο λαμβάνεται η περίπτωση όπου όλα τα πηγάδια είναι κλειστά και σε κάθε σενάριο διαταράσσεται η παροχή άντλησης των πηγαδιών, καθεμία ξεχωριστά. Εφαρμόζεται η μέθοδος βελτιστοποίησης Simplex μέσω της εντολής linprog στο πρόγραμμα Matlab και εξάγεται ο πίνακας απόκρισης A που περιέχει την μεταβολή των υδραυλικών υψών σε σχέση με την μεταβολή των παροχών άντλησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο αλγόριθμος να συγκλίνει δηλαδή μέχρι τα τελευταία δύο αποτελέσματα να είναι πολύ κοντά (ανάλογα με το κριτήριο σύγκλισης που τέθηκε).

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ο αλγόριθμος συγκλίνει στο 3<sup>ο</sup> βήμα. Με αυτά τα αποτελέσματα, σε 4 χρόνια, το μέτωπο της υφαλμύρισης θα μετατοπιστεί προς τα έξω όπως δείχνουν τα σχετικά σχήματα. Συμπεράσματα και σχολιασμός των αποτελεσμάτων παρατίθενται στο τέλος της εργασίας.

## ABSTRACT

This specific project aims to limit the phenomenon of salinization in the area of municipality Troizina, that belongs to the Attiki region, which is created due to the pumping of the wells of the area.

Initially, some general groundwater data are reported and the phenomenon of salinization is analyzed. Then, a general reference is made to the methods and numerical models used to simulate groundwater, followed by a more detailed analysis of finite element and finite difference methods. An analysis is made of the PTC model which simulates the groundwater flow in the area for a period of 4 years and the position of the salinization front is calculated based on the existing pumping wells and the actual pumping rates.

Subsequently, a general description of the study area is made and the geographic, geological, hydrological and climatological data of the area are gathered. Afterward, the model of the area is created and the ground water flow is calibrated using hydraulic heights data. The simulation results are used as initial values for optimization scenarios, which are made to improve the salinization condition.

As an initial scenario is the case where all the wells are closed and in each scenario the pumping flow of the wells is disrupted, each separately. The Simplex optimization method is applied through the linprog command in the Matlab program and the response table A, containing the change of hydraulic heights relative to the change of pumping rates, is derived. The process is repeated until the algorithm converges, until the last two results are similar (depending on the convergence criterion set).

In this problem, the algorithm converges at the third step. With these results, in 4 years, the salinization front will be shifted outward, as the figures show. Conclusions and commentary on the results are listed at the end of the project.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος, αναγκαίος για την επιβίωση του ανθρώπου, με αυτονόητη σημασία και αναγκαιότητα στη ζωή. Τα τελευταία χρόνια, το αγαθό αυτό βρίσκεται σε ανεπάρκεια οδηγώντας έτσι σε μελέτες για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκμετάλλευση και αξιοποίηση κάθε μορφής του στον πλανήτη. Έτσι, προκειμένου να καλυφθούν διάφορες ανάγκες προς επιβίωση, ο άνθρωπος ενσωμάτωσε μια άλλη έννοια στη ζωή του, μια άλλη μορφή νερού, τα υπόγεια ύδατα. **Η σημασία των υπόγειων υδάτων** είναι τεράστια αφού τα τελευταία χρόνια η εκμετάλλευσή τους αυξάνεται ραγδαία. Παρόλο που το κόστος άντλησης τους είναι μεγάλο, θεωρείται αμελητέο μπροστά στο αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την εκμετάλλευση επιφανειακών πόρων όπως είναι οι υδραυλικές κατασκευές, αγωγοί μεταφοράς και φράγματα. Εξαιτίας του τρόπου λειτουργίας των υπόγειων υδάτων, βραχυχρόνια δεδομένα μπορούν να δώσουν μια ικανοποιητική προσέγγιση της συμπεριφοράς τους, γεγονός που ευνοεί την έρευνα και οδηγεί σε περαιτέρω μελέτη τους. Πιο συγκεκριμένα, η αναγνώριση της ανάγκης εκμετάλλευσης υπόγειων υδατικών πόρων οδήγησε στην καλύτερη εκπαίδευση και εξειδίκευση επιστημόνων στο συγκεκριμένο αντικείμενο, με αποτέλεσμα την επίλυση περισσότερων προβλημάτων λειτουργίας των υπόγειων υδροφορέων. Έτσι σήμερα, ο τομέας των υπόγειων υδάτων απασχολεί σε μεγάλο βαθμό την επιστήμη και βοηθά στην κάλυψη αναγκών του ανθρώπου με την κατάλληλη αξιοποίηση των πόρων αυτών.

Τα τελευταία χρόνια, το έντονο ενδιαφέρον για άριστης ποιότητας νερό και προστασίας των υδατικών πόρων και η διαθεσιμότητα, το χαμηλό κόστος και η υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, συνέβαλαν στην εξέλιξη των αριθμητικών μοντέλων. Τα **αριθμητικά μοντέλα**, που προσομοιώνουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων, διανύουν την πέμπτη δεκαετία της ύπαρξης τους και διαδραματίζουν έναν σπουδαίο ρόλο στη σημερινή εποχή, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις πρακτικού ενδιαφέροντος δεν είναι εφικτή μια αναλυτική λύση [1]. Η χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης παρέχει ισχυρά εργαλεία για την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων διαχείρισης φυσικών πόρων και οδηγεί στην αξιολόγηση ή την πρόβλεψη των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της απόσυρσης ύδατος και της μεταφοράς ρύπων.

Το **φαινόμενο της υφαλμύρισης** αυξάνεται αρκετά τα τελευταία χρόνια και αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο δεδομένου ότι το 60 με 70% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε τέτοιου είδους περιοχές. Ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων και ο κίνδυνος αύξησης του φαινομένου αυτού είναι άμεσα συνδεδεμένος με την μείωση των ποσοτήτων των φρέσκων

υδάτων. Έντονο πρόβλημα από το φαινόμενο της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων παρατηρείται και στην Ελλάδα, παρουσιάζοντας μάλιστα αυξητική τάση. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλές παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας αλλά κυρίως στα νησιά, η στάθμη στους υπόγειους υδροφορείς μειώνεται κατά 5 μέτρα ετησίως, ενώ το βάθος άντλησης νερού φτάνει και τα 300 μέτρα. Επομένως, το φαινόμενο της υφαλμύρισης αποτελεί απόδειξη της άναρχης και ανορθολογικής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού [2].

Σύμφωνα με τον κ. Μαντόγλου Αριστοτέλη, αναπληρωτή καθηγητή στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Ε.Μ.Π., στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υπόγειων υδάτων, υπάρχει η ανάγκη να καθοριστούν οι βέλτιστες ποσότητες που μπορούν να αντληθούν από τους υδροφορείς. Για να υπολογιστεί με ακρίβεια η μέγιστη βιώσιμη άντληση σαν ποσοστό της τροφοδοσίας του υδροφορέα, πρέπει να κατανοηθεί καλά η λειτουργία του φυσικού συστήματος, να περιγραφεί με μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης και να γίνει ο **βέλτιστος σχεδιασμός της υφαλμύρισης** με κατάλληλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής άντλησης από τον υδροφορέα υπό τον περιορισμό ότι δεν θα κινδυνεύουν από υφαλμύριση οι γεωτρήσεις [3].

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετάται η περιοχή της Τροιζήνας Αττικής ως προς την ροή των υπόγειων υδάτων και πραγματοποιείται έρευνα γύρω από το φαινόμενο της υφαλμύρισης ανάλογα με τους ρυθμούς άντλησης από υπάρχοντα πηγάδια της περιοχής. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η προσομοίωση της υπόγειας ροής υδάτων στην περιοχή της Τροιζήνας Αττικής με το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code) και ο βέλτιστος σχεδιασμός αναχαιτίσης της υφαλμύρισης στην περιοχή με χρήση μοντέλων βελτιστοποίησης και Matlab.

Η εργασία απαρτίζεται σε επτά κυρίως κεφάλαια με πρώτο κεφάλαιο κάποια εισαγωγικά, γενικά στοιχεία για τα υπόγεια ύδατα και το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μαθηματικά, αριθμητικά μοντέλα και μοντέλα βελτιστοποίησης για την προσομοίωση της ροής υπόγειων υδάτων και αναχαιτίσης του φαινομένου της υφαλμύρισης. Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει αναλυτική παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία, PTC, και βασικών αρχών του προγράμματος Argus One. Ακόμη, στο κεφάλαιο τέσσερα, περιγράφεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης (Τροιζήνα Αττικής) και οι συνθήκες που επικρατούν εκεί. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μοντελοποίηση της ροής με την χρήση του μοντέλου που περιγράφεται στο κεφάλαιο τρία και στο έκτο κεφάλαιο μελετώνται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης για τον βέλτιστο σχεδιασμό αναχαιτίσης της υφαλμύρισης στην περιοχή μελέτης και παρουσιάζονται τα

σχετικά αποτελέσματα. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των συμπερασμάτων σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν σε κάθε στάδιο της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

### 1.1 Βασικές έννοιες - Υπόγεια ύδατα και υδροφορείς

#### 1.1.1 Υπόγεια ύδατα

Από μια πρώτη ματιά, θα έλεγε κανείς πως η ποσότητα νερού που υπάρχει στην γη είναι απεριόριστη και ικανή να καλύψει κάθε είδος ανάγκης. Δυστυχώς όμως, η πραγματική ποσότητα νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί είναι ελάχιστη με το μεγαλύτερο ποσοστό νερού που υπάρχει στον πλανήτη, και συγκεκριμένα το 97,3%, να είναι αλμυρό νερό και είναι ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση χωρίς την κατάλληλη επεξεργασία. Από το υπόλοιπο ποσοστό νερού (2,7%), το 2,1% αποτελεί χιόνια και πάγους και μόλις το 0,6% είναι το εκμεταλλεύσιμο μέρος του συνόλου. Από αυτό το ελάχιστο ποσοστό, το 98% αποτελεί τα υπόγεια ύδατα, αποθέματα δηλαδή γλυκού νερού που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης. Ο πιο συνήθης τρόπος άντλησης τους είναι τα πηγάδια, ή αλλιώς γεωτρήσεις για σκοπούς άρδευσης και για οικιακή και βιομηχανική χρήση. Ωστόσο, πρόβλημα λόγω υψηλού κόστους παρουσιάζεται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται άντληση από μεγάλα βάθη (>800m), μιας και η μισή περίπου ποσότητα των υπόγειων νερών βρίσκεται αποθηκευμένη σε αυτά τα βάθη [4].

Εκτός από τα υπόγεια νερά, οι υδατικοί πόροι αποτελούνται και από τα επιφανειακά ύδατα. Οι δύο αυτοί όροι συνδέονται άμεσα μέσω της εξάρτησης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων από τα επιφανειακά και της υδραυλικής επικοινωνίας που υπάρχει μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, οποιαδήποτε μεταβολή στις υδραυλικές συνθήκες των επιφανειακών υδατικών πόρων έχει άμεσες επιπτώσεις στις συνθήκες λειτουργίας των υπόγειων υδατικών πόρων. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά κινείται αργά σε διάφορες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει και πάλι στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με τη διαπνοή των φυτών [5].

Όμως, αν και υπάρχει αυτή η άμεση συσχέτιση ως προς την διαχείριση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, οι διαφορές ως προς την υδραυλική λειτουργία τους είναι αισθητές. Γιαυτό το λόγο, κρίνεται αναγκαίος ο ξεχωριστός τρόπος ερμηνείας, μελέτης και προσέγγισης των υδατικών αυτών πόρων και παρουσιάζεται μεγάλο ενδιαφέρον στον τομέα διαφορετικής διαχείρισής τους.

### 1.1.2 Υδροφορείς

Βασικό στοιχείο κατανόησης της λειτουργίας των υπόγειων υδάτων αποτελούν οι **υδροφορείς**. Πρόκειται για γεωλογικούς σχηματισμούς εντός των οποίων αποθηκεύεται και μεταφέρεται μια αξιόλογη ποσότητα νερού με υδρολογικά σημαντικό ρυθμό [6]. Αποτελούνται από στερεό εδαφικό υλικό και κενό χώρο στον οποίο περιέχεται νερό. Για την μελέτη της κίνησης του υπόγειου νερού εντός των υδροφορέων, σημαντικό ρόλο παίζει το πορώδες. Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες, τόσο πιο γρήγορα κινείται το νερό. Ακόμα σημαντικότεροι όροι είναι το δαιδαλώδες των πόρων, η διασύνδεση δηλαδή των κενών αυτών χώρων, και το ενεργό πορώδες, το ποσό δηλαδή των διάκενων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι κίνηση του νερού πραγματοποιείται μόνο στις περιπτώσεις όπου οι κενοί χώροι ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας έτσι "μονοπάτια" μέσα από τα οποία ρέει το νερό. Στα διάκενα τα οποία δεν ενώνονται μεταξύ τους, σε αυτά δηλαδή που δεν συνεισφέρουν στη ροή του νερού, παραμένει το νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% για άργιλο και φτάνει μέχρι και το 20% για χαλίκια [5].

Όσον αφορά τις κατηγορίες των υδροφορέων, χωρίζονται σε δύο κύριους τύπους, τους ελεύθερους και τους περιορισμένους υδροφορείς. Ελεύθεροι ή αλλιώς φρεάτιοι υδροφορείς είναι οι υδροφορείς με την πάνω επιφάνεια ελεύθερη και την κάτω να περιβάλλεται από αδιαπέραστο στρώμα, ενώ περιορισμένοι ή αλλιώς υδροφορείς υπό πίεση είναι αυτοί που και οι δύο επιφάνειες τους περιβάλλονται από αδιαπέραστο εδαφικό στρώμα (π.χ. άργιλος) [4].

## 1.2 Διαχείριση υπόγειων υδάτων στην αρχαία Αθήνα

Στην αρχαία Αθήνα, εκτός από τα διάφορα τεχνικά έργα που αναπτύχθηκαν, ο τότε πολιτισμός ανέπτυξε νόμους και θεσμούς για την διαχείριση των υδατικών πόρων ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες σε νερό χωρίς να επιβραβεύεται η τεμπελιά. Ο Σόλωνας που ήταν εξουσία το 594 π.Χ. ήταν αυτός που εισήγαγε τους πρώτους γνωστούς κανόνες και διαμόρφωσε ένα νομικό σύστημα το οποίο περιγράφεται από τον Πλούταρχο στο έργο του 'Σόλων'. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με τα υπόγεια ύδατα, σε περιοχές που δεν τροφοδοτούνταν με αρκετό νερό από τα ποτάμια, λίμνες και πηγές, οι περισσότεροι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν πηγάδια. Έτσι, ο Σόλωνας διεξήγαγε ένα νόμο σύμφωνα με τον οποίο [6]:

- εάν υπήρχε ένα δημόσιο πηγάδι σε απόσταση τεσσάρων σταδίων (710 μέτρα) όλοι θα χρησιμοποιούσαν αυτό
- εάν το πηγάδι ήταν μακρύτερα θα έπρεπε να ανοιχτεί πηγάδι με ιδιωτικά μέσα

- εάν είχαν σκάψει για δεκαοκτώ μέτρα και δεν είχαν βρει νερό, είχαν το δικαίωμα να παίρνουν μια υδρία (20 λίτρα) δύο φορές την ημέρα από τους γείτονές τους

Επιπλέον, για να διασφαλίζεται η τήρηση των νόμων αυτών και των κανονισμών, υπεύθυνος ορίστηκε ένας συγκεκριμένος δημόσιος αξιωματούχος, του οποίου μάλιστα η θέση ήταν τόσο σημαντική που ήταν από τα λίγα αξιώματα που δινόταν με ψηφοφορία και όχι με κλήρωση. Το αξίωμα αυτό είχε καταλάβει ο Θεμιστοκλής.

Αργότερα, όταν τα δημόσια έργα αυξήθηκαν με υδραγωγεία και κρήνες, τα ιδιωτικά έργα (πηγάδια, δεξαμενές) άρχισαν να εγκαταλείπονται. Δεδομένης της αναγκαιότητάς τους σε κατάσταση πολέμου οι ιδιοκτήτες τους υποχρεώθηκαν από κανονισμούς να διατηρούν τα πηγάδια σε καλή κατάσταση και έτοιμα προς χρήση [6].

### 1.3 Βασικές αρχές αξιοποίησής υδατικών πόρων και εκμετάλλευση υπόγειων υδάτων

Η εκμετάλλευση των υδατικών πόρων δεν μπορεί παρά να στηρίζεται σε προχωρημένη γνώση των ποιοτικών και ποσοτικών χωροχρονικών μεταβολών τους. Τέσσερις βασικοί παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας νερού σε ένα υδραυλικό σύστημα:

- Η μέση ετήσια επιφανειακή και υπόγεια απορροή, καθώς και η μέση ετήσια αναπλήρωση του υπόγειου νερού
- Η τεχνοοικονομική δυνατότητα άντλησης του υπόγειου νερού
- Η ποιότητα του νερού, υπόγειου ή επιφανειακού, στην υδρολογική λεκάνη και κοντά σε αυτήν
- Η νομοθεσία για το νερό, υπόγειο ή επιφανειακό, μέσα στην υδρολογική λεκάνη

Όσον αφορά την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, υπάρχουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, δεν είναι απαραίτητη η κατασκευή ταμιευτήρων, αφού οι υδροφορείς πρακτικά συμπεριφέρονται ως ταμιευτήρες υπερετήσιας εξίσωσης. Πολλές φορές οι υδροφορείς αναπτύσσονται κάτω από τις εκτάσεις όπου γίνεται η κατανάλωση του νερού, οπότε αποφεύγεται η κατασκευή μεγάλων έργων μεταφοράς. Ακόμη, οι γεωτρήσεις εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών μπορούν να κατασκευάζονται και να λειτουργούν αυτόνομα και ανεξάρτητα, κάτι που ευνοεί τη σταδιακή ανάπτυξη του συστήματος εκμετάλλευσης. Επίσης, εξαιτίας της αργής κίνησης του υπόγειου νερού αλλά και της πολύ μεγάλης αποθηκευτικής ικανότητας των υδροφορέων, ένα περιορισμένης χρονικής κλίμακας δείγμα δεδομένων είναι δυνατό να δώσει μια σαφή εικόνα των αθροιστικών επιπτώσεων από

μακροχρόνιες μεταβολές. Τέλος, κατά κανόνα η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι καλύτερη από αυτήν του επιφανειακού.

Από την άλλη μεριά, σημαντικό μειονέκτημα της εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών είναι η απαραίτητη άντληση του νερού, συχνά από μεγάλα βάθη, η οποία συνεπάγεται σημαντική ενεργειακή, άρα και οικονομική, επιβάρυνση. Έτσι, για μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη υδατικών πόρων, το συνολικό κόστος κατασκευής και λειτουργίας των έργων εκμετάλλευσης υπόγειου νερού διαμορφώνεται σε πολύ μεγαλύτερα επίπεδα από τα αντίστοιχα έργα εκμετάλλευσης επιφανειακού νερού [6].

Συνολικά, οι υπόγειοι υδατικοί πόροι δεν πλεονεκτούν απόλυτα απέναντι στους επιφανειακούς, αλλά επικρατεί η άποψη ότι αν σε μια περιοχή συνυπάρχουν, τότε η βέλτιστη λύση θα προέλθει από έναν ορθολογικό συνδυασμό και των δύο.

#### **1.4 Επιπτώσεις από την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων**

Οι υδατικοί πόροι αποτελούν ένα φλέγον ζήτημα στις μέρες μας και πρόκειται για ένα ευαίσθητο περιβαλλοντικό παράγοντα, ο οποίος πρέπει να αντιμετωπίζεται με σοβαρότητα και υπευθυνότητα όσον αφορά την ανθρώπινη παρέμβαση. Πρέπει δηλαδή να ακολουθηθεί μια μεθοδολογία που να διασφαλίζει τη διατήρηση και τη βέλτιστη εκμετάλλευση των υδατικών πόρων. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται μια ορθολογική διαχείριση που να βασίζεται σε στοιχεία που αφορούν στον ενεργητικό και παθητικό ρόλο των υδατικών πόρων στα πλαίσια του πολυδιάστατου χώρου στον οποίο συμμετέχουν. Δυστυχώς όμως, πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες και ο τρόπος εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, οδηγούν σε άμεσες και έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα, που αποτελούν κύριο θέμα της παρούσας εργασίας, οι ανθρώπινες παρεμβάσεις έχουν πολύ σοβαρά αποτελέσματα. Η αλόγιστη εκμετάλλευση των υδροφορέων εγκυμονεί πολλούς κινδύνους καθώς η άντληση πέρα από τα όρια της φυσικής ανανέωσης, οδηγεί σε σταδιακή μείωση των υδατικών αποθεμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την οικονομικά απαγορευτική εκμετάλλευσή τους, λόγω μεγάλης πτώσης της στάθμης, ή ακόμα και την πλήρη εξάντλησή τους. Παρόμοια αποτελέσματα μπορεί να προκύψουν και από τη ρύπανση των υδροφορέων είτε από αστικό, είτε από αγροτικό, είτε από το βιομηχανικό περιβάλλον. Το πρόβλημα της ρύπανσης γίνεται ακόμα πιο έντονο εξαιτίας των μικρών ταχυτήτων ροής των υπόγειων υδάτων, με αποτέλεσμα ο τελικός χρόνος απορρύπανσης τους να είναι πολύ μεγάλος.

Γενικά, η λανθασμένη αντίληψη που δυστυχώς επικρατεί οδηγεί στην υποτίμηση της σημασίας και της δυνατότητας συμμετοχής των υπόγειων υδατικών πόρων στην κάλυψη των υδατικών αναγκών,

και προωθεί την αλόγιστη εκμετάλλευση και ρύπανση των υδροφορέων. Η αυξανόμενη έλλειψη υδατικών πόρων έχει φέρει στο προσκήνιο μια μεγάλη σύγκρουση που αφορά στους δύο ρόλους του νερού, ως εμπορεύσιμο αγαθό που υπηρετεί τους οικονομικούς στόχους της μεγαλύτερης αγροτικής παραγωγικότητας και ως κρίσιμος παράγοντας ζωής για όλα τα είδη και τις φυσικές κοινότητες. Περισσότερο νερό για τις ανθρώπινες ανάγκες σημαίνει λιγότερο νερό για τη συντήρηση των οικοσυστημάτων.

Για τους παραπάνω λόγους, κρίνεται αναγκαία η ορθολογική αντίληψη στην διαχείριση των υδατικών πόρων και συγκεκριμένα των υπόγειων υδάτων, μέσω της οποίας να μην να εξυπηρετούνται οι ανθρώπινες ανάγκες, αλλά και να διασφαλίζονται η προστασία και ο σεβασμός του περιβάλλοντος [7].

## **1.5 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης υπόγειων υδροφορέων**

### **1.5.1 Ο μηχανισμός της υφαλμύρισης**

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Περιβαλλοντικό Οργανισμό (European Environmental Agency, EEA), με τον όρο υφαλμύριση περιγράφεται το φυσικό φαινόμενο το οποίο προσβάλλει όλους τους παράκτιους υπόγειους υδροφορείς. Στις παράκτιες περιοχές, σε περίπτωση μείωσης της στάθμης του γλυκού νερού, το θαλασσινό νερό έρχεται σε επαφή με αυτό, χωρίς όμως να αναμειγνύονται λόγω διαφορετικής πυκνότητας, καθιστώντας το ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση.

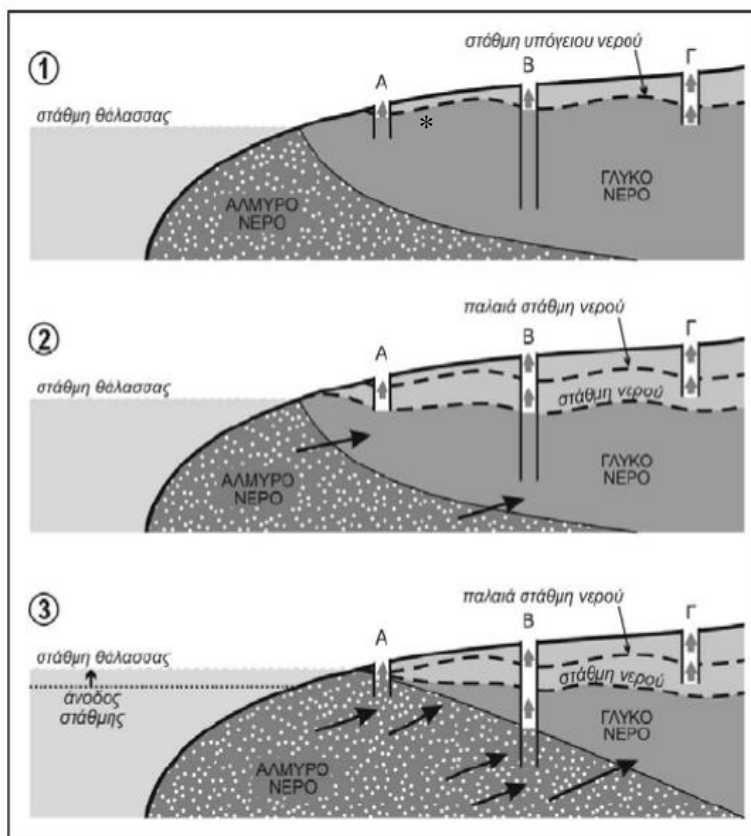
Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια απότομη αύξηση των υπεραντλήσεων, με σκοπό την κάλυψη υδατικών αναγκών της αγροτικής και κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης, σε περιοχές όπου οι επιφανειακοί υδατικοί πόροι δεν επαρκούν ή απαιτούν μεγάλο κόστος εκμετάλλευσής τους. Η υπεράντληση αυτή οδηγεί σε εξάντληση των υδατικών πόρων και σε ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων λόγω παρουσίας του φαινομένου της υφαλμύρισης, δηλαδή της διείσδυσης θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς [8].

Όταν η εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων οδηγεί σε αλλαγές της δυναμικής ισορροπίας της διεπιφάνειας θαλασσινού και γλυκού νερού, οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται σε υψηλό κίνδυνο θαλάσσιας διείσδυσης. Υπερεκμετάλλευση ενός υπόγειου υδροφορέα συμβαίνει όταν οι απολήψεις υπερβαίνουν τον εμπλουτισμό και αυτό οδηγεί σε ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου νερού ή σε αντιστροφή της διεύθυνσης ροής [8].

Στο Σχήμα 1, φαίνεται η υφαλμύριση του γλυκού νερού που οφείλεται σε υπεράντληση στη στεριά, κατά τα διάφορα στάδια. Αρχικά, στο 1<sup>ο</sup> στάδιο υπάρχει ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού



νερού, και από τις τρεις γεωτρήσεις, Α, Β και Γ, που υπάρχουν στην ακτή αντλείται αποκλειστικά γλυκό νερό. Στο 2<sup>ο</sup> στάδιο η στάθμη του γλυκού νερού έχει κατέβει εξαιτίας της άντλησης από τις τρεις γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα το αλμυρό νερό να εισχωρεί όλο και περισσότερο στη στεριά. Τέλος, σε συνδυασμό με την άνοδο της θάλασσας, στο 3<sup>ο</sup> στάδιο αντλείται αποκλειστικά αλμυρό νερό από τις γεωτρήσεις Α και Β.



Σχήμα 1:Στάδια του φαινομένου της υφαλμύρισης λόγω υπεράντλησης [8].

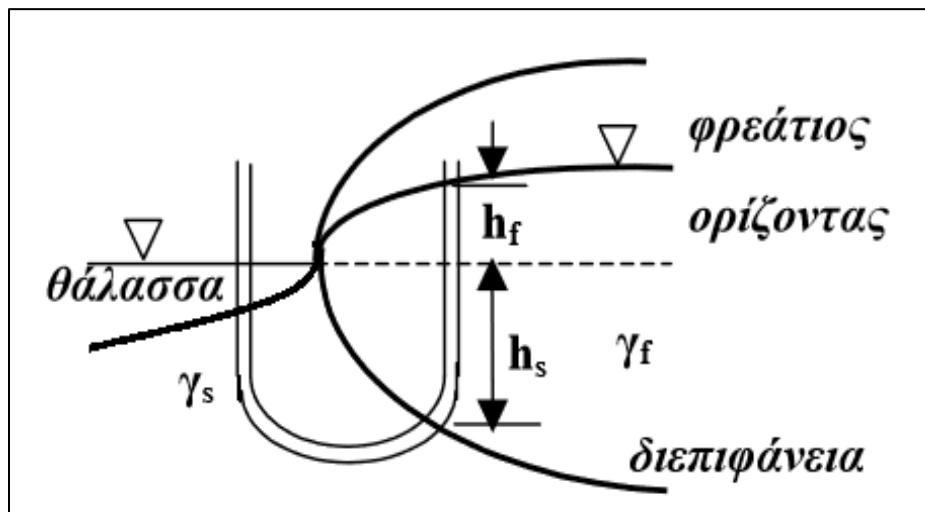
Η υφαλμύριση έχει αρνητικές επιπτώσεις στις περιοχές όπου εμφανίζεται και οδηγεί σε κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα. Επηρεάζεται άμεσα ο τουρισμός, η γεωργία και η βιομηχανία με αποτέλεσμα το μαρασμό των περιοχών αυτών. Επίσης φυσικό αποτέλεσμα της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων αποτελεί η ερημοποίηση των θιγόμενων περιοχών, η οποία τις καθιστά ακατάλληλες για διαβίωση. Σημαντικό είναι επίσης και το γεγονός πως για την πλήρη απορρύπανση του γλυκού νερού απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τον μηχανισμό της υφαλμύρισης εξήγησαν και ερμήνευσαν πριν από ένα περίπου αιώνα οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901) οι οποίοι βρήκαν ότι η στάθμη του θαλασσινού νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα Ghyben-Herzberg,

προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η σφήνα του θαλασσινού νερού θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit. Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί τον πόδα της αλμυρής σφήνας. Ορίζοντας  $h_f$  το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και  $h_s$  τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_s$  τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και  $\delta$  το λόγο  $\gamma_f/(\gamma_s - \gamma_f)$ , ισχύει [9]:

$$h_s \cdot \gamma_s = (h_f + h_s) \cdot \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot h_f \equiv \delta \cdot h_f$$

Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρεάτια παρατήρησης και μπορεί να εφαρμοστεί για περιορισμένους και φρεάτιους υδροφορείς. Για πυκνότητα γλυκού νερού  $\rho_f = 1,000 \text{ gr/cm}^3$  και πυκνότητα αλμυρού νερού  $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$ , και θέτοντας  $h_s = \xi$ , υπολογίζεται ότι:  $\xi = 40h_f$ .



Σχήμα 2: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg για τον μηχανισμό της υφαλμύρισης [9].

Στην πραγματικότητα, για την διεπιφάνεια γλυκού-θαλασσινού νερού ισχύουν τα εξής [9]:

- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής αλλά υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.

- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης.

#### 1.5.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης στην Ελλάδα

Η υφαλμύριση τείνει να αποτελέσει ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα στην Ελλάδα, με άμεσο κίνδυνο για την ανάπτυξη των παράκτιων περιοχών της, γεγονός που οφείλεται στα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά του Ελλαδικού χώρου. Πιο συγκεκριμένα, στην ηπειρωτική Ελλάδα και γενικότερα στην ενδοχώρα, υπάρχουν οροσειρές ως αποτέλεσμα της γεωτεκτονικής εξέλιξης της Ελλάδας, η παρουσία των οποίων ευνοεί τις έντονες βροχοπτώσεις, κυρίως κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση των παράκτιων περιοχών, οι οποίες είναι πεδινές και χρησιμοποιούνται κυρίως για καλλιέργειες. Σε αυτές τις περιοχές το κλίμα είναι πιο ήπιο και το ύψος βροχής είναι μικρότερο συγκριτικά με τις ορεινές περιοχές. Ακόμη, στα νησιά της Ελλάδας, το ύψος βροχής είναι μικρότερο σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη περιοχή. Επομένως, η άνιση αυτή κατανομή των υδατικών πόρων, σχετίζεται άμεσα με προβλήματα που αφορούν τα ύδατα και το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Ο βασικότερος λόγος που το πρόβλημα αποκτά μεγάλες διαστάσεις στην Ελλάδα, βασίζεται σε δύο κύριους παράγοντες. Πρώτον, στην Ελλάδα παρουσιάζεται ένα σχετικά μεγάλο μήκος ακτογραμμής που ξεπερνά τα 15.000 km και οδηγεί στην ανάπτυξη του φυσικού φαινομένου της υφαλμύρισης. Δεύτερον, το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο έντονο εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, του τουρισμού και των τακτικών καλλιεργειών στις παραθαλάσσιες περιοχές, με κυριότερο ανθρωπογενή παράγοντα την άναρχη διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας και την ανεξέλεγκτη σπατάλη νερού κυρίως στον αγροτικό τομέα μέσω παράνομων γεωτρήσεων.

Η ανεξέλεγκτη άντληση χωρίς ουσιαστική πολιτική ελέγχου, χωρίς υδρολογικές μελέτες, χωρίς αυστηρό θεσμικό πλαίσιο, οδηγεί σε σπατάλη των πηγών της χώρας οι οποίες κινδυνεύουν από υφαλμύριση. Το νομοθετικό πλαίσιο που ισχύει δεν δίνει λύση στα προβλήματα και η επιστημονική κοινότητα είναι διχασμένη. Σύμφωνα με την εφημερίδα Καθημερινή, τα πολύτιμα αποθέματα υπόγειου νερού κινδυνεύουν να εξαφανιστούν από τις 170.000 γεωτρήσεις που υπάρχουν και λειτουργούν στη χώρα μέχρι το 2007, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται σε αυτόν τον αριθμό οι παράνομες, που κυρίως έχουν γίνει στην Αττική κατά την περίοδο της μεγάλης λειψυδρίας. Οι νομοί στην Ελλάδα με τις περισσότερες γεωτρήσεις για αγροτική χρήση είναι η Αργολίδα με περισσότερες από 24.000 γεωτρήσεις, αν και δεν είναι όλες ενεργές, η Κορινθία, η Βοιωτία, Φθιώτιδα, η Άρτα, η Καρδίτσα, η Λάρισα και η Μαγνησία. Αντίστοιχα, οι νομοί με τις περισσότερες γεωτρήσεις για αστική χρήση είναι η Αττική, η

Θεσσαλονίκη, η Σύρος, η Πάρος, το Λασίθι και η Νάξος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα νησιά έχουν γίνει «σουρωτήρια», αλλά συγκεκριμένα στις Κυκλάδες οι ιδιωτικές γεωτρήσεις είναι πολλαπλάσιες των δημοτικών. Ακόμη, σε πολλές περιοχές τα προβλήματα από την υπεράντληση είναι ήδη ορατά με τους επιστήμονες του ΙΓΜΕ να εκτιμούν ότι οι παράκτιοι υδροφόροι ορίζοντες κινδυνεύουν άμεσα από την διείσδυση της θάλασσας και όσο το καθεστώς αδειοδότησης και ελέγχου των γεωτρήσεων παραμένει ελαστικό και ανεξέλεγκτο, τόσο η κατάσταση με τα χρόνια θα επιδεινώνεται χωρίς να μπορεί να αναστραφεί [10].

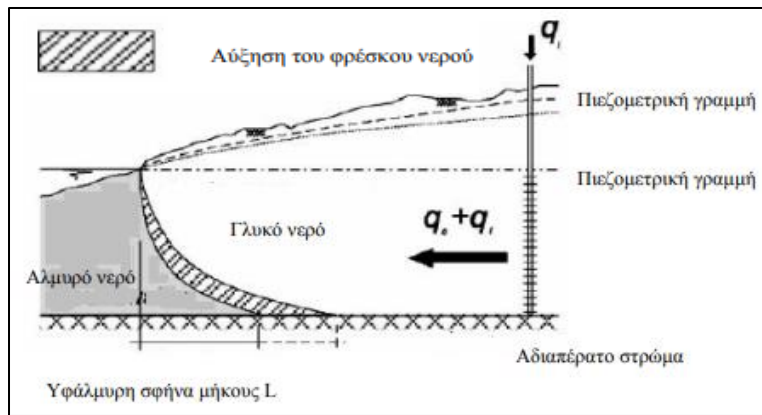
Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στις περισσότερες περιπτώσεις αναγνωρίζεται από του υπεύθυνους υδρογεωλόγους και μηχανικούς. Συνήθως όμως είναι ανάγκη η έκτασή του, λόγω έλλειψης στοιχείων. Δεν είναι δηλαδή εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Κατά την εισροή της θάλασσας σε έναν υδροφορέα, συνθήκες μόνιμης ροής στην πραγματικότητα δεν αποκαθίστανται εύκολα. Επιπλέον, τις περισσότερες φορές το πρόβλημα φθάνει σε ανεπίτρεπτα όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν παίρνονται εγκαίρως. Η εφαρμογή των μέτρων αυτών είναι συνήθως συνδεδεμένη με οικονομικούς, κοινωνικούς, νομικούς και πολιτικούς παράγοντες και αυτό δυσχεραίνει ιδιαίτερα το πρόβλημα.

Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως είναι ανάγκη να αντιμετωπιστεί η υφαλμύριση άμεσα, καθώς λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του προβλήματος, όσο δε γίνονται ενέργειες για τη λύση του, τόσο πιο δύσκολη καθίσταται η αντιμετώπιση του. Η καταγραφή όλων των υφάλμυρων περιοχών της χώρας, σε συνδυασμό με τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων του τόπου είναι ίσως το πρώτο και απαραίτητο βήμα προς τη διαχείριση του προβλήματος.

### 1.5.3 Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης

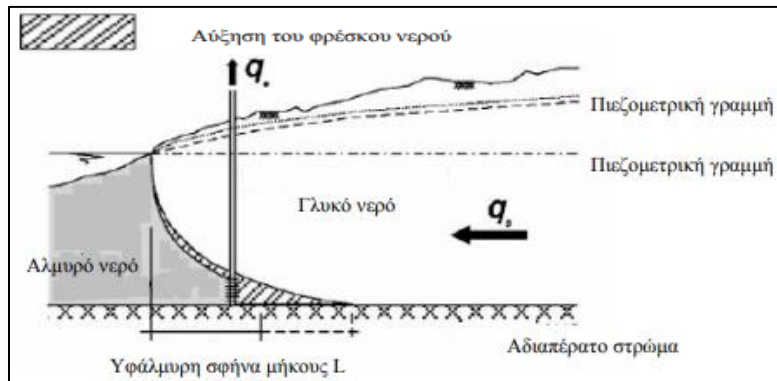
Όπως έχει προαναφερθεί, είναι πολύ σημαντικό να αντιμετωπιστεί άμεσα το φαινόμενο της υφαλμύρισης και να γίνει γρήγορα αντιληπτό πως το πρόβλημα είναι τεράστιο και επιδεινώνεται όλο και περισσότερο όσο περνάει ο καιρός. Πρέπει λοιπόν να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισης ώστε να εμποδιστεί όσο το δυνατόν περισσότερο το φαινόμενο αυτό προτού οδηγηθεί σε μη αντιστρέψιμη κατάσταση. Κάποιες προτάσεις αντιμετώπισης είναι οι εξής [11]:

- Έγχυση καθαρού νερού, ή ακόμα και επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων μέσω φρεατίων σε μεγάλο βάθος, σε περιοχές που παρουσιάζουν πρόβλημα υφαλμύρισης. Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στο Ισραήλ και στο Λος Άντζελες.



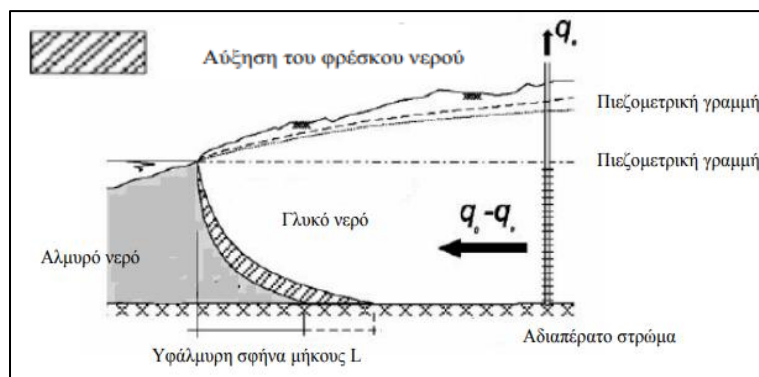
Σχήμα 3: Έγχυση καθαρού νερού [11]

- Εξαγωγή του αλμυρού και του υφάλμυρου νερού. Αυτή η λύση όμως ενδέχεται να οδηγήσει σε χαμηλές πιεζομετρικές στάθμες ιδιαίτερα σε ρηχούς υδροφορείς, ενώ η απόθεση του εξαγόμενου νερού μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα.



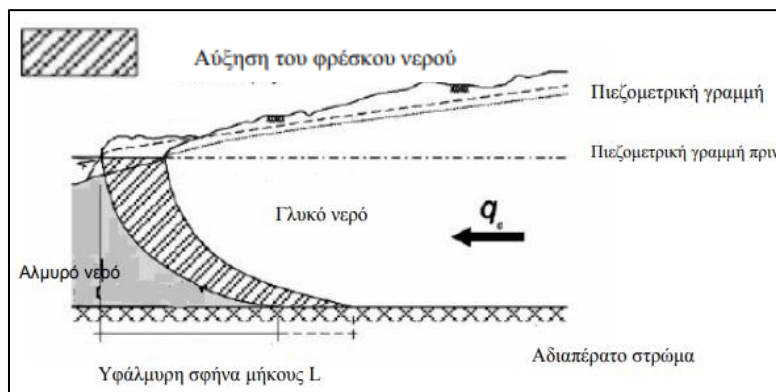
Σχήμα 4: Εξαγωγή αλμυρού και υφάλμυρου νερού [11]

- Μεταβολή του ρυθμού άντλησης ή αλλαγή θέσης των φρεατίων. Ο ρυθμός άντλησης θα πρέπει να παραμένει σταθερός, ενώ τα φρεάτια πρέπει να είναι καλά διανεμημένα ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα ακόμα και σε περιόδους ξηρασίας κατά τις οποίες ο κίνδυνος υφαλμύρισης είναι μεγαλύτερος.



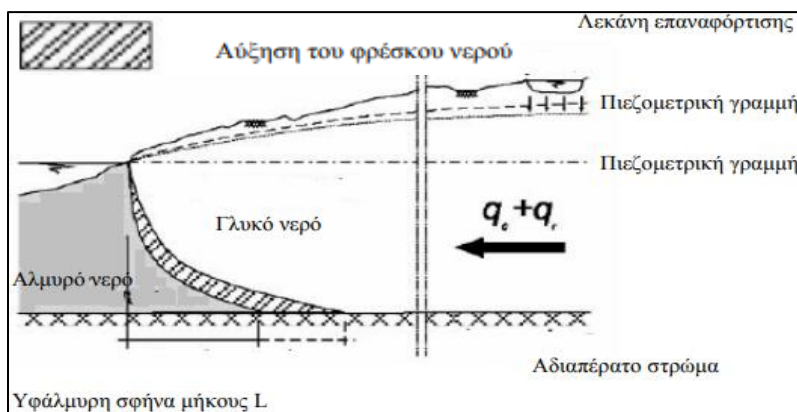
Σχήμα 5: Μεταβολή του ρυθμού άντλησης [11]

- Αποκατάσταση της γης δημιουργώντας έτσι ένα σώμα εδάφους όπου να μπορεί να αποθηκευτεί το καθαρό νερό και ταυτόχρονα δημιουργώντας μια φυσική καθυστέρηση στην εισροή του αλμυρού νερού.



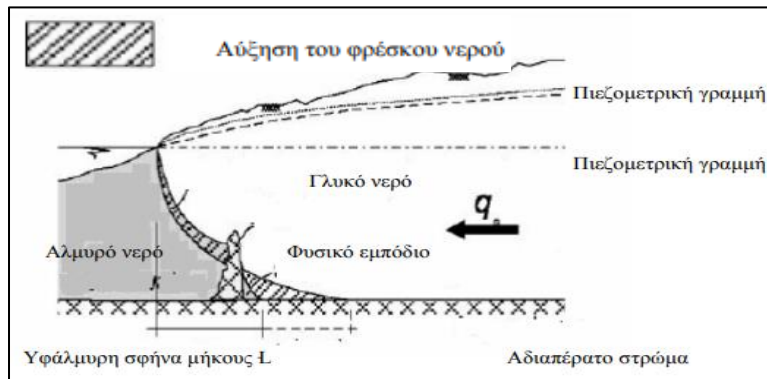
Σχήμα 6: Αποκατάσταση εδάφους [11]

- Τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα με σκοπό την αύξηση του γλυκού νερού και την ταυτόχρονη μείωση της διείσδυσης του αλμυρού. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού, και κάθε μια από αυτές εφαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής και τα δεδομένα της.



Σχήμα 7: Τεχνητός εμπλουτισμός [11]

- Δημιουργία φυσικών εμποδίων στη ζώνη υφαλμύρισης. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ρηχούς υδροφορείς και δυστυχώς με μεγάλο κόστος.



Σχήμα 8: Δημιουργία φυσικού εμποδίου [11]

Έτσι, ανάλογα με την φύση και το μέγεθος του προβλήματος που υπάρχει σε μια περιοχή, καθώς και με βάση τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και το κόστος, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος αντιμετώπισης από τις ήδη αναφερθείσες.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ-ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 2.1 Μαθηματικά και αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης

Με τον όρο μοντέλο εννοείται μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος που προσομοιώνει την συμπεριφορά του σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις. Σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM (D5880-95), μοντέλο θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα. Μαθηματικό μοντέλο κατά την ευρεία έννοια είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος με μαθηματική μορφή και το περιγράφει μέσω μιας συναρτησιακής σχέσης [12].

Επιπλέον, η προσομοίωση είναι μια τεχνική μοντελοποίησης στην οποία η Επιχειρησιακή Έρευνα, η Πληροφορική και η Στατιστική «συναντώνται» και συνεργάζονται αρμονικά για την επίτευξη του τελικού στόχου. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθοδολογίας είναι η αποτύπωση ενός συστήματος με τη βοήθεια λογικών σχέσεων, διαγραμμάτων και προγραμμάτων στον υπολογιστή και εν τέλει η λήψη βέλτιστων αποφάσεων με την εκτέλεση πειραμάτων στον υπολογιστή, η δειγματοληψία και η ανάλυση δεδομένων [13].

Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης στην επιστήμη και στη μηχανική έχει γίνει ένα ισχυρό εργαλείο για την περιγραφή και τη μελέτη των φυσικών συστημάτων και των φαινομένων. Συγκεκριμένα, στον τομέα της υδροηλεκτρολογίας των υπογείων υδάτων, τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα υδρολογικά φαινόμενα, την κίνηση νερού και πετρελαίου στο έδαφος και την κίνηση των μολυσματικών παραγόντων. Επιπλέον, οι προσομοιωτές χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση ή την πρόβλεψη μακροπρόθεσμων επιπτώσεων από την απόσυρση ύδατος και τη μετανάστευση μολυσματικών ουσιών και την εξέταση εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης υπόγειων υδάτων. Γενικά, ένας αριθμητικός προσομοιωτής μειώνει, με διάφορες τεχνικές προσέγγισης, μία ή περισσότερες μερικές διαφορικές εξισώσεις σε ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν για διακριτές τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών [14].

Η ανάγκη εισαγωγής της αριθμητικής προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι οι αναλυτικές λύσεις δεν ήταν επαρκείς για να περιγράψουν με ακρίβεια ένα υπόγειο σύστημα. Ο κύριος λόγος της ανεπάρκειας των αναλυτικών λύσεων είναι η ετερογένεια που χαρακτηρίζει το σύστημα. Σε γενικές



γραμμές, τα μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων υδάτων χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αλλαγών στο επίπεδο των υπόγειων υδάτων ή τις μεταβολές της συγκέντρωσης, με στόχο στρατηγικές προστασίας από δοκιμές, για μεταβολές συγκεντρώσεων μετατόπισης με στόχο τον προσδιορισμό μίας πηγής ρύπων ή τον σχεδιασμό ενός δικτύου συλλογής δεδομένων πεδίου, και για την αξιολόγηση του έργου άλλων ερευνητών, όπως για την αξιολόγηση των συμπερασμάτων τους μέσω της μοντελοποίησης [14].

Ακόμη, η ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης υπόγειων υδάτων, στις αρχές της δεκαετίας του 1970, παρείχε στους σχεδιαστές ποσοτικές τεχνικές για την ανάλυση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης. Τα τελευταία χρόνια, μοντέλα προσομοίωσης συνδυάστηκαν με μοντέλα βελτιστοποίησης για τον εντοπισμό των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους και τους περιορισμούς της διαχείρισης. Τα τυπικά προβλήματα αποκατάστασης των υπόγειων υδάτων περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό του πεδίου των φρεατίων, δηλαδή τον προσδιορισμό του αριθμού, της θέσης και του χρονοδιαγράμματος άντλησης ή επαναφόρτισης όλων των φρεάτων άντλησης ή επαναφόρτισης. Οι Gorelick (1983), Yeh (1992), Ahlfeld και Heidari (1994), Wagner (1995) και Ahlfeld και Mulligan (2000), έχουν δώσει εκτεταμένες αναθεωρήσεις στα μοντέλα προσομοίωσης σε συνδυασμό με μοντέλα βελτιστοποίησης [15].

Ένας άλλος σημαντικός τομέας έρευνας και ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια είναι η βελτιστοποίηση σχεδιασμού μακροπρόθεσμης παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων. Το ζήτημα της μακροπρόθεσμης παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων είναι σημαντικό λόγω της διάρκειας των προγραμμάτων παρακολούθησης, της ανάγκης επαλήθευσης των διορθωτικών μέτρων και της δυνατότητας τροποποίησης της αποκατάστασης εάν το σχέδιο αποκατάστασης ή παρακολούθησης δεν εκτελείται επαρκώς. Επιπλέον, έχει δοθεί σημαντικά λιγότερη προσοχή στη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων σε σχέση με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της διαδικασίας αποκατάστασης, συνεπώς υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος για σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα αυτό. Τέλος, τα δίκτυα παρακολούθησης με μεγάλη χρονική διάρκεια συνιστώνται ως πεδίο εστίασης της έρευνας καθώς μέχρι σήμερα δεν έχουν διερευνηθεί εκτεταμένα [15].

## 2.2 Προσομοίωση κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης

Στο παρελθόν έχουν παρουσιαστεί αρκετά αριθμητικά μοντέλα που σχετίζονται με την ροή των υπόγειων υδάτων και τη μαζική μεταφορά, με τα περισσότερα από αυτά να περιλαμβάνουν κορεσμένη ροή σε πορώδη μέσα. Έχουν επίσης αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που περιλαμβάνουν ροή στην ακόρεστη ζώνη όπου οι διαδικασίες είναι πιο περίπλοκες και λιγότερο κατανοητές [14].

Όσον αφορά τα μοντέλα των ακόρεστων ζωνών, θεωρητικά είναι πιο σύνθετα και χρειάζονται περισσότερες παράμετροι από τα μοντέλα κορεσμένων ζωνών, αλλά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα όταν απαιτείται η διαδικασία διήθησης και η επαναφόρτιση της κορεσμένης ζώνης για να καθοριστεί η πορεία του ύδατος που διηθείται προς τον υπόγειο υδροφόρο. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι απαιτούν τη γνώση του ρυθμού επαναφόρτισης για να καθορίσουν την ανώτερη συνθήκη ορίων, καθώς το διεισδυμένο νερό που εισάγεται στο άνω όριο του μοντέλου ακόρεστης ζώνης τελικά θα φθάσει στη κορεσμένη ζώνη ως εμπλουτισμός εκτός και αν προσομοιωθεί ως εξατμισοδιαπνοή [14].

Επίσης, για την προσομοίωση της απόκρισης του υδροφόρου στον εμπλουτισμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο που περιλαμβάνει και την κορεσμένη και την ακόρεστη ζώνη. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ότι το πεδίο ροής μεταξύ των δύο ζωνών είναι συνεχές και ο υδροφόρος ορίζοντας υπολογίζεται ως επιφάνεια μηδενικής πίεσης ύδατος [16].

## 2.3 Βασικές εξισώσεις ροής και μεταφοράς μάζας

Όλα τα αριθμητικά μοντέλα υπογείων υδάτων λύνουν ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή των υπόγειων υδάτων, την ταχύτητα διαρροής και τη μεταφορά μάζας σε περίπτωση μόλυνσης των υπογείων υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, ένα πρόγραμμα στον υπολογιστή λύνει το σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από την προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξισώσεις του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) που αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο και το σύνολο αυτών των αλγεβρικών εξισώσεων, που λαμβάνονται με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εκφραστεί σε μορφή μήτρας [14].

### 2.3.1 Μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων

Στην πραγματικότητα, τα μοντέλα ροής των υπόγειων υδάτων στη κορεσμένη ζώνη, επιλύουν τις δύο μερικές διαφορικές εξισώσεις που σχετίζονται με τη ροή των υπόγειων υδάτων και την ταχύτητα διαρροής, οι οποίες είναι αντιστοίχως οι εξής (1) και (2) [14]:

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

Όπου,

- $K_{xx}$ : υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση  $x$  [ $LT^{-1}$ ]
- $K_{yy}$ : υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση  $y$  [ $LT^{-1}$ ]
- $K_{zz}$ : υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση  $z$  [ $LT^{-1}$ ]
- $S$ : ειδικός συντελεστής αποθήκευσης [ $L^{-1}$ ]
- $Q_i$ : ο όρος της άντλησης στο σημείο  $i$  [ $L^3T^{-1}$ ]
- $\delta$ : λειτουργία δέλτα
- $r$ : ο αριθμός πηγών/απαγωγών

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

Όπου,

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

### 2.3.2 Μοντέλα μεταφοράς μάζας υπογείων υδάτων

Τα μοντέλα μεταφοράς μάζας υπογείων υδάτων περιγράφουν τις κύριες διαδικασίες διάχυσης, πρόσληψης και διασποράς καθώς και ορισμένες διαδικασίες μεταφοράς μάζας όπως αποσύνθεση και προσρόφηση. Πιο συγκεκριμένα, επιλύουν ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που σχετίζονται με τη ροή υπόγειων υδάτων, την ταχύτητα των υπόγειων υδάτων και τη μαζική μεταφορά [14].

Συγκεκριμένα, πρώτα λύνεται η εξίσωση ροής (1), που έχει ήδη αναφερθεί, και στη συνέχεια, γνωρίζοντας τα υδραυλικά ύψη  $h$ , λύνεται η εξίσωση της ταχύτητας υπογείων υδάτων:

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

Τέλος, λύνεται η εξίσωση μεταφοράς μάζας ως προς την συγκέντρωση  $C$ , ως εξής:

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

Όπου,

- $C$ : η συγκέντρωση ρύπων [ $ML^{-3}$ ]
- $\theta$ : το πορώδες του υδροφορέα
- $C^\omega$ : η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού [ $ML^{-3}$ ]
- $E(C)$ : συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες χημικής προσρόφησης
- $D_{ij}$ : οι όροι διασποράς στις τρεις κύριες κατευθύνσεις ( $x, y, z$ ) [ $L^2T^{-1}$ ]

Οι όροι της διασποράς ορίζονται ως εξής:

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

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

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

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

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

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

Όπου,

$D_M$ : συντελεστής μοριακής διάχυσης [ $L^2T^{-1}$ ]

$\alpha_L$ : διαμήκης διασπορά [ $L$ ]

$\alpha_T$ : εγκάρσια διασπορά [L]

$\alpha_V$ : κάθετη διασπορά [L]

$V$ : ταχύτητα ροής υπόγειου νερού [ $LT^{-1}$ ]

## 2.4 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης

Ανάλογα με την αριθμητική μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τη λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, τα μοντέλα χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες [14]:

- 1) Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
- 2) Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- 3) Μέθοδος ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
- 4) Μέθοδος συνοριακών στοιχείων
- 5) Μέθοδος αναλυτικών στοιχείων

Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες στην λύση προβλημάτων ροής υπόγειων υδάτων και μεταφοράς μάζας. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί αλλά και από την προτίμηση του χρήστη. Από τη μια, οι πεπερασμένες διαφορές έχουν μια σχετικά εύκολη εφαρμογή και γενικά, χρειάζονται λιγότερη διαδικασία και εργαλεία για την δημιουργία της μήτρας εξισώσεων. Από την άλλη, όταν πρόκειται για προσέγγιση ακανόνιστων ορίων, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται καλύτερη σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Όσον αφορά τις ενσωματωμένες πεπερασμένες διαφορές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ακανόνιστους τομείς όπως τα πεπερασμένα στοιχεία. Επομένως, λόγω του ότι οι μέθοδοι μοιάζουν πολύ μεταξύ τους, η επιλογή μεθόδου στηρίζεται συχνά στην προτίμηση του χρήστη.

Τα αριθμητικά μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών για την προσέγγιση των παραγώγων των αλυσιδωτών αλάτων, παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από την Remsonetal. (1971), Mercer and Faust (1981) και Wang and Anderson (1982). Η ολοκληρωμένη πεπερασμένη διαφορά (IFD) αναφέρθηκε από τους Narasimhan και Witherspoon (1978) και Fogg (1986). Τα αριθμητικά μοντέλα ροής υπογείων υδάτων χρησιμοποιώντας την προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάστηκαν από τους Pinder and Gray (1977), Zienkiewicz (1977), Mercer and Faust (1981) και Huyakorn and Pinder (1983). Η μέθοδος των οριακών στοιχείων ή η οριακή

ολοκληρωτική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε από τους Liggett και Liu (1983), Liggett (1987) και De Marsily (1986) [14].

#### 2.4.1 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Οι γραμμές ροής που υπάρχουν κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα, στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, αντιπροσωπεύουν έναν όγκο νερού που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Όσον αφορά τον εμπλουτισμό, μπορεί να προσομοιώνεται μέσω πηγαδιών ή να εισάγεται μέσω χωριστού πίνακα στο μοντέλο. Αναφορικά με τις τρισδιάστατες προσομοιώσεις, όταν στο μοντέλο ο υδροφόρος ορίζοντας ανήκει στο ανώτερο στρώμα, ο χειρισμός του εμπλουτισμού γίνεται απλούστερος. Σε αυτή την περίπτωση, το ανώτερο στρώμα θεωρείται μη περιορισμένο και έτσι καθορίζεται ένας πίνακας ο οποίος περιέχει τους ρυθμούς άντλησης ή εμπλουτισμού. Αντιθέτως, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε περισσότερα στρώματα, κρίνεται αναγκαία η χρήση μιας εναλλακτικής προσέγγισης. Μια επιλογή, είναι να τοποθετηθεί ένας κόμβος εμπλουτισμού σε μορφή πηγαδιού επανατροφοδοσίας για κάθε κόμβο του υδροφόρου ορίζοντα. Ενδέχεται όμως να υπάρξουν προβλήματα γιατί τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών δεν εγγυόνται ότι το ύψος του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα ισούται με το υδραυλικό ύψος που προκύπτει λόγω πίεσης μαζί με το υδραυλικό ύψος εξαιτίας της θέσης. Δηλαδή, αν ο χρήστης ορίσει την θέση του υδροφόρου ορίζοντα κατά την προσομοίωση, το μοντέλο θα εξακολουθεί να εφαρμόζει τον εμπλουτισμό στους ήδη καθορισμένους κόμβους ακόμα και στην περίπτωση που το υδραυλικό ύψος ξεπεράσει την κορυφή του στρώματος. Έτσι, για να μην προκαλούνται τέτοια προβλήματα, δημιουργούνται διάφορα πακέτα που έχουν την δυνατότητα να ακολουθούν τις διακυμάνσεις του υδροφόρου ορίζοντα, τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω.

#### 2.4.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Βασικό χαρακτηριστικό των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων είναι η ευκαιρία που δίνεται στον χρήστη να καθορίσει τις κατανεμημένες πηγές σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο και τις σημειακές πηγές σε ένα κόμβο. Όμως, απαιτείται η αναδιανομή των σημειακών και κατανεμημένων πηγών σε κόμβους για την κατάρτιση της εξίσωσης του πίνακα μέσα στον κώδικα. Η ροή που εισάγεται στο μοντέλο για κάθε στοιχείο πολλαπλασιάζεται μέσω του κώδικα με την επιφάνεια του στοιχείου και έπειτα το νερό διανέμεται σε κάθε κόμβο του στοιχείου αναλογικά.

Κατά τη κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης πρέπει να έχει υπόψιν του την κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα και να ελέγχει ώστε η παραμόρφωση να μην αυξάνει τον λόγο των διαστάσεων  $x$  και  $y$  πέραν του ορίου που συνιστάται [17].

## 2.5 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά αριθμητικά μοντέλα με σκοπό την προσομοίωση της υπόγειας ροής και την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς. Τα σημαντικότερα από αυτά, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια, είναι το MODFLOW, MT3DMS, FEFLOW, SUTRA, PTC και FEMWATER. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος, τον σκοπό του μελετητή, τον βαθμό διερεύνησης και πολλές άλλες παραμέτρους, επιλέγεται το κατάλληλο αριθμητικό μοντέλο/κώδικας.

### 2.5.1 Το μοντέλο MODFLOW

Το μοντέλο MODFLOW αποτελεί το πλέον διακεκριμένο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών για τρισδιάστατη ροή υπόγειων υδάτων παγκοσμίως. Αναπτύχθηκε από την Αμερικανική Γεωλογική Έρευνα στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και αρχικά ο κώδικας ονομαζόταν USGS Modular Three-Dimensional Ground-Water Flow Model. Με το μοντέλο MODFLOW γίνεται προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού κάνοντας χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την διαίρεση του πεδίου του μοντέλου ροής υπογείων υδάτων σε μια σειρά γραμμών, στηλών και στρωμάτων. Το πεδίο του μοντέλου, ορίζει ένα μοναδικό πλέγμα κελιών/κυψελών, που αντιπροσωπεύουν τη διανομή υδρογεωλογικών ιδιοτήτων και υδρογεωλογικών ορίων εντός του μοντέλου. Έτσι, αφού οι ιδιότητες και τα όρια καταχωρηθούν στο μοντέλο, το MODFLOW, χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές και τις διαστάσεις των κυψελών, εξάγει ένα σύνολο εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών το οποίο και επιλύει για να υπολογίσει την υδραυλική κεφαλή στο κέντρο κάθε κελιού του μοντέλου [18].

### 2.5.2 Το μοντέλο MT3DMS

Το μοντέλο MT3DMS (Modular 3-D multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems), δημιουργήθηκε για την προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς ρύπων, διαλυτών στο νερό, σε υπόγειους υδροφορείς, μέσω ποικίλων μηχανισμών διάδοσης όπως η διασπορά, η διάχυση, η προσρόφηση και οι χημικές αντιδράσεις. Ακόμη, εφαρμόζονται διάφορα είδη οριακών συνθηκών και εξωτερικών πηγών/απαγωγών, όπως γεωτρήσεις, ποτάμια, εξατμισοδιαπνοή και επιφανειακός εμπλουτισμός. Για την χρήση του κώδικα αυτού, γίνεται συνδυασμός του με άλλα αριθμητικά μοντέλα υπόγειων υδάτων. Στην περίπτωση που οι υπάρχουσες διαφορές πυκνότητας δεν επηρεάζουν το πεδίο ροής, συνδυάζεται με το μοντέλο MODFLOW ενώ, αντιθέτως, όταν οι διαφορές πυκνότητας παίζουν σημαντικό ρόλο, συνδυάζεται με το μοντέλο SEAWAT (πρόγραμμα ηλεκτρονικών υπολογιστών βασισμένο στο συνδυασμό των μοντέλων MODFLOW και MT3DMS) [19].



### 2.5.3 Το μοντέλο FEFLOW

Το μοντέλο παρουσιάστηκε αρχικά από τον Dr. Hans-Jörg G. Diersch το 1979. Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που σκοπό έχει την προσομοίωση δισδιάστατης και τρισδιάστατης υπόγειας ροής, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα των υγρών, τη μάζα μολυσματικών ουσιών (αλατότητα) και τη μεταφορά θερμότητας. Έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει φρεάτιους υδροφορείς, κινούμενα πλέγματα, κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες, εξαρτώμενη από την αλατότητα και εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία μεταφορά, και πολύπλοκες γεωμετρικές και παραμετρικές καταστάσεις [14].

### 2.5.4 Το μοντέλο SUTRA

Η αρχική έκδοση του SUTRA κυκλοφόρησε το 1984 (Voss 1984) και πρόκειται για ένα μοντέλο δισδιάστατης μεταφοράς υπόγειων υδάτων για κορεσμένες και ακόρεστες ροές, ένα μοντέλο για την πλήρη εισχώρηση θαλάσσιου νερού και μεταφοράς ενέργειας. Το SUTRA χρησιμοποιεί μια μέθοδο δισδιάστατου υβριδικού πεπερασμένου στοιχείου και μια μέθοδο ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση της ροής κορεσμένου ή ακόρεστου υπογείου ύδατος εξαρτώμενου από την πυκνότητα υγρού, της μεταφοράς διαλυμένης ουσίας στα υπόγεια ύδατα και της μεταφοράς θερμικής ενέργειας στα υπόγεια ύδατα και στη στερεή δομή του υδροφόρου ορίζοντα [14].

### 2.5.5 Το μοντέλο PTC

Το μοντέλο PTC αναπτύχθηκε πρώτα από τους Babu et al το 1987 και αργότερα, αναπτύχθηκε ως Plug-In Extension (PIE) για το πρόγραμμα GIS ArgusOne (Olivares 2001). Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο που υπολογίζει τη ροή των υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων σε πορώδη μέσα συνδυάζοντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών επιτρέπει την εφαρμογή της διαδικασίας διαχωρισμού. Το PTC χρησιμοποιεί μερικές διαφορικές εξισώσεις για να παρουσιάσει την κορεσμένη ροή υπογείων υδάτων που περιγράφεται από την υδραυλική κεφαλή, τα στοιχεία ταχύτητας των υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων. Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και από τον νόμο του Darcy. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του τομέα σε περίπου παράλληλες οριζόντιες στρώσεις [14].



### 2.5.6 Το μοντέλο FEMWATER

Πρόκειται για ένα πλήρως τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο προσομοιώνει την εξαρτώμενη από την πυκνότητα συζευγμένη ροή και μεταφορά ρύπων σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες. Επιπλέον, επιτρέπει τη μοντελοποίηση της διείσδυσης αλμυρού νερού καθώς και άλλων ρύπων που εξαρτώνται από την πυκνότητα [14].

## 2.6 Μοντέλα βελτιστοποίησης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια, για την διαχείριση υπογείων υδάτων, έχουν συνδυαστεί διάφορα μοντέλα προσομοίωσης και μοντέλα βελτιστοποίησης ώστε να αποδώσουν με βέλτιστο τρόπο την υπόγεια ροή των υδάτων καθώς και την μεταφορά μάζας.

Με βάση την θεωρία που χρησιμοποιείται κάθε φορά, τα μοντέλα βελτιστοποίησης χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [20]:

- Μη γραμμικά μοντέλα (χρήση μη γραμμικού προγραμματισμού)
- Δυναμικά μοντέλα (χρήση δυναμικού προγραμματισμού)
- Μοντέλα γενετικών αλγόριθμων
- Μοντέλα προσομοιωμένης ανόπτησης
- Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN)
- Μοντέλα τεχνικών κοπής

Το κύριο χαρακτηριστικό των προβλημάτων διαχείρισης μολυσματικών υπόγειων υδάτων, είναι η μη κυρτή μορφή τους, εξαιτίας της μη κυρτής συμπεριφοράς της εξίσωσης μεταφοράς μάζας και/ή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επομένως, η πλειοψηφία των παραπάνω μοντέλων παρουσιάζει δυσκολία στον προσδιορισμό μιας και μοναδικής βέλτιστης λύσης.

### 2.6.1 Μη γραμμικά μοντέλα

Η πλειοψηφία αυτών των μοντέλων στηρίζεται σε τεχνικές βασιζόμενες στην κλίση. Πιο συγκεκριμένα, απαιτούν τον υπολογισμό της παραγώγου της μήτρας για συγκεντρώσεις σε σχέση με τις μεταβλητές απόφασης, χωρίς να είναι σίγουρο ότι θα υπάρξει μια ολική βέλτιστη λύση. Στο παρελθόν, ο συνδυασμός μοντέλων προσομοίωσης και μη γραμμικών μοντέλων βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπόγειων υδάτων, παρουσιάστηκε από τους Gorelick, et al. το 1984, Willis και Yeh το 1987, καθώς και από πολλούς άλλους στη συνέχεια.

### 2.6.2 Δυναμικά μοντέλα

Αυτά τα μοντέλα βασίζονται στην θεωρία του δυναμικού προγραμματισμού όπου μη γραμμικά και στοχαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων μπορούν να μεταφραστούν στο σύστημα. Επιπλέον, τα δυναμικά μοντέλα, είναι μαθηματικά πολύπλοκα, έχουν αναφερθεί αριθμητικές δυσκολίες και μια ολική βέλτιστη λύση δεν είναι δεδομένη. Οι πρώτοι που εργάστηκαν με δυναμικά μοντέλα, είναι οι Jones, et al. το 1987, Chang, et al. το 1992, και πολλοί άλλοι ακολούθησαν.

### 2.6.3 Μοντέλα γενετικών αλγόριθμων

Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτών των μοντέλων είναι ότι δεν απαιτείται ο υπολογισμός των παραγώγων και όπως και στις προηγούμενες κατηγορίες μοντέλων, η ολική βέλτιστη λύση δεν είναι πάντα εφικτή και σίγουρη. Η εφαρμογή τους στα προβλήματα υπόγειων υδάτων ξεκίνησε στις αρχές του 1990 και αντιπροσωπευτική δουλειά παρουσιάστηκε από τον McKinney και Lin το 1994 και από πολλούς άλλους στα επόμενα χρόνια.

### 2.6.4 Μοντέλα προσομοιωμένης ανόπτησης

Αυτά τα μοντέλα σχεδιάστηκαν με σκοπό την επίλυση μεγάλων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και δεν απαιτούν τον υπολογισμό των παραγώγων. Ακόμη, υπάρχει ευελιξία στην επιλογή των λειτουργιών κόστους και θεωρητικά μπορούν να αποδώσουν μια ολική βέλτιστη λύση αλλά όχι στην πράξη.

### 2.6.5 Μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN)

Την τελευταία δεκαετία, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε προβλήματα μοντελοποίησης και διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Οι Rogers και Dowla (1994) ήταν μεταξύ των πρώτων που χρησιμοποίησαν την ANNs σε μια προσέγγιση δύο σταδίων για τα μη γραμμικά προβλήματα διαχείρισης των υπογείων υδάτων. Βέλτιστες λύσεις ελήφθησαν με την πρώτη κατάρτιση ενός ANN για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων ροής και μεταφοράς διαφόρων στρατηγικών άντλησης [1].

### 2.6.6 Μοντέλα τεχνικών κοπής

Στην κατηγορία αυτή τα μοντέλα χαρακτηρίζονται ως παγκόσμιες τεχνικές βελτιστοποίησης λόγω της διαμόρφωσης της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία απαιτείται να είναι κοίλη. Επίσης, απαιτείται μόνο μια παράγωγος συνάρτησης σε κάθε επανάληψη μέχρις ότου ληφθεί η βέλτιστη λύση. Ακόμη, αυτά τα μοντέλα βασίζονται στη θεωρία της κοπής όπου η εφικτή περιοχή περικλείεται σε ένα πολύγωνο και όπου το πιο ακραίο σημείο της εφικτής περιοχής καθορίζεται εξαλείφοντας τμήματα της μη εφικτής περιοχής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ PTC ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE

### 3.1 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου PTC

Το μοντέλο PTC έχει ως στόχο την προσομοίωση της υπόγειας ροής μέσω της χρήσης μιας σειράς διαφορικών εξισώσεων. Οι βασικές αυτές εξισώσεις, όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, αφορούν τα εξής:

- Υδραυλικό ύψος

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

- Ταχύτητα υπογείων υδάτων στις κατευθύνσεις x, y και z

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

- Μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από την συγκέντρωση C

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

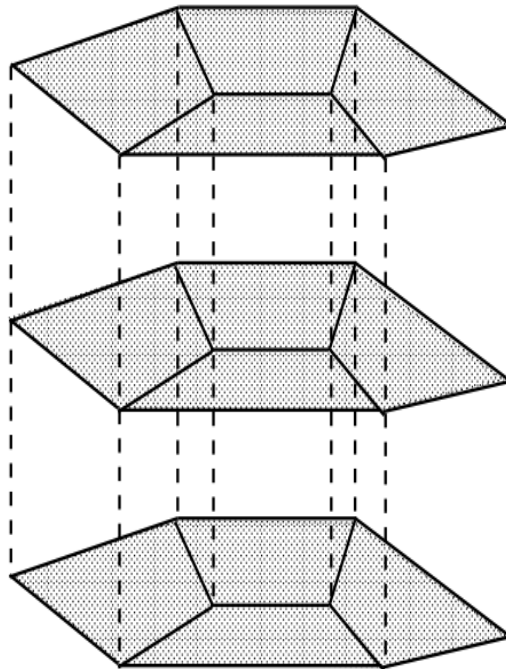
Οι παραπάνω διαφορικές εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και από τον νόμο του Darcy. Το μοντέλο PTC επιλύει τις εξισώσεις αυτές υπολογίζοντας πρώτα τα υδραυλικά ύψη h από την εξίσωση που αφορά τα υδραυλικά ύψη. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy και για τις τρεις κατευθύνσεις (x, y, z) χρησιμοποιώντας τα υδραυλικά ύψη που ήδη υπολογίστηκαν και τέλος, υπολογίζεται η συγκέντρωση του ρύπου C ως ο πλέον μόνος άγνωστος όρος της εξίσωσης.

### 3.2 Ο αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου PTC

Η επίλυση του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων, για σύνθετα φυσικά συστήματα, απαιτεί γενικά την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για τα φυσικά συστήματα κλίμακας πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια που εμπλέκεται στην επίλυση μιας αριθμητικής διακριτοποίησης αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλη [21].

Το PTC χρησιμοποιεί έναν μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού για την επίλυση των πλήρως τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει αισθητά την υπολογιστική επιβάρυνση. Πιο συγκεκριμένα, στον αλγόριθμο αυτό, το σύστημα χωρίζεται σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα μέσα στα οποία γίνεται διακριτοποίηση των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα αυτά συνδέονται μεταξύ τους κάθετα με μια διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Το υβρίδιο αυτό μέσω του συνδυασμού πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων που διαθέτει, καθορίζει τη δυνατότητα της διαδικασίας διαχωρισμού [21].

Τέλος, κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα όλα οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και στο δεύτερο βήμα, λύνονται οι κατακόρυφες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα [21].



Σχήμα 9: Διάταξη οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων το ένα επάνω στο άλλο, παράγοντας τρισδιάστατη διακριτοποίηση [21]

### 3.3 Οριακές συνθήκες

Στις έρευνες για τα υπόγεια ύδατα, το υπό μελέτη σύστημα ή υποσύστημα πρέπει ιδανικά να “εγκλωβίζεται” από μια οριακή επιφάνεια η οποία αντιστοιχεί σε αναγνωρίσιμα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Η θέση της τρισδιάστατης οριακής επιφάνειας στη φύση ορίζει την “εξωτερική γεωμετρία” του συστήματος ροής των υπόγειων υδάτων. Ο καθορισμός των οριακών συνθηκών του συστήματος ροής του υπόγειου νερού σημαίνει την ταξινόμηση ενός οριοθετημένου τύπου (συνήθως ενός ή ενός συνδυασμού των τύπων) σε κάθε σημείο της οριακής επιφάνειας. Η επιλογή της οριακής επιφάνειας και των οριακών συνθηκών είναι ίσως το πιο κρίσιμο βήμα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου συστήματος υπόγειων υδάτων. Επιπλέον, η ακατάλληλη επιλογή αυτών των στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία της προσπάθειας μοντελοποίησης, καταλήγοντας έτσι σε ένα αποτέλεσμα που δεν έχει σχέση με την αντίστοιχη απόκριση στο πραγματικό σύστημα. Συνήθως η επιλογή οριακών συνθηκών για ένα εννοιολογικό ή αριθμητικό μοντέλο συνεπάγεται σημαντική απλούστευση των πραγματικών υδρογεωλογικών συνθηκών. Προκειμένου να αποφευχθούν σοβαρά σφάλματα, οι υποθέσεις στις οποίες βασίζονται αυτές οι απλουστεύσεις πρέπει να γίνουν σαφώς κατανοητές και να εκτιμηθεί η επίδρασή τους στο αποτέλεσμα του μοντέλου [22].

Όσον αφορά τα υδρογεωλογικά όρια, εκφράζονται από τρεις διαφορετικούς τύπους μαθηματικών συνθηκών [17]:

- Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους, γνωστός και ως οριακή συνθήκη Dirichlet, για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό.
- Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής, γνωστός και ως οριακή συνθήκη Neumann, για τα οποία η παράγωγος της ροής κατά μήκος του ορίου είναι σταθερή.
- Τύπος 3: Όρια εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος ροής, γνωστός και ως οριακή συνθήκη Cauchy ή μικτού ορίου, για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή.

Όσον αφορά την εξίσωση ροής, το μοντέλο PTC δέχεται και τους τρεις παραπάνω τύπους οριακών συνθηκών και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις οριακές αυτές συνθήκες. Η ήδη επιλεγμένη οριακή συνθήκη είναι μηδενικής ροής για όλα τα όρια, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη περιορισμένου υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα κάτω αλλά και γύρω από αυτόν. Με την δυνατότητα επιλογής άλλων οριακών συνθηκών, ο χρήστης μπορεί να παρουσιάσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες [16], [21].

### 3.3.1 Καθορισμένο υδραυλικό ύψος

Στον πρώτο τύπο οριακών συνθηκών (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), τα όρια θέτονται δηλώνοντας τους κόμβους και την σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Οι γραμμές και οι στήλες του πίνακα συντελεστών ορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα ως σταθεροί όροι που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Έτσι, οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος απαλείφονται από την εξίσωση του πίνακα και επομένως, απομένουν  $(N \times M - N_C)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_C)$  αγνώστους, όπου  $N_C$  είναι ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος [16], [21].

### 3.3.2 Καθορισμένη ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green, προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ , η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές. Έτσι, ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται μαθηματικά επίσης με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε ένα κόμβο. Για διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή [16], [21].

### 3.3.3 Ροή εξαρτημένη από το υδραυλικό ύψος

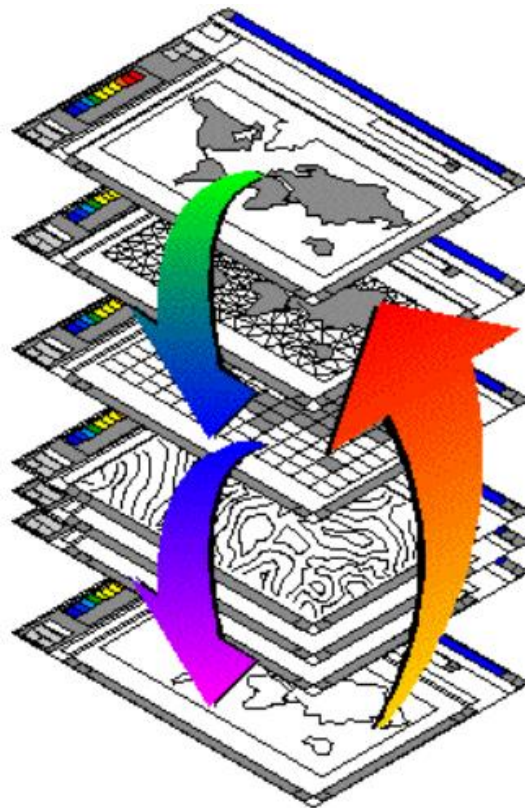
Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι, εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Με τον κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από τον χρήστη,  $k_L$ , μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή [16], [21].



### 3.4 Πρόγραμμα Argus ONE

Το πρόγραμμα Argus Open Numerical Environments (Argus ONE) είναι ένα προηγμένο γραφικό λογισμικό προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας που ενσωματώνει άψογα τα μοντέλα υπόγειων υδάτων και το GIS. Προσφέρει μια ενοποιημένη λύση μοντελοποίησης για όλα τα προβλήματα των υπόγειων υδάτων. Η μοναδική τεχνολογία Plug-In Extension της Argus (PIE) επιτρέπει σε οποιονδήποτε να προσαρμόσει το Argus ONE ως γραφικό περιβάλλον χρήσης για τα μοντέλα. Επιπλέον, το Argus ONE έχει δώσει τη δυνατότητα σε μηχανικούς και επιστήμονες, σε τομείς που σχετίζονται με τις γεωεπιστήμες, να επιταχύνουν το έργο προεπεξεργασίας τους κατά δύο τάξεις μεγέθους χωρίς να χρειάζεται να αλλάζουν τα υπάρχοντα αριθμητικά μοντέλα τους [23].

Ακόμη, το Argus ONE δίνει τη δυνατότητα εύκολης προετοιμασίας των δεδομένων για οποιοδήποτε πακέτο μοντελοποίησης, είτε πεπερασμένων στοιχείων, είτε πεπερασμένων διαφορών. Επίσης, εισάγοντας αυτόματα τα φυσικά δεδομένα σε στρώματα GIS, σε πλέγματα ή σε κόμβους και στοιχεία, το Argus ONE διατηρεί τα δεδομένα έτοιμα για επαναχρησιμοποίηση, δηλαδή, η αλλαγή του πλέγματος δεν απαιτεί ξανά την εισαγωγή δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται σε διαφορετικά επίπεδα τα οποία ο χρήστης μπορεί να επεξεργάζεται, καθώς και να δημιουργεί καινούργια [23].



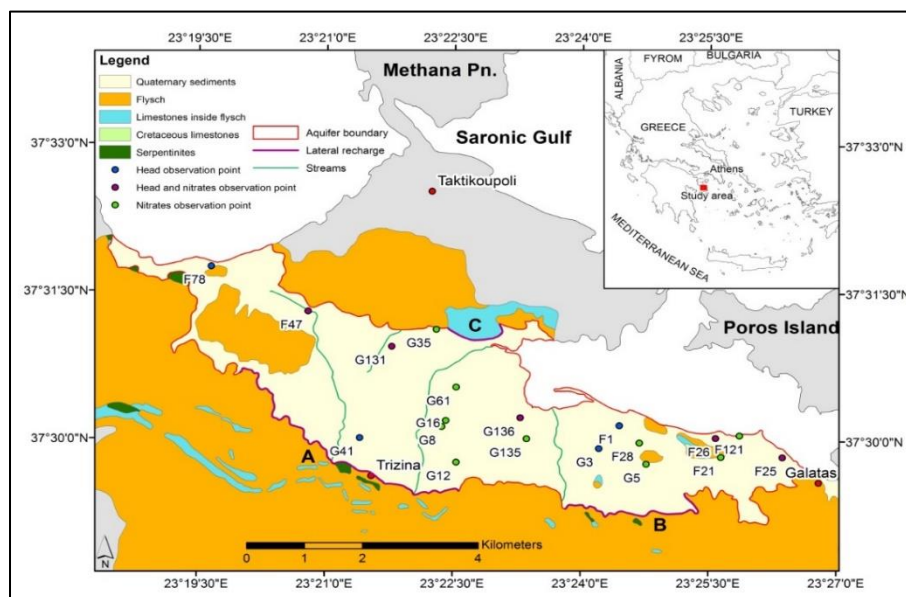
Σχήμα 10: Τα επίπεδα του Argus ONE [23]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 –ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 4.1 Γενικά στοιχεία περιοχής μελέτης

Στην συγκεκριμένη εργασία, μελετάται η περιοχή Τροιζήνα, η οποία ανήκει στον δήμο Τροιζήνας της Περιφερειακής Ενότητας Νήσων που βρίσκεται στην Περιφέρεια Αττικής. Σύμφωνα με τη διοικητική διαίρεση της Ελλάδας όπως αυτή διαμορφώθηκε με το πρόγραμμα “Καλλικράτης”, από 1 Ιανουαρίου 2011 έγινε συνένωση του Δήμου Τροιζηνίας και του Δήμου Μέθανων σε Δήμος Τροιζήνας-Μέθανων. Γεωγραφικά βρίσκεται στην Πελοπόννησο στο νοτιοανατολικό τμήμα του Νομού Αργολίδας, απέναντι από τον Πόρο, και συνορεύει με τους δήμους Ερμιόνης, Κρανιδίου, Επιδαύρου και Μεθάνων. Βορειοανατολικά, νοτιοανατολικά και νότια, βρέχεται από το Σαρωνικό κόλπο, ενώ βορειοδυτικά βρίσκεται η Αργολίδα. Ο δήμος Τροιζήνας, περιλαμβάνει έξι δημοτικά διαμερίσματα, έχει έδρα του τον Γαλατά, και σύμφωνα με την απογραφή του 2011, έχει πληθυσμό 7.143 κατοίκους. Επίσης, η Τροιζήνα έχει υψόμετρο 68 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας, και βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος περίπου 37,49 και γεωγραφικό μήκος περίπου 23,36 [24], [25].

Η περιοχή Τροιζήνα, διακρίνεται σε τρεις ζώνες. Πρώτη ζώνη αποτελεί η ηπειρωτική περιοχή, στην οποία υπάρχουν πολλοί λόφοι ενώ η αγροτική δραστηριότητά της, συγκεντρώνεται κυρίως στις πεδιάδες. Η δεύτερη ζώνη είναι το νησί του Πόρου, το οποίο αποτελεί το νησιωτικό τμήμα της επαρχίας και είναι το κυρίως τουριστικό και διοικητικό κέντρο της. Τέλος, τρίτη ζώνη είναι η χερσόνησος των Μεθάνων, η οποία είναι γνωστή για τις ιαματικές πηγές της [24].



Χάρτης 4.1.1: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Τροιζήνα Αττικής) [24]



## 4.2 Χλωρίδα και πανίδα

Ο δήμος Τροιζήνας-Μεθάνων αποτελείται από λόφους, βουνά, κοιλάδες και οροπέδια. Το φυσικό περιβάλλον της περιοχής είναι πολύμορφο και εναλλάσσεται στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές. Το οικοσύστημα είναι γεωργικό και οι δασικές εκτάσεις εκτείνονται στα ορεινά. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν ελαιώνες, μεγάλα κτήματα με λεμονιές, πορτοκαλιές και μανταρινιές, συκιές, αμυγδαλιές, πεύκα και κουκουναριές. Στην περιοχή υπάρχουν επίσης σπάνια αγριολούλουδα, σπάνιες ορχιδέες και ευδοκιμούν σχίνα, θυμάρι, ρίγανη, φασκόμηλο και άλλα αρωματικά και φαρμακευτικά βότανα, με αριθμό που ξεπερνά τα 150 αυτοφυή φυτά. Οι δασικές εκτάσεις έχουν χαρακτηριστικό είδος τον χαλέπιο πεύκη και επίσης υπάρχουν πλατάνια, κυπαρίσσια, λυγαριές, μυρτιές και πολλά άλλα είδη δέντρων. Ακόμη, η μακκία της Τροιζήνας είναι πλουσιότερη και εκεί εναλλάσσονται διάφορα είδη θάμνων όπως ρείκι και αγριελιά [26], [27].

Τέλος, τα φρυγανικά οικοσυστήματα που αναπτύσσονται ανάλογα με τα λιθολογικά χαρακτηριστικά είναι [27]:

- Φρύγανα με αστοιβή που κυρίως εμφανίζονται σε φλύσχη και βρίσκονται σε εγκαταλελειμμένες καλλιέργειες.
- Φρύγανα με θυμάρι που βρίσκονται σε ασβεστολιθικά εδάφη με μεγάλο ποσοστό χαλικιών και βράχων.
- Φρύγανα με αλογοθύμαρο, αστοιβή, αφάνα ή θυμάρι, που βρίσκονται σε δυσπρόσιτους τόπους παλαιών καλλιεργειών.
- Φρύγανα με ασφάκα, φασκομηλιά και αλιστρακιά που βρίσκονται σε βραχώδεις ασβεστολιθικές περιοχές με αρκετά μεγάλες κλίσεις.

Όσο για την πανίδα της περιοχής, η άγρια πανίδα του νησιού αποτελείται ως επί το πλείστον από λαγούς, αγριοκούνελα, αλεπούδες, σκαντζόχοιρους, χελώνες, φίδια (δραγκωλιά, αστρίτης και σαΐτα) και σαύρες. Όσον αφορά την ορνιθοπανίδα της περιοχής, υπάρχουν κοράκια, πετροχελιδона, κουκουβάγιες και πολλά άλλα είδη πουλιών. Συγκεκριμένα, στον υδροβιότοπο της Ψήφτας, σύμφωνα με μελέτες ειδικών, έχει εκτιμηθεί ότι μεταναστεύουν 89 είδη πουλιών από 34 διαφορετικές οικογένειες [26].

## 4.3 Μετεωρολογικά στοιχεία

Στην περιοχή μελέτης επικρατεί κυρίως εύκρατο και Μεσογειακό κλίμα με ήπιο και σχετικά υγρό χειμώνα που διαρκεί μεταξύ Νοέμβριο και Ιανουάριο ενώ η περίοδος με τις χαμηλότερες βροχοπτώσεις είναι μεταξύ Ιουνίου και Αυγούστου. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα (παγετός, ισχυροί άνεμοι),

σπανίζουν ή λείπουν ολοκληρωτικά, καθώς υπάρχουν και περιοχές όπως ο κάμπος της Καλλονής και τα Βλαχεϊκά όπου οι θερμοκρασίες δεν κατεβαίνει κάτω από τους  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Συγκεκριμένα, με βάση τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό του Πόρου, εκτιμάται μέση ετήσια βροχόπτωση με ύψος 603mm. Γενικά, στην περιοχή παρατηρείται μεγάλη ηλιοφάνεια και μέτριοι, βόρειοι άνεμοι δημιουργώντας έτσι ένα ήπιο και γλυκό χειμώνα και ένα σχετικά ξηρό και ζεστό καλοκαίρι με μέσες θερμοκρασίες  $9-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $27-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  αντίστοιχα [27].

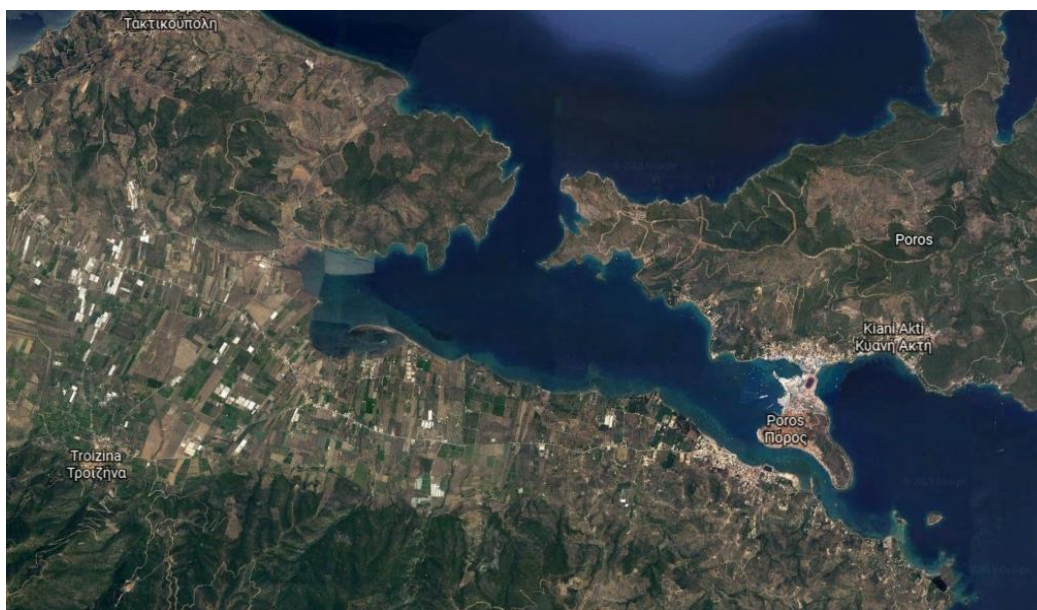
#### 4.4 Γεωλογία – Υδρογεωλογία περιοχής

Η περιοχή μελέτης, αποτελείται κυρίως από φλύσχη και ασβεστόλιθους, ενώ παράλληλα εμφανίζονται οφιολιθικά πετρώματα και σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Πιο συγκεκριμένα, κοντά στο όρος Αδέρεις, δηλαδή στην κεντρική και ανατολική περιοχή, επικρατεί ο φλύσχος ενώ δυτικά και βόρεια επικρατούν οι ασβεστόλιθοι. Επίσης, στην περιοχή υπάρχει η πεδινή λεκάνη της Τροιζήνας, η οποία σχηματίστηκε εξαιτίας του τεκτονικού βυθίσματος που έχει δημιουργηθεί ανάμεσα στην χερσόνησο των Μεθάνων και του όρους Αδέρεις που έπειτα καλύφθηκε από τεταρτογενείς αποθέσεις. Η πεδινή αυτή λεκάνη της Τροιζήνας, εκτείνεται προς τα ανατολικά μέχρι την περιοχή Πόρου-Γαλατά-Λεμονοδάσους, ενώ το βόρειο τμήμα της έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα [28].

##### 4.4.1 Γεωλογία

Όσον αφορά την γεωλογική δομή της περιοχής, χαρακτηρίζεται από μια πολυπλοκότητα, γεγονός που οδήγησε σε πολλές έρευνες και αποτέλεσε αντικείμενο πολλών μελετητών, χωρίς ακόμα να διευκρινισθεί πλήρως μιας και υπάρχει μεγάλη διάσταση απόψεων. Ιδιαίτερα, δεν διευκρινίστηκε ακόμα η ακριβής θέση της οφιολιθικής σειράς σε σχέση με τους ασβεστόλιθους της Τραπεζώνας, που ανήκουν σε κατώτερη σειρά. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του ερευνητή και Δρ. υδρογεωλογίας, Κάρολου Α. Μπεζέ, οι ασβεστόλιθοι βρίσκονται συχνά επάνω στους οφιόλιθους σε πολλές θέσεις της Αργολίδας. Στην βάση των επωθημένων ασβεστόλιθων, παρατηρείται ένα τεκτονικό λατυποπαγές, που δημιουργήθηκε από διάφορα θραύσματα πετρωμάτων τόσο της υποκείμενης ζώνης (οφιόλιθοι) όσο και της υπερκείμενης ζώνης (ασβεστόλιθοι).

Έτσι, από τις μελέτες που πραγματοποίησε στην περιοχή ο συγκεκριμένος ερευνητής, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι στο δυτικό τμήμα της περιοχής, εμφανίζονται ασβεστόλιθοι επωθημένοι πάνω στους οφιόλιθους. Ακόμη, στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής, εμφανίζονται οφιόλιθοι που καταλαμβάνουν τις χαμηλότερες υψομετρικά περιοχές, ενώ σε μεγαλύτερα υψόμετρα παρουσιάζονται και πάλι ασβεστόλιθοι επωθημένοι πάνω στους οφιόλιθους [28].

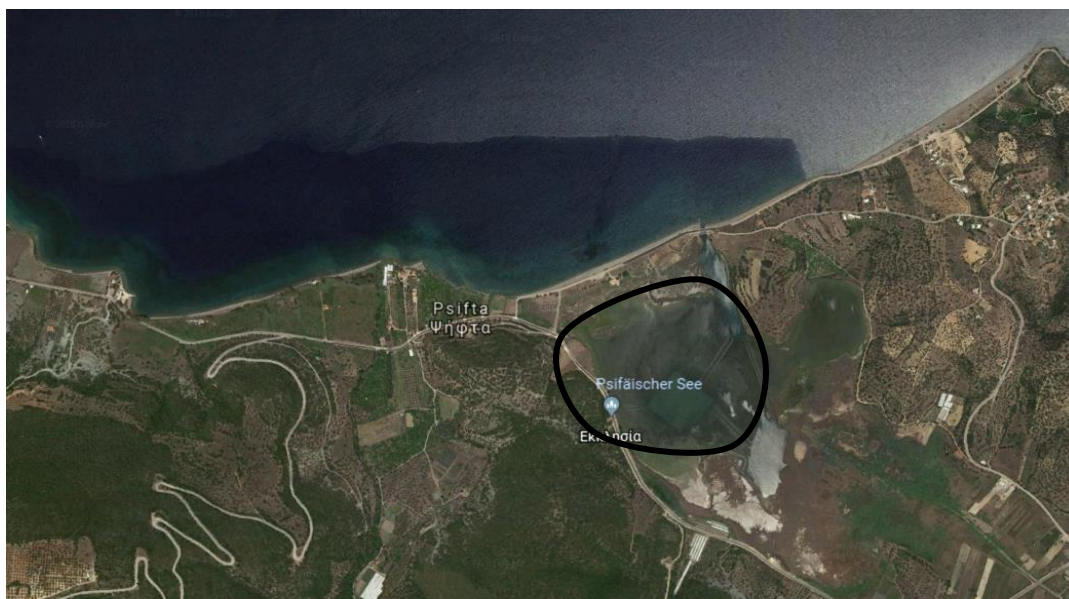


Σχήμα 11: Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης (πηγή: Google Earth, πρόσβαση: 08/05/2018)

#### 4.4.2 Υδρογεωλογία

Στην περιοχή μελέτης, υπάρχει η υδρογεωλογική λεκάνη της Τροιζήνας η οποία περιλαμβάνει τη χαμηλή περιοχή που φθάνει ανάμεσα στον όρμο Βιδίου και της λίμνης Ψήφτας, καθώς και τις ημιορεινές περιοχές που οριοθετούν την πεδινή λεκάνη βόρεια και νότια, δηλαδή τις περιοχές Τακτικούπολης και Τροιζήνας. Στο κέντρο της λεκάνης, το υψόμετρο είναι πολύ χαμηλό, περίπου 0-40 μ., και επικρατούν κυρίως προσχώσεις των χειμάρρων, το πάχος των οποίων ξεπερνά τα 100 μ. στα πολύ κεντρικά σημεία. Εντός των προσχώσεων αυτών, σχηματίζεται ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας που εκφορτίζεται υπογείως από την πλευρά του όρμου του Βιδίου αλλά και από την πλευρά της λίμνης της Ψήφτας [28].

Σύμφωνα με στοιχεία του ερευνητή και Δρ. υδρογεωλογίας, Κάρολου Α. Μπεζέ, η λεκάνη που τροφοδοτεί τον υδροφόρο ορίζοντα της Τροιζήνας καλύπτει έκταση περίπου 50 τετραγωνικών χιλιομέτρων και από αυτά τα 18 περίπου αντιστοιχούν σε πεδινό τμήμα. Επιπλέον, ο υδροφόρος ορίζοντας χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων για φυτική παραγωγή και υπερεκμετάλλευση πόρων υπόγειων υδάτων κυρίως για γεωργικούς σκοπούς, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων όσον αφορά τις συγκεντρώσεις νιτρικών αλάτων που υπερβαίνουν την τιμή κατωφλίου των 50 mg/l (οδηγία 98/83).



Σχήμα 12: Υδροβιότοπος Ψήφτας (πηγή: Google Earth, πρόσβαση: 08/05/2018)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 5.1 Εισαγωγή δεδομένων στο μοντέλο

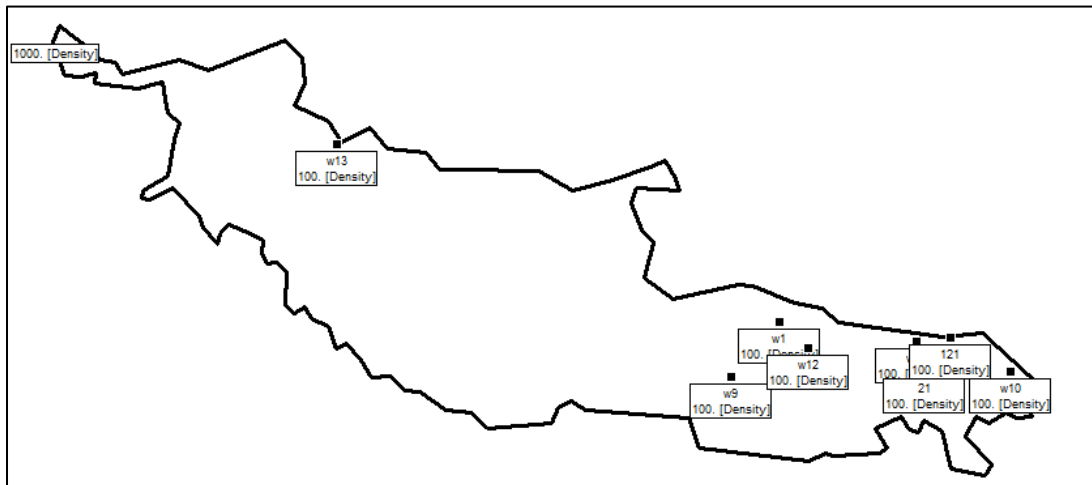
Αρχικά, για την προσομοίωση της ροής των υπογείων υδάτων και γενικά της κατάστασης που επικρατεί στην περιοχή μελέτης με την χρήση του μοντέλου PTC, απαιτείται η εισαγωγή βασικών στοιχείων-δεδομένων που αφορούν την περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές όλων των δεδομένων εισάγονται με τις ίδιες μονάδες μέτρησης, δηλαδή σε μέτρα (m) για τη μονάδα μήκους και σε μέρες (days) για τη μονάδα χρόνου. Οποιαδήποτε τιμή που δόθηκε σε άλλη μονάδα μέτρησης, μετατράπηκε στις προαναφερθείσες μονάδες πριν την εισαγωγή της στο μοντέλο PTC. Τα στοιχεία της περιοχής εισάγονται στο μοντέλο με τον παρακάτω τρόπο:

- ✓ Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο αρχείο PTC και από την επιλογή PIE's, μέσω της εντολής 'edit project info', εισάγονται στις καρτέλες 'general' και 'stresses' βασικές αρχικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται ο αριθμός των στρωμάτων (layers) και ο τύπος κανάβου (τριγωνικός και ορθογωνικός) που χρησιμοποιείται. Η αρίθμηση των στρωμάτων γίνεται από κάτω προς τα πάνω, δηλαδή από τα βαθύτερα στα πιο ρηχά στρώματα. Για την περιοχή μελέτης, επιλέγεται ένα και μοναδικό στρώμα καθώς παρατηρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια αντλούν νερό από κοινό στρώμα. Ο τύπος κανάβου που επιλέγεται είναι τριγωνικός επειδή καλύπτει με μεγαλύτερη ακρίβεια την περιοχή, ειδικά σε περιπτώσεις έντονης μορφολογίας.
- ✓ Συμπληρώνεται το κριτήριο σταθερής κατάστασης, σύμφωνα με το οποίο ορίζεται η διαφορά μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων ροής ώστε να επιτευχθεί σταθερή ροή.
- ✓ Το χρονικό διάστημα για το οποίο γίνεται η προσομοίωση επιλέγεται να είναι 4 χρόνια, καθένα από τα οποία χωρίζεται σε δύο χρονικές περιόδους, θερινή και χειμερινή. Δηλαδή επιλέγονται οκτώ περίοδοι, με διάρκεια 180 ημέρες η κάθε μια. Ορίζονται 100 χρονικά βήματα για κάθε περίοδο.
- ✓ Κατά την εκτέλεση του μοντέλου, επιλέχθηκαν να γίνουν όλες οι εργασίες (do flow, do velocity, use memory, do mass balance) εκτός από την εργασία 'do transport' επειδή στην παρούσα εργασία δεν γίνεται μεταφορά ρύπου.
- ✓ Εισάγονται στο μοντέλο οι χάρτες της περιοχής μελέτης, τοπογραφικός και υδρογεωλογικός, με τέτοιο τρόπο ώστε να επικαλύπτονται. Οι χάρτες αυτοί έχουν την ίδια κλίμακα και παρέχουν



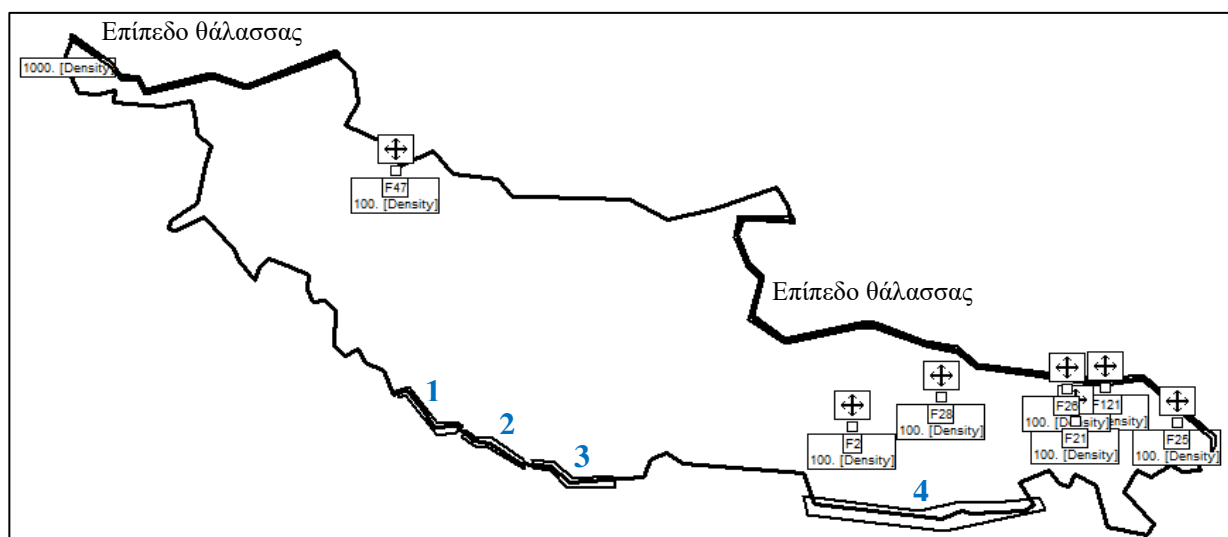
στοιχεία για τα πηγάδια, την τοπογραφία, την γεωλογία και τα πετρώματα που συναντώνται στην περιοχή.

- ✓ Με βάση τους χάρτες που εισάγονται και με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων του μοντέλου, σχεδιάζεται το περίγραμμα της περιοχής μελέτης και έτσι προκύπτει μια κλειστή γραμμή που αντιστοιχεί στον όγκο ελέγχου του μοντέλου, δημιουργείται δηλαδή το ‘domain outline’ που καθορίζει τα όρια της περιοχής.



Σχήμα 13: Περίγραμμα περιοχής (domain outline) με την χρήση του μοντέλου PTC

- ✓ Γίνεται εισαγωγή των οριακών συνθηκών κατά μήκος της θάλασσας, δηλαδή στις περιοχές οι οποίες βρέχονται από αυτή. Επιλέγεται οριακή συνθήκη πρώτου τύπου, που σημαίνει σταθερό υδραυλικό ύψος ή σταθερή συγκέντρωση, και τίθεται υδραυλικό ύψος ίσο με 200 μέτρα στα σημεία αυτά. Οι άλλες δύο περιοχές, από όπου εισέρχεται νερό στην περιοχή μελέτης, χωρίζονται σε επιμέρους κομμάτια, όπως φαίνεται στο σχήμα 14, στα οποία επιλέγεται η ανάλογη οριακή συνθήκη. Πιο συγκεκριμένα, στο αριστερό πρώτο κομμάτι (αριθμός 1) επιλέγεται οριακή συνθήκη τύπου ένα και ορίζονται υδραυλικά ύψη 207 m και 206 m για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Για το αριστερό δεύτερο κομμάτι (αριθμός 2), επιλέγεται και πάλι οριακή συνθήκη τύπου ένα και ορίζονται υδραυλικά ύψη 206 m και 205 m για την υγρή και ξηρή περίοδο αντίστοιχα. Επίσης, στο τρίτο κομμάτι (αριθμός 3) επιλέγεται οριακή συνθήκη πρώτου τύπου με τιμές υδραυλικού ύψους 205 m και 204 m για τις χρονικές περιόδους. Τέλος, για το δεξί κομμάτι (αριθμός 4), επιλέγεται οριακή συνθήκη τύπου δύο με τιμές εισροών 2000 m<sup>2</sup>/day και 1700 m<sup>2</sup>/day για τις διάφορες χρονικές περιόδους.

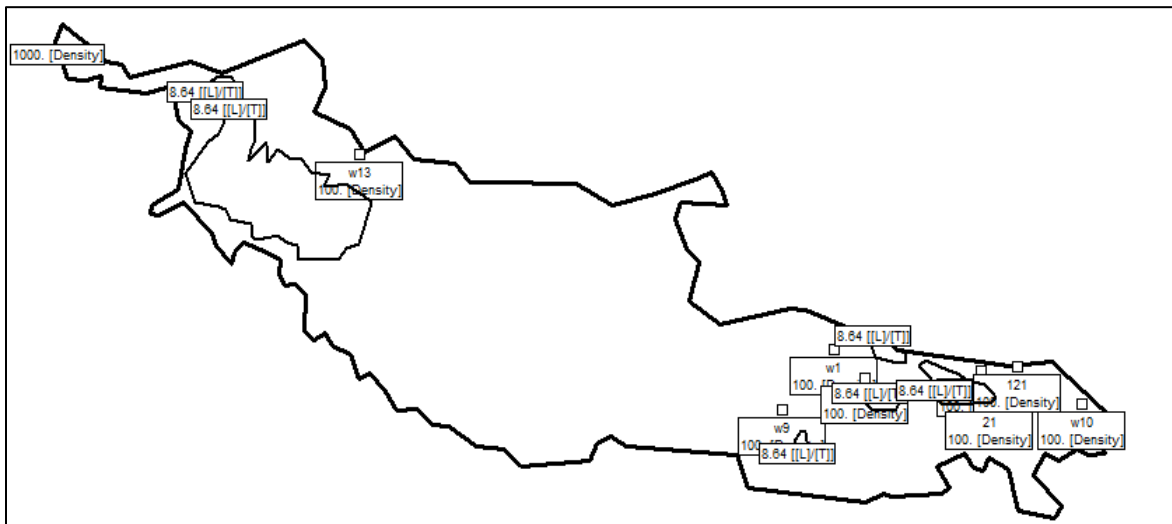


Σχήμα 14: Απεικόνιση των τμημάτων εισροών, εκροών και επαφής με τη θάλασσα με την χρήση του μοντέλου PTC, για την εισαγωγή οριακών συνθηκών

- ✓ Πραγματοποιείται ψηφιοποίηση των ισοϋψών καμπύλων από τον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής μέσω GIS, ώστε να γίνει εισαγωγή του υψομέτρου και στη συνέχεια, με την μέθοδο της παρεμβολής (interpolation method), τα διάφορα ύψη ενσωματώνονται αυτόματα στο μοντέλο και έτσι μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια το ανάγλυφο της περιοχής. Στα απόλυτα υψόμετρα της περιοχής προστέθηκαν 200 m για αποφυγή των αρνητικών τιμών στο μοντέλο.
- ✓ Εισάγεται η υδραυλική αγωγιμότητα, αφού πρώτα γίνει η διακριτοποίηση των επιμέρους υδρογεωλογικών ενοτήτων (φακοί). Στην περιοχή επικρατούν πετρώματα κυρίως ασβεστολιθικά, ενώ στο αριστερό και δεξί τμήμα της περιοχής όπου υπάρχουν οι ‘φακοί’, παρουσιάζεται φλύσχη. Οι υδραυλικές αγωγιμότητες θεωρούνται ίδιες για τις διευθύνσεις x και y, ενώ για την διεύθυνση z επιλέγεται μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στις τρεις διευθύνσεις τόσο για την ευρύτερη περιοχή όσο και για τα σημεία των ‘φακών’, καθώς και ο χάρτης της περιοχής μελέτης μαζί με τους διαφορετικούς υδρογεωλογικούς σχηματισμούς.

Υδραυλική αγωγιμότητα k (m/d)	k <sub>x</sub>	k <sub>y</sub>	k <sub>z</sub>
Περιοχή μελέτης	86,4	86,4	8,64
Φακοί	8,64	8,64	0,864

Πίνακας 5.1.1: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας



Σχήμα 15: Απεικόνιση της περιοχής μελέτης και των φακών με την χρήση του μοντέλου PTC

- ✓ Εισάγεται η παράμετρος της βροχόπτωσης στο μοντέλο, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα υπόγεια ύδατα μέσω της διαδικασίας της διήθησης, μέσω της οποίας ένα ποσοστό νερού καταλήγει στους υδροφορείς. Από την μελέτη του Ματιάτου και με βάση τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό του Πόρου υπολογίστηκε ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 603 mm. Θεωρείται ότι βροχόπτωση παρατηρείται μόνο κατά την υγρή περίοδο, η διάρκεια της οποίας είναι 180 μέρες, και έτσι τίθεται η τιμή μηδέν για τις ξηρές περιόδους. Επομένως, η βροχόπτωση μετατρέπεται σε m/d και εφαρμόζεται μόνο για τις υγρές περιόδους ως εξής:

$$603 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ yr}}{180 \text{ d}} = 3,35 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{d}}$$

Από την παραπάνω τιμή, που αποτελεί την συνολική βροχόπτωση για τις υγρές περιόδους, θεωρείται ότι μόνο ένα ποσοστό 20% διηθείται τελικά και καταλήγει στα υπόγεια ύδατα. Έτσι, το διηθούμενο ποσό βροχόπτωσης που εισάγεται τελικά στο μοντέλο προκύπτει ως εξής:

$$3,35 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{d}} \cdot 0,20 = 6,7 \times 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{d}} = \mathbf{0,00067 \frac{m}{d}}$$

- ✓ Εισάγονται ψηφιακά τα πηγάδια που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης μέσω τοπογραφικού χάρτη και καταγράφονται στο μοντέλο τα αρχικά υδραυλικά ύψη τόσο των πηγαδιών άντλησης όσο και των πηγαδιών παρατήρησης. Στα αρχικά υδραυλικά ύψη των πηγαδιών, προστέθηκαν 200 μέτρα γιατί το μοντέλο, με τα αρχικά υδραυλικά ύψη, χωρίς τροποποίηση, εξάγει αρνητικές τιμές για τα υδραυλικά ύψη, γεγονός που θελήσαμε να αποφύγουμε. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περιοχή πιθανόν να υπάρχουν και πολλές ιδιωτικές γεωτρήσεις, κάποιες από τις οποίες έχουν δηλωθεί

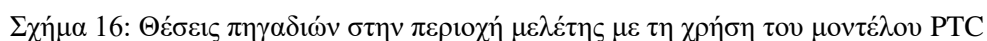


και λειτουργούν νόμιμα ενώ κάποιες άλλες όχι. Παρόλα αυτά, για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας, λαμβάνονται υπόψιν μόνο τα δημοτικά πηγάδια. Παρακάτω, στον πίνακα 5.1.2, παρουσιάζονται τα αρχικά υδραυλικά ύψη όλων των πηγαδιών, με εξαίρεση τα πηγάδια άντλησης F21 και F121, για τα οποία δεν υπήρχαν δεδομένα.

<b>Πηγάδια άντλησης</b>		
<b>Ταυτότητα πηγαδιών</b>	<b>Αρχικά υδραυλικά ύψη (initial heads), m</b>	<b>Αρχικά υδραυλικά ύψη (initial heads) με προσθήκη 200 μέτρων, m</b>
F2	1,2	201,2
F25	0,78	200,78
F26	1,01	201,01
F28	1,14	201,14
F47	1,98	201,98
F21	-	-
F121	-	-
<b>Πηγάδια παρατήρησης</b>		
<b>Ταυτότητα πηγαδιών</b>	<b>Αρχικά υδραυλικά ύψη (initial heads), m</b>	<b>Αρχικά υδραυλικά ύψη (initial heads) με προσθήκη 200 μέτρων, m</b>
F1	0,85	200,85
F87	1,24	201,24
G12	1,25	201,25
G131	2,87	202,87
G136	0,91	200,91
G3	1,08	201,08
G35	2,18	202,18
G5	3,26	203,26
G6	0,48	200,48
G8	0,32	200,32
F78	0,51	200,51
F82	27,62	227,62
G41	5,1	205,1
G53	15,6	215,6
G73	21,97	221,97
G4	8,78	208,78

Πίνακας 5.1.2: Αρχικά υδραυλικά ύψη πηγαδιών

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ακριβείς θέσεις των πηγαδιών που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης καθώς και τα αρχικά υδραυλικά ύψη τους. Όπως παρατηρείται, τα περισσότερα πηγάδια βρίσκονται συγκεντρωμένα στην ανατολική πλευρά της περιοχής.



Πηγάδια άντλησης		
	Ρυθμός άντλησης, m <sup>3</sup> /d	
Ταυτότητα πηγαδιών	Ξηρή περίοδος	Υγρή περίοδος
F2	-1440	-840
F25	-1200	-480
F26	-1440	-720
F28	-1920	-840
F47	-2400	-1560
F21	-1920	-600
F121	-2400	-1920
Συνολικός ρυθμός άντλησης	<b>-12720</b>	<b>-6960</b>

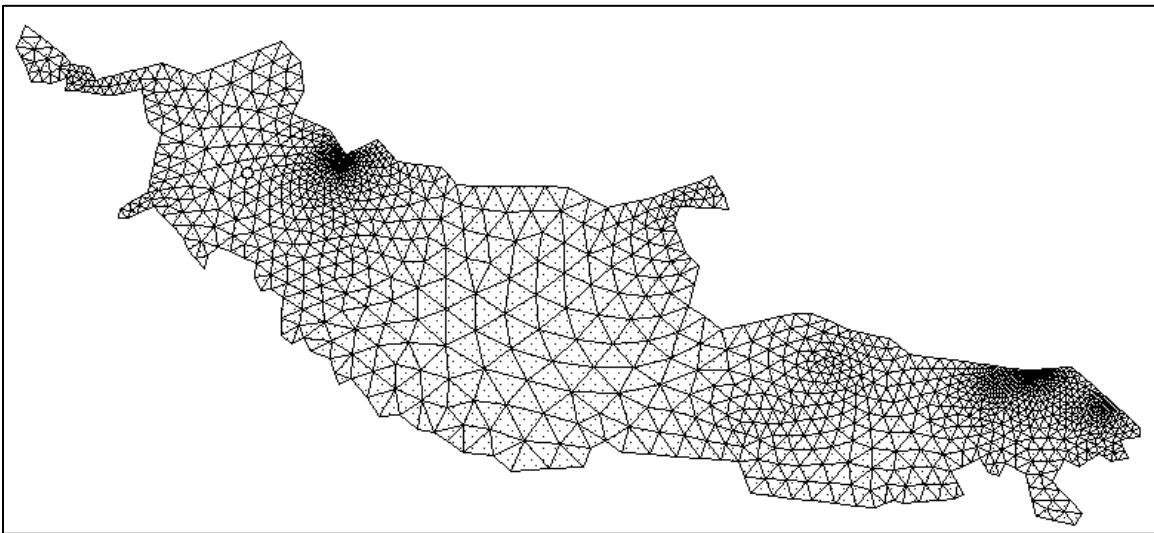
42

- ✓ Γίνεται καταγραφή των υψομέτρων τόσο για το κατώτατο στρώμα (bottom elevation  $L_0$ ) όσο και για το στρώμα από όπου αντλούνε τα πηγάδια (elevation  $L_1$ ). Όπως αναφέρθηκε, στα υψόμετρα προστίθενται 200 μέτρα και οι τιμές που προκύπτουν είναι και αυτές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Στον πίνακα 5.1.4, παρουσιάζονται οι τιμές των υψομέτρων αυτών με τη προσθήκη των 200 μέτρων, με εξαίρεση τα πηγάδια άντλησης F121 και F21 για τα οποία δεν δόθηκαν δεδομένα.

Πηγάδια άντλησης και παρατήρησης		
Ταυτότητα πηγαδιών	Bottom elevation $L_0$ , m	Elevation $L_1$ , m
F1	105,36	205,36
F2	139,1	219,1
F25	153,41	203,41
F26	142,1	202,1
F28	119,73	209,73
F47	63,44	203,44
F21	-	-
F121	-	-
F87	43,6	204,02
G12	151,21	231,21
G131	81,8	211,8
G136	63,25	203,25
G3	111,78	211,78
G35	161,11	221,11
G5	197,06	217,06
G6	91,98	201,98
G8	33,96	223,96
F78	132,8	202,8
F82	180,1	230,1
G41	173,5	233,5
G53	197,34	247,34
G73	174,1	225,9
G4	150,5	230,5

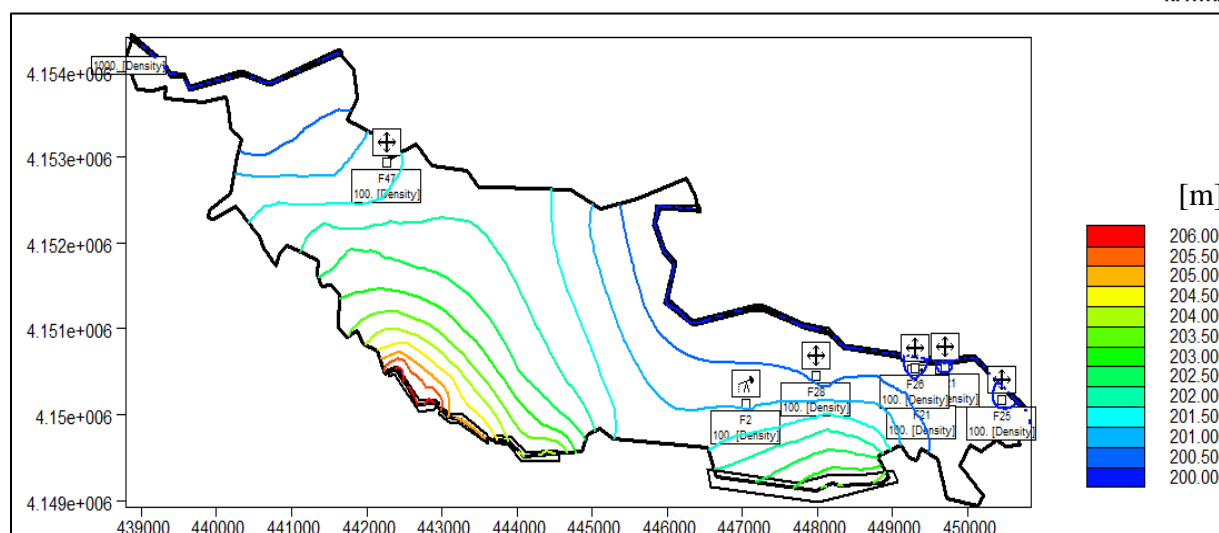
Πίνακας 5.1.4: Τιμές υψομέτρων για τα στρώματα

- ✓ Κατασκευάζεται το πλέγμα / κανάβος, ο οποίος διαιρεί την περιοχή σε τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, στην κορυφή των οποίων υπάρχουν οι κόμβοι. Το πρόγραμμα Argus One student επιτρέπει την δημιουργία κανάβου μέχρι 2000 στοιχείων. Για τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εργασίας, επειδή η περιοχή μελέτης είναι αρκετά μεγάλη, και τα στοιχεία είναι περισσότερα από 2000, χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο πρόγραμμα του καθηγητή μου, κ. Καρατζά. Επάνω στους κόμβους του πλέγματος επιλύονται οι εξισώσεις του μοντέλου, και όπως παρατηρείται στο σχήμα 17, για μεγαλύτερη ακρίβεια στην επίλυση, το πλέγμα γύρω από τα πηγάδια άντλησης γίνεται πιο πυκνό. Συνολικά, στην παρούσα εργασία, ο κανάβος αποτελείται από 1393 κόμβους (nodes) και 2492 στοιχεία (elements)



Σχήμα 17: Πλέγμα (mesh) της περιοχής μελέτης με την χρήση του μοντέλου PTC

- ✓ ‘Τρέχει’ το μοντέλο, με την εντολή RUN ώστε να εξάγει τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών, των ταχυτήτων και των συγκεντρώσεων για όλες τις χρονικές περιόδους.
- ✓ Τέλος, αναπαρίστανται γραφικά τα υδραυλικά ύψη με βάση το αρχείο εξόδου που αντιστοιχεί στην τελευταία περίοδο προσομοίωσης (περίοδος 8). Ακολουθεί το αντίστοιχο σχήμα (σχήμα 18).

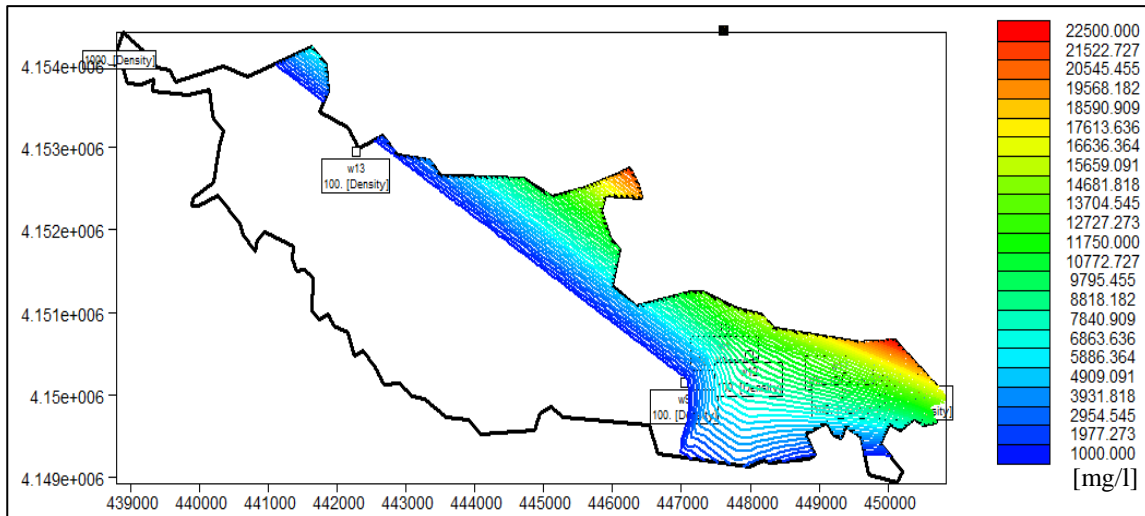


Σχήμα 18: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου PTC για τα υδραυλικά ύψη της περιοχής που αντιστοιχούν στην τελευταία περίοδο (8<sup>η</sup>) όταν τα πηγάδια αντλούν

✓ Επίσης, γίνεται γραφική αναπαράσταση της αρχικής συγκέντρωσης των **χλωριώντων** με σκοπό την εύρεση της ζώνης υφαλμύρισης, δηλαδή να υπολογιστεί περίπου μέχρι που φθάνει η σφήνα του υφάλμυρου νερού. Δεδομένα για **χλωριώντα** δόθηκαν μόνο για τέσσερα πηγάδια και καταγράφονται στον πίνακα 5.1.5.

Ταυτότητα πηγαδιών	Αρχική συγκέντρωση χλωριώντων (mg/l)
F1	10467
F25	16750
F26	16045
F28	9845

Πίνακας 5.1.5: Τιμές συγκέντρωσης χλωριώντων



Σχήμα 19: Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου PTC για τις συγκεντρώσεις των χλωριώντων

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 19, το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι πιο έντονο στην ανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης, μιας και οι μεγαλύτερες τιμές συγκεντρώσεων για χλωριόντα παρατηρούνται στα πηγάδια που βρίσκονται σε αυτή την μεριά. Για αυτό το λόγο, επίκεντρο της εργασίας είναι η μελέτη της υφαλμύρισης σε αυτό το κομμάτι της περιοχής. Επίσης παρατηρείται ότι το φαινόμενο μειώνεται πλήρως στην περιοχή όπου βρίσκεται η ισοσταθμική των 201 μέτρων. Επομένως, χρησιμοποιώντας την σχέση Ghyben – Herzberg που έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο σημείο,

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40 h_f$$

και θέτοντας ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας,  $h_f = 1$  m, προκύπτει:

$$\xi = 40 h_f = 40 \cdot 1 \text{ m} \rightarrow \xi = 40 \text{ m}$$

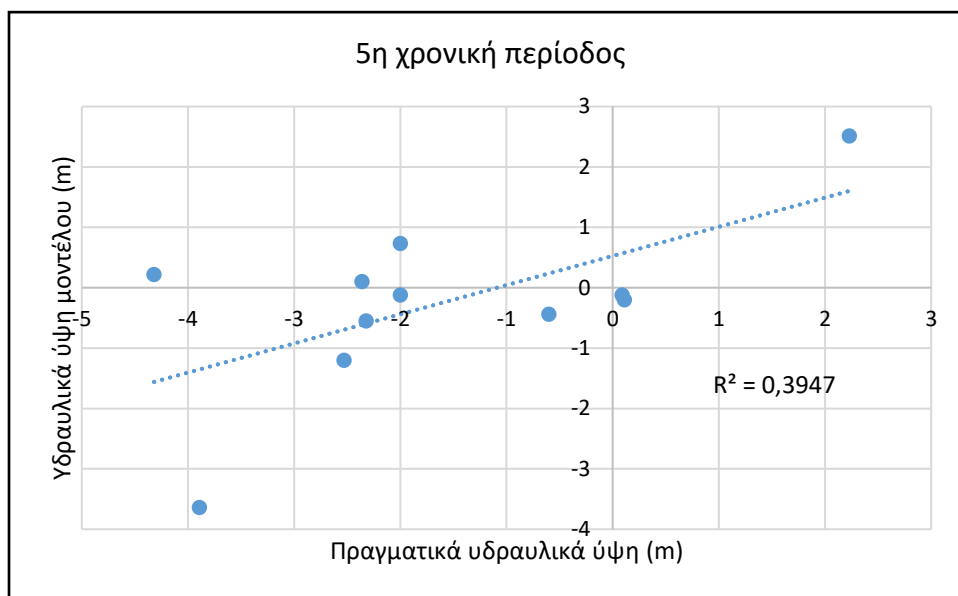
Επομένως, με σκοπό την μείωση της υφαλμύρισης, δηλαδή την όλο και λιγότερη εισχώρηση της σφήνας στην περιοχή μελέτης, θα πρέπει το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας,  $h_f$ , να είναι μεγαλύτερο από 1 m ( $h_f > 1$  m), δηλαδή τουλάχιστον 201 μέτρα.

## 5.2 Διαδικασία βαθμονόμησης

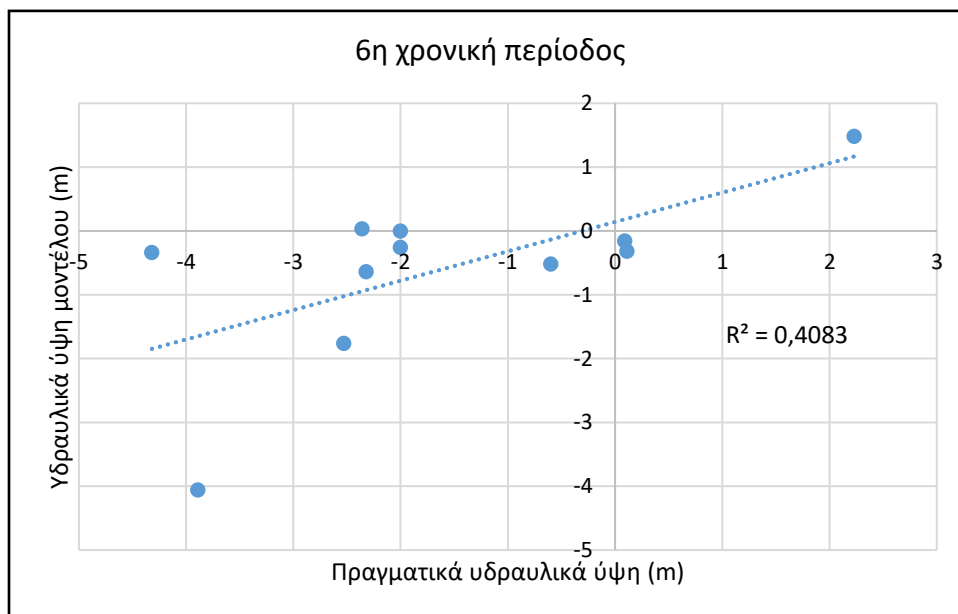
Η βαθμονόμηση αποτελεί μια σημαντική διαδικασία η οποία αποσκοπεί στην ακριβή αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των υδραυλικών υψών και των ροών στην περιοχή μελέτης. Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, εισάγονται στο μοντέλο διάφορες παράμετροι μέσω των οποίων προσεγγίζονται οι πραγματικές τιμές ροών και υδραυλικών υψών που υπάρχουν στο πεδίο. Συνήθως, για την βαθμονόμηση, ακολουθείται η διαδικασία της δοκιμής και σφάλματος (trial and error), στην οποία αλλάζονται κάθε φορά οι τιμές των παραμέτρων μέχρις ότου το μοντέλο να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές τιμές του πεδίου.

Στην συγκεκριμένη εργασία, πραγματοποιήθηκε μια σειρά επαναλήψεων, στις οποίες επιλέχθηκε μια συγκεκριμένη ημερομηνία (1/9/2008) που παρέχει δεδομένα για τις πραγματικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα δεδομένα αυτής της ημερομηνίας για τα παρατηρούμενα υδραυλικά ύψη και έγινε συσχέτιση με τα αποτελέσματα της 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> περιόδου (3<sup>ο</sup> έτος) μόνο για τα πηγάδια για τα οποία υπήρχαν δεδομένα, όπως αυτά εξήχθησαν μέσω του μοντέλου. Η βαθμονόμηση λαμβάνει τέλος όταν η συσχέτιση των πραγματικών τιμών και των αποτελεσμάτων φτάσει σε έναν ικανοποιητικό βαθμό.

Οι επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν έτσι ώστε να υπάρξει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα ήταν πολλές, καθώς η βαθμονόμηση αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να υπάρξει ένας βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων έτσι ώστε να υφίσταται το επιθυμητό αποτέλεσμα, γεγονός που απαιτεί μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, στις οποίες μάλιστα συναντώνται αρκετά εμπόδια. Στην συγκεκριμένη εργασία, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε σε περιόδους με ενεργές τις αντλήσεις και αφορά όλο το χρονικό διάστημα των τεσσάρων χρόνων, και με βάση τα αποτελέσματα και τις πραγματικές τιμές που προαναφέρθηκαν, εξήχθησαν τα εξής διαγράμματα:



Διάγραμμα 1: Συσχέτιση αποτελεσμάτων μοντέλου και πραγματικών τιμών για την 5<sup>η</sup> χρονική περίοδο



Διάγραμμα 2: Συσχέτιση αποτελεσμάτων μοντέλου και πραγματικών τιμών για την 6<sup>η</sup> χρονική περίοδο

Όπως παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα (διαγράμματα 1 και 2), η βέλτιστη ευθεία δεν αντιπροσωπεύει πλήρως όλα τα σημεία. Παρόλα αυτά θεωρείται πως η βαθμονόμηση λαμβάνει τέλος, δηλαδή η συσχέτιση των πραγματικών τιμών και των αποτελεσμάτων έχει φτάσει σε έναν ικανοποιητικό βαθμό και γίνονται αποδεκτές οι τιμές του  $R^2$ . Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές βρίσκονται εκτιμητικά στα ίδια επίπεδα, δηλαδή οι τιμές του μοντέλου δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις μετρήσεις πεδίου και αυτό θεωρείται αρκετό, επειδή οι ημερομηνίες για τις οποίες τρέχει το μοντέλο δεν συμπίπτουν με τις ημερομηνίες που αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές.



Σημείωση: Η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε πριν την προσθήκη των 200 μέτρων στις τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.2.1, οι τιμές των υδραυλικών υψών που προκύπτουν από το μοντέλο είναι αρνητικές. Για αυτό το λόγο έγινε η προσθήκη των 200 μέτρων σε όλες τις τιμές και στη συνέχεια τρέχοντας και πάλι το μοντέλο εξήχθησαν νέα αποτελέσματα, στα οποία στηρίχθηκε και συνεχίστηκε η συγκεκριμένη εργασία.

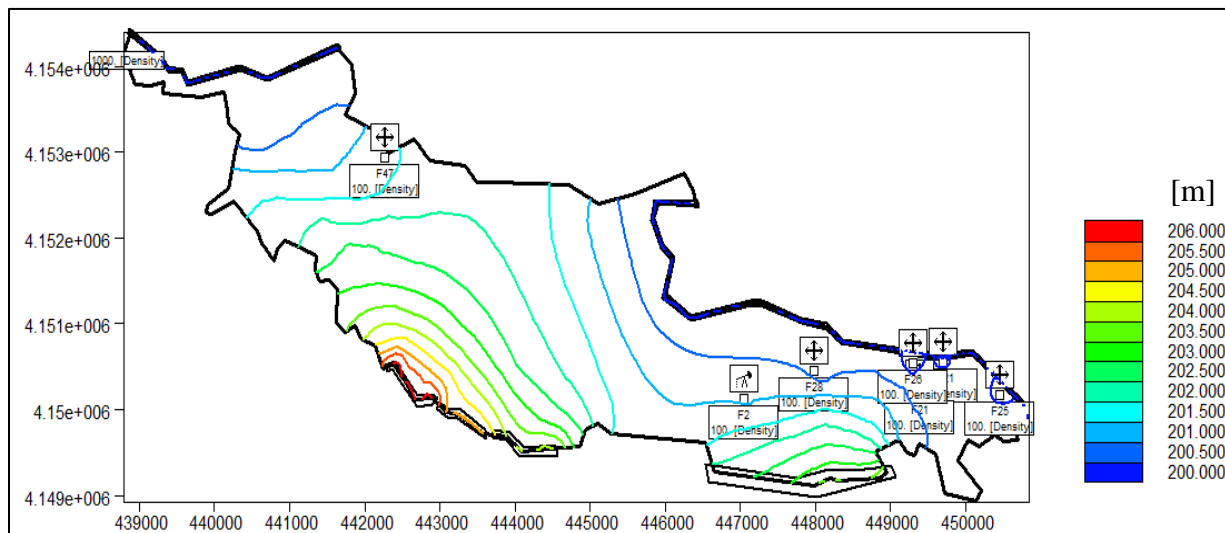
Ταυτότητα α πηγαδιών	Ημερομηνία α δεδομένων	Παρατηρούμενα υδραυλικά ύψη (πραγματικές τιμές)	Αριθμός κόμβου	Υδραυλικά ύψη για την 5 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (αποτελέσματα)	Υδραυλικά ύψη για την 6 <sup>η</sup> χρονική περίοδο (αποτελέσματα)
F1	1/9/2008	0,09	621	<b>-0,12</b>	<b>-0,16</b>
G12	1/9/2008	-3,89	739	<b>-3,64</b>	<b>-4,06</b>
G131	1/9/2008	-2	833	0,73	<b>-0,0017</b>
G136	1/9/2008	-2,32	737	<b>-0,55</b>	<b>-0,64</b>
G3	1/9/2008	-0,6	650	<b>-0,44</b>	<b>-0,52</b>
G35	1/9/2008	-4,32	845	0,22	<b>-0,34</b>
G5	1/9/2008	0,11	532	<b>-0,2</b>	<b>-0,32</b>
G6	1/9/2008	-2	803	<b>-0,12</b>	<b>-0,26</b>
G8	1/9/2008	-2,53	750	<b>-1,2</b>	<b>-1,76</b>
F78	1/9/2008	-2,36	1260	0,1	0,032
G41	1/9/2008	2,23	795	2,51	1,48

Πίνακας 5.2.1: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη της 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> χρονικής περιόδου πριν την προσθήκη των 200 μέτρων

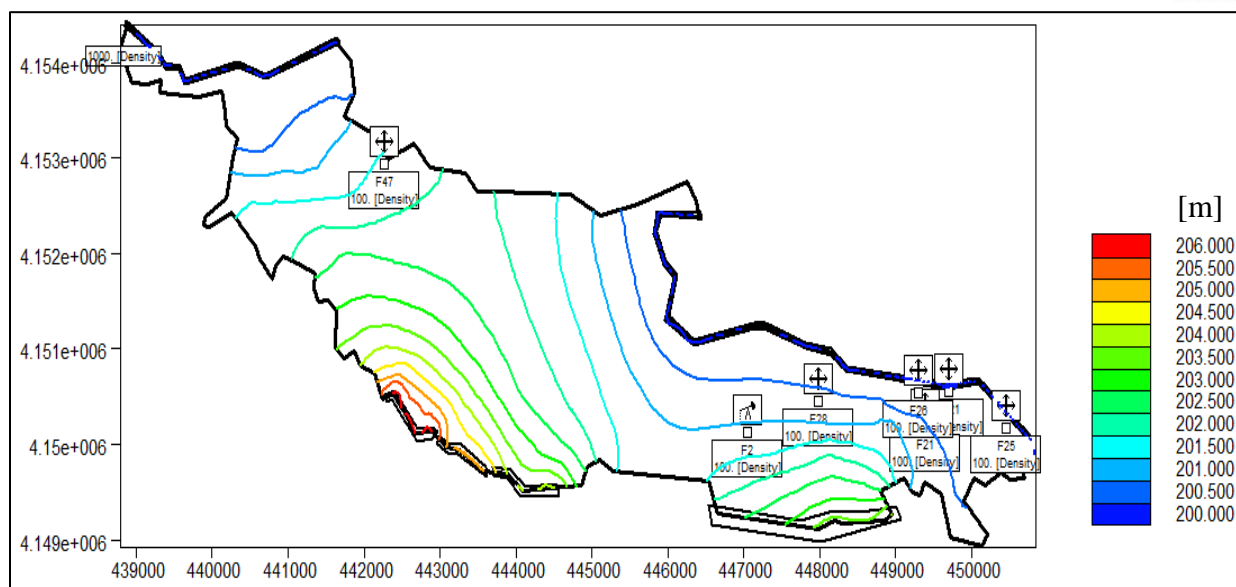
### 5.3 Αποτελέσματα μοντέλου

Για την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός ρυθμών άντλησης των πηγαδιών με σκοπό την μείωση του φαινομένου της υφαλμύρισης, γίνεται σύγκριση των γραφικών αποτελεσμάτων του μοντέλου για την 8<sup>η</sup> χρονική περίοδο (ξηρή περίοδος), για την περίπτωση όπου τα πηγάδια αντλούν με τους δεδομένους ρυθμούς άντλησης, και των γραφικών αποτελεσμάτων του μοντέλου όταν τα πηγάδια δεν αντλούν, δηλαδή υπάρχει μηδενικός ρυθμός άντλησης για όλες τις χρονικές περιόδους. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή για την περίπτωση όπου τα πηγάδια αντλούν κανονικά με τους δεδομένους ρυθμούς άντλησης (σχήμα 20) και για την περίπτωση όπου και τα επτά πηγάδια είναι κλειστά (σχήμα 21).

Επίσης, το σχήμα 20 αντιστοιχεί στην τελική βαθμονόμηση με βάση πρώτου και δεύτερου είδους οριακές συνθήκες και με προσθήκη 200 μέτρων βάθους. Το πεδίο ροής (ταχύτητες ροής) της περιοχής μελέτης, όταν όλα τα πηγάδια αντλούν με τους δεδομένους ρυθμούς άντλησης, φαίνεται στο σχήμα 22. Όπως ήταν αναμενόμενο, το νερό ρέει προς την θάλασσα με ένα μικρό κομμάτι να καταλήγει στο βορειοδυτικό μέρος της περιοχής που βρέχεται από θάλασσα, και το υπόλοιπο μέρος των υδάτων, να καταλήγει βορειοανατολικά, όπου βρίσκεται και το μεγαλύτερο μήκος ακτογραμμής.

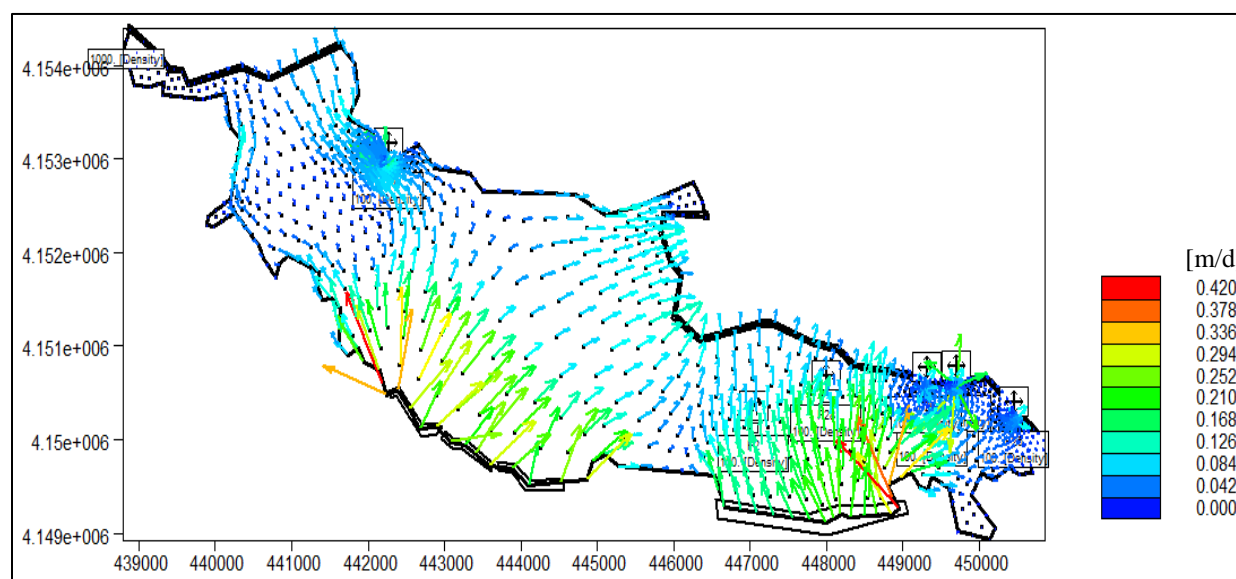


Σχήμα 20: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη της 8<sup>ης</sup> περιόδου όταν όλα τα πηγάδια αντλούν με δεδομένους ρυθμούς άντλησης



Σχήμα 21: Αποτελέσματα μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη της 8<sup>ης</sup> περιόδου όταν όλα τα πηγάδια είναι κλειστά

Όπως παρατηρείται από τα γραφικά αποτελέσματα, το επίπεδο της θάλασσας βρίσκεται στα 200 μέτρα και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα όσο απομακρυνόμαστε από την ακτή δεν αυξάνεται αλλά μειώνεται, γεγονός που φανερώνει καθαρά τη διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό, την εμφάνιση δηλαδή του φαινομένου της υφαλμύρισης. Αντικειμενικός σκοπός της εργασίας είναι να διατηρηθεί ο υδροφόρος ορίζοντας όσο το δυνατόν γίνεται στο επίπεδο της θάλασσας. Με την υπάρχουσα κατάσταση, μια μεγάλη περιοχή του υδροφορέα έχει στάθμη υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ 200 και 207 μέτρων.



Σχήμα 22: Πεδίο ροής των υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης όταν όλα τα πηγάδια αντλούν

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΑΧΑΙΤΗΣΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 6.1 Ορισμός του προβλήματος

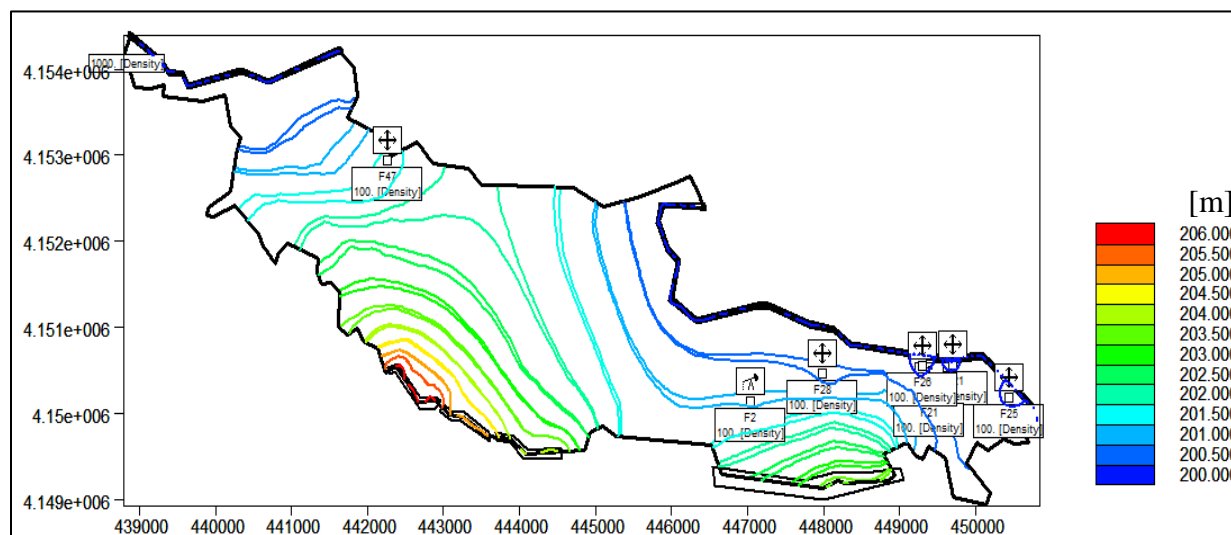
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην περιοχή μελέτης εξετάζονται επτά πηγάδια άντλησης, τα οποία βρίσκονται διάσπαρτα στο χώρο, με τα περισσότερα να βρίσκονται συγκεντρωμένα στο ανατολικό κομμάτι της περιοχής καθώς μόνο ένα πηγάδι απέχει πολύ από τα υπόλοιπα και βρίσκεται στην βορειοδυτική πλευρά. Όσον αφορά τους ρυθμούς άντλησης των πηγαδιών, όλα αντλούν με μέγιστες παροχές άντλησης (ξηρή περίοδος), οι οποίες μάλιστα είναι διαφορετικές μεταξύ τους.

Ο στόχος της παρούσας βελτιστοποίησης είναι να παραμείνει η ισοσταθμική καμπύλη των 201 μέτρων όσο γίνεται πιο κοντά στην ακτογραμμή, δηλαδή να μην γίνει ακόμα πιο έντονο το ήδη αυξημένο φαινόμενο της υφαλμύρισης. Στην διαδικασία αυτή, θα μελετηθούν μόνο τα έξι από τα επτά πηγάδια άντλησης καθώς το πηγάδι F47 βρίσκεται στην δυτική πλευρά της περιοχής και δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Επίσης, στα σενάρια που γίνονται για εξαγωγή βέλτιστης λύσης, λαμβάνεται ότι τα πηγάδια δεν αντλούν καθόλου τον χειμώνα και έτσι τίθενται μηδενικές τιμές για τις υγρές περιόδους όλων των πηγαδιών. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ο σκοπός εξυπηρετεί μόνο τις ανάγκες της βελτιστοποίησης καθώς έχει ρεαλιστικά αλλά όχι πραγματικά χαρακτηριστικά.

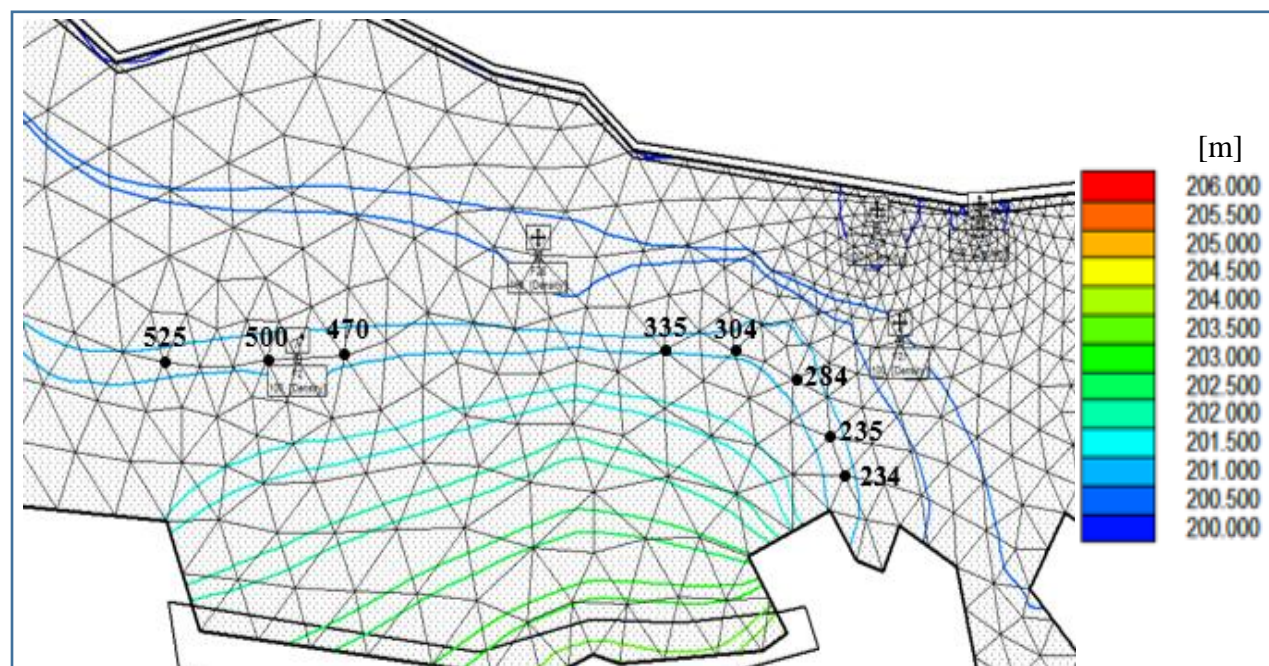
Η διαδικασία της βελτιστοποίησης αρχίζει λαμβάνοντας 8 σημεία παρατήρησης στην περιοχή ανάμεσα στην ισοσταθμική των 201 μέτρων όταν τα πηγάδια αντλούν, και στην ισοσταθμική των 201 μέτρων όταν όλα τα πηγάδια είναι κλειστά, και από αυτά, μέσω μεθόδων βελτιστοποίησης που θα αναλυθούν, θα μελετάται κατά πόσο μετακινείται η σφήνα της υφαλμύρισης προς τα έξω.

Στα σχήματα 20 και 21 φαίνεται η προσομοίωση του μετώπου της υφαλμύρισης όταν τα πηγάδια είναι ανοιχτά και όταν τα πηγάδια είναι κλειστά για προσομοίωση τεσσάρων χρόνων, ενώ στο σχήμα 23 παρουσιάζονται και οι δύο περιπτώσεις μαζί. Τα σημεία παρατήρησης ανάμεσα στα δύο μέτωπα, με φορά από τα δυτικά προς τα ανατολικά, βρίσκονται στους κόμβους 525, 500, 470, 335, 304, 284, 235 και 234 και στο εξής θα αναφέρονται ως πηγάδια παρατήρησης 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 και 8. Σε αυτούς τους κόμβους θα μελετάται η επίδραση στην κατάσταση των υπογείων υδάτων, όταν γίνονται διάφορες μεταβολές στις παροχές άντλησης των πηγαδιών.

Στο σχήμα 24, φαίνονται με μεγέθυνση της περιοχής, οι κόμβοι παρατήρησης και η νοητή γραμμή που ενώνει τους κόμβους αυτούς μεταξύ τους λαμβάνεται ως η οριακή επιτρεπτή θέση για την μετατόπιση του μετώπου υφαλμύρισης προς την ενδοχώρα, ή αλλιώς το ελάχιστο επιτρεπτό υδραυλικό ύψος στους κόμβους είναι 201 μέτρα.



Σχήμα 23: Μεταβολή των υδραυλικών υψών για την 8<sup>η</sup> περίοδο στις περιπτώσεις όπου όλα τα πηγάδια αντλούν και όλα είναι κλειστά



Σχήμα 24: Κόμβοι παρατήρησης στην περιοχή μελέτης για την ισοσταθμική καμπύλη των 201 μέτρων

Το πρόβλημα που τίθεται σε μελέτη στην συγκεκριμένη εργασία, μπορεί να εκφραστεί με μαθηματικούς όρους ως εξής:

$$\max \sum_{i=1}^6 q_i \text{ subject to } H_1, H_2, \dots, H_{10} \geq 201$$

$$0 \leq q_1 \leq 1200$$

$$0 \leq q_2 \leq 2400$$

$$0 \leq q_3 \leq 1440$$

$$0 \leq q_4 \leq 1920$$

$$0 \leq q_5 \leq 1920$$

$$0 \leq q_6 \leq 1440$$

Στην παραπάνω μαθηματική έκφραση, οι δείκτες 1,2,...,6 αντιστοιχούν στα πηγάδια άντλησης με την εξής σειρά: F<sub>25</sub>, F<sub>121</sub>, F<sub>26</sub>, F<sub>21</sub>, F<sub>28</sub>, F<sub>2</sub>. Όπως δείχνουν οι ανισότητες, οι παροχές στα πηγάδια άντλησης δεν μπορούν να υπερβούν τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές τους και δεν μπορούν να είναι μικρότερες από μηδέν.

## 6.2 Προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού

Όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα, στις περιπτώσεις όπου εφαρμόζονται προβλήματα βελτιστοποίησης, πολλές φορές η αντικειμενική συνάρτηση και οι συναρτήσεις των περιορισμών παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η απευθείας αντιμετώπιση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού. Αυτή η μη γραμμική συμπεριφορά οφείλεται κυρίως στην μη γραμμική απόκριση του συστήματος στην άντληση, δηλαδή το υδραυλικό ύψος δεν μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την παροχή, και παρουσιάζεται συνήθως στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν ελεύθεροι υδροφορίες.

Έτσι, για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, χρησιμοποιείται ένας εναλλακτικός αλγόριθμος, με διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις επίλυσης του συστήματος υπογείων υδάτων, ο

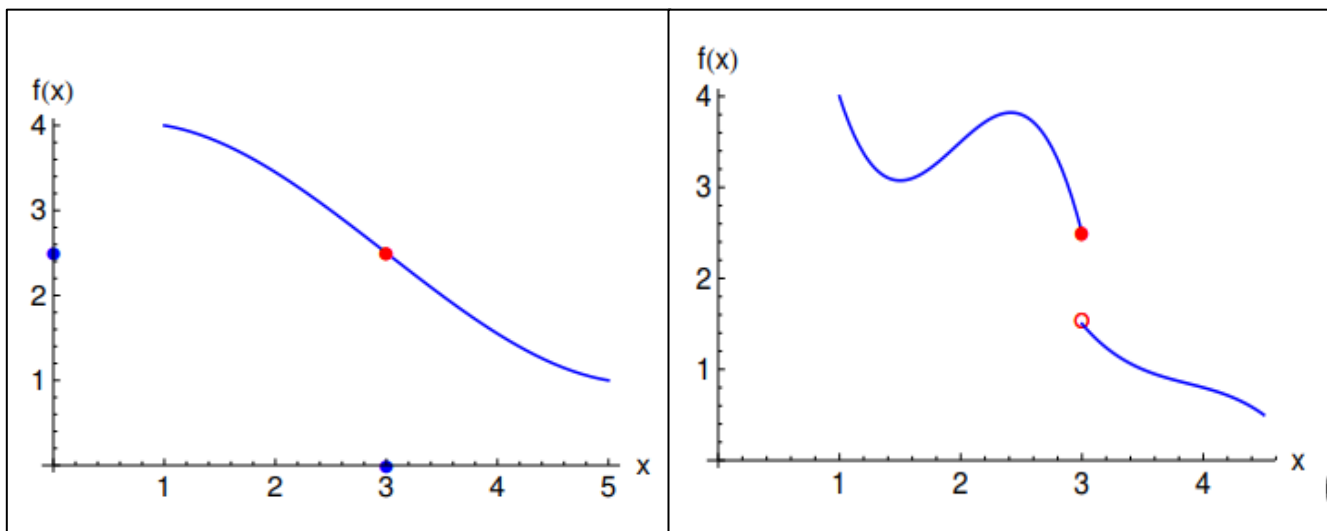


οποίος όμως απαιτεί μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο για την εξαγωγή λύσης και δεν εγγυάται πως η λύση που προκύπτει θα είναι η βέλτιστη.

### 6.2.1 Δομή μη γραμμικών προβλημάτων

Τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού απαιτούν μια ειδική μεταχείριση και αντιμετώπιση καθώς προστίθεται επιπλέον πολυπλοκότητα τόσο στις χρησιμοποιούμενες μεθόδους όσο και στην επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των μη γραμμικών συναρτήσεων και των αντίστοιχων μεθόδων βελτιστοποίησης είναι η συνέχεια της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι μη γραμμικές συναρτήσεις διαφοροποιούνται μεταξύ τους με τον διαχωρισμό τους σε συνεχείς και μη συνεχείς. Η αντικειμενική συνάρτηση θεωρείται συνεχής όταν  $\lim_{h \rightarrow 0} f(x+h) = f(x)$  για κάθε τιμή της μεταβλητής  $x$ . Στα διαγράμματα 3 και 4 φαίνεται γραφικά η συνέχεια και η ασυνέχεια μιας συνάρτησης:

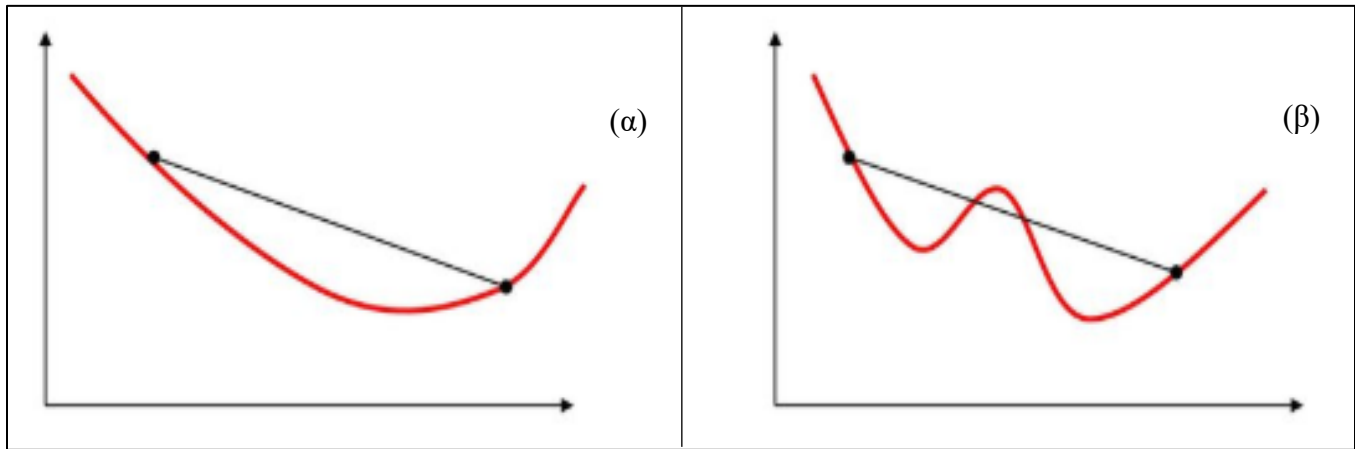


Διάγραμμα 3: Συνάρτηση συνεχής στο  $x_0 = 3$  [29]

Διάγραμμα 4: Συνάρτηση ασυνεχής στο  $x_0 = 3$  [29]

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι η κυρτότητα. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης επηρεάζεται άμεσα από την γραφική αναπαράσταση που έχει μια συνεχής μη γραμμική συνάρτηση  $f$  η οποία καθορίζεται από την έννοια της κυρτότητας. Πιο συγκεκριμένα, σε πολλές περιπτώσεις, ανάλογα με την μορφή που έχει η συνάρτηση, υπάρχει μόνο ολικό ακρότατο, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει και πλήθος από τοπικά ακρότατα. Όσον αφορά τα τοπικά ακρότατα, η ύπαρξή τους επηρεάζει αρνητικά την απόδοση των εφαρμοσμένων αλγορίθμων και την ποιότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται. Αυτό γιατί τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού επιλύονται με αλγόριθμους οι οποίοι βασίζονται στην αναζήτηση ελαχίστων, χωρίς όμως να επιβεβαιώνουν αν είναι τοπικά ή ολικά.





Διάγραμμα 5: Κυρτή συνάρτηση, στο (α) με ολικό ελάχιστο και στο (β) με δύο τοπικά ελάχιστα

### 6.3 Μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων

Η μέθοδος Simplex, η οποία θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενο στάδιο, χρησιμοποιείται ευρέως για την λύση γραμμικών προβλημάτων και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο. Αν και έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι, τα περισσότερα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να επιλυθούν με τον μοναδικό αλγόριθμο της μεθόδου αυτής, η οποία αποτελεί και την πιο δημοφιλή. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τα μη γραμμικά προβλήματα, καθώς για την επίλυσή τους, υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί αλγόριθμοι, καθένας από τους οποίους διακρίνεται ανάλογα με την φύση του προβλήματος και θεωρείται ικανοποιητικός [30].

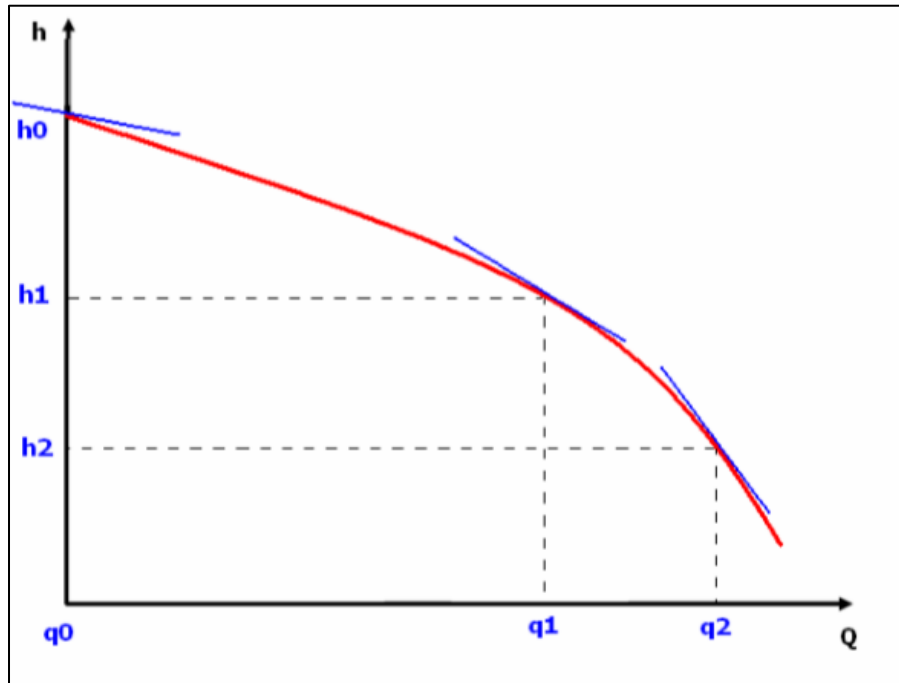
Κάποιοι βασικοί αλγόριθμοι/μέθοδοι για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων είναι [30]:

1. Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης
2. Μέθοδοι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης
3. Μέθοδοι που δεν είναι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης

#### 6.3.1 Μέθοδοι διαδοχικής γραμμικοποίησης

Η μέθοδος της διαδοχικής γραμμικοποίησης εφαρμόζεται για τη λύση των προβλημάτων στα οποία τα υδραυλικά ύψη προσομοιώνονται με εξισώσεις του ελεύθερου υδροφορέα αλλά οι υπόλοιπες παράμετροι της μαθηματικής επίλυσης είναι γραμμικές. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται, με βάση αυτές τις συνθήκες, λύνει το πρόβλημα εφαρμόζοντας διαδοχικά γραμμικές μεθόδους, εκμεταλλευόμενος την μη γραμμική φύση του υδραυλικού ύψους. Γενικά, για όλα τα γραμμικά προβλήματα θεωρείται γνωστό το πάχος του υδροφορέα και τα όρια του όγκου ελέγχου και δημιουργείται ένας πίνακας απόκρισης ο οποίος αποτελεί την βάση για την λύση του συστήματος. Σε

κάθε επανάληψη ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος και με δεδομένες τις παροχές άντλησης και θέτοντας τους κατάλληλους περιορισμούς, υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη. Αυτά στην συνέχεια, εισάγονται και πάλι στο πρόβλημα ώστε να προκύψουν τα νέα όρια του όγκου ελέγχου και να δημιουργηθεί ο νέος πίνακας απόκρισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση [30].

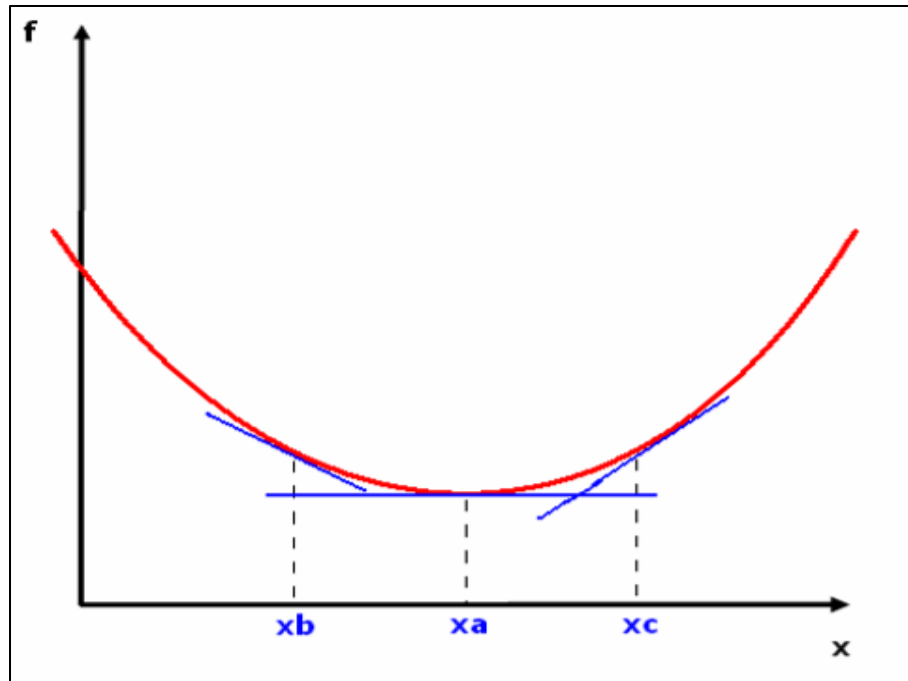


Διάγραμμα 6: Προσέγγιση της καμπύλης υδραυλικού ύψους-παροχής άντλησης από τον αλγόριθμο της διαδοχικής γραμμικοποίησης [30]

Στο διάγραμμα 6 φαίνεται η λειτουργία του διαδοχικά εφαρμοζόμενου αλγόριθμου γραμμικής επίλυσης θεωρώντας συγκεκριμένα όρια του όγκου ελέγχου σε κάθε επανάληψη. Σε καθένα από τα τρία σημεία που απεικονίζονται υπολογίζεται η παράγωγος του υδραυλικού ύψους με την παροχή άντλησης και η καμπύλη προσεγγίζεται με την εύρεση διαφορετικών κλίσεων.

### 6.3.2 Μέθοδοι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης

Η παράγωγος μιας συνάρτησης μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τη θέση του ελαχίστου σημείου της συνάρτησης. Στο διάγραμμα 7 που ακολουθεί, η συνάρτηση έχει ελάχιστο στο σημείο  $x_a$  και επομένως η παράγωγος στο σημείο αυτό είναι μηδέν. Στο σημείο  $x_b$  η παράγωγος δεν είναι μηδέν και έτσι δεν πρόκειται για ελάχιστο. Επίσης, η κλίση παρουσιάζει αρνητικό πρόσημο, γεγονός που δείχνει ότι το ελάχιστο θα βρίσκεται δεξιά του σημείου  $x_b$ . Ομοίως, στο σημείο  $x_c$  η παράγωγος δεν είναι μηδέν, επομένως το σημείο δεν είναι ελάχιστο, και η κλίση είναι θετική άρα το ελάχιστο βρίσκεται αριστερά του σημείου  $x_c$ .



Διάγραμμα 7: Εύρεση ακροτάτου με γνωστή την παράγωγο της συνάρτησης σε διάφορα σημεία [30]

Με τον παραπάνω τρόπο λύνονται τρεις βασικές κατηγορίες προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται για προβλήματα χωρίς περιορισμούς, όπου ζητούμενο είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, για μη γραμμικά προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς, όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη γραμμική και οι περιορισμοί γραμμικοί, και τέλος για προβλήματα με μη γραμμικούς περιορισμούς, όπου η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι γραμμική ή μη και οι περιορισμοί μη γραμμικοί [30].

### 6.3.3 Μέθοδοι που δεν είναι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης

Αρκετοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί στην προσπάθεια αντιμετώπισης των δυσκολιών που προκύπτουν κατά την επίλυση μη κυρτών προβλημάτων. Συχνά χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι ολικής βελτιστοποίησης, καθώς έχουν τη δυνατότητα να αποφεύγουν αποτελεσματικά τα τοπικά ακρότατα, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν απόλυτες αποδείξεις ότι τελικά εντοπίζουν τα ολικά ακρότατα. Επιπλέον, πρόκειται για αλγόριθμους που απαιτούν αρκετά υψηλή υπολογιστική ισχύ και εφαρμόζονται καλύτερα σε προβλήματα μικρής έκτασης. Στόχος της έρευνας στον τομέα αυτό είναι πλέον ο συνδυασμός τεχνικών αναζήτησης ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος και ταυτόχρονα να γίνει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων τους [30].

## 6.4 Προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού

Τα τελευταία χρόνια, ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί το δημοφιλέστερο μοντέλο που χρησιμοποιείται στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας. Ειδικότερα, χρησιμοποιείται σε προβλήματα λήψης αποφάσεων των ιδιωτικών και δημόσιων επιχειρήσεων, όπως για παράδειγμα για την προσέγγιση προβλημάτων κατανομής περιορισμένων πόρων σε εναλλακτικές και ανταγωνιστικές δραστηριότητες μεταξύ επιχειρησιακών ερευνητών [31].

### 6.4.1 Μαθηματικοί ορισμοί του γραμμικού προγραμματισμού

Στη μαθηματική γλώσσα, ο γραμμικός προγραμματισμός είναι ένα μαθηματικό μοντέλο με σκοπό την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης άγνωστων, πραγματικών μεταβλητών, η οποία να είναι συμβατή με ένα πεπερασμένο σύνολο γραμμικών ανισοτήτων. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται μεταβλητές απόφασης [31],[32].

Επίσης, όταν πρόκειται για βελτιστοποίηση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) ενός και μόνου κριτηρίου απόφασης (αντικειμενική συνάρτηση), το πρόγραμμα ονομάζεται μονοκριτήριο. Σε αυτό, ζητείται να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών ( $x_1, x_2, \dots, x_i$ ) που βελτιστοποιούν τη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση [31]:

$$g(x) = z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_ix_i$$

υπό τους γραμμικούς περιορισμούς:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1l}x_l \leq \text{ή} = \text{ή} \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2l}x_l \leq \text{ή} = \text{ή} \geq b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{ml}x_l \leq \text{ή} = \text{ή} \geq b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_l \geq 0$$

Όπου  $i = 1, 2, \dots, m$  και  $j = 1, 2, \dots, l$  είναι γνωστοί πραγματικοί συντελεστές.

#### 6.4.2 Διαδικασία μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση γίνεται σε τέσσερα στάδια τα οποία αναλύονται ως εξής [31]:

##### Στάδιο 1<sup>ο</sup> : Αντικείμενο της απόφασης

Πρώτο στάδιο της μοντελοποίησης είναι ο καθορισμός των μεταβλητών απόφασης, οι οποίες πρέπει να αντανakλούν απόλυτα το ζητούμενο της απόφασης, μέσα από τις ανάγκες του περιβάλλοντος στο οποίο θα παρθεί η απόφαση και σύμφωνα με τις αξίες μιας κοινωνίας.

Το αντικείμενο της απόφασης ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό του συνόλου των λύσεων  $A = \{x \in R^1 / Ax \leq b, x \geq 0\}$  μετά από τη διαμόρφωση περιορισμών που είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Το τετράπτυχο: τεχνολογία-περιβάλλον-πόροι-προτιμήσεις είναι η κατ' εξοχή πηγή των έμμεσων επιτρεπτών ορίων μέσα στα οποία «κινούνται» οι τιμές των μεταβλητών απόφασης.

##### Στάδιο 2<sup>ο</sup> : Κριτήρια απόφασης

Στο δεύτερο στάδιο, ο αναλυτής του προβλήματος (μοντελοποιός) οφείλει να διαμορφώσει γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης,  $z$ , σύμφωνα με τους στόχους της επιχείρησης ή του οργανισμού καθώς και τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων.

Τα κριτήρια αυτά έχουν τη μορφή:

$$[\max]g_1(x) = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_{1l}x_l$$

$$[\max]g_2(x) = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + \dots + c_{2l}x_l$$

.....

$$[\max]g_n(x) = c_{n1}x_1 + c_{n2}x_2 + \dots + c_{nl}x_l$$

Όπου  $n$  ο αριθμός των κριτηρίων και είναι η μήτρα των συντελεστών των αντικειμενικών συναρτήσεων.

##### Στάδιο 3<sup>ο</sup> : Μοντέλα απόφασης

Το τρίτο στάδιο της διαδικασίας αυτής είναι καθαρά τεχνικό. Ο αναλυτής χρησιμοποιεί μια σειρά από αλγόριθμους και σχετικές τεχνικές για την επίτευξη 'καλών' λύσεων και την τεκμηρίωση των λύσεων αυτών. Σε προβλήματα καθαρής βελτιστοποίησης, όταν το κριτήριο βελτιστοποίησης είναι ένα και μοναδικό, χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο επίτευξης βέλτιστης λύσης ο γνωστός, ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος Simplex. Σε πολυκριτήρια μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, όπου

η έννοια της βέλτιστης λύσης χάνει τη σημασία της, χρησιμοποιούνται πιο εξειδικευμένες μέθοδοι. Στις πρακτικές εφαρμογές, ο αναλυτής οφείλει σε κάθε περίπτωση να επεξεργαστεί σε βάθος τα στοιχεία επίλυσης που του παρέχει η μέθοδος simplex. Τεχνικές που συμβάλλουν αποτελεσματικά στην ανάλυση αυτή είναι η ανάπτυξη της λύσης, η ανάλυση ευαισθησίας, η παραμετρική ανάλυση και η ανάλυση ευστάθειας.

#### Στάδιο 4° : Υποστήριξη της απόφασης

Στο στάδιο αυτό, πρέπει να στηριχθεί το αποτέλεσμα/ η λύση της διαδικασίας. Σε περίπτωση που η λύση και οι επιπτώσεις της δεν ικανοποιούν τον αποφασίζοντα, θα πρέπει να αναθεωρηθεί ένας ή περισσότεροι από τους παράγοντες: τεχνολογία, περιβάλλον, πόροι και προτιμήσεις.

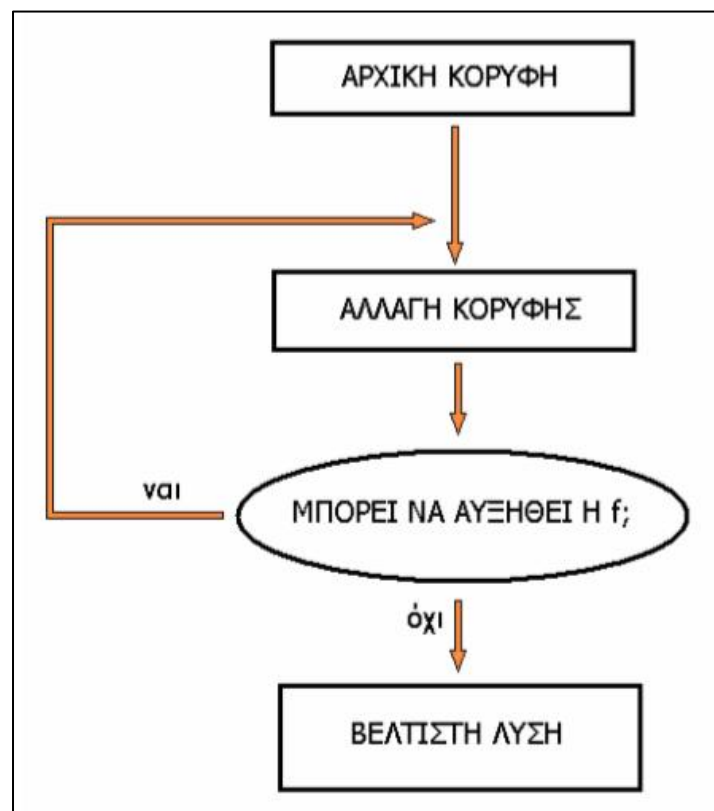
#### 6.4.3 Συνθήκες εφαρμογής μοντέλων γραμμικού προγραμματισμού

Προκειμένου να είναι εφικτή η προσέγγιση ενός προβλήματος απόφασης μέσω ενός κλασικού μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού, πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις [31]:

1. Γραμμικότητα: Το αποτέλεσμα, είτε αυτό είναι όρος περιορισμού  $a_{ij}x_j$  είτε όρος αντικειμενικής συνάρτησης  $c_jx_j$  είναι γραμμική συνάρτηση του αιτίου  $x_j$  που το προκαλεί.
2. Διαιρετότητα: Οι μεταβλητές απόφασης είναι άπειρα διαιρετές, δηλαδή εκφράζονται για παράδειγμα σε μονάδες μήκους ή βάρους. Σε περίπτωση που οι μεταβλητές δεσμεύονται να πάρουν όλες ακέραιες τιμές, το πρόβλημα εμπίπτει στην κατηγορία του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Όταν δεν δεσμεύονται όλες οι μεταβλητές να πάρουν ακέραιες τιμές, αλλά μόνο μερικές από αυτές, το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία του μικτού γραμμικού προγραμματισμού.
3. Βεβαιότητα: Τα δεδομένα του προβλήματος είναι γνωστά με απόλυτη βεβαιότητα. Όταν ορισμένα από αυτά δεν είναι γνωστά με βεβαιότητα, αλλά ακολουθούν γνωστούς στατιστικούς νόμους, ο προγραμματισμός λέγεται στοχαστικός. Επίσης, όταν η πληροφορία για κάποιους συντελεστές είναι προσεγγιστική, ο προγραμματισμός ονομάζεται ασαφής.
4. Μονοδιάστατη: Στον κλασικό γραμμικό προγραμματισμό, η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να είναι μια και μοναδική (μονοδιάστατος ή μονοκριτήριος γραμμικός προγραμματισμός) . Στην αντίθετη περίπτωση, το πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία του πολυκριτήριου γραμμικού προγραμματισμού.

## 6.5 Μέθοδος Simplex

Η μέθοδος Simplex ανακαλύφθηκε το 1947 από τον Αμερικανό George Dantzig και αποτελεί τα τελευταία χρόνια τον δημοφιλέστερο αλγόριθμο γραμμικού προγραμματισμού και γενικότερα εφαρμόζεται σε μεγάλο βαθμό στην επιχειρησιακή έρευνα. Πρόκειται για μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο μέσω της οποίας προσδιορίζεται η βέλτιστη λύση ενός γραμμικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή προσπαθεί, αφού βρεθεί μια εφικτή λύση, να βελτιώσει σε κάθε επανάληψη την τιμή της συνάρτησης κόστους ή αλλιώς αντικειμενική συνάρτηση. Η διαδικασία αυτή αρχίζει βρίσκοντας μια μεταβλητή του προβλήματος η οποία μπορεί να αυξηθεί, μειώνοντας ταυτόχρονα κάποια άλλη μεταβλητή ούτως ώστε να βρεθεί βέλτιστη τιμή της συνάρτησης κόστους. Στο σχήμα 25, παρουσιάζεται η διαδικασία που αναφέρθηκε, στην οποία με μετακίνηση από κορυφή σε κορυφή του υπερπολυέδρου  $A$ , βελτιώνεται η αντικειμενική συνάρτηση. Βέλτιστη λύση θεωρείται η κορυφή πέραν της οποίας δεν υπάρχει άλλη βελτίωση και σε αυτήν σταματάει η διαδικασία [33].



Σχήμα 25: Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου Simplex [16]



### 6.5.1 Μετατροπή του γραμμικού προβλήματος στην πρότυπη μορφή

Στο πρώτο στάδιο της μεθόδου Simplex απαιτείται ο μετασχηματισμός όλων των ανισοεξισώσεων του γραμμικού προβλήματος σε ισότητες, ώστε να προκύψει η πρότυπη μορφή  $[\max]z = c^T x$  με πίνακα  $A$  ώστε  $Ax = b$  ( $x \geq 0$ ). Για το σκοπό αυτό, εισάγεται για κάθε ανισοεξίσωση μια θετική μεταβλητή απόκλισης, η οποία προστίθεται όταν ο περιορισμός είναι τύπου  $\leq$  και αφαιρείται όταν ο περιορισμός είναι τύπου  $\geq$ . Αυτές οι μεταβλητές έχουν μηδενικό συντελεστή στην αντικειμενική συνάρτηση και το νέο γραμμικό πρόβλημα είναι ισοδύναμο με το αρχικό, από την άποψη ότι υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των λύσεων των δύο επιμέρους γραμμικών προβλημάτων.

### 6.5.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Με σκοπό την συστηματική διερεύνηση των κορυφών του υπερπολύεδρου των δυνατών λύσεων ενός γραμμικού προβλήματος, με αλγεβρικό τρόπο, και την κατεύθυνση προς την βέλτιστη λύση, απαιτούνται τα εξής θεωρήματα:

**Θεώρημα 1:** Ο αριθμός των βασικών δυνατών λύσεων ενός γραμμικού προβλήματος είναι πεπερασμένος.

**Θεώρημα 2:** Το σύνολο των δυνατών λύσεων είναι κυρτό (υπερπολύεδρο).

**Θεώρημα 3:** Κάθε βασική δυνατή λύση του γραμμικού προβλήματος είναι μια κορυφή του υπερπολύεδρου και αντίστροφα.

**Θεώρημα 4:** Εάν υπάρχει μια δυνατή λύση τότε υπάρχει και μια βασική δυνατή λύση.

**Θεώρημα 5:** Εάν υπάρχει μια βέλτιστη δυνατή λύση, τότε η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει τη βέλτιστη τιμή της σε ένα τουλάχιστον ακραίο σημείο του κυρτού συνόλου των δυνατών λύσεων, δηλαδή σε μια βασική δυνατή λύση.

## 6.6 Επίλυση του υπό μελέτη προβλήματος με χρήση γραμμικού προγραμματισμού

Για την επίλυση του παρόντος προβλήματος, εφαρμόζεται μια μέθοδος διαδοχικής γραμμικοποίησης, στην οποία σκοπός είναι να προσεγγιστεί η καμπύλη υδραυλικού ύψους – παροχής άντλησης με διαδοχικές ευθείες. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται ουσιαστικά για την εφαρμογή της μεθόδου Simplex του γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλές φορές χρησιμοποιώντας σε κάθε επανάληψη ως αρχική τιμή την ‘βέλτιστη’ λύση του προηγούμενου βήματος.

### 6.6.1 Μεθοδολογία αλγόριθμου

Ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε, παρουσιάζεται παρακάτω με τα εξής βήματα:

- **1<sup>ο</sup> Βήμα**

Σενάριο 0: Επιλέγεται μια αρχική εξάδα για τις παροχές άντλησης των πηγαδιών και τίθεται μηδενική τιμή για όλες τις χρονικές περιόδους και για όλα τα πηγάδια. Πρόκειται ουσιαστικά για το αρχικό μηδενικό διάνυσμα παροχών  $\vec{Q}_0$  το οποίο εισάγεται στο PTC, προσομοιώνει την κατάσταση των υπογείων υδάτων για 4 χρόνια και έτσι προκύπτει για τους οκτώ κόμβους παρατήρησης το αρχικό διάνυσμα υδραυλικών υψών  $\vec{H}_0$ .

$$\vec{Q}_0 = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \vec{H}_0 = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \\ H_6 \\ H_7 \\ H_8 \end{bmatrix}$$

Σενάριο 1: Στη συνέχεια, από το διάνυσμα των αρχικών παροχών, διαταράσσεται η παροχή του πρώτου πηγαδιού άντλησης ( $F_{25}$ ) κατά  $\Delta Q_1$  ίσο με το 20% της αρχικής του παροχής άντλησης, και έτσι προκύπτει το διάνυσμα  $\vec{Q}'_{01}$  το οποίο εισαγόμενο και πάλι στο PTC δίνει ένα νέο διάνυσμα υδραυλικών υψών  $\vec{H}'_{01}$ .

Σημείωση: Για όλα τα πηγάδια ισχύει διαταραχή της παροχής άντλησης  $\Delta Q_i$  κατά 20% της παροχής κάθε πηγαδιού ξεχωριστά.

$$\vec{Q}'_{01} = \begin{bmatrix} Q_1 + \Delta Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} \rightarrow \vec{H}'_{01} = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \\ H'_7 \\ H'_8 \end{bmatrix}$$

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίζεται τελικά το διάνυσμα της κλίσης, δηλαδή του υδραυλικού ύψους ως προς την μεταβολή της παροχής άντλησης, που αποτελεί ουσιαστικά την πρώτη στήλη του πίνακα A, ο οποίος θα εξηγηθεί σε επόμενο σημείο.

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

Σενάριο 2: Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με διαταραχή αυτή τη φορά της παροχής του δεύτερου πηγαδιού άντλησης ( $F_{121}$ ) κατά  $\Delta Q_2$  ίσο με το 20% της αρχικής του παροχής άντλησης, και έτσι προκύπτουν τα εξής διανύσματα κατά σειρά.

$$\vec{Q}'_{02} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 + \Delta Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{με εφαρμογή στο PTC}} \vec{H}'_{02} = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \\ H'_7 \\ H'_8 \end{bmatrix} \rightarrow \left( \frac{\partial H}{\partial Q} \right)_2 = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_2} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_2} \end{bmatrix}$$

Σενάριο 3: Διαταράσσεται η παροχή άντλησης για το τρίτο πηγάδι ( $F_{26}$ ) κατά  $\Delta Q_3$ .

$$\vec{Q}'_{03} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 + \Delta Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{με εφαρμογή στο PTC}} \vec{H}'_{03} = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \\ H'_7 \\ H'_8 \end{bmatrix} \rightarrow \left( \frac{\partial H}{\partial Q} \right)_3 = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_3} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_3} \end{bmatrix}$$

Σενάριο 4: Διαταράσσεται η παροχή άντλησης για το τέταρτο πηγάδι ( $F_{21}$ ) κατά  $\Delta Q_4$ .

$$\vec{Q}'_{04} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 + \Delta Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{με εφαρμογή στο PTC}} \vec{H}'_{04} = \begin{bmatrix} H'_1 \\ H'_2 \\ H'_3 \\ H'_4 \\ H'_5 \\ H'_6 \\ H'_7 \\ H'_8 \end{bmatrix} \rightarrow \left( \frac{\partial H}{\partial Q} \right)_4 = \begin{bmatrix} \frac{H'_1 - H_1}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_2 - H_2}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_3 - H_3}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_4 - H_4}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_5 - H_5}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_6 - H_6}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_7 - H_7}{\Delta Q_4} \\ \frac{H'_8 - H_8}{\Delta Q_4} \end{bmatrix}$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα σενάρια 5 και 6 όπου διαταράσσονται οι παροχές του πέμπτου ( $F_{28}$ ) και έκτου ( $F_2$ ) πηγαδιού αντίστοιχα κατά  $\Delta Q_5$  και  $\Delta Q_6$ .

Τελικά, πραγματοποιώντας τις παραπάνω διαταραχές, προκύπτει ο τελικός πίνακας απόκρισης  $A$  με 6 στήλες (όσα και τα πηγάδια άντλησης) και 8 γραμμές (όσοι και οι κόμβοι παρατήρησης) από τον οποίο φαίνονται ουσιαστικά οι μεταβολές του υδραυλικού ύψους προς τις αντίστοιχες μεταβολές της παροχής άντλησης.

Η παραπάνω πρόταση μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά από τη σχέση  $\Delta H = A \cdot \Delta Q$  και παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας  $A$  και η σχέση αυτή.

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

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

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιείται η μέθοδος Simplex, η επίλυση της οποίας λαμβάνει χώρα στο μαθηματικό πακέτο Matlab 2015a. Η βασική εντολή ονομάζεται **linprog** και εισάγεται στο Matlab ως εξής:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, LB, UB)$$

όπου:

x: οι μεταβλητές απόφασης

fval: η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης

f: το διάνυσμα της αντικειμενικής συνάρτησης με τους συντελεστές των μεταβλητών απόφασης

A, b: πίνακας και διάνυσμα αντίστοιχα των περιορισμών ανισότητας

Aeq, beq: πίνακας και διάνυσμα αντίστοιχα των περιορισμών ισότητας

LB: διάνυσμα ελαχίστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης (lower bound)

UB: διάνυσμα μέγιστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης (upper bound)

Με χρήση των παραπάνω λύνεται το πρόβλημα της μορφής  $\min f(x)$  subject to  $A \cdot x \leq b$  αφού πρώτα γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές. Πιο συγκεκριμένα, κατά τον ορισμό του προβλήματος, πρέπει να γίνει μεγιστοποίηση της ολικής παροχής άντλησης, και γιαυτό η εντολή **linprog** θα κληθεί να ελαχιστοποιήσει την αρνητική ολική παροχή. Έτσι, με βάση τον περιορισμό θα πρέπει το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο παρατήρησης να μην μειώνεται κάτω από 201 m. Επίσης, σημαντικό χαρακτηριστικό της εντολής **linprog** είναι ότι απαιτεί ο περιορισμός να εκφράζεται με βάση τη μεταβλητή απόφασης x, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η παροχή άντλησης (q). Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνουν οι εξής μετασχηματισμοί:

Αν θεωρηθεί μια θεωρητική ελάχιστη τιμή αναφοράς  $H_{ref} = 201 \text{ m}$ , τότε για κάθε πηγάδι παρατήρησης θα πρέπει:

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

και αν το  $\Delta H$  εκφραστεί συναρτήσει του πίνακα απόκρισης A, τότε:

$$\begin{aligned} H_0 + A \cdot \Delta Q &\geq H_{ref} \Rightarrow H_0 + A \cdot (Q - Q_0) \geq H_{ref} \\ \Rightarrow A \cdot Q &\geq H_0 - H_{ref} - A \cdot Q_0 \Rightarrow -A \cdot Q \leq H_0 - H_{ref} - A \cdot Q_0 \end{aligned}$$



Στην παραπάνω έκφραση,  $Q_0$  και  $H_0$  είναι το αρχικό ζεύγος τιμών παροχής και υδραυλικού ύψους με βάση το οποίο κατασκευάστηκε ο πίνακας απόκρισης  $A$ ,  $Q$  είναι η διαταραγμένη παροχή άντλησης και  $H$  είναι η απόκριση του μοντέλου PTC για την παροχή αυτή.

Σύμφωνα λοιπόν με τη σχέση  $A \cdot x \leq b$ , για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ο πίνακας  $A$  του περιορισμού ανισότητας της εντολής είναι ο αρνητικός του πίνακα απόκρισης  $A$ , το διάνυσμα  $b$  του περιορισμού ανισότητας είναι η 'στήλη'  $H_0 - H_{ref} - A \cdot Q_0$ , το διάνυσμα ελαχίστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης είναι το  $LB=[0;0;0;0;0;0]$  και το διάνυσμα μεγίστων ορίων για τις μεταβλητές απόφασης αποτελείται από της μέγιστες παροχές άντλησης των πηγαδιών για τις ξηρές περιόδους:

$$LB = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad UB = \begin{bmatrix} 1200 \\ 2400 \\ 1440 \\ 1920 \\ 1920 \\ 1440 \end{bmatrix}$$

Σαν τελικό αποτέλεσμα, είναι οι έξι βελτιωμένες πλέον παροχές άντλησης στα πηγάδια και η συνολική παροχή.

- **2<sup>ο</sup> Βήμα**

Σε αυτό το βήμα, σαν νέο διάνυσμα  $\vec{Q}_0$  λαμβάνεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του προηγούμενου βήματος και ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία καταλήγοντας έτσι σε μια λύση η οποία συγκρίνεται με την προηγούμενη. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση, μέχρι δηλαδή οι τελευταίες δύο λύσεις να είναι παραπλήσιες.

#### 6.6.2 Εφαρμογή του αλγόριθμου στο υπό μελέτη πρόβλημα

Παρακάτω, παρουσιάζεται η εφαρμογή των βημάτων που αναλύθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

- **1<sup>ο</sup> Βήμα**

Στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται όλα τα σενάρια του πρώτου βήματος. Δηλαδή, το αρχικό διάνυσμα της παροχής των πηγαδιών άντλησης και το διάνυσμα των αρχικών υδραυλικών υψών στα πηγάδια παρατήρησης, οι διαταραχές της παροχής που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε σενάριο για κάθε ένα πηγάδι άντλησης (κατά 20%) και οι αντίστοιχες αποκρίσεις υδραυλικών υψών του μοντέλου για τα οκτώ πηγάδια παρατήρησης.

Πηγάδια άντλησης	Αρχική παροχή $Q_0$	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{01}$ ως προς το 1 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{02}$ ως προς το 2 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{03}$ ως προς το 3 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{04}$ ως προς το 4 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{05}$ ως προς το 5 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{06}$ ως προς το 6 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης
1 (F <sub>25</sub> )	0	0 + 240	0	0	0	0	0
2 (F <sub>121</sub> )	0	0	0 + 480	0	0	0	0
3 (F <sub>26</sub> )	0	0	0	0 + 288	0	0	0
4 (F <sub>21</sub> )	0	0	0	0	0 + 384	0	0
5 (F <sub>28</sub> )	0	0	0	0	0	0 + 384	0
6 (F <sub>2</sub> )	0	0	0	0	0	0	0 + 384

Πίνακας 6.6.2.1: Αρχική παροχή και διαταραγμένες παροχές για τα πηγάδια άντλησης για το 1<sup>ο</sup> βήμα

Πηγάδια παρατήρησης (κόμβοι)	Αρχικό υδραυλικό ύψος $H_0$	Υδραυλικό ύψος $H'_{01}$ για την 1 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{02}$ για την 2 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{03}$ για την 3 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{04}$ για την 4 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{05}$ για την 5 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{06}$ για την 6 <sup>η</sup> διαταραχή
1 (525)	201,044978	201,044910	201,044906	201,044868	201,043756	201,040957	201,033761
2 (500)	201,103178	201,103081	201,103076	201,103020	201,101423	201,096975	201,080748
3 (470)	201,118589	201,118465	201,118459	201,118387	201,116359	201,109873	201,098515
4 (335)	201,107601	201,107083	201,107045	201,106677	201,097953	201,097709	201,103548
5 (304)	201,110745	201,109994	201,109927	201,109367	201,096359	201,10341	201,107278
6 (284)	201,134876	201,133930	201,133835	201,133144	201,116369	201,128425	201,131556
7 (235)	201,079504	201,078029	201,077964	201,077373	201,053190	201,074672	201,076651
8 (234)	201,060848	201,059208	201,059245	201,058774	201,035043	201,056288	201,058096

Πίνακας 6.6.2.2: Αρχικά υδραυλικά ύψη στους κόμβους παρατήρησης και υδραυλικά ύψη που προκύπτουν από το μοντέλο PTC για κάθε διαταραχή

Ακολουθεί ο πίνακας απόκρισης Α ο οποίος δείχνει τις μεταβολές του υδραυλικού ύψους με την παροχή  $\theta H/\theta Q_i$ .

-0,0000002833	-0,00000015000	-0,00000038194	-0,00000318229	-0,00001047135	-0,00003894792
-0,0000004042	-0,00000021250	-0,00000054861	-0,00000457031	-0,00001615365	-0,00007788194
-0,0000005167	-0,00000027083	-0,00000070139	-0,00000580729	-0,00002269792	-0,00006970139
-0,0000021583	-0,00000115833	-0,00000320833	-0,00002512500	-0,00002576042	-0,00001407292
-0,0000031292	-0,00000170417	-0,00000478472	-0,00003746354	-0,00001910156	-0,00001203819
-0,0000039417	-0,00000216875	-0,00000601389	-0,00004819531	-0,00001679948	-0,00001152778
-0,0000061458	-0,00000320833	-0,00000739931	-0,00006852604	-0,00001258333	-0,00000990625
-0,0000068333	-0,00000333958	-0,00000720139	-0,00006720052	-0,00001187500	-0,00000955556

Πίνακας 6.6.2.3: Πίνακας απόκρισης Α για το 1<sup>ο</sup> βήμα

Μετά την δημιουργία του παραπάνω πίνακα, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος Simplex, και με βάση τα όσα αναλύθηκαν, προκύπτει το εξής αρχείο στην Matlab:

```
>> %EPILYSI TOY YPO MELETI PROVLIMATOS
>> %ANTIKEIMENIKI SYNARTHSH
>> f=[-1;-1;-1;-1;-1;-1];
>> %EISAGONTE O PINAKAS APOKRISIS A KAI TO DIANYSMA b
>> A

A =

    1.0e-04 *

    -0.0028    -0.0015    -0.0038    -0.0318    -0.1047    -0.3895
    -0.0040    -0.0021    -0.0055    -0.0457    -0.1615    -0.7788
    -0.0052    -0.0027    -0.0070    -0.0581    -0.2270    -0.6970
    -0.0216    -0.0116    -0.0321    -0.2512    -0.2576    -0.1407
    -0.0313    -0.0170    -0.0478    -0.3746    -0.1910    -0.1204
    -0.0394    -0.0217    -0.0601    -0.4820    -0.1680    -0.1153
    -0.0615    -0.0321    -0.0740    -0.6853    -0.1258    -0.0991
    -0.0683    -0.0334    -0.0720    -0.6720    -0.1187    -0.0956

>> b=[0.044978;0.103178;0.118589;0.107601;0.110745;0.134876;0.079504;0.060848];
>> %EISAGONTAI TA ANOTERA KAI KATWTERA ORIA THS TIMHS q
>> LB=zeros(6,1);
>> UB=[1200;2400;1440;1920;1920;1440];
>> %EFARMOZETAI I METHODOS SIMPLEX
>> [q,fval]=linprog(f,-A,b,[],[],LB,UB);
Optimization terminated.
>> %EKSAGONTAI OI VELTIOMENOI RITHMOI ANTILISIS
>> q
```

Τελικά, οι νέες βελτιωμένες παροχές άντλησης που προκύπτουν είναι οι εξής:

Πηγάδι άντλησης	Βελτιωμένη τιμή παροχής (m <sup>3</sup> /d)
1	1200
2	2400
3	1440
4	85,33
5	1920
6	599,55
$\sum Q_i$	7644,88

Πίνακας 6.6.2.4: Η βέλτιστη λύση του 1<sup>ου</sup> βήματος

Όπως παρατηρείται, το αποτέλεσμα απέχει αρκετά από την αρχική εξάδα των παροχών και γιαυτό ο αλγόριθμος δεν έχει συγκλίνει ακόμα. Συνεπώς, θα απαιτηθεί νέα επανάληψη.

## • 2<sup>ο</sup> Βήμα

Αυτή τη φορά, σαν αρχική εξάδα παροχών λαμβάνεται η βελτιωμένη λύση του προηγούμενου βήματος που φαίνεται στον πίνακα 6.6.2.4. Ακολουθείται έτσι η ανάλογη διαδικασία με προηγούμενως:

Πηγάδια άντλησης	Αρχική παροχή $Q_0$	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{01}$ ως προς το 1 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{02}$ ως προς το 2 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{03}$ ως προς το 3 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{04}$ ως προς το 4 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{05}$ ως προς το 5 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{06}$ ως προς το 6 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης
1 (F <sub>25</sub> )	1200	<b>1440</b>	1200	1200	1200	1200	1200
2 (F <sub>121</sub> )	2400	2400	<b>2880</b>	2400	2400	2400	2400
3 (F <sub>26</sub> )	1440	1440	1440	<b>1728</b>	1440	1440	1440
4 (F <sub>21</sub> )	85,33	85,33	85,33	85,33	<b>102,40</b>	85,33	85,33
5 (F <sub>28</sub> )	1920	1920	1920	1920	1920	<b>2304</b>	1920
6 (F <sub>2</sub> )	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55	599,55	<b>719,46</b>

Πίνακας 6.6.2.5: Αρχική παροχή και διαταραγμένες παροχές για τα πηγάδια άντλησης για το 2<sup>ο</sup> βήμα

Πηγάδια παρατήρησης (κόμβοι)	Αρχικό υδραυλικό ύψος $H_0$	Υδραυλικό ύψος $H'_{01}$ για την 1 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{02}$ για την 2 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{03}$ για την 3 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{04}$ για την 4 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{05}$ για την 5 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{06}$ για την 6 <sup>η</sup> διαταραχή
1 (525)	200,9999950	200,999927	200,999923	200,999885	200,999941	200,995973	200,995322
2 (500)	201,0232500	201,023152	201,023147	201,023091	201,023172	201,017041	201,013902
3 (470)	201,0303980	201,030274	201,030267	201,030195	201,030298	201,021671	201,02203
4 (335)	201,0375630	201,037045	201,037007	201,036639	201,037134	201,027667	201,035875
5 (304)	201,0488940	201,048142	201,048075	201,047514	201,048254	201,041557	201,04745
6 (284)	201,0729790	201,072031	201,071936	201,071244	201,072155	201,066526	201,071596
7 (235)	201,0178070	201,01633	201,016264	201,015673	201,016636	201,012974	201,016618
8 (234)	200,9999700	200,998328	200,998365	200,997894	200,998822	200,995409	200,998824

Πίνακας 6.6.2.6: Αρχικά υδραυλικά ύψη στους κόμβους παρατήρησης και υδραυλικά ύψη που προκύπτουν από το μοντέλο PTC για κάθε διαταραχή για το 2<sup>ο</sup> βήμα

-0,0000002833	-0,0000001500	-0,0000003819	-0,0000031634	-0,0000104740	-0,0000389709
-0,0000004083	-0,0000002146	-0,0000005521	-0,0000045694	-0,0000161693	-0,0000779585
-0,0000005167	-0,0000002729	-0,0000007049	-0,0000058582	-0,0000227266	-0,0000697857
-0,0000021583	-0,0000011583	-0,0000032083	-0,0000251318	-0,0000257708	-0,0000140772
-0,0000031333	-0,0000017062	-0,0000047917	-0,0000374927	-0,0000191068	-0,0000120424
-0,0000039500	-0,0000021729	-0,0000060243	-0,0000482718	-0,0000168047	-0,0000115337
-0,0000061542	-0,0000032146	-0,0000074097	-0,0000685999	-0,0000125859	-0,0000099158
-0,0000068417	-0,0000033437	-0,0000072083	-0,0000672525	-0,0000118776	-0,0000095572

Πίνακας 6.6.2.7: Πίνακας απόκρισης A για το 2<sup>ο</sup> βήμα

Εφαρμόζεται και πάλι η μέθοδος Simplex και προκύπτει αρχείο στο Matlab αντίστοιχο αυτού του 1<sup>ου</sup> βήματος.

Τελικά, προκύπτουν οι εξής βελτιωμένες παροχές άντλησης για τα έξι πηγάδια:

Πηγάδι άντλησης	Βελτιωμένη τιμή παροχής (m <sup>3</sup> /d)
1	1200
2	2400
3	1440
4	84,9
5	1920
6	599,46
$\sum Q_i$	7644,36

Πίνακας 6.6.2.8: Η βέλτιστη λύση του 2<sup>ου</sup> βήματος

Όπως παρατηρείται, και πάλι το αποτέλεσμα απέχει πολύ από την προηγούμενη λύση και έτσι συμπεραίνουμε ότι ο αλγόριθμος δεν συγκλίνει ακόμα και επομένως απαιτείται νέα επανάληψη.

### • 3<sup>ο</sup> Βήμα

Ομοίως σε αυτό το βήμα λαμβάνεται ως αρχική εξάδα παροχών, η βελτιωμένη λύση του 2<sup>ου</sup> βήματος και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία διαταράσσοντας και πάλι τις παροχές άντλησης των πηγαδιών.

Πηγάδια άντλησης	Αρχική παροχή $Q_0$	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{01}$ ως προς το 1 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{02}$ ως προς το 2 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{03}$ ως προς το 3 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{04}$ ως προς το 4 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{05}$ ως προς το 5 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης	Διαταραγμένη παροχή $Q'_{06}$ ως προς το 6 <sup>ο</sup> πηγάδι άντλησης
1 (F <sub>25</sub> )	1200	<b>1440</b>	1200	1200	1200	1200	1200
2 (F <sub>121</sub> )	2400	2400	<b>2880</b>	2400	2400	2400	2400
3 (F <sub>26</sub> )	1440	1440	1440	<b>1728</b>	1440	1440	1440
4 (F <sub>21</sub> )	84,90	84,90	84,90	84,90	<b>101,88</b>	84,90	84,90
5 (F <sub>28</sub> )	1920	1920	1920	1920	1920	<b>2304</b>	1920
6 (F <sub>2</sub> )	599,46	599,46	599,46	599,46	599,46	599,46	<b>719,35</b>

Πίνακας 6.6.2.9: Αρχική παροχή και διαταραγμένες παροχές για τα πηγάδια άντλησης για το 3<sup>ο</sup> βήμα

Πηγάδια παρατήρησης (κόμβοι)	Αρχικό υδραυλικό ύψος $H_0$	Υδραυλικό ύψος $H'_{01}$ για την 1 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{02}$ για την 2 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{03}$ για την 3 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{04}$ για την 4 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{05}$ για την 5 <sup>η</sup> διαταραχή	Υδραυλικό ύψος $H'_{06}$ για την 6 <sup>η</sup> διαταραχή
1 (525)	201,000000	200,999932	200,999928	200,99989	200,999946	200,995978	200,995328
2 (500)	201,023259	201,023161	201,023156	201,02310	201,023181	201,01705	201,013912
3 (470)	201,030406	201,030282	201,030276	201,030204	201,030308	201,02168	201,02204
4 (335)	201,037575	201,037057	201,037019	201,036651	201,037148	201,027679	201,035888
5 (304)	201,048911	201,048159	201,048092	201,047531	201,048275	201,041574	201,047467
6 (284)	201,073000	201,072053	201,071958	201,071266	201,072181	201,066548	201,071618
7 (235)	201,017837	201,01636	201,016295	201,015704	201,016672	201,013004	201,016649
8 (234)	201,000000	200,998358	200,998395	200,997923	200,998858	200,995439	200,998854

Πίνακας 6.6.2.10: Αρχικά υδραυλικά ύψη στους κόμβους παρατήρησης και υδραυλικά ύψη που προκύπτουν από το μοντέλο PTC για κάθε διαταραχή για το 3<sup>ο</sup> βήμα

-0,0000002833	-0,0000001500	-0,0000003819	-0,0000031802	-0,0000104740	-0,0000389691
-0,0000004083	-0,0000002146	-0,0000005521	-0,0000045936	-0,0000161693	-0,0000779631
-0,0000005167	-0,0000002708	-0,0000007014	-0,0000057715	-0,0000227240	-0,0000697806
-0,0000021583	-0,0000011583	-0,0000032083	-0,0000251472	-0,0000257708	-0,0000140712
-0,0000031333	-0,0000017063	-0,0000047917	-0,0000374558	-0,0000191068	-0,0000120444
-0,0000039458	-0,0000021708	-0,0000060208	-0,0000482332	-0,0000168021	-0,0000115272
-0,0000061542	-0,0000032125	-0,0000074062	-0,0000686101	-0,0000125859	-0,0000099091
-0,0000068417	-0,0000033438	-0,0000072118	-0,0000672556	-0,0000118776	-0,0000095588

Πίνακας 6.6.2.11: Πίνακας απόκρισης A για το 3<sup>ο</sup> βήμα

Με αυτόν τον πίνακα απόκρισης, πραγματοποιείται και πάλι η εφαρμογή της μεθόδου Simplex και εξάγεται αρχείο μέσω της Matlab.

Παρακάτω παρουσιάζεται το τελικό διάνυσμα των βέλτιστων παροχών άντλησης όπως αυτό προέκυψε.

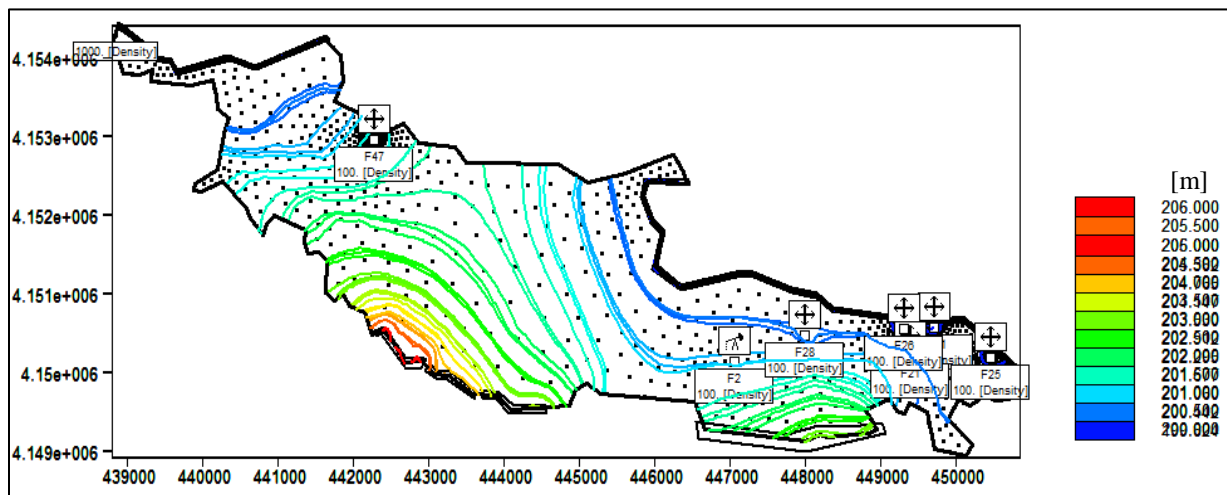


Πηγάδι άντλησης	Βέλτιστη τιμή παροχής (m <sup>3</sup> /d)
1	<b>1200</b>
2	<b>2400</b>
3	<b>1440</b>
4	<b>84,9</b>
5	<b>1920</b>
6	<b>599,46</b>
$\sum Q_i$	<b>7644.36</b>

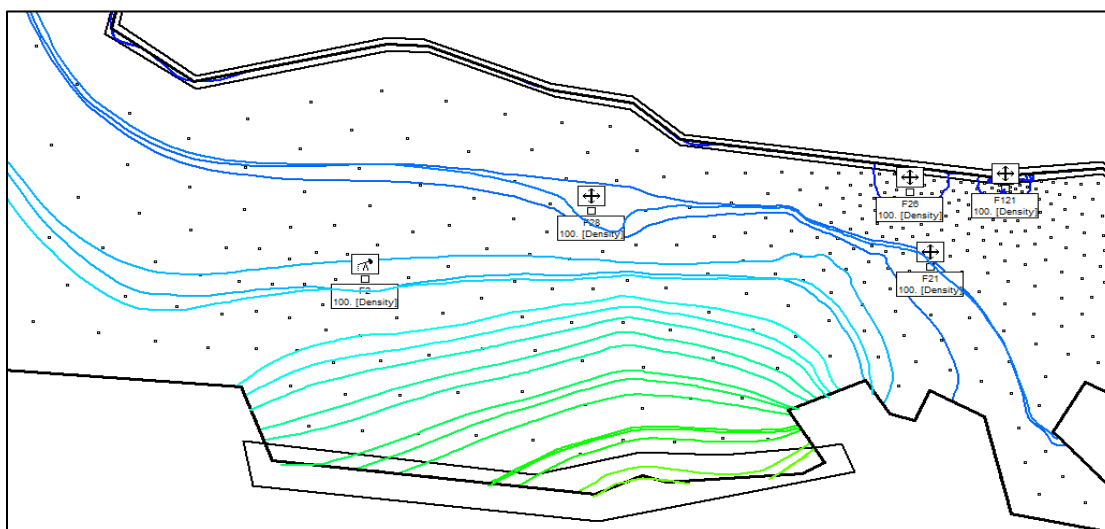
Πίνακας 6.6.2.12: Η βέλτιστη λύση του 3<sup>ου</sup> βήματος

Συγκρίνοντας με την βέλτιστη εξάδα του προηγούμενου βήματος, παρατηρείται ότι οι τιμές είναι ίδιες γεγονός που σημαίνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει, δηλαδή το μη γραμμικό πρόβλημα γραμμικοποιήθηκε, και επομένως δεν απαιτούνται άλλες επαναλήψεις.

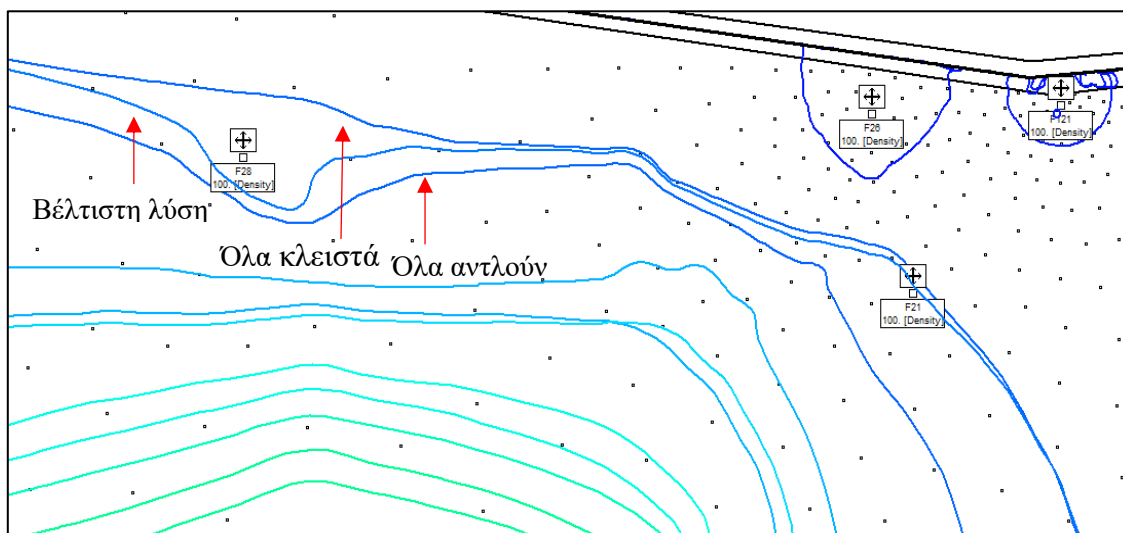
Στα σχήματα 26, 27 και 28, φαίνεται η μετατόπιση του μετώπου της υφαλμύρισης και η νέα θέση που προκύπτει εφαρμόζοντας την τελική βέλτιστη εξάδα παροχών άντλησης των πηγαδιών στο μοντέλο PTC. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται η αρχική θέση του μετώπου, πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε βελτιστοποίησης, όταν όλα τα πηγάδια αντλούσαν με δεδομένους ρυθμούς, η θέση που θα βρισκόταν το μέτωπο αν όλα τα πηγάδια ήταν κλειστά, και τέλος, η βελτιωμένη θέση του με εφαρμογή βελτιστοποίησης για 4 χρόνια. Όπως αναμενόταν, το φαινόμενο υποχωρεί από την ενδοχώρα σε ένα βαθμό, και η καμπύλη βρίσκεται ανάμεσα στις δύο ισοσταθμικές των δύο περιπτώσεων που αναφέρθηκαν.



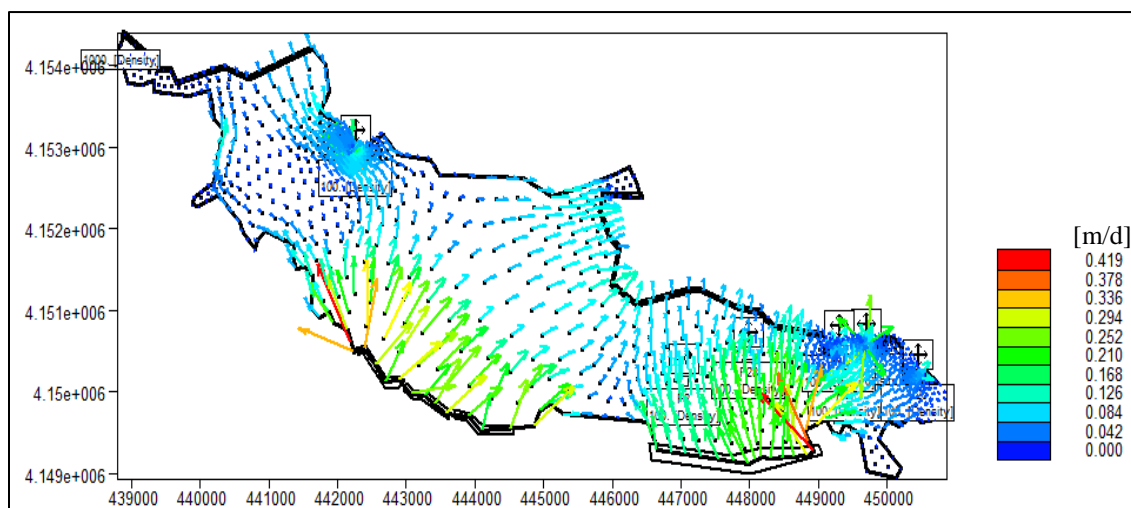
Σχήμα 26: Βέλτιστη λύση-θέση του μετώπου υφαλμύρισης μετά την εφαρμογή μεθόδου βελτιστοποίησης



Σχήμα 27: Μεγέθυνση τμήματος της περιοχής μελέτης



Σχήμα 28: μεγέθυνση τμήματος της περιοχής μελέτης



Σχήμα 29: Ταχύτητες υπογείων υδάτων για τις βέλτιστες παροχές άντλησης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη εργασία, μελετήθηκε η περιοχή Τροιζήνα, η οποία ανήκει στην περιφέρεια Αττικής. Κύριο αντικείμενο είναι η εις βάθος ανάλυση και βελτίωση του φαινομένου της υφαλμύρισης που παρατηρείται στην περιοχή. Με βάση τα δεδομένα των χλωριώντων που δόθηκαν και με το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε, παρατηρήθηκε ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι έντονο στην ανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης και έτσι το πρόβλημα εστιάζεται σε αυτό το κομμάτι. Τα έξι πηγάδια άντλησης που μελετήθηκαν βρίσκονται συγκεντρωμένα κοντά στο μέτωπο αυτό ενώ το έβδομο πηγάδι, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν λήφθηκε υπόψιν λόγω θέσης. Σκοπός ήταν μέσω της προσομοίωσης της περιοχής μελέτης, και με μέθοδο βελτιστοποίησης να γίνει αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρισης.

Η υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων είναι ένα πολύ συχνό φαινόμενο στον Ελλαδικό χώρο τα τελευταία χρόνια καθώς παρατηρείται σε πολλά νησιά και εισβάλλει στην ενδοχώρα προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις κυρίως σε περιοχές με πολύ μικρά επιφανειακά αποθέματα γλυκού νερού. Αυτό γιατί, σε τέτοιες περιοχές, το υπόγειο νερό είναι η μοναδική πηγή γλυκού νερού για μεγάλες χρονικές περιόδους και η ύπαρξη ενός τέτοιου φαινομένου προκαλεί υποβάθμιση των υπόγειων νερών με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγάλο οικονομικό κόστος μεταφοράς γλυκού νερού από άλλη περιοχή. Επίσης, αποτελεί ένα φαινόμενο, δύσκολο να διαχειριστεί καθώς η αναστροφή του είναι επίπονη και χρονοβόρα αφού ακόμα και όταν το μέτωπο απωθηθεί, δεν απομακρύνεται πλήρως το αλμυρό νερό από τους πόρους του εδάφους. Το αλμυρό νερό, ως βαρύτερο από το γλυκό, θα έχει πάντα την τάση να εισχωρεί προς την ενδοχώρα και έτσι σε κάθε περίπτωση, η υφαλμύριση ίσως να είναι αδύνατο να αναστραφεί πλήρως.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, σαν δεδομένα δόθηκαν τα αρχικά υδραυλικά ύψη τόσο των πηγαδιών άντλησης όσο και των πηγαδιών παρατήρησης, τα βάθη των στρωμάτων και οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων. Με βάση αυτά άρχισε η προσομοίωση της περιοχής μελέτης μέσω του μοντέλου PTC αφού έγινε η εισαγωγή τους στις κατάλληλες καρτέλες του περιβάλλοντος εργασίας. Από το διάγραμμα των χλωριόντων που προέκυψε, συμπεραίνουμε όπως ήδη αναφέρθηκε, ότι κύριο πρόβλημα υφαλμύρισης υπάρχει στην ανατολική πλευρά της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τις τιμές των συγκεντρώσεων, διαπιστώθηκε ότι το αλμυρό νερό φτάνει μέχρι και τα 201 μέτρα, δηλαδή 1 μέτρο πάνω

από την επιφάνεια της θάλασσας. Επομένως, η διαδικασία της βελτιστοποίησης που ακολούθησε, αφορά την ισοσταθμική καμπύλη των 201 μέτρων.

Βασικό στάδιο ήταν η διαδικασία της βαθμονόμησης η οποία έγινε με βάση τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών που προέκυψαν από το μοντέλο με την χρήση των παραπάνω δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση των προσομοιωμένων υδραυλικών υψών (αποτελέσματα) και των πραγματικών υδραυλικών υψών σε ορισμένα πηγάδια τα οποία δόθηκαν. Από τα διαγράμματα της βαθμονόμησης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι τιμές βρίσκονται εκτιμητικά στα ίδια επίπεδα, δηλαδή οι τιμές του μοντέλου δεν αποκλίνουν σημαντικά από τις μετρήσεις πεδίου και αυτό θεωρείται αρκετό, επειδή οι ημερομηνίες για τις οποίες τρέχει το μοντέλο δεν συμπίπτουν με τις ημερομηνίες που αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές. Έτσι, η βαθμονόμηση έγινε δεκτή και έλαβε τέλος.

Η προσομοίωση έγινε για 4 χρόνια, δηλαδή για οκτώ χρονικές περιόδους (δύο ανά έτος). Ενδιαφέρον δόθηκε στις ξηρές περιόδους και ειδικότερα στην 8<sup>η</sup> ξηρή περίοδο. Αυτό γιατί τον χειμώνα οι αντλήσεις είναι μικρές σε σχέση με το καλοκαίρι όπου οι ανάγκες για νερό αυξάνονται και το πρόβλημα της υφαλμύρισης γίνεται πιο έντονο λόγω μεγαλύτερης συχνότητας και μεγαλύτερων ρυθμών άντλησης. Ο λόγος που γίνεται προσομοίωση για 4 χρόνια και όχι για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, π.χ. 20 χρόνια, είναι γιατί το φαινόμενο είναι αρκετά δύσκολο να αντιμετωπιστεί πόσο μάλλον μακροχρόνια. Πρόκειται για μια διαδικασία που είναι από μόνη της χρονοβόρα και για προσομοίωση σε μεγάλο χρονικό διάστημα δεν θα υπήρχαν άμεσα αποτελέσματα. Σκοπός λοιπόν είναι, να γίνεται σε μικρά χρονικά διαστήματα, στην συγκεκριμένη εργασία κάθε 4 χρόνια, η διαδικασία της βελτιστοποίησης ώστε να καταλήγει κάθε φορά σε νέες βέλτιστες λύσεις οι οποίες θα εφαρμόζονται.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης βασίζεται σε 6 σενάρια, όπως αυτά αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα για κάθε πηγάδι. Στο αρχικό σενάριο θεωρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια είναι κλειστά για όλες τις χρονικές περιόδους. Κάτι τέτοιο θα αποτελούσε σίγουρα την βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της υφαλμύρισης και δεν θα χρειαζόταν οποιαδήποτε διαδικασία. Όμως, αυτή η τακτική δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικά δεδομένα, δηλαδή δεν είναι εφικτό, για διάφορους λόγους, οικονομικούς και κοινωνικούς, να ζητηθεί από τους ιδιοκτήτες των γεωτρήσεων να κλείσουν τελείως τα πηγάδια και να μην αντλούν. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε αναγκαία η βελτιστοποίηση και η εφαρμογή της μεθόδου Simplex μέσω του προγράμματος Matlab για εύρεση βέλτιστου συνδυασμού αντλήσεων οι οποίες σίγουρα θα είναι μειωμένες σε σχέση με τις αρχικές. Οι κόμβοι παρατήρησης αφορούν την ισοσταθμική καμπύλη των 201 μέτρων και με την διαδικασία που ήδη αναλύθηκε στο κεφάλαιο 6, κατασκευάζεται κάθε φορά ο πίνακας απόκρισης A μέχρι ο αλγόριθμος να συγκλίνει.

Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα τις βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος έδειξε να συγκλίνει από το τρίτο κιόλας βήμα, δηλαδή η τελική εξάδα της δεύτερης επανάληψης είναι ίδια με αυτήν της τρίτης επανάληψης, και έτσι, η διαδικασία έλαβε τέλος. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν και το πρόβλημα ήταν σχεδόν γραμμικό, μέσω της βελτιστοποίησης, η οποία αφορά γραμμικά προβλήματα, κατάφερε να επιλυθεί και τελικά να συγκλίνει ικανοποιητικά ο αλγόριθμος. Αυτό δείχνει πως η μέθοδος Simplex δικαιολογημένα αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο και έχει την δυνατότητα να εφαρμόζεται και να ανταποκρίνεται ακόμα και σε δύσκολα, σχεδόν γραμμικά, πραγματικά προβλήματα, όπως το συγκεκριμένο.

Στην τελική βέλτιστη λύση, τα τέσσερα από τα έξι πηγάδια άντλησης που μελετήθηκαν διατηρούν ίδιους τους ρυθμούς άντλησης, ενώ για τα άλλα δύο μειώθηκαν αρκετά. Πιο συγκεκριμένα, τα πηγάδια  $F_{25}$ ,  $F_{121}$ ,  $F_{26}$  και  $F_{28}$  συνεχίζουν να αντλούν με ρυθμούς -1200, -2400, -1440 και -1920  $m^3/d$  αντίστοιχα, ενώ στα πηγάδια  $F_{21}$  και  $F_2$  οι ρυθμοί άντλησης μειώθηκαν από -1920  $m^3/d$  σε -84,90  $m^3/d$  και από -1440  $m^3/d$  σε -599,46  $m^3/d$  αντίστοιχα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι λογικό καθώς τα πηγάδια  $F_{21}$  και  $F_2$  είναι αυτά που βρίσκονται πιο κοντά στην ισοσταθμική των 201 μέτρων, δηλαδή πιο κοντά στο μέτωπο της υφαλμύρισης, επομένως επηρεάζουν περισσότερο και δυσχεραίνουν το φαινόμενο, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται κυρίως κοντά στην ακτογραμμή και στο επίπεδο της θάλασσας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ioannis K. Nikolos, Maria Stergiadi, Maria P. Papadopoulou and George P. Karatzas, 2006. Artificial neural networks as an alternative approach to groundwater numerical modelling and environmental design.
2. Ιωάννης Τριχάκης, Χανιά 2004. Προσομοίωση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός της ζώνης υφαλμύρισης στην βιομηχανική περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης.
3. Μαντόγλου Αριστοτέλης, Αν. Καθηγητής, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Ε.Μ.Π. Προσομοίωση και Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων.
4. Περικλής Λατινόπουλος, Α.Π.Θ., 1998. Υδραυλική των υπογείων υδάτων.
5. [http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA\\_1.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_1.pdf) (πρόσβαση: 22/02/2018)
6. Μαμάσης Νίκος, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π. Τεχνική Υδρολογία, Υπόγεια Νερά.
7. Περικλής Λατινόπουλος (καθηγητής), Νικόλαος Θεοδοσίου (λέκτορας), Α.Π.Θ., 2007. Εκμετάλλευση και προστασία των υπόγειων υδατικών πόρων.
8. Κ. Βουδούρης, Α. Scheidleder, Π. Δασκαλάκη, 2005. Θαλάσσια διείσδυση σε παράκτια υπόγεια υδατικά συστήματα λόγω υπεράντλησης και η οδηγία 2000/60/ΕΚ, Τόμος 15, 75-81.
9. Α. Νάνου-Γιάνναρου, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας ΕΜΠ, Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων, Συμπόσιο «ΑΙΓΑΙΟ-ΝΕΡΟ-ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ», Πάρος, 6-7 Ιουλίου, 2001.
10. Χατζηιωαννίδου Έφη, (2007) “170.000 γεωτρήσεις έκαναν την Ελλάδα «σουρωτήρι»” *Εφημερίδα Η Καθημερινή*, 15 Απριλίου.
11. Gualbert H.P., Oude Essink, 2001. Improving fresh groundwater supply problems and solutions. *Ocean & Coastal Management* 44, 429-449.
12. <http://artemis.library.tuc.gr/DT2014-0050/DT2014-0050.pdf> (πρόσβαση: 29/03/2018)
13. [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2489/1/02\\_chapter\\_1.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2489/1/02_chapter_1.pdf) (πρόσβαση: 29/03/2018)
14. George P. Karatzas, 23 May 2017. Developments on Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport, 3235-3243.
15. Calvin C. Chien, Miguel A. Medina, Jr., George F. Pinder, Danny D. Reible, Brent E. Sleep, Chunmiao Zheng. Contaminated Ground Water and Sediment, Modeling for Management and Remediation, 122-126.
16. Καρτεράκης Στέφανος, Χανιά, Αύγουστος 2005, Πολυτεχνείο Κρήτης. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.

17. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.
18. <https://www.waterloohydrogeologic.com/visual-modflow-flex/> (πρόσβαση: 15/04/2018)
19. Βιολέτας Χρ. Καρυοφύλλη, Πάτρα, Μάιος 2014, ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΝΤΛΗΤΙΚΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ ΓΛΑΥΚΟΥ (ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΑΤΡΩΝ) ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.
20. Calvin C. Chien, Miguel A. Medina, Jr., George F. Pinder, Danny D. Reible, Brent E. Sleep, Chunmiao Zheng. Environmental modeling and management.
21. Babu D.K., Pinder G.F., Niemi A., Ahfield D.P., Stothoff S.A., 1997, Princeton University. Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows.
22. O. Lehn Franke, Thomas E. Reilly, and Gordon D. Bennett, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, DEFINITION OF BOUNDARY AND INITIAL CONDITIONS IN THE ANALYSIS OF SATURATED GROUND-WATER FLOW SYSTEMS-AN INTRODUCTION, Chapter B5.
23. <http://www.scientificsoftwaregroup.com/> (πρόσβαση: 25/04/2018)
24. Στραβόλαιμος Κυπριανός Κωνσταντίνος, Χανιά, Σεπτέμβριος 2017, Πολυτεχνείο Κρήτης. Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπου σε προσχωματικό παράκτιο υδροφορέα της περιφέρειας Αττικής.
25. <http://buk.gr/el/poli-perioxi/troizina> (πρόσβαση: 25/04/2018)
26. <http://www.troizinia-methana.gr/gr-xlorida.html> (πρόσβαση: 25/04/2018)
27. [ec.europa.eu/agriculture/quality/door/documentDisplay.html](http://ec.europa.eu/agriculture/quality/door/documentDisplay.html) (πρόσβαση: 25/04/2018)
28. Κάρολος Α. Μπεζές, Δρ. Υδρογεωλογίας, Αθήνα 1999. Υδρογεωλογική μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων Τροιζήνας, νομού Πειραιά, Τεύχος Ζ'.
29. <https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/432/1/08%20%20pdf> (πρόσβαση: 13/06/2018)
30. David P. Ahlfeld, Ann E. Mulligan, Optimal Management of Flow in Groundwater Systems.
31. <http://www.math.ntua.gr/~coletsos/Documents/linearprogramming.pdf>, Σχολή εφαρμοσμένων μαθηματικών και φυσικών επιστημών, Εισαγωγή στην επιχειρησιακή έρευνα, Γραμμικός προγραμματισμός, Νοέμβριος 2006, Αθήνα.
32. [https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/zaro/teaching/alg-and-comb opt/ LinProgNotes.pdf](https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/zaro/teaching/alg-and-comb%20opt/LinProgNotes.pdf) (πρόσβαση: 14/06/2018)
33. Βαρδαλής Νικόλαος, Νοέμβριος 2007, Τ.Ε.Ι. Καβάλας, Η ΜΕΘΟΔΟΣ SIMPLEX ΚΑΙ Ο ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΩΝ.