

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΛΗΣΕΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SWI**

Μακρής Αλέξιος

Επιβλέπων: Α. ΜΑΝΤΟΓΛΟΥ

Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2014

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
Abstract	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ SWI	9
2.1 ΕΙΣΑΓΟΓΗ	9
2.2 Εννοιολογικό μοντέλο	9
2.3 Παραδοχές του SWI.....	10
2.4 Μαθηματική Περιγραφή Μοντέλου SWI.....	11
2.5 Διαδικασία επίλυσης.....	14
2.6 Κορυφή και πόδι της σφήνας υφαλμύρωσης	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΡΧΕΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ SWI	16
3.1 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ SWI	17
3.2 Basic Package (ba6)	19
3.3 Block Centered Flow Package (bcf)	19
3.4 Discretisation Package (dis).....	20
3.5 General Head Boundary Package (ghb).....	20
3.6 Name file(nam).....	21
3.7Output Control (oc)	21

3.8 Preconditioned Conjugate Gradient Solver Package (pcg).....	21
3.9 Well Package (wel)	22
3.10 Recharge Package(rch)	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΛΕΤΗ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΒΑΘΥ ΚΑΛΥΜΝΟΥ	23
4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	23
4.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SWI	25
5.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ PATTERN SEARCH.....	25
5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	26
5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	36
6.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ.....	36
6.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ	36
6.4 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΟ SWI	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	39
7.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ SWI	39
7.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	40
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	41

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διπλωματικής είναι να μελετήσει το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, δηλαδή της εισαγωγής θαλασσινού νερού σε υπόγειους υδροφορείς, μέσω του προγράμματος SWI (Sea Water Intrusion). Για το πρόγραμμα αυτό θα αναλυθούν οι παραδοχές που κάνει καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Επειδή το πρόγραμμα αυτό βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης και η λειτουργία του είναι αρκετά περίπλοκη έγινε μία προσπάθεια δημιουργίας προϋποθέσεων διευκόλυνσης της λειτουργίας του προγράμματος. Σε δεύτερο στάδιο επιχειρήθηκε η εκτέλεση βελτιστοποίησης άντλησης νερού από τον υδροφορέα, που είναι και ο απώτερος σκοπός της εργασίας.

Το πρώτο στάδιο της εργασίας, σχετίζεται με τη λειτουργία του προγράμματος SWI. Γίνεται μία συνοπτική περιγραφή του μοντέλου SWI που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του υδροφορέα. Αναλύονται ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος καθώς και οι παραδοχές που έχουν γίνει. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι μαθηματικές εξισώσεις της μεθόδου καθώς και η διαδικασία επίλυσής του. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα αυτό, έχει έναν μεγάλο βαθμό δυσκολίας τόσο στην εκμάθησή του όσο και στην εκτέλεσή του, καθώς δεν έχει αναπτυχθεί σε γραφικό περιβάλλον στο οποίο να μπορεί ο χρήστης να εισάγει τα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος. Όλες οι μεταβλητές, για να τις αναγνωρίσει το SWI, θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία, στον ίδιο φάκελο με το πρόγραμμα, την ώρα που αυτό θα εκτελεστεί. Η διαμόρφωση των αρχείων είναι πολύ αυστηρή, καθώς μικρές παρεκκλίσεις κάνουν το πρόγραμμα μη εκτελέσιμο χωρίς να υπάρχει κάποια ένδειξη, που να οδηγεί τον χρήστη να βρει το λάθος. Για διευκόλυνση της χρήσης του προγράμματος, στα πλαίσια της εργασίας, δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον MATLAB, υποπρογράμματα, τα οποία δέχονται από τον χρήστη τα δεδομένα του προβλήματος και στη συνέχεια συνθέτουν αυτόματα, τα αρχεία με την κατάλληλη διάρθρωση, ώστε να μπορεί να τα αναγνωρίσει το SWI.

Το δεύτερο στάδιο της εργασίας, σχετίζεται με την βελτιστοποίηση της άντλησης. Απώτερος σκοπός, είναι να βρεθεί η μεγαλύτερη τιμή παροχής άντλησης που μπορεί να εξασφαλιστεί από τον υδροφορέα, χωρίς όμως τον κίνδυνο υφαλμύρωσής του. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική, εκτελείται επίσης σε περιβάλλον MATLAB και πραγματοποιήθηκε με τον αλγόριθμο PATTERN SEARCH. Σημειώνεται ότι είναι η πρώτη φορά που εφαρμόζεται βελτιστοποίηση παράκτιου υδροφορέα σε συνδυασμό με το πρόγραμμα SWI.

Abstract

The objective of the research is to study problems of seawater intrusion in coastal aquifers, using the program SWI (Sea Water Intrusion). The ultimate goal of the research is to perform an optimization of the drawing of water from the aquifer. The mathematical equations are presented and the pertinent assumptions are discussed. It is noted that the program is still under development, which presents several difficulties in its utilization.

The first stage of the project is related to the problem of coastal aquifer simulation based on SWI. This is very difficult, because of its lack of graphical interface. All variables, in order to be identified by the program, must be placed in properly defined files, in the same folder with the program. The structure of these files is very strict and the slightest deviation causes the program not to run and without any indication about what is wrong. In order to make the use of SWI easier, several sub-programs are created in MATLAB, based on user input and automatically creating the necessary files needed.

The second stage of the thesis is related to optimization of water extraction from coastal aquifers. The objective is to find the maximum pumping rate, i.e. the water the aquifer may provide, while protecting the aquifer from seawater intrusion. This is an optimization procedure and is also executed in MATLAB. The optimization method is based on the Pattern Search algorithm. Notice that it is the first time that optimization is combined with the SWI simulation program.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη περιγραφή του φαινομένου της υφαλμύρωσης, τι είναι, πως προκαλείται και σε ποιες περιοχές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική περιγραφή του μοντέλου SWI που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του υδροφορέα. Αναλύονται ο τρόπος προσέγγισης του προβλήματος καθώς και οι παραδοχές που έχουν γίνει. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι μαθηματικές εξισώσεις της μεθόδου καθώς και η διαδικασία επίλυσής του.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των αρχείων των παραμέτρων που χρειάζεται το SWI για να μπορεί να εκτελεστεί. Για την ευκολότερη χρήση του προγράμματος αυτού, δημιουργήθηκαν σε επιβάλλον MATLAB μικρά προγράμματα τα οποία δέχονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του κάθε προβλήματος και δημιουργούν άμεσα τα αντίστοιχα αρχεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή του υδροφορέα ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα παραδείγματα βελτιστοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μία ανάλυση της μεθόδου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Αναφέρεται επίσης ο τρόπος που εφαρμόστηκε καθώς και τα αποτελέσματα που παρουσίασε. Τα παραδείγματα που εκτελέστηκαν είναι αρχικά ενός πηγαδιού και στη συνέχεια πολλαπλών.

Στο έκτο και κεφάλαιο γίνεται μία ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, καθώς και των δυσκολιών που αντιμετωπίστηκαν στην εκτέλεσή της.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

1.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Η υφαλμύρωση ενός παράκτιου υδροφορέα, είναι η διαδικασία κατά την οποία εισέρχεται θαλασσινό νερό στον υδροφορέα λόγω αυξημένων αντλήσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το νερό του πλέον να μην είναι αξιοποιήσιμο με οποιονδήποτε τρόπο και να διαταράσσεται η φυσική ισορροπία του περιβάλλοντος.

Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε νησιωτικές αλλά και παράκτιες περιοχές, κυρίως τους θερινούς μήνες. Η υψηλή ζήτηση σε νερό που έχουν πολλές τέτοιες περιοχές, όταν συνδυάζεται με την έλλειψη επαρκούς ποσότητας επιφανειακού δυναμικού, οδηγούν στην αξιοποίηση και του υπόγειου αποθέματος. Την μείωση λοιπόν αυτή, του υπόγειου δυναμικού, έρχεται να καλύψει η είσοδος του θαλασσινού νερού με το οποίο έρχεται σε επαφή ο υδροφορέας.

Ανάμεσα στο γλυκό και το θαλασσινό νερό, υπάρχει μία ενδιάμεση κατάσταση, η οποία ονομάζεται διεπιφάνεια. Πάνω από το όριο αυτό, βρίσκεται το ελαφρύ γλυκό νερό με ειδικό βάρος $1.000\text{cm}^3/\text{gr}$ και κάτω από το όριο βρίσκεται το βαρύτερο αλμυρό νερό $1.025\text{cm}^3/\text{gr}$. Σε σταθερές συνθήκες, όπου δεν υπάρχει άντληση, τα όρια αυτά βρίσκονται σε ισορροπία σε σταθερές θέσεις. Μόλις το σύστημα διαταραχθεί, από μία πιθανή άντληση, την οποία δεν μπορεί να αναπληρώσει φυσικά η τροφοδοσία, τα όρια της διεπιφάνειας μετακινούνται προς το εσωτερικό της στεριάς, μέχρι να βρεθεί καινούρια κατάσταση ισορροπίας. Η μετατόπιση αυτή εξαρτάται από το πιεζομετρικό φορτίο, την τροφοδοσία της περιοχής, καθώς και την ποσότητα της άντλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ SWI

2.1 ΕΙΣΑΓΟΓΗ

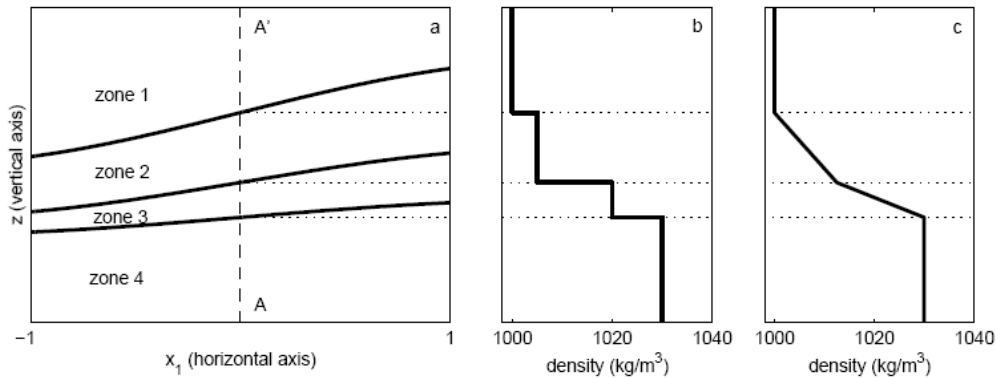
Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει μία παρουσίαση των χαρακτηριστικών του μοντέλου SWI το οποίο προσομοιώνει την μετατόπιση του μετώπου υφαλμύρωσης σε παράκτιους υδροφορείς. Θα αναφερθούν οι προσεγγίσεις του, καθώς και οι παραδοχές που κάνει και θα γίνει μία ανάλυση των μαθηματικών εξισώσεων που επιλύονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Το SWI (Sea Water Intrusion) είναι ένα πρόγραμμα που προσομοιώνει το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, μοντελοποιώντας το μέσω του MODFLOW. Το πακέτο SWI προσομοιώνει την εξέλιξη της τρισδιάστατης κατανομής της πυκνότητας στο χρόνο, τα αποτελέσματα της οποίας επηρεάζουν άμεσα τη ροή. Το κύριο πλεονέκτημα του SWI είναι πως κάθε υδροφορέας μπορεί να μοντελοποιηθεί με ξεχωριστό στρώμα κελιών. Ένα υπάρχον μοντέλο MODFLOW παράκτιου υδροφορέα, μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να προσομοιώνει θαλάσσια διείσδυση, με την προσθήκη ενός επιπλέον αρχείου εισόδου. Το SWI μπορεί να προσομοιώσει ροή διεπαφής, στρωματοποιημένη ροή και μη μόνιμη ροή μεταβλητής πυκνότητας.

2.2 Εννοιολογικό μοντέλο

Το SWI διακριτοποιεί τον υδροφορέα σε ζώνες χρησιμοποιώντας καμπύλες επιφάνειες. Στην εικόνα 1 (σχήμα a) αναπαριστάται η διατομή ενός υδροφορέα με τις λεπτές γραμμές να αντιστοιχούν στις επιφάνειες. Το υψόμετρο κάθε επιφάνειας είναι μία μοναδική συνάρτηση των οριζόντιων συντεταγμένων.

Το SWI έχει δύο επιλογές, την στρωματοποιημένη ροή και την ροή μεταβλητής πυκνότητας. Στην στρωματοποιημένη, η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή σε κάθε ζώνη και ασυνεχής από ζώνη σε ζώνη (σχήμα b). Ενώ στην ροή μεταβλητής πυκνότητας, οι επιφάνειες διαχωρισμού έχουν σταθερή πυκνότητα κατά μήκος τους (σχήμα c). Στην περίπτωση αυτή, η πυκνότητα μεταβάλλεται γραμμικά κάθετα στις ζώνες και είναι συνεχής από ζώνη σε ζώνη.



Εικόνα 1: (a) Κατακόρυφη διατομή υδροφορέα, (b) Κατανομή πυκνότητας σε στρωματοποιημένη ροή, (c) Κατανομή πυκνότητας σε ροή μεταβλητής πυκνότητας (Bakker & Schaars, 2005)

2.3 Παραδοχές του SWI

Υπάρχουν τέσσερις παραδοχές στις οποίες βασίζεται το μοντέλο SWI

- 1) Υιοθετείται η Dupuit παραδοχή, σύμφωνα με την οποία θεωρείται αμελητέα η αντίσταση της ροής στην κατεύθυνση κάθετα στις στρώσεις (e.g. Strack, 1989, p.36).
- 2) Η εξίσωση ισοζυγίου μάζας, αντικαθίσταται από την εξίσωση συνέχειας της ροής, στον υπολογισμό του ποδιού της σφήνας (Boussinesq-Oberbeck approximation; e.g. Holzbecher, 1998, p. 32). Οι επιδράσεις της πυκνότητας υπολογίζονται μέσω του γενικευμένου νόμου του Darcy.
- 3) Οι επιδράσεις της διασποράς και της διάχυσης δεν χρησιμοποιούνται.
- 4) Δεν επιτρέπεται η αναστροφή. Αναστροφή είναι η παρουσία αλμυρού νερού (βαρύτερο), πάνω από γλυκό νερό (ελαφρύτερο).

2.4 Μαθηματική Περιγραφή Μοντέλου SWI

Για σημειογραφική ευκολία υιοθετείται ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x_1, x_2, z) , με το z να έχει κατακόρυφη κατεύθυνση προς τα πάνω. Τα υπόγεια νερά χωρίζονται κάθετα σε N ζώνες. Οι ζώνες και οι επιφάνειες αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω. Η ζώνη n οροθετείται από την επάνω της επιφάνεια n (Εικόνα 2). Το ύψος μίας επιφάνειας αντιπροσωπεύεται από μία συνάντηση $\zeta_n(x_1, x_2)$. Το κάτω όριο του υδροφορέα ονομάζεται ζ_{N+1} ενώ το πάνω όριο του, ονομάζεται ζ_1 .

Η τρισδιάστατη κατανομή της πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή γράφεται:

$$v = \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \quad (1)$$

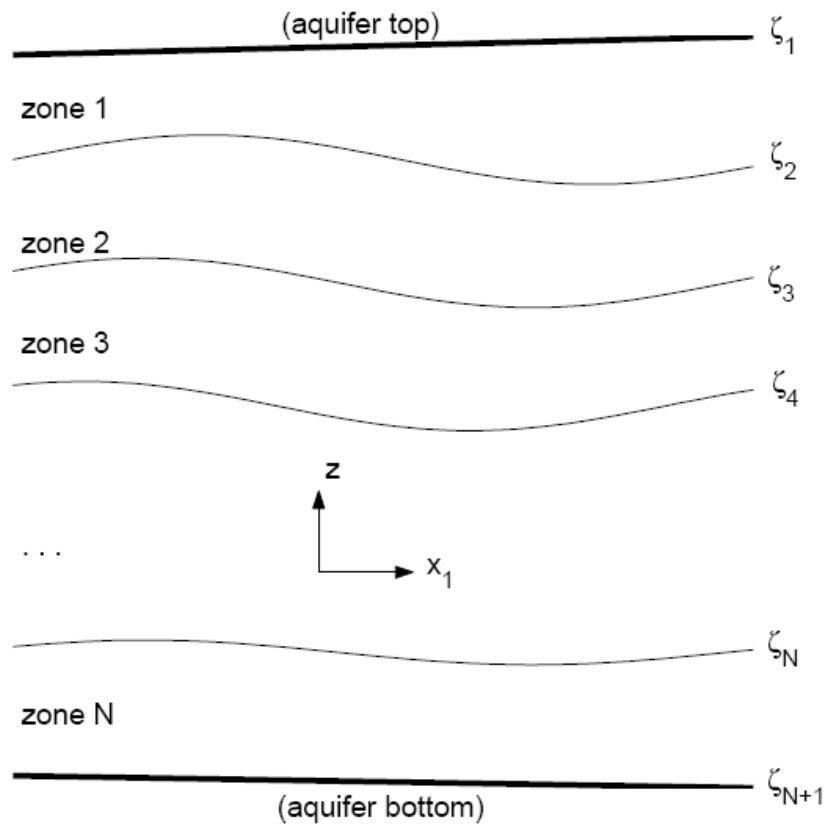
όπου ρ_f είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού και $\rho(x, y, z)$ είναι η τρισδιάστατη κατανομή πυκνότητας

Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στην κορυφή του υδροφορέα (h_1) και τα ύψη των επιφανειών 2 έως N .

Το διάνυσμα συνολικής οριζόντιας ροής κάτω από μία επιφάνεια p ονομάζεται $\overset{p}{U}_i$ και είναι η ροή ανάμεσα στο κάτω όριο του υδροφορέα και το ύψος της επιφάνειας p (ζ_p).

$$\overset{p}{U}_i = \int_{z_b}^{\zeta_p} q_i dz \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

Όπου ο δείκτης i χρησιμοποιείται για να εκφράσει τις δύο οριζόντιες συνιστώσες ενός διανύσματος. Το q_i είναι το διάνυσμα της ειδικής παροχής, το οποίο εκφράζεται σαν κλίση του υδραυλικού φορτίου του γλυκού νερού (e.g. Holzbecher, 1998, p.35)



Εικόνα 2: Διατομή του υδροφορέα διακριτοποιημένου σε ζώνες (Bakker & Schaars, 2005)

$$q_i = -k\partial_i h \quad i=1,2 \quad (3)$$

Όπου ∂_i είναι η μερική παράγωγος στην x_i κατεύθυνση ($\partial_i = \partial / \partial x_i$) και k είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του γλυκού νερού.

Από την προσέγγιση του Dupuit, η κατανομή πίεσης στον υδροφορέα είναι υδροστατική, το οποίο καταλήγει στην ειδική παροχή να εκφράζεται:

$$q_i = -k\partial_i h_n + k\partial_i \int_{\zeta_n}^z v(x_1, x_2, z') dz' \quad i=1,2 \quad (4)$$

Όπου h_n είναι το φορτίο στο ύψος $z = \zeta_n$.

Η εξίσωση συνέχειας της συνολικής ροής στον υδροφορέα μπορεί να γραφτεί ως :

$$\partial_i U_i = -S \frac{\partial h_1}{\partial t} + \gamma \quad i=1,2 \quad (5)$$

Όπου $S[-]$ είναι η αποθηκευτικότητα και $\gamma [L/T]$ είναι ένας όρος φόρτισης. Ο συμβολισμός αθροισμάτων του Αϊνστάιν για επαναλαμβανόμενους δείκτες έχει εφαρμοστεί στην παραπάνω εξίσωση (the Einstein summation convention).

Αντίστοιχα η εξίσωση συνέχειας για τη ροή κάτω από την επιφάνεια p ($p=2, \dots, N$) μπορεί να γραφτεί ως:

$$\partial_i U_i = -n \frac{\partial \zeta_p}{\partial t} + \gamma_p \quad i=1,2 \quad (6)$$

Όπου n είναι το ενεργό πορώδες και γ_p είναι ένας όρος φόρτισης.

Ο συνδυασμός των εξισώσεων συνέχειας (5),(6) και του νόμου του Darcy (4) έχει σαν αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned} \partial_i [\sigma_1 \partial_i h_1] &= S \frac{\partial h_1}{\partial t} - \gamma + R_1 \\ \delta_n \partial_i [\sigma_p \partial_i \zeta_p] &= n \frac{\partial \zeta_p}{\partial t} - \gamma_p + R_p \quad p = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (7)$$

Όπου ως σ_p ορίζεται η συνολική διαβιβαστικότητα κάτω από την επιφάνεια p . Ως δ_p ορίζεται το εύρος της διακύμανσης της πυκνότητας ανάμεσα στις ζώνες, ενώ R_1 και R_p είναι όροι ψευδο-φόρτισης. Ο όρος γ περιλαμβάνει τη διαρροή μεταξύ υδροφορέων, όταν το μοντέλο έχει πολλαπλούς υδροφορείς.

Για στρωματοποιημένη ροή, τα δ_n , R_1 και R_p ορίζονται ως:

$$\delta_1 = n \quad \delta_n = v_n - v_{n-1} \quad n = 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

$$R_1 = -\sum_{n=1}^N \delta_n \partial_i [\sigma_n \partial_i \zeta_n] \quad (9)$$

$$R_p = -\partial_i [\sigma_p \partial_i h_1] - \sum_{n=1}^{p-1} \delta_n \partial_i [\sigma_p \partial_i \zeta_n] - \sum_{n=p+1}^N \delta_n \partial_i [\sigma_n \partial_i \zeta_n] \quad (10)$$

Όπου v_n είναι η αδιάστατη πυκνότητα στη ζώνη n

Για ροή μεταβλητής πυκνότητας, ως v ορίζεται η αδιάστατη πυκνότητα κατά μήκος της επιφάνειας ζ_n και το δ_n υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχέση (8), αλλά με τη μέση αδιάστατη πυκνότητα, μ_n της ζώνης n .

$$\mu_n = (v_n + v_{n+1}) / 2 \quad (11)$$

Οι όροι R_1 και R_p ορίζονται ως:

$$R_1 = -\sum_{n=1}^N \delta_n \partial_i [\sigma_n \partial_i \zeta_n] + \sum_{n=p^*}^{N^*-1} \varepsilon_n \partial_i [\tau_n \partial_i (\zeta_n - \zeta_{n+1})] \quad (12)$$

$$R_p = -\partial_i [\sigma_p \partial_i h_1] - \sum_{n=1}^{p-1} \delta_n \partial_i [\sigma_n \partial_i \zeta_n] - \sum_{n=p+1}^N \delta_n \partial_i [\sigma_n \partial_i \zeta_n] + \sum_{n=p^*}^{N^*-1} \varepsilon_n \partial_i [\tau_n \partial_i (\zeta_n - \zeta_{n+1})] \quad (13)$$

Όπου τ_p είναι η διαπερατότητα της ζώνης p :

$$\tau_p = k(\zeta_p - \zeta_{p+1}) \quad (14)$$

ε_p είναι το μέτρο της διακύμανσης της πυκνότητας στη ζώνη p :

$$\varepsilon_p = (v_{p+1} - v_p) / 6 \quad (15)$$

p^* είναι ο αριθμός της πρώτης επιφάνειας κάτω από το άνω όριο του υδροφορέα, που είναι μεγαλύτερος ή ίσος του p

N^* είναι ο αριθμός της τελευταίας επιφάνειας πάνω από κάτω όριο του υδροφορέα

2.5 Διαδικασία επίλυσης

Αρχικές τιμές θα πρέπει να δοθούν σε κάθε εξαρτημένη μεταβλητή, σε κάθε υδροφορέα, όπως το φορτίο του γλυκού νερού του κάθε υδροφορέα στην κορυφή του, καθώς και το ύψος ζ_n των επιφανειών 2 έως N . Οριακές συνθήκες πρέπει να ορισθούν για το υδραυλικό φορτίο, την κλίση του υδραυλικού φορτίου ή το συνδυασμό τους κατά μήκος των ορίων του μοντέλου. Τα όρια των επιφανειών 2 έως N , είναι πιθανό να μπορούν να μετακινούνται. Οι οριακές συνθήκες όλων των επιφανειών διακυμαίνονται κατακόρυφα κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Όταν μία επιφάνεια τέμνεται με το κάτω όριο του υδροφορέα, η διακύμανση θεωρείται μηδενική. Όταν μία επιφάνεια τέμνεται με το άνω όριο του υδροφορέα, η διακύμανση καθορίζεται από τη ροή του υδροφορέα. Στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, το κελιά κατά μήκος των ορίων κάθε επιφάνειας πηγαίνουν στο ύψος τους, ώστε να καθορισθεί κατά πόσο το όριο θα πρέπει να μετακινηθεί οριζόντια.

2.6 Κορυφή και πόδι της σφήνας υφαλμύρωσης

Στο τέλος κάθε χρονικού βήματος, θα πρέπει να καθοριστεί πια κομμάτια των ορίων των επιφανειών 2 έως N, θα πρέπει να μετακινηθούν οριζόντια. Τα όρια της κάθε επιφάνειας καθορίζονται από την διακύμανση κατά την διάρκεια του χρονικού βήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η επιφάνεια να μπορεί να μετακινηθεί κατακόρυφα, κατά μήκος των ορίων, στη διάρκεια του χρονικού βήματος. Το όριο της επιφάνειας που βρίσκεται κοντά στο κάτω μέρος του υδροφορέα ονομάζεται πόδι (toe), ενώ το όριο που βρίσκεται κοντά στο άνω μέρος του υδροφορέα ονομάζεται κορυφή (tip).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΡΧΕΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ SWI

Όπως προαναφέρθηκε, το SWI, διαβάζει τις παραμέτρους του εκάστοτε προβλήματος, από κατάλληλα διαμορφωμένα αρχεία.

Τα αρχεία αυτά είναι 10 στον αριθμό, αλλά δεν είναι όλα απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος. Για παράδειγμα το αρχείο rch (Recharge), το οποίο σχετίζεται με την επιφανειακή τροφοδοσία, δεν είναι απαραίτητο, καθώς δεν είναι υποχρεωτικό σε κάθε πρόβλημα να υπάρχει τέτοια παράμετρος.

Όλα αυτά τα αρχεία πρέπει να έχουν μία αυστηρά καθορισμένη μορφή, για να μπορεί να τα «διαβάσει» το SWI. Αυτή είναι και μία από τις κύριες δυσκολίες του προγράμματος αυτού, καθώς πολύ μικρές παραλείψεις, θα κάνουν την εκτέλεση αδύνατη, χωρίς να υπάρχει οποιοσδήποτε μηχανισμός που να υποδεικνύει το λάθος, ώστε να μπορεί να διορθωθεί. Το γεγονός αυτό κάνει την χρήση του ιδιαίτερα δύσκολη και χρειάζεται μεγάλη εξοικείωση ώστε να μπορεί ο χρήστης να το εκτελέσει.

Στην εξάλειψη αυτού του προβλήματος αφιερώθηκε το πρώτο τμήμα της εργασίας αυτής. Για την διευκόλυνση της χρήσης του SWI, τόσο σε χρόνο, όσο και σε περιπλοκότητα, δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον MATLAB, μικρά προγράμματα, τα οποία δέχονται κατά την κλήση τους τα δεδομένα που θα πρέπει να περιέχει το κάθε αρχείο και στη συνέχεια το συνθέτουν με την κατάλληλη διάρθρωση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι ο χρήστης δεν είναι υποχρεωμένος να γνωρίζει τον τρόπο λειτουργίας του κάθε προγράμματος και μπορεί άμεσα και χωρίς λάθη να καταλήξει σε αποτελέσματα.

Στη συνέχεια θα γίνει μία ανάλυση όλων των αρχείων που απαιτούνται καθώς και οι παράμετροι εισόδου του εκάστοτε προγράμματος που δημιουργήθηκε για να το συνθέτει.

3.1 ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ SWI

Για να γίνει η προσομοίωση του υδροφορέα μέσω του SWI, είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός ακόμα αρχείου εισόδου, το SWI. Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες για την αρχική τιμή της κατανομής της πυκνότητας, όπως και την μεταβατική εξέλιξη της πυκνότητας. Η κατανομή της πυκνότητας καθορίζεται χωρίζοντας τον υδροφορέα κάθετα σε ζώνες, που οριοθετούνται από καμπύλες επιφάνειες. Στο αρχείο αυτό θα πρέπει να οριστεί αν η ροή προσομοιώνεται ως στρωματοποιημένη, ή μεταβλητής πυκνότητας. Επίσης θα πρέπει να περιέχει τις τιμές των αρχικών θέσεων των επιφανειών καθώς και την τιμή του ύψους του κάθε κελιού.

Η διάταξη του αρχείου, ώστε να λειτουργεί το SWI είναι πολύ συγκεκριμένη και πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα δεδομένα εισαγωγής.

1.Δεδομένα:NPLN ISTRAT ISWIZT NPRN

2.Δεδομένα:TOESLOPE TIPSLOPE ZETAMIN DELZETA

3.Δεδομένα:NU

Για κάθε επιφάνεια και κάθε layer:

4.Δεδομένα:ZETA(NCOL,NROW)

5.Δεδομένα:SSZ(NCOL,NROW)

6.Δεδομένα:ISOURCE(NCOL,NROW)

NPLN: Ο αριθμός των επιφανειών. Ισούται με τον αριθμό των ζωνών μείον ένα

ISTRAT: Η κατανομή της πυκνότητας

Αν ISTRAT=0 η πυκνότητα κυμαίνεται γραμμικά μεταξύ των επιφανειών

Αν ISTRAT=1 η πυκνότητα είναι σταθερή μεταξύ των επιφανειών

ISWIZT: Ο αριθμός των μονάδων που απαιτείται από το αρχείο SWI για την παραγωγή του αρχείου με τα αποτελέσματα των υψών

Αν ISWIZT>0, ο αριθμός της μονάδας καταγραφής για κάθε ανύψωση

Αν ISWIZT<0, οι ανυψώσεις δεν θα καταγράφονται

NPRN: Ο αριθμός που φανερώνει ανά πόσα χρονικά βήματα θα καταγράφει τα ύψη

TOESLOP: Η μέγιστη κλίση στα κελιά που αντιστοιχούν στο σημείο toe

TIPSLOPE: Η μέγιστη κλίση στο κελί που αντιστοιχεί στο σημείο tip

ZETAMIN: Το ελάχιστο υψόμετρο μίας επιφάνειας προτού αυτή απομακρυνθεί από ένα κελί

DELZETA: Το υψόμετρο μίας επιφάνειας, όταν αυτή κινείται σε ένα διπλανό άδεια κελί

NU: Τιμές της αδιάστατης πυκνότητας

Αν ISTRAT=1, πυκνότητα σε κάθε ζώνη(NPLN+1)

Αν ISTRAT=0, πυκνότητα κατά μήκος κάθε επιφάνειας (NPLN τιμές)

ZETA: Οι αρχικές αυξήσεις των επιφανειών ανά σειρές στηλών

SSZ: Το ενεργό πορώδες για όλα τα κελιά του υδροφορέα

ISOURCE: Όρος που σχετίζεται με τον τύπο των εξωτερικών πηγών. Ο όρος καθορίζεται από οποιαδήποτε εξωτερική παράμετρο (άντληση, τροφοδοσία, GHB κελιά)

Αν ISOURCE>0, οι πηγές είναι του ίδιου τύπου με το νερό στη ζώνη ISOURCE. Εάν η ζώνη δε είναι παρούσα στο κελί, οι πηγές τοποθετούνται σε ζώνη στην κορυφή του υδροφόρου ορίζοντα

Αν ISOURCE=0, οι πηγές αποτελούνται από νερό ίδιου τύπου όπως στην κορυφή του υδροφορέα

Αν ISOURCE<0, οι πηγές είναι ίδιου τύπου με το νερό στη ζώνη που ορίζεται από τον όρο ISOURCE. Αυτή η επιλογή είναι χρήσιμη για τη μοντελοποίηση του πυθμένα του ωκεανού, όπου το νερό που διεισδύει είναι αλμυρό, αλλά το νερό που κατεισδύει είναι ίδιου τύπου με το νερό στην κορυφή του υδροφορέα

3.2 Basic Package (ba6)

Το αρχείο αυτό παρέχει αρχικές συνθήκες για να λυθούν οι εξισώσεις των υπόγειων νερών.

Για κάθε κελί του κανάβου, θα πρέπει να ορισθεί η κατάσταση του και το αρχικό του υδραυλικό φορτίο.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το ba6 αρχείο ονομάζεται Createba6File και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

ibount: πίνακας με τις ένδειξη για την κατάσταση των κελιών (ενεργό= 1, μη ενεργό=-1), θα πρέπει να υπάρχει ένδειξη για κάθε κελί του κανάβου

inthead: πίνακας του αρχικού υδραυλικού φορτίου, θα πρέπει να υπάρχει ένδειξη για κάθε κελί του κανάβου

Εναλλακτικά, αντί των πινάκων ibount και inthead, μπορεί να δοθεί η ένδειξη Constant «τιμή», με την οποία κάθε κελί του κανάβου, παίρνει την τιμή που δόθηκε.

3.3 Block Centered Flow Package (bcf)

Το αρχείο αυτό περιέχει πληροφορίες για τον καθορισμό τις ροής ανάμεσα σε κελιά, καθώς και την κίνηση του νερού από και προς αποθήκευση.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το bc6 αρχείο ονομάζεται Createbc6File και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

thickness: το πάχος του στρώματος του υδροφορέα

hydcond: η υδραυλική αγωγιμότητα K

vertleak: ο όρος αυτός είναι η διαρροή μεταξύ των υδροφορέων, σε περίπτωση που το μοντέλο έχει πολλαπλούς υδροφορείς

3.4 Discretisation Package (dis)

Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για να καθορίσει τον κানাβο και γενικές ιδιότητες του υδροφορέα.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το dis αρχείο ονομάζεται CreatedisFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

nl: είναι ο αριθμός των layers του μοντέλου

nr: είναι ο αριθμός των σειρών του μοντέλου

nc: είναι ο αριθμός των στηλών του μοντέλου

csx: είναι το εύρος των στηλών του μοντέλου

csy: είναι το εύρος των σειρών του μοντέλου

topelev: το μέγιστο ύψος του μοντέλου

botelev: το ελάχιστο ύψος του μοντέλου

ttotal: ο συνολικός χρόνων όλων των χρονικών βημάτων

tsteps: ο αριθμός των χρονικών βημάτων

3.5 General Head Boundary Package (ghb)

Το αρχείο αυτό παρέχει οριακές συνθήκες για την υπόγεια ροή του νερού. Πρέπει να περιλαμβάνει τα κελιά που έχουν τις οριακές συνθήκες.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το ghb αρχείο ονομάζεται CreateghbFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

ghb: πίνακας όπου οι στήλες του έχουν για τα κελιά με οριακές συνθήκες, διαδοχικά τις τιμές του layer, της σειράς στον κানাβο, της στήλης στον κানাβο, το αρχικό υδραυλικό φορτίο και την τιμή conductance του κάθε κελιού.

3.6 Name file(nam)

Το αρχείο αυτό περιέχει τα ονόματα όλων των αρχείων που θα χρησιμοποιήσει το swi, μόλις αυτό τρέξει.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το nam αρχείο ονομάζεται CreatenamFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

ghb: ένδειξη που φανερώνει αν υπάρχει ghb αρχείο(0 δεν υπάρχει, 1 υπάρχει)

rchr: ένδειξη που φανερώνει αν υπάρχει rch αρχείο(0 δεν υπάρχει, 1 υπάρχει)

3.7 Output Control (oc)

Το αρχείο αυτό καθορίζει πόσο συχνά θα αποθηκεύονται τα αποτελέσματα.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το oc αρχείο ονομάζεται CreateocFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

tsteps: ο αριθμός των χρονικών βημάτων

3.8 Preconditioned Conjugate Gradient Solver Package (pcg)

Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το υδραυλικό φορτίο με την preconditioned conjugate gradient iterative method.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το pcg αρχείο ονομάζεται CreatepcgFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

3.9 Well Package (wel)

Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις σταθερές εισροές ή εκροές νερού από το σύστημα. Με θετικό πρόσημο διακρίνονται οι εισροές νερού, ενώ με αρνητικό πρόσημο οι εκροές.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το wel αρχείο ονομάζεται CreatewelFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

wel: πίνακας όπου οι στήλες του έχουν για τα κελιά με σταθερή εισροή νερού, τις τιμές του layer, της σειράς στον κάναβο, της στήλης στον κάναβο και της παροχής του κελιού

welr: πίνακας με τις θέσεις (σειρά και στήλη) των πηγαδιών

Q: η τιμή της άντλησης του κάθε πηγαδιού

3.10 Recharge Package(rch)

Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει την επιφανειακή τροφοδοσία από κατείδυση.

Το πρόγραμμα που δημιουργεί το rch αρχείο ονομάζεται CreaterchFile και οι παράμετροι εισόδου του είναι:

FileName: το όνομα του αρχείου

rch: η τιμή της ημερήσιας κατείδυσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΛΕΤΗ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΒΑΘΥ ΚΑΛΥΜΝΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία σύντομη αναφορά στον υδροφόρο που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές της εργασίας. Παρουσιάζονται τόσο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, όσο και οι αρχικές πιεζομετρικές συνθήκες.

4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

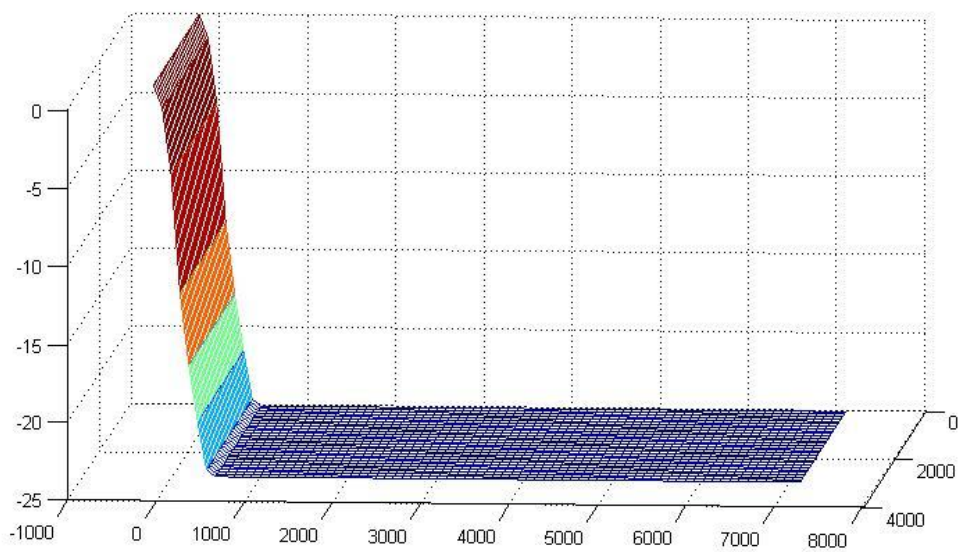
Ο υδροφόρος που θα χρησιμοποιηθεί σαν παράδειγμα στη συγκεκριμένη εργασία βρίσκεται στο Βαθύ της Καλύμνου. Προσομοιώνεται με ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο σχήμα, το μήκος του είναι 7000m, το πλάτος του είναι 3000m και το βάθος του είναι 25m. Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) θεωρείται 100m/d. Ο υδροφόρος δέχεται τόσο επιφανειακή όσο και πλευρική τροφοδοσία. Η ετήσια κατείσδυση υπολογίζεται σε $N=0.03\text{m/year}$ το οποίο αντιστοιχεί σε $N=0.00008\text{m/d}$ ενώ η πλευρική τροφοδοσία εκτιμάται σε $Q=1350000\text{m}^3/\text{year}$ το οποίο αντιστοιχεί σε $Q=3698.6\text{m}^3/\text{d}$.

Ο υδροφόρος προσομοιάζεται με ένα κάναβο 30x70 κελιών, διαστάσεων 100m x 100m. Ανάντη του υδροφόρου πρέπει να προστεθεί μία στήλη η οποία θα εισάγει την πλευρική τροφοδοσία, ενώ κατάντη, προστίθενται τρεις στήλες για τις οριακές συνθήκες με το σύνορο της θάλασσας. Στις δύο άλλες πλευρές, ο υδροφόρος συνορεύει με αδιαπέρατο όριο, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται κάποια άλλη προσθήκη. Ο τελικός κάναβος που δημιουργείται έχει 30x74 κελιά.

Το αρχικό υδραυλικό φορτίο που έχει ο υδροφόρος τίθεται 0.05 και η τιμή conductance θεωρείται 1000. Σε κάθε επίλυση, θα γίνονται 200 χρονικά βήματα, διάρκειας 50 ημερών το καθένα. Τέλος, η πλευρική τροφοδοσία, αν διαιρεθεί με τα 30 κελιά που έχει στο πλάτος του ο υδροφόρος, μας δίνει $Q=123\text{m/d}$ ανά κελί.

4.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Στο σημείο αυτό θα γίνει μία περιγραφή της αρχικής συνθήκης του υδροφορέα. Εκτελώντας το SWI, για μηδενική άντληση, μπορούμε εύκολα να έχουμε μία εικόνα της κατάστασης του φρέατος, όταν αυτό βρίσκεται σε φυσική ισορροπία. Η διεπαφή, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα, είναι συμμετρική, έχει ίδια κλίση σε όλο το μήκος της και το πόδι της βρίσκεται σε απόσταση 400m από την ακτογραμμή.



Απεικόνιση υδροφορέα σε συνθήκες μηδενικής άντλησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SWI

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί η βελτιστοποίηση της άντλησης στον υδροφορέα της Καλύμνου.

Η αρχική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης ήταν η SQP (sequential quadratic programming). Η μέθοδος αυτή, αν και χρησιμοποιείται για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων, δεν μπορούσε τις περισσότερες φορές να χρησιμοποιήσει τους περιορισμούς που της είχαν τεθεί. Το πρόβλημα της μεθόδου αυτής ήταν πως η ανεξάρτητη μεταβλητή της, δεν είναι συνεχής, αλλά έχει μεμονωμένες τιμές. Η ανεξάρτητη μεταβλητή στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, είναι η απόσταση του ποδιού της διεπαφής από τη θέση του πηγαδιού. Από το SWI όμως, την θέση της διεπαφής, την βρίσκουμε από έναν πίνακα με τα ύψη των κελιών του κανάβου. Στο πρώτο κελί που το ύψος του είναι μηδενικό, βρίσκεται το πόδι της διεπαφής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι τιμές της απόστασης ποδιού πηγαδιού να είναι διακεκριμένες, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εκτελεστεί ορθά η SQP μέθοδος. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε τελικά η μέθοδος PATTERN SEARCH, η οποία δεν περιορίζεται από αυτό το γεγονός.

Μέσω της μεθόδου Pattern Search, για δεδομένες θέσεις πηγαδιών, θα υπολογιστεί αυτόματα η μέγιστη άντληση που μπορεί να υπάρξει στον υδροφορέα, χωρίς να διακινδυνεύεται η υφαλμύρωσή του. Η μέθοδος αυτή θα εκτελεί επαναληπτικά το πρόγραμμα SWI μέχρι να βρει τη βέλτιστη λύση, κάτι που με το δεδομένο πρόγραμμα δοκιμάζεται για πρώτη φορά και είναι και ο απώτερος σκοπός της εργασίας.

5.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ PATTERN SEARCH

Η μέθοδος PatternSearch βρίσκει το τοπικό ελάχιστο (x) μίας συνάρτησης (fun) της MATLAB, η οποία είναι η συνάρτηση στόχου($f(x)$). Το χαρακτηριστικό της είναι πως δεν χρησιμοποιεί την παράγωγο της συνάρτησης για να προσεγγίζει την λύση με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε μη συνεχείς είτε σε διαφορικές εξισώσεις.

Η μέθοδος χωρίζει μία μεταβλητή, σε ίσα διαστήματα. Όταν η αύξηση ή η μείωση κάθε μεταβλητής δεν βελτιώνει το αποτέλεσμα των πειραματικών δεδομένων, μειώνει στο μισό το εύρος των βημάτων και επαναλαμβάνει τη διαδικασία. Η μέθοδος τερματίζει μόλις το εύρος των βημάτων θεωρηθεί αρκετά μικρό.

Στην μορφή που χρησιμοποιήθηκε, η PATTERNSEARCH, έχει αρχική τιμή(x_0), κατώτατο όριο (lb) και ανώτατο όριο(ub).

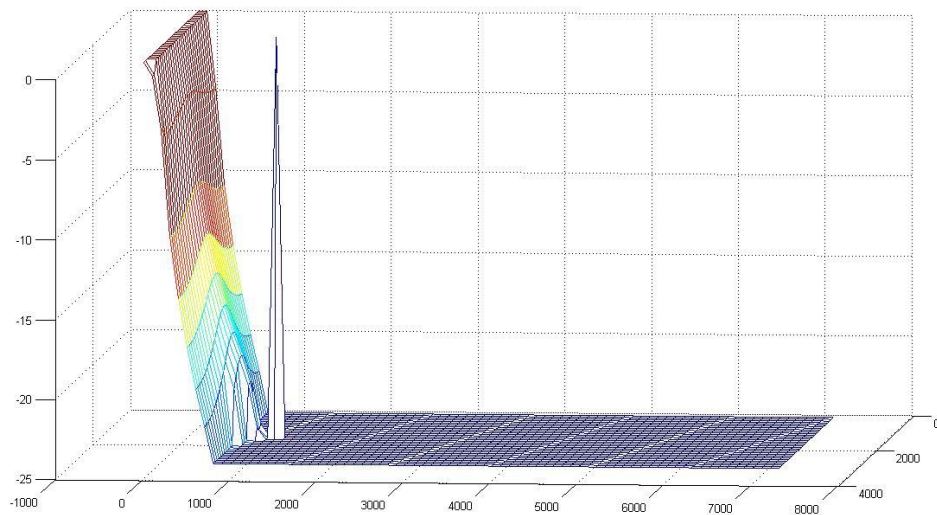
Στο δεδομένα πρόβλημα, το τοπικό ελάχιστο (x) που θα υπολογίζει ο αλγόριθμος, θα είναι η απόσταση που έχει το πόδι από τη θέση του πηγαδιού. Το SWI δίνει σαν αποτελέσματα έναν πίνακα υψών της διεπιφάνειας που χωρίζει αλμυρό και γλυκό νερό. Η θέση λοιπόν του ποδιού, είναι η θέση του πρώτου κελιού του κανάβου σε κάθε σειρά, του οποίου το ύψος είναι μεγαλύτερο από το ύψος του πυθμένα. Για λόγους ασφαλείας, ώστε να μην έχει προλάβει να φτάσει το αλμυρό νερό στο πηγάδι, η θέση του πηγαδιού ορίζεται 1 κελί πιο κοντά στη θάλασσα απ' ότι πραγματικά είναι, ώστε το πρόγραμμα να τερματίζει 100m πιο νωρίς.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΝΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ

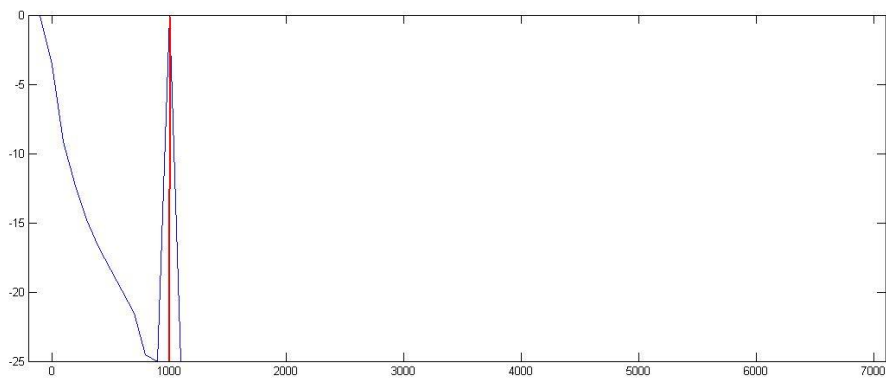
Αρχικά θα παρουσιαστούν αποτελέσματα της μεθόδου αυτής σε προβλήματα με 1 πηγάδι. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά πιο απλή αφού έχει μόνο μία μεταβλητή, δηλαδή την άντληση του πηγαδιού, που να επηρεάζει την θέση της σφήνας. Το κατώτατο όριο που δόθηκε στα παρακάτω παραδείγματα είναι $lb=0$ καθώς πρόκειται για άντληση και δεν μπορούν να υπάρχουν αρνητικές τιμές, ενώ το ανώτατο όριο είναι $ub=4000$ που είναι ισοδύναμο της πλευρικής τροφοδοσίας. Η αρχική τιμή (x_0) μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, καθώς απλά βοηθάει τη μέθοδο τη μέθοδο να φτάσει πιο εύκολα στη βέλτιστη τιμή. Η μεταβλητή που αλλάζει σε κάθε παράδειγμα, θα είναι η θέση του πηγαδιού και αναλόγως θα παρουσιάζεται η μέγιστη άντληση που μπορεί να προσφερθεί. Σε κάθε παράδειγμα θα παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπαφής αλμυρού και γλυκού νερού, μαζί με την κάθετη τομή στην ευθεία του πηγαδιού.

Παράδειγμα 1

Στο παράδειγμα αυτό, η θέση του πηγαδιού βρίσκεται ακριβώς στη μέση πλάτους του υδροφορέα και σε απόσταση 1000m από την ακτογραμμή. Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι άντληση $Q=2188.02\text{m}^3/\text{d}$.



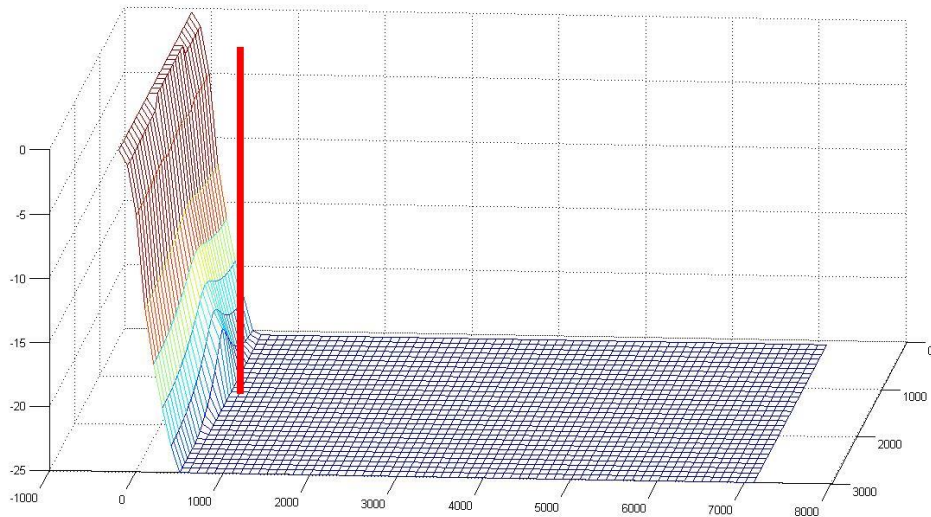
Παράδειγμα 1: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



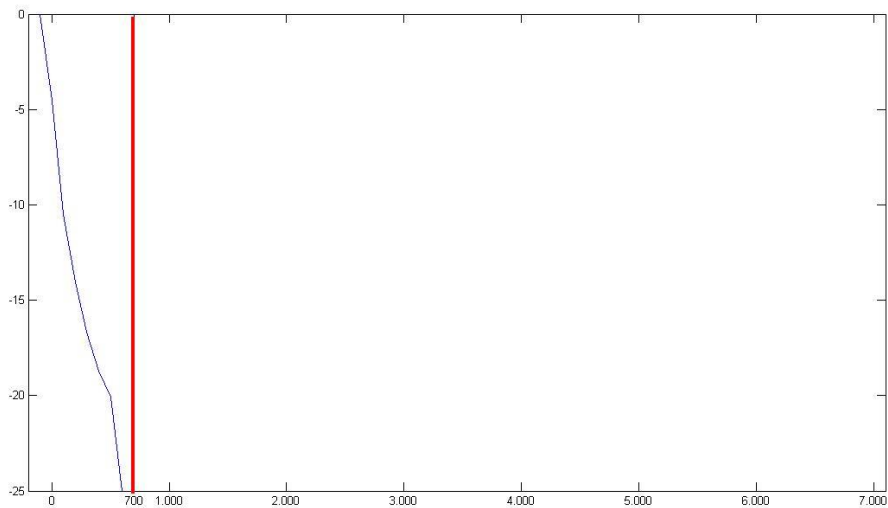
Παράδειγμα 1: Τομή διεπαφής

Παράδειγμα 2

Στο παράδειγμα αυτό, η θέση του πηγαδιού βρίσκεται ακριβώς 1300m από το όριο του υδροφορέα και σε απόσταση 700m από την ακτογραμμή. Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι άντληση $Q= 1280.45\text{m}^3/\text{d}$. Όπως αναμενόταν, η παροχή άντλησης έχει μειωθεί αφού το πηγάδι βρίσκεται τώρα πιο κοντά στην ακτή.



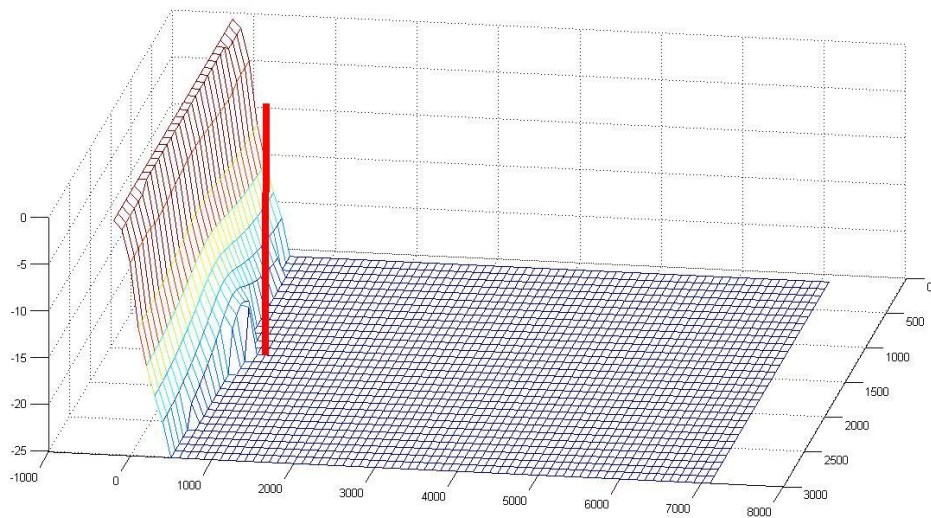
Παράδειγμα 2: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



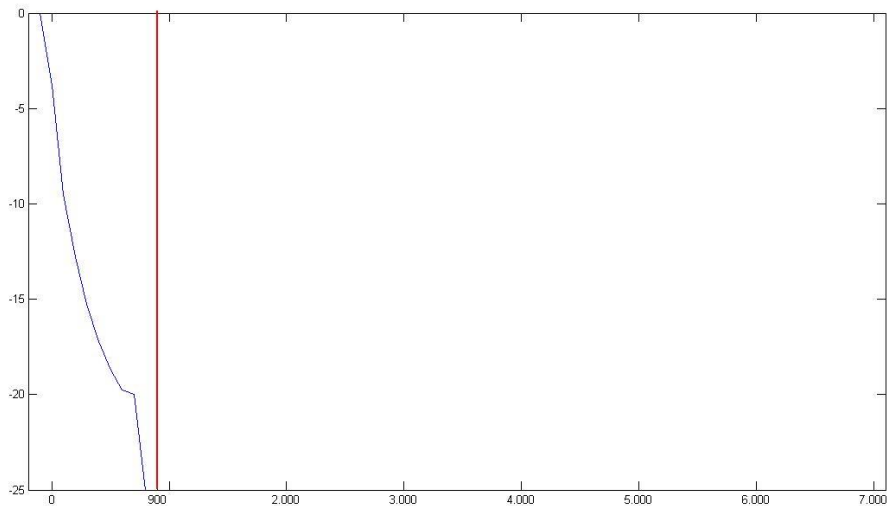
Παράδειγμα 2: Τομή διεπαφής

Παράδειγμα 3

Στο παράδειγμα αυτό, η θέση του πηγαδιού βρίσκεται ακριβώς στη μέση πλάτους του υδροφορέα και σε απόσταση 900m από την ακτογραμμή. Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι άντληση $Q= 1918.09\text{m}^3/\text{d}$.



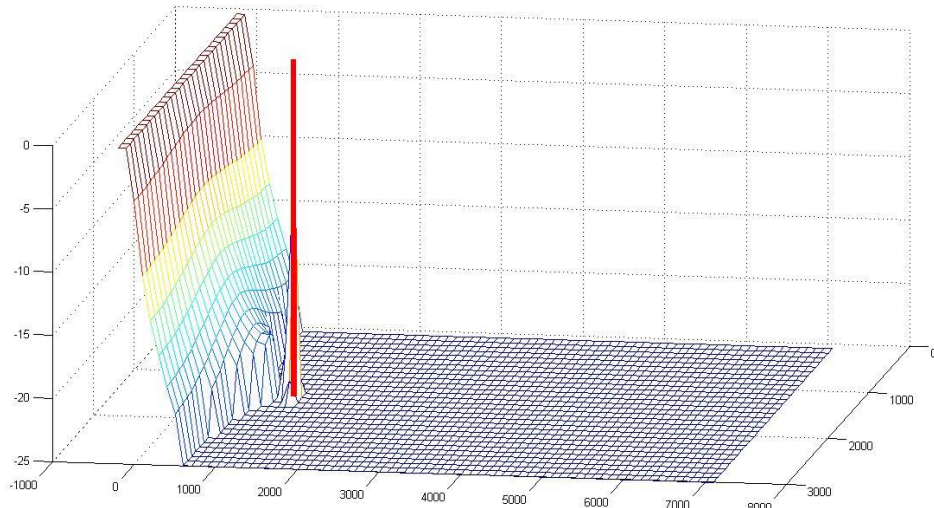
Παράδειγμα 3: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



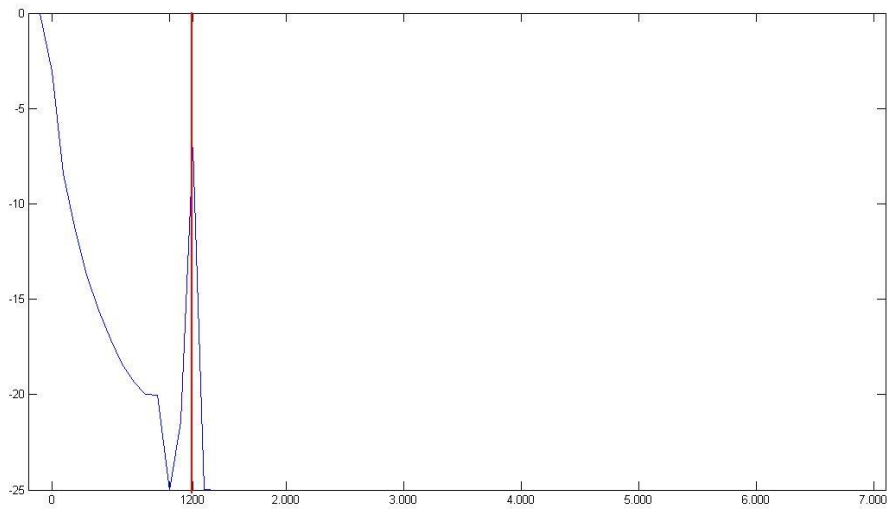
Παράδειγμα 3: Τομή διεπαφής

Παράδειγμα 4

Το παράδειγμα αυτό έχει ένα πηγάδι στη μέση του υδροφορέα, σε απόσταση 1200m από την ακτογραμμή και η μέγιστη άντληση που μπορεί να προσφέρει είναι $2686.13\text{m}^3/\text{d}$.



Παράδειγμα 4: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



Παράδειγμα 4: Τομή διεπαφής

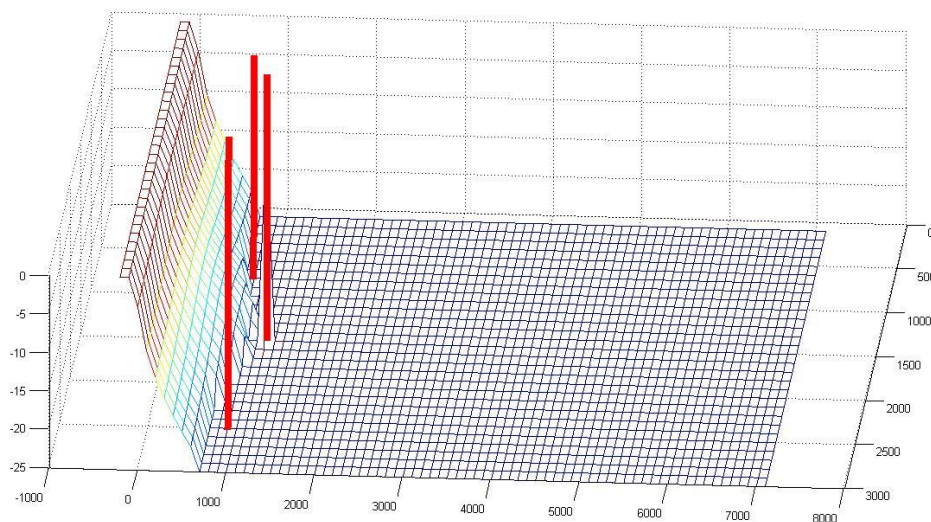
5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ

Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν παραδείγματα λειτουργίας της μεθόδου σε περιπτώσεις με πολλαπλά πηγάδια. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά πιο περίπλοκη, καθώς σε κάθε επανάληψη που εκτελεί το πρόγραμμα, θα πρέπει να εξετάζει τις συνθήκες κάθε πηγαδιού ξεχωριστά, αφού κανένα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα όρια. Το κατώτατο όριο του κάθε πηγαδιού είναι επίσης $lb=0$ αφού πρόκειται επίσης για άντληση, ενώ το ανώτατο είναι $ub=3000$, εφόσον έχουμε πολλαπλά πηγάδια. Οι αρχικές τιμές άντλησης (x_0) βοηθάνε το πρόγραμμα να βρει τα αποτελέσματα, αν είναι μεγαλύτερες σε πηγάδια μακριά από την ακτογραμμή και μικρότερες σε πηγάδια κοντά σε αυτή. Κάθε παράδειγμα θα ακολουθείται από την τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπαφής και στη συνέχεια προβάλλεται η κάθετη τομή στην ευθεία του κάθε πηγαδιού για την καλύτερη παρουσίαση του αποτελέσματος.

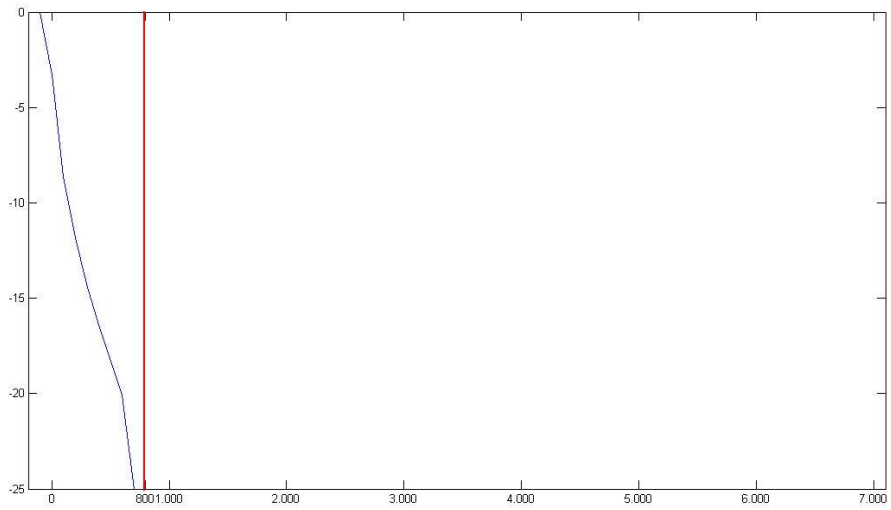
Παράδειγμα 5

Στο παράδειγμα αυτό υπάρχουν 3 πηγάδια. Οι θέσεις τους στον υδροφορέα, μαζί με τα αποτελέσματα της μεθόδου, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

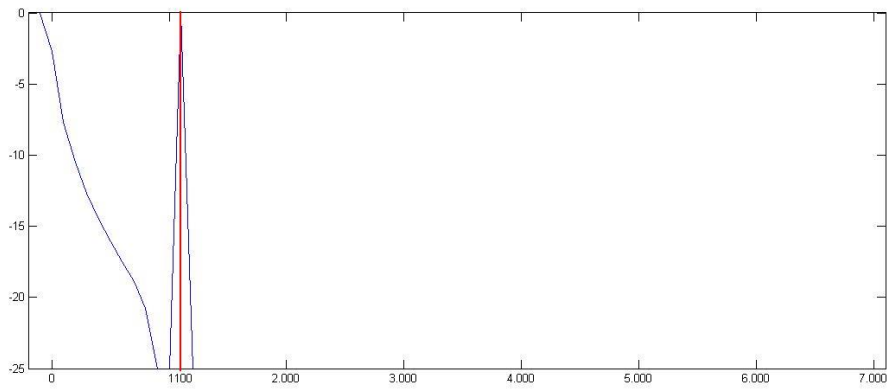
	X	ψ	Q
Πηγάδι 1	800m	800m	11.85m ³ /d
Πηγάδι 2	1100m	1500m	2991.81m ³ /d
Πηγάδι 3	900m	2500m	96.02m ³ /d



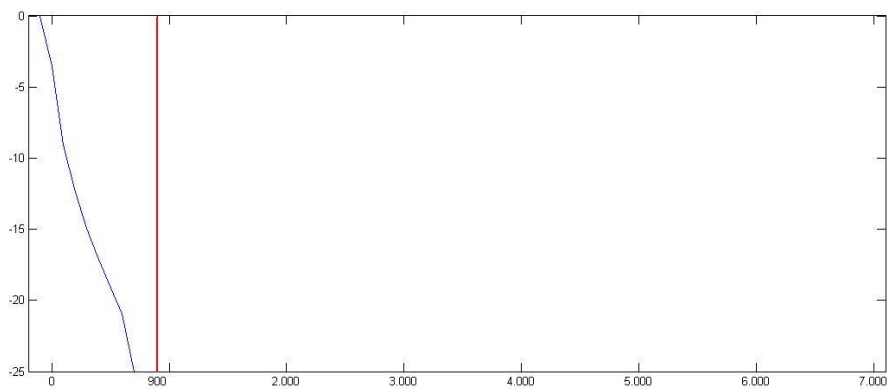
Παράδειγμα 5: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



Παράδειγμα 5: Τομή διεπαφής πηγαδιού 1



Παράδειγμα 5: Τομή διεπαφής πηγαδιού 2

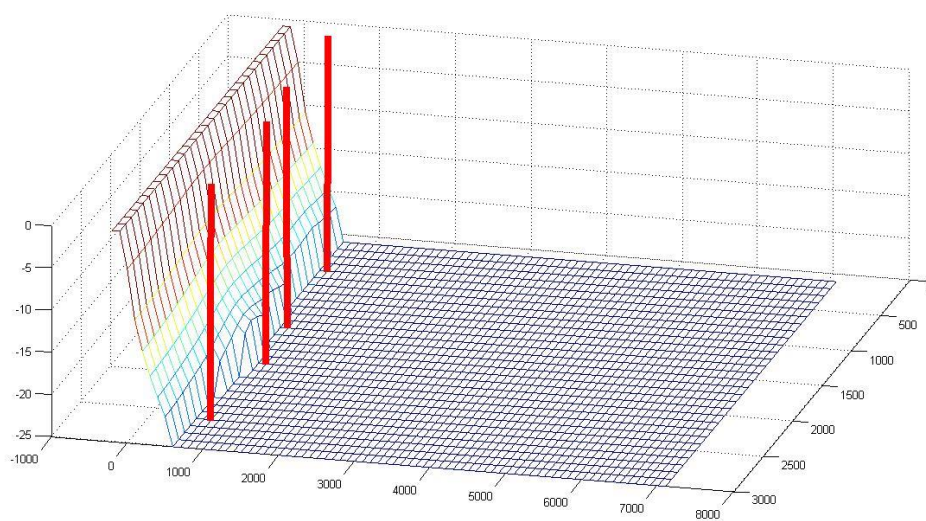


Παράδειγμα 5: Τομή διεπαφής πηγαδιού 3

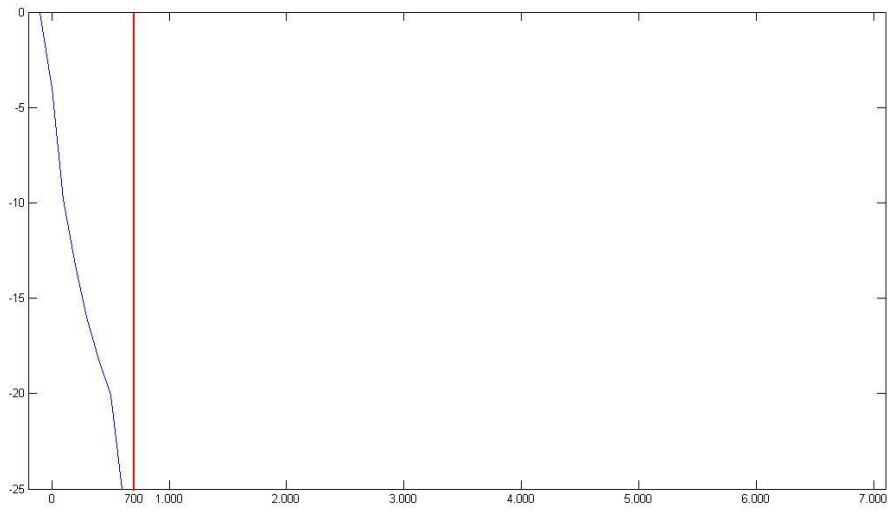
Παράδειγμα 6

Στο τελευταίο παράδειγμα, η βελτιστοποίηση εξετάζει 4 ξεχωριστά πηγάδια. Οι συντεταγμένες τους στον κάναβο, μαζί με τις μέγιστες αντλήσεις τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

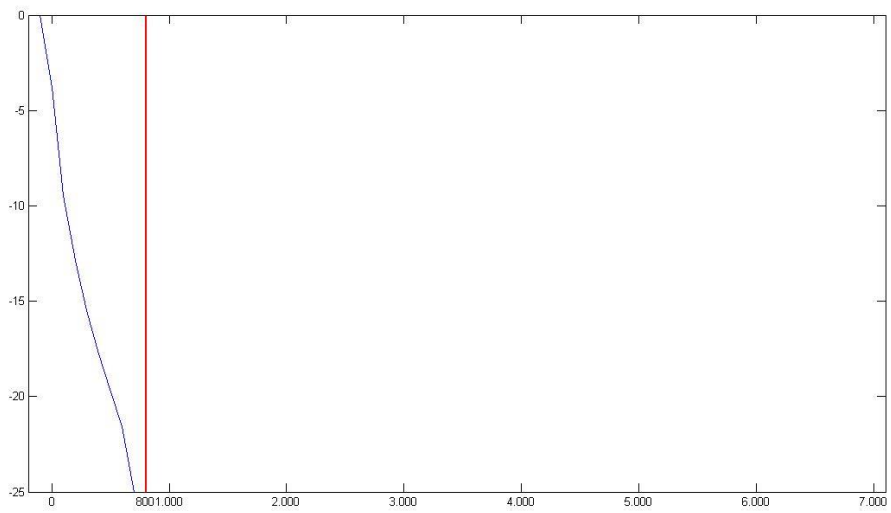
	X	Ψ	Q
Πηγάδι 1	700m	500m	463.38m ³ /d
Πηγάδι 2	800m	1300m	400.00m ³ /d
Πηγάδι 3	900m	1800m	1424.00m ³ /d
Πηγάδι 4	800m	2600m	199.99m ³ /d



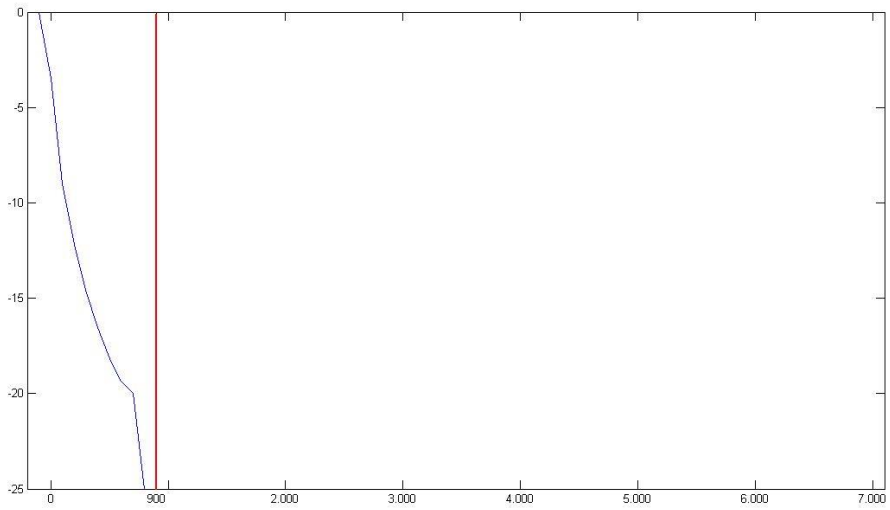
Παράδειγμα6: Τρισδιάστατη απεικόνιση διεπαφής



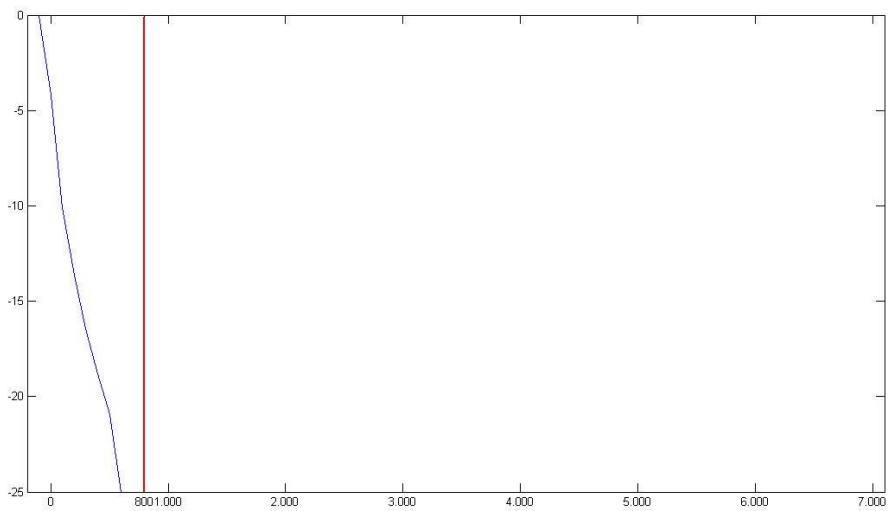
Παράδειγμα 6: Τομή διεπαφής πηγαδιού 1



Παράδειγμα 6: Τομή διεπαφής πηγαδιού 2



Παράδειγμα 6: Τομή διεπαφής πηγαδιού 3



Παράδειγμα 6: Τομή διεπαφής πηγαδιού 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία ανάλυση των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης της βελτιστοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας. Αρχικά θα αναφερθούν τα συμπεράσματα σε επίπεδο ενός πηγαδιού και στη συνέχεια σε επίπεδο πολλαπλών πηγαδιών. Τέλος θα γίνει η αναφορά των σημαντικότερων προβλημάτων που συναντήθηκαν κατά την μελέτη της εργασίας.

6.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ

Στα παραδείγματα 1 έως 4 του προηγούμενου κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης άντλησης προβλημάτων με ένα πηγάδι. Από την γραφική τους αναπαράσταση, φαίνεται πως το πόδι της διεπαφής, πλησιάζει τη θέση του πηγαδιού, που εμφανίζεται με κόκκινη γραμμή, και σταματάει 100m πριν από αυτή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πως το πηγάδι θα αντλεί πάντοτε γλυκό νερό. Όπως ήταν αναμενόμενο, ανάλογα με την θέση του πηγαδιού στον υδροφορέα, μεταβάλλεται και η μέγιστη άντληση που μπορεί να προσφερθεί. Τα πηγάδια που βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή, έχουν μικρότερο όριο σε σχέση με αυτά που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτή.

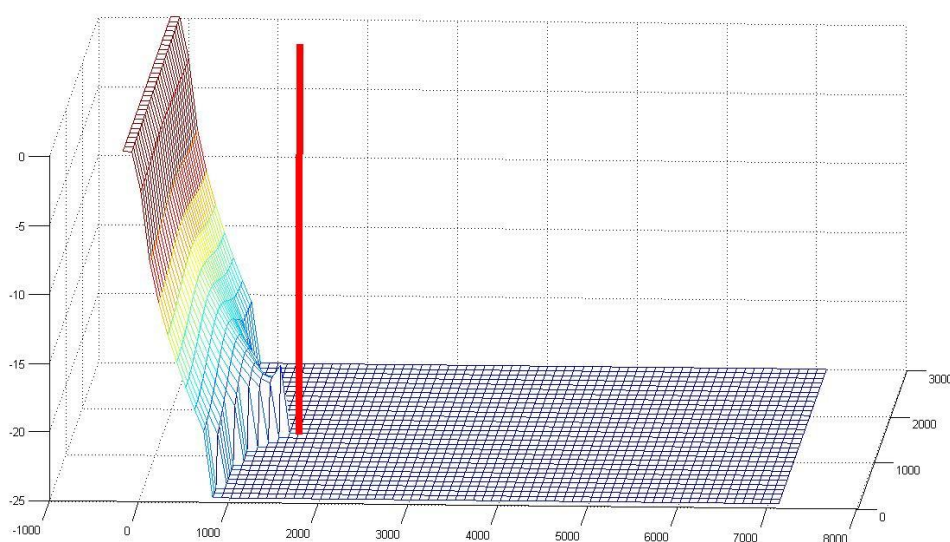
6.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ

Τα παραδείγματα 5 και 6 του προηγούμενου κεφαλαίου, είναι περιπτώσεις βελτιστοποίησης άντλησης από πολλαπλά πηγάδια. Όπως και στα προβλήματα του μονού πηγαδιού, έτσι και στα προβλήματα με πολλαπλά πηγάδια, το πρόγραμμα τερματίζει μόλις το πόδι της διεπαφής πλησιάζει στα 100m από τη θέση του κάθε πηγαδιού. Όπως είναι φυσικό, εφόσον η απόσταση του πηγαδιού από την ακτογραμμή επηρεάζει την μέγιστη άντληση, στην ταυτόχρονη χρήση τουλάχιστον δύο πηγαδιών, αυτό που βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτογραμμή μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ποσότητα νερού, σε σχέση με αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στη θάλασσα. Αυτό παρουσιάζεται και από τους πίνακες και τις γραφικές αναπαραστάσεις των παραδειγμάτων.

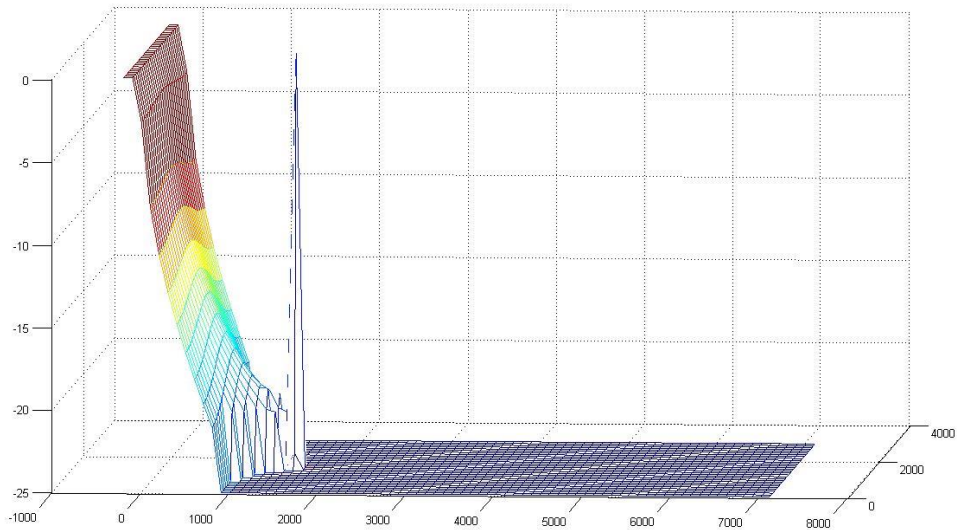
6.4 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΤΟ SWI

Η κυριότερη δυσκολία υπήρξε κατά την εκτέλεση του SWI, ήταν η αυστηρότητα της δομής των αρχείων παραμέτρων που χρειάζεται το πρόγραμμα για να εκτελεστεί. Η δυσκολία αυτή, σε συνδυασμό με το εγχειρίδιο του δημιουργού του, το οποίο είναι αρκετά συνοπτικό και έχει μερικά λάθη στα παραδείγματα που προσφέρει για την εκμάθησή του, κάνουν αρκετά χρονοβόρα την εκμάθηση του προγράμματος. Για το λόγο αυτό, εκτός από τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν για την αυτόματη διαμόρφωση των παραμέτρων, στο παράρτημα της εργασίας υπάρχουν όλα τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να έχει η επιλογή του χρόνου της προσομοίωσης καθώς και ο αριθμός των χρονικών βημάτων της. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα αποτελέσματα που παρουσίασε η βελτιστοποίηση παρουσίαζαν μία ιδιαιτερότητα. Η διεπαφή αλμυρού-γλυκού νερού, κανονικά θα πρέπει να είναι σταθερά φθίνουσα από την ακτογραμμή έως το πόδι της. Σε αυτές τις περιπτώσεις κοντά στη θέση του πηγαδιού άλλαζε φορά και ανάβαινε κάποια μέτρα σε ύψος πριν τελικά αρχίσει να φθίνει πάλι. Για την δεδομένη άντληση που παρουσίασε η βελτιστοποίηση, αν αυξηθεί ο χρόνος ή τα χρονικά βήματα, χωρίς να αλλάξει καμία άλλη παράμετρος, φαίνεται πως η διεπαφή ενώνεται με το ίδιο το πηγάδι με αποτέλεσμα να παραβιάζεται η αρχική συνθήκη του προβλήματος.



Απεικόνιση διεπαφής με χρόνο προσομοίωσης 10000



Απεικόνιση διεπαφής με χρόνο προσομίωσης 40000

Ένα άλλο θέμα που συναντήθηκε σε παραδείγματα με πολλαπλά πηγάδια, είναι να παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με την σειρά των πηγαδιών, ενώ ο υδροφορέας είναι απόλυτα συμμετρικός. Παρατηρήθηκαν μικρές διαφορές στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, αντιστρέφοντας τη σειρά τους κατά πλάτος του υδροφορέα όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

X	Y	Q
8	10	384
15	12	1323
24	11	815

X	Y	Q
7	11	832
16	12	1387
23	10	300

Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πιθανότατα ο τρόπος λειτουργίας της βελτιστοποίησης στα πολλαπλά πηγάδια, καθώς υπολογίζει αρχικά το πρώτο πηγάδι, μετά το πρώτο και το δεύτερο μαζί και συνεχίζει μέχρι να τα εξετάσει όλα ταυτόχρονα. Με αυτή τη μέθοδο ενδέχεται να βρίσκει διαφορές ανάλογα με την σειρά των πηγαδιών που εξετάζονται πρώτα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η αναφορά των συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας. Αρχικά θα αναλυθεί η λειτουργία του SWI και στη συνέχεια θα ακολουθήσουν τα πορίσματα της εκτέλεση της βελτιστοποίησης.

7.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ SWI

Όπως έχει προαναφερθεί, το αρχικό στάδιο της εργασίας, ήταν η διευκόλυνση της χρήσης του SWI προγράμματος. Με την χρήση των προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν, η εκτέλεση του προγράμματος γίνεται πολύ γρηγορότερη και ελαχιστοποιείται η πιθανότητα λάθους. Τα συνηθέστερα λάθη που παρουσιάζονται, οφείλονται είτε στην δομή των αρχείων παραμέτρων, που έχει πολύ αυστηρούς κανόνες, είτε σε σφάλμα κατά την καταχώρηση των τιμών. Το πρώτο είδος απαλείφεται, καθώς η δομή του κάθε αρχείου δημιουργείται αυτόματα, ενώ το δεύτερο περιορίζεται σημαντικά, καθώς είναι ξεκάθαρο στον χρήστη ποιες τιμές θα πρέπει να εισάγει στο εκάστοτε πρόγραμμα, οι οποίες καταχωρούνται μόνο μία φορά κατά την κλήση του.

7.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Το δεύτερο και τελευταίο στάδιο της εργασία, σχετίζεται με την εφαρμογή βελτιστοποίησης στο πρόγραμμα SWI. Όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, η επαναληπτική διαδικασία μπορεί να δουλέψει και να δώσει απαντήσεις, τόσο σε προβλήματα ενός πηγαδιού, όσο και σε προβλήματα πολλαπλών πηγαδιών. Η μέθοδος βέβαια παρουσιάζει κάποια προβλήματα σε ορισμένες εφαρμογές της, όπως την αντιστροφή της κλίσης της διεπαφής και τις διαφορές των αποτελεσμάτων αναλόγως της σειράς των πηγαδιών, τα οποία όμως δεν μπόρεσαν να αναλυθούν επαρκώς στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Νάνου Γιάνναρου Α. “Εισαγωγή στα υπόγεια νερά” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείου, Αθήνα 1999

Τερζίδης Γ.Α. “Εφαρμοσμένη Υδραυλική”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 1997.

Roach L. Amy. “Evaluation of a Dspressive Correvtion Factor for the Interface Solution Simulated with the SWI Package”. 2011

Bakker Mark. “Analytic Solutions for interface flow in combined, confined and semi confined coastal aquifer”. 2005

Bakker Mark – Frans Schaars. “How to become a Jedi Master in Modeling Sea Water Intrusion with Modflow” – SWI. 2010

Bakker Mark – Frans Schaars. “The Sea Water Intrusion (SWI) Package manual, Part I. Theory and examples”. 2005

Παπαντωνίου Μ. “Διαχείριση Παράκτιων υδροφορέων-Βελτιστοποίηση Αντλήσεων”, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών σπουδών, Αθήνα 2003

Σμυρής Ι “Προσομοίωση Υπόγειου Παράκτιου Υδροφορέα με τη Χρήση δύο Μοντέλων Προσομοίωσης” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων ΕΜΠ, Αθήνα 2013

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στη συνέχεια ακολουθεί η δομή όλων των αρχείων του συγκεκριμένου προβλήματος

Project.ba6

FREE

CONSTANT 1

999.990000

CONSTANT 0.05

Project.bc6

0 1.000000e+030 0 0.000000 0 0

00

CONSTANT 1

CONSTANT 2500

Project.dis

1 30 74 1 0 0

0

CONSTANT 100

CONSTANT 100

CONSTANT 0

CONSTANT -25

10000 200 1.000000 SS

Project.nam

GLOBAL 1 project.glo

LIST 2 project.lst

BAS6 3 project.ba6

BCF6 11 project.bc6

WEL 12 project.wel

RCH 18 project.rch

PCG 19 project.pcg

SWI 23 project.swi

OC 22 project.oc

DIS 10 project.dis

GHB 24 project.ghb

DATA(BINARY) 30 project.hds

DATA(BINARY) 51 project.bgt

DATA(BINARY) 52 project.zta

Project.pcg

50 25 1

0.000010 0.000010 1.000000 0 0.000000 3.000000 1.000000

Project.ghb

90 50

90

1 1 1 0.05 1000

1 1 2 0.05 1000

1 1 3 0.05 1000

1 2 1 0.05 1000

1 2 2 0.05 1000

1 2 3 0.05 1000

1 3 1 0.05 1000

1 3 2 0.05 1000

1 3 3 0.05 1000

1 4 1 0.05 1000

1 4 2 0.05 1000

1 4 3 0.05 1000

1 5 1 0.05 1000

1 5 2 0.05 1000

1 5 3 0.05 1000

1 6 1 0.05 1000

1 6 2 0.05 1000

1 6 3 0.05 1000

1 7 1 0.05 1000

1 7 2 0.05 1000

1 7 3 0.05 1000

1 8 1 0.05 1000

1 8 2 0.05 1000

1 8 3 0.05 1000

1 9 1 0.05 1000

1 9 2 0.05 1000

1 9 3 0.05 1000

1 10 1 0.05 1000

1 10 2 0.05 1000

1 10 3 0.05 1000

Συνεχίζεται έως το 1 30 3 0.05 1000.

1 19 74 123.00
1 20 74 123.00
1 21 74 123.00
1 22 74 123.00
1 23 74 123.00
1 24 74 123.00
1 25 74 123.00
1 26 74 123.00
1 27 74 123.00
1 28 74 123.00
1 29 74 123.00
1 30 74 123.00