

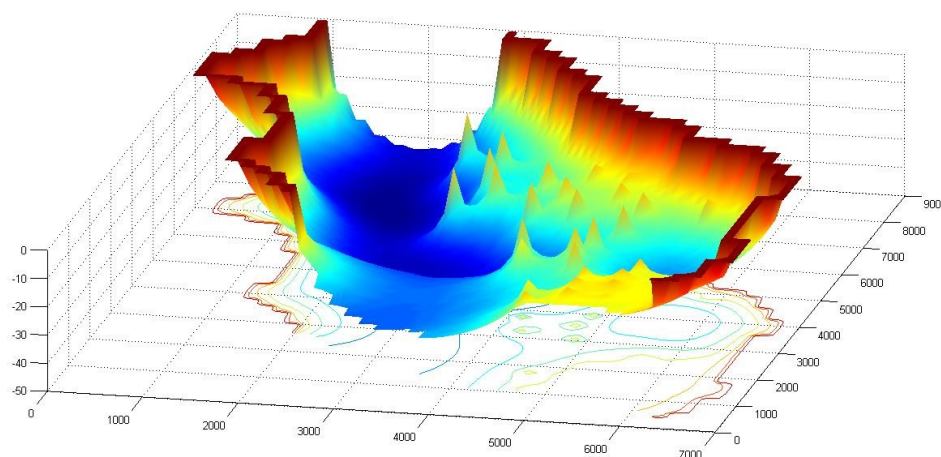


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Διερεύνηση των δυνατοτήτων άντλησης του παράκτιου υδροφορέα Βουρβούλου-Καμαρίου της Ν.Θήρας με χρήση μοντέλων προσομοίωσης»



Αλέξανδρος Μαντόγλου

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Καρατζάς

Επιτροπή εξέτασης: Γεώργιος Καρατζάς

Κωνσταντίνος Χρυσικόπουλος

Δόκου Ζωή

Χανιά, Ιανουάριος 2014

----- Όρια υδρολογικών λεκανών
— Υδρογραφικό δίκτυο

Εικόνα φόντου εξωφύλλου: Mantoglou A.F, Giannouloupoulos P., Υδρογραφικό δίκτυο Ν. Θήρας.

Εικόνα εξωφύλλου: Αλέξανδρος Μαντόγλου, Σχηματική αναπαράσταση της διείσδυσης του υφάλμυρου νερού στον υδροφορέα Βουρβούλου - Καμαρίου

Περιεχόμενα

Σύμβολα και συντμήσεις.....	6
Περίληψη.....	8
Abstract.....	10
1. Εισαγωγή.....	12
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	13
1.2 Δομή της Διπλωματικής εργασίας.....	13
2. Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων.....	16
2.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης	17
2.1.1 Περιγραφή του προβλήματος: Αναλυτικές λύσεις.....	21
2.2 Μοντέλα διεπιφάνειας (Sharp interface) και η λύση Ghyben-Herzberg.	21
2.3 Η περίπτωση της Ν. Θήρας.	24
2.4 Μέτρα ανάσχεσης και αντιμετώπισης.	26
3. Γενικά στοιχεία της Ν. Θήρας.....	29
3.1 Γεωγραφική θέση και χαρακτηριστικά της Νήσου	30
3.2 Ανθρωπογενή στοιχεία	32
3.2.1 Δημογραφικά – Πληθυσμιακά στοιχεία.....	32
3.2.2 Βιομηχανικές δραστηριότητες	33
3.3 Κλίμα	34
3.4 Υδρευτική κατάσταση	37
3.4.1 Ύδρευση δήμου Θήρας.	38
3.4.2 Διαμόρφωση πωλήσεων νερού.....	43
3.4.3 Μελλοντικά υδρευτικά έργα.....	44
4. Γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά Ν. Θήρας.....	45
4 Εισαγωγή	46
4.1 Γεωλογική δομή της περιοχής.....	47
4.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	49

5. Προσδιορισμός κατείσδυσης Ν. Θήρας με το μοντέλο ακόρεστης ροής CLASS U3M-1D	53
5.1 Το εργαλείο CLASS U3M-1D.....	54
5.2 Στάδια του προγράμματος	56
Α. Παράμετροι για τη διάκριση του εδαφικού προφίλ.	57
Β. Φυτοκάλυψη και παράμετροι κλίματος	59
Γ. Υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους.	60
Δ. Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με το χρονικό βήμα.	62
Ε. Παράμετροι κατανομής ριζοστρώματος και της εδαφικής εξάτμισης.	63
5.3 Εξαγόμενα του προγράμματος	65
6. Μοντέλο εκτίμησης μέγιστης αιεφόρου άντλησης – Βελτιστοποίηση αντλήσεων.	69
6 Μοντέλα Υφαλμύρισης Παράκτιων Υδροφορέων	70
6.1 Η μεθοδολογία του προγράμματος.	71
6.2 Προβλέψεις από προηγούμενες εφαρμογές του προγράμματος.....	74
7. Διερεύνηση σεναρίων άντλησης για περιορισμό της υφαλμύρισης	79
7.1 Αλλαγή του περιορισμού της ανύψωσης του υφάλμυρου νερού	80
7.1.1 Περιορισμός της ανύψωσης του υφάλμυρου νερού κοντά στην επιφάνεια του υδροφορέα.....	80
7.1.2 Αύξηση του περιορισμού του βάθους στις κεντρικές και μείωση του στις παράκτιες γεωτρήσεις.	90
7.2 Εφαρμογή διόρθωσης για νερό μικρότερης πυκνότητας... ..	103
7.3 Εφαρμογή διόρθωσης της πυκνότητας του θαλασσινού νερού για νερό μεγαλύτερης αλατότητας.	109
8. Συμπεράσματα και προτάσεις	115
8 Γενικά συμπεράσματα για τη διαχείριση των αντλήσεων της Ν.Θήρας	116

8.1 Συμπεράσματα από την προσομοίωση της κατείσδυσης με το μοντέλο ακόρεστης ροής CLASS U3M-1D.....	118
8.2 Συμπεράσματα από τις εφαρμογές του μοντέλου της μέγιστης αειφόρου άντλησης.	118
8.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	122
Βιβλιογραφία - Αναφορές	127

Σύμβολα και συντμήσεις

ΜΣΘ: μέση στάθμη θάλασσας

TSS: Ολικά αιωρούμενα στερεά

LAI: δείκτης επιφάνειας φυλλώματος

SQP: διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός

ΔΕΥΑΘ: δημοτική επιχείρηση ύδρευσης και αποχέτευσης Θήρας

h_f : ύψος φρεατικής επιφάνειας από την βάση του υδροφορέα

ρ_s : πυκνότητα θαλασσινού νερού

ρ_f : πυκνότητα γλυκού νερού

H_s : βάθος θαλασσινού νερού

d : βάθος του υδροφορέα

b : βάθος γλυκού νερού από την διεπιφάνεια την φρεατική επιφάνεια

ξ : βάθος γλυκού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας μέχρι την διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού.

Q_i : ρυθμός άντλησης νερού από γεώτρηση

N : επιφανειακή τροφοδοσία υδροφορέα

K : υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμένου εδαφικού υλικού υδροφορέα

K_a : υδραυλική αγωγιμότητα ακόρεστου εδαφικού υλικού υδροφορέα

T : μεταβιβαστικότητα

S : αποθηκευτικότητα

S_y : ειδική απόδοση

ψ : ύψος πίεσης

t : χρόνος

θ : βαθμός κορεσμού εδάφους

K_{Pan} : συντελεστής εξάτμισης από εξατμησίμετρο

M : αριθμός γεωτρήσεων (nwell)

α_T : συντελεστής εγκάρσιας διασποράς

Περίληψη

Η νήσος Θήρα έχει γνωρίσει τις τελευταίες δεκαετίες αλματώδη τουριστική ανάπτυξη. Σε αυτό έχει συντελέσει η μοναδικότητα του τοπίου λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας του παρελθόντος. Συνέπεια της ανάπτυξης αυτής, είναι η αύξηση της ζήτησης νερού κατά τη θερινή περίοδο κυρίως όπου ο πληθυσμός και οι επισκέπτες του νησιού αυξάνονται κατά πολύ.

Τα περιορισμένα υδατικά αποθέματα του νησιού σε συνδυασμό με τη μορφολογία των υπόγειων υδροφορέων και την άγνοια ως προς την διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων έχουν οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των υπογείων νερών και στην υποβάθμιση της ποιότητας των.

Για την απόκτηση μιας καλύτερης εικόνας σχετικά με την υδρολογική κατάσταση του νησιού, επιχειρείται ο υπολογισμός της κατείσδυσης στον υπόγειο υδροφορέα με χρήση του μοντέλου ακόρεστης ροής CLASS U3M-1D.

Στη συνέχεια, γίνεται εκτίμηση των μέγιστων δυνατοτήτων άντλησης του υδροφορέα σε διαφορετικά σενάρια άντλησης με χρήση μοντέλων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια προηγούμενων εργασιών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων του ΕΜΠ σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιεί τη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp Interface) και κάνει βελτιστοποίηση με την μέθοδο του διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού (SQP) για την εύρεση της μέγιστης δυνατότητας άντλησης υπό περιορισμούς που στόχο

έχουν την προστασία του υδροφορέα από υφαλμύριση. Κατόπιν εξετάζονται διάφορα σενάρια διαχείρισης με αυστηρότερους περιορισμούς οι οποίοι προστατεύουν καλύτερα τον υδροφορέα από πιθανή υφαλμύριση και καταλήγουν σε μειωμένες τιμές της άντλησης. Οι νέες αυτές προβλέψεις συγκρίνονται με τις προηγούμενες μελέτες του ΕΜΠ.

Τέλος, διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Abstract

In recent decades, the island of Santorini has experienced rapid development, mainly because of tourism growth. The uniqueness of the volcanic landscape has played a key role in this development. The fresh water demand has increased greatly, and it continues to increase, especially during summer months. This has led to overexploitation and deterioration of groundwater reserves. Therefore, there is need for better management of groundwater resources based on the aquifer characteristics.

In order to obtain a better representation of the island's hydrological regime, the deep infiltration into the aquifer of atmospheric precipitation is estimated using the unsaturated water movement model CLASS U3M-1D.

Then, the maximum pumping rates of the studied aquifer is estimated using a sharp interface model coupled with an optimization algorithm based on sequential quadratic programming method, (SQP). These models and the corresponding computational routines were originally developed in MATLAB at the Rural and Surveying Engineering Department of the National Technical University of Athens (NTUA). The aquifer model is based on the sharp interface assumption while the optimal pumping rates are obtained by an optimization method based on sequential quadratic programming (SQP). The constraints of the method limit the interface movement and protect the wells from seawater intrusion. Various scenarios with more conservative constraints are investigated here which improve protection of the aquifer from saltwater intrusion and result in reduced pumping

rates. The new predictions are compared to previous studies obtained at NTUA.

Finally, the conclusions drawn from the above research are presented and recommendations for further studies are proposed.

1. Εισαγωγή

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μία προσπάθεια διερεύνησης των δυνατοτήτων άντλησης του παράκτιου υδροφορέα Βουρβούλου – Καμαρίου της Ν. Θήρας. Στα πλαίσια αυτής επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός του υδατικού ισοζυγίου της εδαφικής ζώνης ώστε να εκτιμηθεί και η ποσότητα βροχής που καταλήγει στον υδροφορέα.

Οι εκτιμήσεις των αντλήσεων έγιναν με χρήση ενός μοντέλου που αναπτύχτηκε στη σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π το 2004. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε προσομοίωση και βελτιστοποίηση για τον υπολογισμό της βιώσιμης απόδοσης νησιωτικών υδροφορέων. Εξετάζονται διάφορα σενάρια διαχείρισης με αυστηρότερους περιορισμούς οι οποίοι προστατεύουν καλύτερα τον υδροφορέα από πιθανή υφαλμύριση. Οι νέες αυτές προβλέψεις συγκρίνονται με τις προηγούμενες μελέτες του ΕΜΠ.

1.2 Δομή της Διπλωματικής εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναπτύσσεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης σε παράκτιες περιοχές και εξετάζεται η διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων σε σχέση με αυτό το πρόβλημα. Αναλύονται τα αίτια και οι επιπτώσεις του προβλήματος καθώς και οι μηχανισμοί για την περιγραφή του. Τέλος γίνεται αναφορά σε ορισμένους έως τώρα διαθέσιμους τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου.

Στο τρίτο κεφάλαιο, επιχειρείται μια γενική περιγραφή της νήσου Θήρας, καθώς και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε αυτή. Γίνεται παράθεση στοιχείων αναφορικά με τη θέση, την οικονομική σημασία καθώς και σχετικά με τη μοναδικότητα σε σχέση με την ιστορική και φυσική κληρονομιά. Τέλος, παρουσιάζονται τα διαθέσιμα στοιχεία των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που έχουν σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων καθώς και ορισμένα στοιχεία σχετικά με την επίσημη ύδρευση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, καταγράφονται τα γεωλογικά και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του νησιού, ενώ παρατίθενται και σχετικοί χάρτες. Επίσης περιγράφεται ο υδροφορέας ενδιαφέροντος και τα χαρακτηριστικά του.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτίμηση της κατείσδυσης στον υδροφορέα. Με χρήση των διαθέσιμων κλιματικών και υδρολογικών στοιχείων της περιοχής, καθώς και με τη χρήση του εργαλείου μοντελοποίησης ακόρεστης ζώνης CLASS U3M-1D, εξάγεται το εκτιμώμενο ετήσιο ύψος του νερού που διηθείται ως τροφοδοσία στον υδροφορέα. Το μέγεθος αυτό είναι καθοριστικής σημασίας και χρησιμεύει στον υπολογισμό των δυνατοτήτων άντλησης του.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση του μοντέλου βελτιστοποίησης των αντλήσεων καθώς και του τρόπου λειτουργίας του. Επίσης γίνεται εκτέλεση του μοντέλου με συγκεκριμένες παραμέτρους που αργότερα θα χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς και σύγκρισης για τα σενάρια των περιορισμών που θα ακολουθήσουν.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των σεναρίων που επιλέχθηκαν να δοκιμαστούν, καθώς και του σκεπτικού για την επιλογή των, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για κάθε επιλογή καθώς και μία σύντομη ανάλυση αυτών.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα παραπάνω και εξάγονται συμπεράσματα από τα αποτελέσματα της εργασίας. Γίνεται μία επισκόπηση της μεθοδολογίας και των επιλογών που ενδεχομένως να επηρέασαν τα αποτελέσματα, ενώ παρουσιάζονται και προτάσεις για την βελτίωση αυτής και για την περαιτέρω μελέτη γύρω από το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα.

2. Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων

2.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης

Πολλές περιοχές στον κόσμο χρησιμοποιούν τα υπόγεια νερά ως κύρια πηγή για την υδροδότησή τους. Με τον παγκόσμιο πληθυσμό να αυξάνεται σε ανησυχητικό βαθμό, τα υδάτινα αποθέματα γλυκού νερού συνεχώς μειώνονται, αυξάνοντας την σημαντικότητα της παρακολούθησης και της διαχείρισης των υπογείων υδάτων. Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους που συχνά απαντώνται σε παράκτιους υδροφορείς είναι η εισχώρηση θαλασσινού νερού στους υδροφορείς που εντείνεται υπό την υπεράντληση των υπογείων υδάτων, το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων.

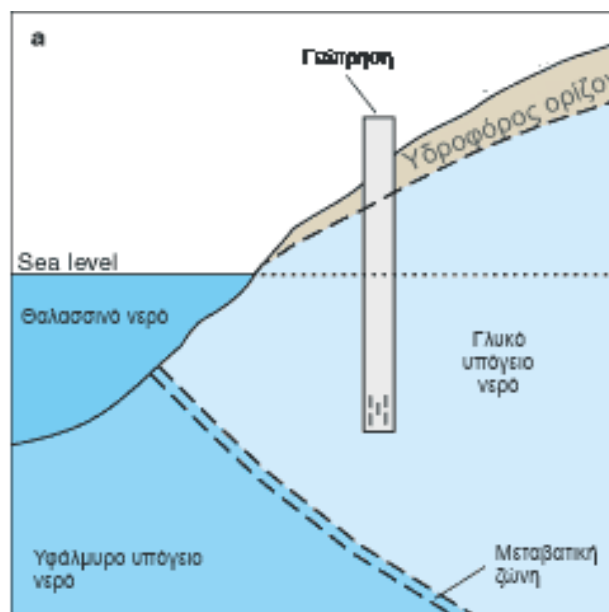
Σε περιοχές όπου το υπόγειο νερό αντλείται από υδροφορείς που είναι υδραυλικά συνδεδεμένοι με τη θάλασσα, η μεταβολή της υδραυλικής κλίσης μπορεί να οδηγήσει στην είσοδο του αλμυρού νερού από τη θάλασσα προς τα πηγάδια στη γη. Το κλειδί στον έλεγχο αυτού του προβλήματος είναι στην διατήρηση της σωστής ισορροπίας μεταξύ της ποσότητας του νερού που αντλείται από τον υδροφορέα και της ποσότητας του νερού που τον τροφοδοτεί.

Ο εντοπισμός και η περιγραφή της διεπιφάνειας γλυκού/αλμυρού νερού, η στενή παρακολούθηση της θέσης και της παρέκκλισης της (με άμεσες υδραυλικές και έμμεσες γεωφυσικές μελέτες πεδίου), η πρόβλεψη της χρήσης του νερού με μοντελοποίηση μέσω υπολογιστών, η υδραυλική τροποποίηση μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού ή/και της ενίσχυσης του φυσικού εμπλουτισμού είναι τα τέσσερα βασικά στοιχεία για αποδοτικά μέτρα αντιμετώπισης της υφαλμύρισης.

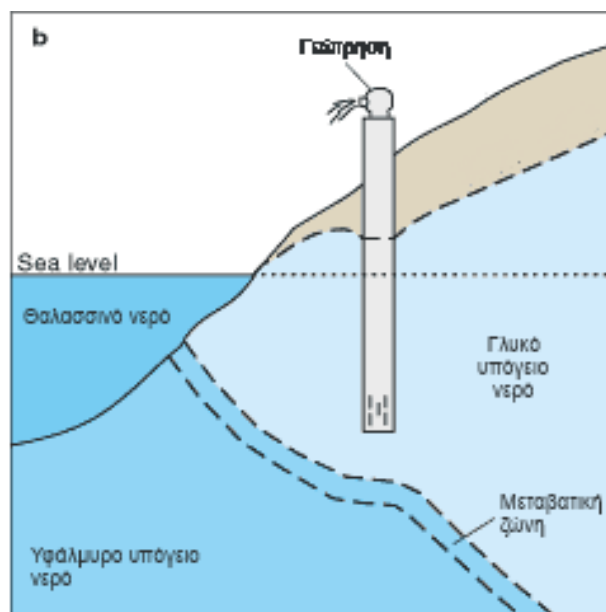
Η παγκόσμια αλλαγή του κλίματος και η επακόλουθη αύξηση της στάθμης της θάλασσας μπορούν να χειροτερεύσουν την κατάσταση και να οδηγήσουν σε ποιο έντονα φαινόμενα υφαλμύρισης. Ο βασικός σκοπός λοιπόν της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων και η αντίστοιχη νομοθεσία σε παράκτιες περιοχές πρέπει να προασπίσουν μία βιώσιμη κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη.

Το νερό είναι ένας από τους ποιο σημαντικούς φυσικούς πόρους σε ένα οικοσύστημα. Η υδρόσφαιρα στην επιφάνεια και κοντά στην επιφάνεια της γης είναι η βάση για όλα τα ζωντανά είδη σε αυτόν τον πλανήτη. Ωστόσο, η φαινομενική σχετική αφθονία του νερού διαθέσιμη προς τους ανθρώπους τους κάνει να ξεχνούν εύκολα πόσο σημαντικό και αναντικατάστατο είναι στη ζωή τους.

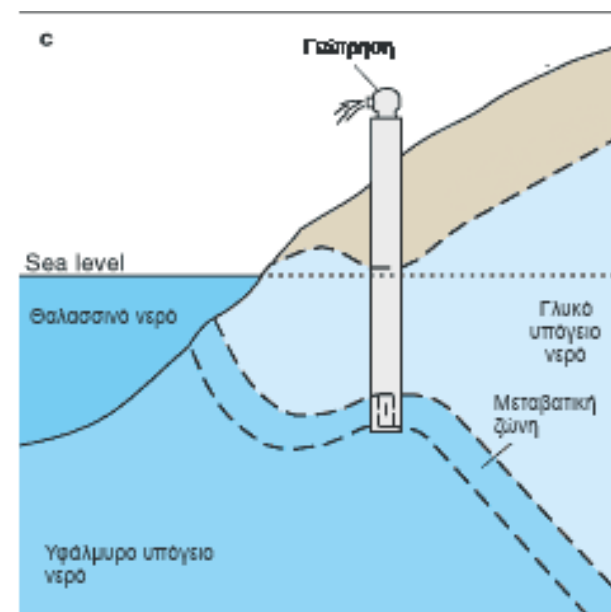
Στο επίγειο υδραυλικό σύστημα, όταν το γλυκό υπόγειο νερό εξάγεται με άντληση γεωτρήσεων σε μεγαλύτερο ρυθμό απ' ότι μπορεί να αναπληρωθεί, συμβαίνει πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής υδροστατικής πίεσης. Όταν αυτό συμβαίνει κοντά σε μια παράκτια περιοχή, αλμυρό θαλασσινό νερό εισέρχεται στον υδροφορέα (Εικόνα 1). Ως αποτέλεσμα τα αποθέματα γλυκού νερού επιμολύνονται με αλμυρό νερό, όπως συμβαίνει σε πολλές περιοχές όπως αυτές της ανατολικής ακτής και της ακτής του Κόλπου του Μεξικού στις Η.Π.Α καθώς και σε πολλές περιοχές της Μεσογείου και του Περσικού Κόλπου.



Γεώτρηση που δεν αντλεί σε ελεύθερα υδροφόρα σε κατάσταση ισορροπίας – δεν συμβαίνει εισχώρηση της υφαλμύρωσης.



Γεώτρηση που αντλεί σε ελεύθερα υδροφόρα – η υφαλμύρη αφήνα έχει εισχωρήσει χωρίς να επηρεάζει την αλυσότητα στη γεώτρηση.



Γεώτρηση που αντλεί σε ελεύθερα υδροφόρα – η υφαλμύρη αφήνα έχει εισχωρήσει επηρεάζοντας τα νερά της γεώτρησης.

Εικόνα 1

Η επίδραση των αντλήσεων στην εισχώρηση του μετώπου της υφαλμύρωσης.

Πηγή: US. GEOLOGICAL SURVEY Fact Sheet 057-00

Επεξεργασία -Μετάφραση: Αλέξανδρος Μαντόγλου

Αυτός είναι ο πιο συχνά κατανοητός ορισμός της υφαλμύρισης. Η υφαλμύριση, ορίζεται από τους Freeze & Cherry (1979) ως η είσοδος του αλμυρού νερού σε υδροφορείς γλυκού νερού υπό την επίδραση της εκμετάλλευσης των τελευταίων. Ο Atkinson (1986) περιγράφει τα προβλήματα της υφαλμύρισης για τις παράκτιες περιοχές των Η.Π.Α.

Προβλήματα υφαλμύρισης εμφανίζονται και σε επιφανειακά νερά σε παράκτια ποτάμια συστήματα, όπως επίσης και το αλμυρό νερό που απαντάται σε παράκτιους υδροβιότοπους. Αυτού του είδους η υφαλμύριση έχει σημαντικό αντίκτυπο στα οικοσυστήματα αυτών των περιοχών. Εδώ ωστόσο, θα γίνει εστίαση στα συστήματα των υπογείων υδάτων και στην υφαλμύριση παράκτιων υδροφορέων.

Η είσοδος και ανάμειξη του θαλασσινού νερού στα αποθέματα γλυκού νερού σε παράκτιους υδροφορείς, έχει γίνει αιτία ανησυχίας τον τελευταίο αιώνα αφού οι πληθυσμοί στις παράκτιες περιοχές έχουν αυξηθεί απότομα αυξάνοντας ταυτόχρονα και τις απαιτήσεις τους σε νερό. Η υφαλμύριση προξενεί πολλά οικολογικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά προβλήματα σε παράκτιες περιοχές. Αν και το αποτέλεσμα της υφαλμύρισης έχει αναγνωριστεί σχετικά πρόσφατα, το αντίκτυπο αυτού του προβλήματος θα μπορούσε να είναι πολύ σοβαρό στο μέλλον.

Ο περιορισμός των αποθεμάτων πόσιμου νερού θα μπορούσε να είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα ενός συστήματος υποστήριξης της ζωής. Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο για την αλατότητα όπως ορίστηκαν από την USEPA το 1962 δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή των 500 mg/l, (Atkinson, 1986). Το θαλασσινό νερό περιέχει περίπου 30000 mg/l, 60 φορές περισσότερο από τα όρια της USEPA για το πόσιμο νερό. Για το

λόγο αυτό ακόμα και μία μικρή ποσότητα θαλασσινού νερού μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όταν αναμειχτεί με αποθέματα γλυκού νερού.

Επίσης τα επίπεδα αλατότητας στο νερό άρδευσης μπορεί να είναι καθοριστικής σημασίας για τη γεωργία, μειώνοντας τις σοδιές και καταστρέφοντας τα φυτά με μικρές ανοχές στο αλάτι.

2.1.1 Περιγραφή του προβλήματος: Αναλυτικές λύσεις

Σε κάθε φυσική επιστήμη, μια αναλυτική λύση μπορεί συχνά να παρέχει μια απλή αλλά ξεκάθαρη περιγραφή του προβλήματος. Η ανάπτυξη αναλυτικών λύσεων δίνει επίσης μια ιστορική ματιά της προόδου σε διάφορους τομείς όπως στο πρόβλημα της υφαλμύρισης. Οι αναλυτικές λύσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως βάση σύγκρισης για τις αριθμητικές λύσεις. Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι οι μηχανικοί συχνά χρησιμοποιούν μια αναλυτική λύση ως εργαλείο για μια πρώτη εκτίμηση σε περιοχές όπου τα υδρογεωλογικά δεδομένα είναι περιορισμένα.

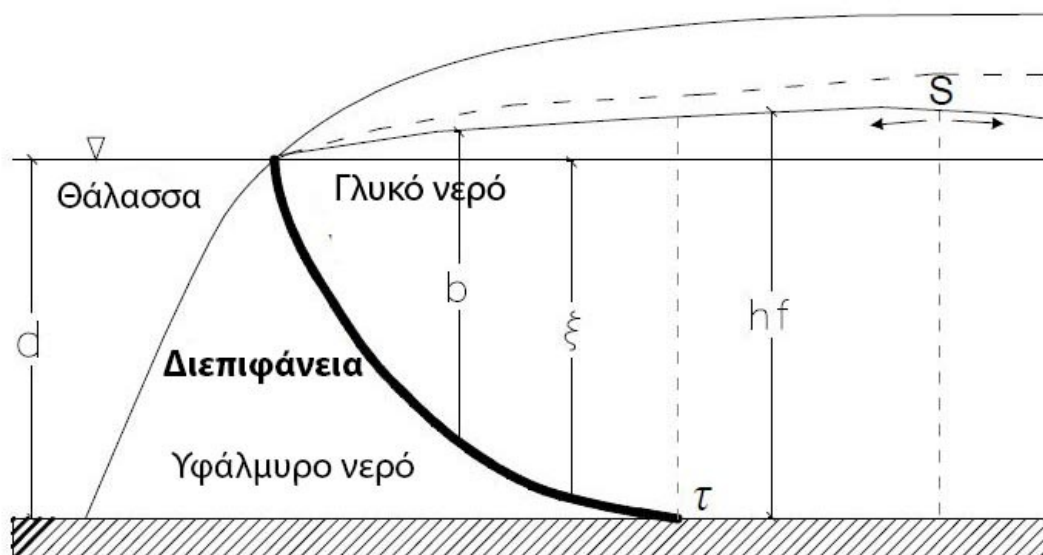
2.2 Μοντέλα διεπιφάνειας (Sharp interface) και η λύση Ghyben-Herzberg.

Η σχέση των Ghyben-Herzberg είναι το πρώτο και θεμελιώδες αναλυτικό μοντέλο για την περιγραφή του προβλήματος της υφαλμύρισης. Η σχέση των Ghyben-Herzberg λέει ότι κάτω από υδροστατικές συνθήκες, το βάρος μιας στήλης γλυκού νερού που

εκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα έως την σχηματιζόμενη διεπιφάνεια, ισορροπείται από μια αντίστοιχη στήλη θαλασσινού νερού που εκτείνεται από την επιφάνεια της θάλασσας ως το ίδιο βάθος όπου η στήλη του γλυκού νερού συναντά τη διεπιφάνεια. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως:

$$h_f - d = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \xi$$

Όπου το h_f είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην φρεατική επιφάνεια (υδροφόρος ορίζοντας) και της βάσης του υδροφορέα, ξ είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην επιφάνεια της θάλασσας και της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού σε ένα σημείο, ρ_s και ρ_f είναι οι πυκνότητες του αλμυρού και του γλυκού νερού αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 2) φαίνεται η δημιουργούμενη διεπιφάνεια ανάμεσα στο γλυκό και αλμυρό νερό.



Εικόνα 2

Η διεπιφάνεια στην εξίσωση Ghyben – Herzberg

Πηγή: Αριστοτέλης Μαντόγλου, 2003.

Επεξεργασία – Μετάφραση: Αλέξανδρος Μαντόγλου

Αυτή η ανάλυση υποθέτει υδροστατικές συνθήκες σε έναν ομογενή, ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα. Το πόσο βαθιά μπορεί να εισχωρήσει το θαλασσινό νερό μέσα στο χερσαίο κομμάτι εξαρτάται από την μείωση του υδραυλικού φορτίου. Αν η πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι 1.025 kg/m^3 και η πυκνότητα του γλυκού νερού είναι 1.000 kg/m^3 , σύμφωνα με την σχέση Ghyben-Herzberg, αν το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε έναν παράκτιο ελεύθερο υδροφορέα ελαττωθεί κατά 1m τότε η διεπιφάνεια με το αλμυρό νερό θα ανέλθει κατά 40m . Προφανώς, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πολύ μεγάλη απώλεια πόρων γλυκού νερού. Αυτή η τιμή μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή, εξαρτώμενη από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού.

Οι Badon Ghyben και A. Herzberg κατέληξαν ο καθένας ανεξάρτητα στην παραπάνω εξίσωση, πλέον γνωστή ως Ghyben-Herzberg, το 1888 και το 1901 αντίστοιχα. Είναι άξιο να επισημανθεί ότι ο Du Commun θα έπρεπε να θεωρηθεί ως πατέρας αυτής της σχέσης αφού την ανακάλυψε το 1828. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η σχέση Ghyben-Herzberg ισχύει εξίσου για υδροφορείς των οποίων το άνω όριο είναι φρεατική επιφάνεια, και για υδροφορείς των οποίων το άνω όριο είναι ένα οριζόντιο αδιαπέρατο στρώμα. Στην τελευταία περίπτωση το ξ συμβολίζει την πιεζομετρική στάθμη σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας.

Στην πράξη η σχέση Ghyben-Herzberg μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μία πρώτη εκτίμηση της θέσης της διεπιφάνειας. Η θεωρία Ghyben-Herzberg είναι μόνο η αρχή για πολλές απόπειρες να κατανοηθεί αναλυτικά το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Μετά την

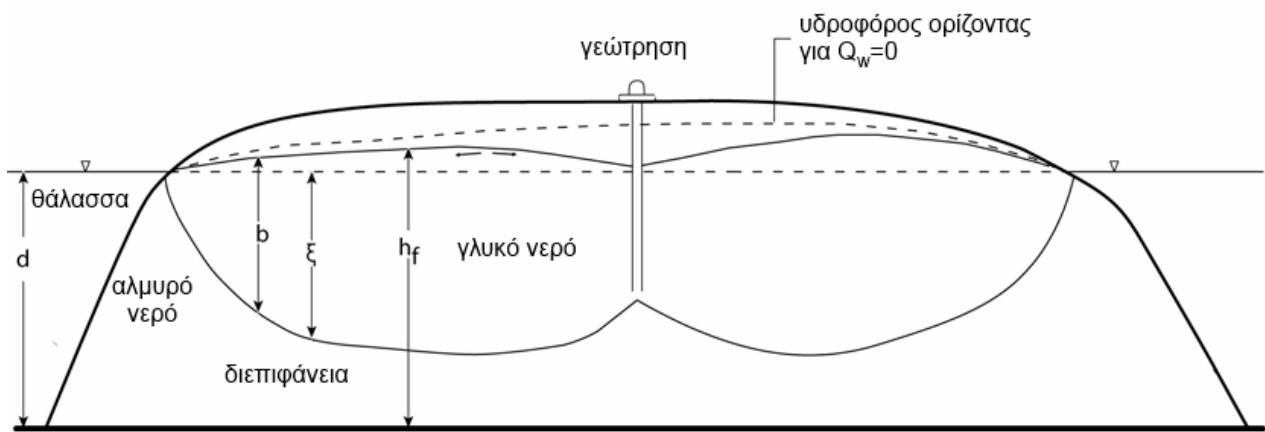
προσπάθεια που ξεκίνησε στο 19^ο αιώνα, οι ερευνητές δουλεύουν συνεχώς στο πρόβλημα. Ο Strack (1976) ανέπτυξε τη λύση του ενιαίου δυναμικού.

Ορισμένα πιο σύνθετα μοντέλα αναπτύχθηκαν για το χειρισμό των λύσεων της αναμίξιμης και μεταφοράς αλάτων (πχ Henry 1964). Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, αναπτύχθηκαν πιο σύνθετες τεχνικές αριθμητικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας αλγορίθμους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, όμως η περιγραφή αυτών δεν εμπίπτει στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

2.3 Η περίπτωση της Ν. Θήρας.

Στην περίπτωση της Ν. Θήρας, ο εξεταζόμενος υδροφορέας Βουρβούλου-Καμαρίου που είναι ο κεντρικός του νησιού, διαβρέχεται από την θάλασσα σε δύο πλευρές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όταν το βάθος του υδροφορέα d είναι μεγάλο σε σχέση με το πλάτος του, η διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού δεν συναντά τον πυθμένα του υδροφορέα. Όπως φαίνεται και στη σχηματική τομή παρακάτω (Εικόνα 3), ένας τέτοιος υδροφορέας αποτελείται από έναν φακό γλυκού νερού που ουσιαστικά επιπλέει πάνω σε υφάλμυρο νερό. Σε αυτές τις περιπτώσεις το αλμυρό νερό θεωρείται στάσιμο ενώ για το γλυκό νερό θεωρείται ότι κινείται οριζόντια με σταθερή ροή (Mantoglou and Giannouloroulos 2004). Η μεταβλητή d αντιπροσωπεύει το βάθος του υδροφορέα από τη βάση του ως την επιφάνεια της θάλασσας, b είναι το συνολικό βάθος του γλυκού νερού από την φρεατική επιφάνεια, ξ είναι το βάθος του γλυκού νερού από τη βάση του

υδροφορέα έως την γραμμή της επιφάνειας της θάλασσας και h_f είναι η πιεζομετρική στάθμη ως προς τη βάση του υδροφορέα. Η σχέση Ghyben – Herzberg συνδέει το πιεζομετρικό ύψος h_f με το βάθος ξ με τη σχέση: $h_f - d = \delta \xi$ όπου: $\delta = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f = 0.025$, ρ_s είναι πυκνότητα του θαλασσινού νερού ενώ ρ_f είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού.



Εικόνα 3

Ο σχηματιζόμενος φακός για περίπτωση υφαλμύρισης σε μικρό νησί.

Πηγή: Mantoglou A.F. and Giannouloropoulos P., 2004.

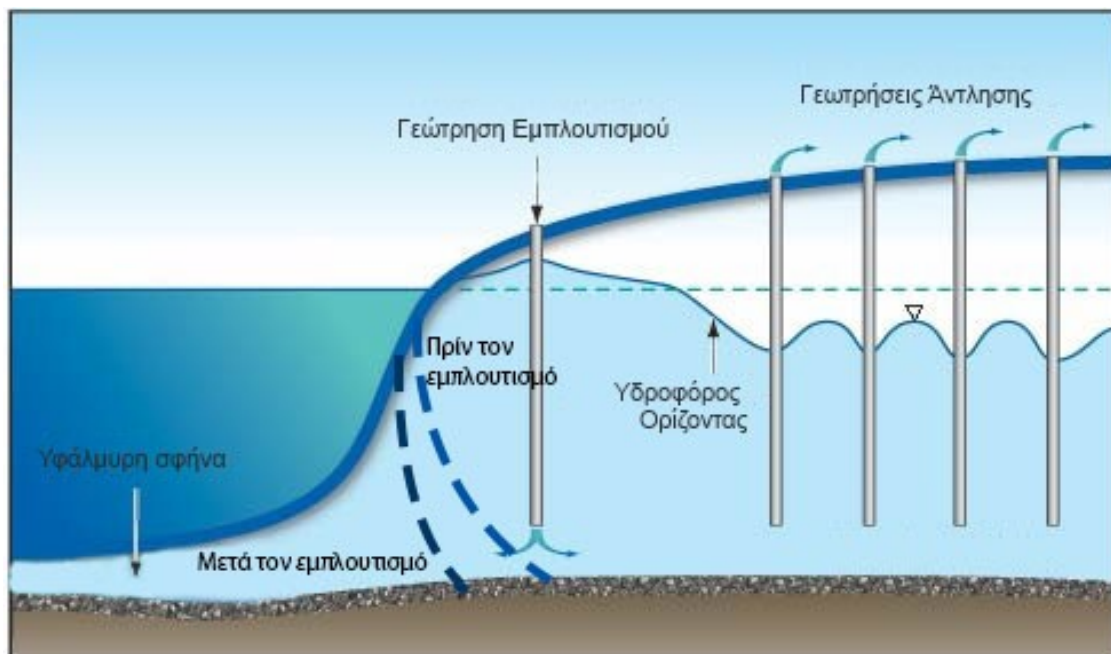
Επεξεργασία – Μετάφραση: Αλέξανδρος Μαντόγλου

2.4 Μέτρα ανάσχεσης και αντιμετώπισης.

Για την ανάσχεση της υπαλμύρισης συνήθως εφαρμόζονται διάφορα μέτρα αντιμετώπισης. Ο συνήθης σκοπός αυτών είναι η αύξηση της υπόγειας ροής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα και/ή η μείωση της ροής του αλμυρού νερού προς το γλυκό. Υπάρχει ένας αριθμός τέτοιων μεθόδων με τις οποίες είναι δυνατό να προληφθεί η ανάμιξη του γλυκού νερού με αλμυρό, που περιλαμβάνουν τα υπόγεια φράγματα και τον τεχνητό εμπλουτισμό. Τα υπόγεια φράγματα αποτελούν υπόγειες ημιπερατές ή αδιαπέρατες κατασκευές οι οποίες τοποθετούνται σε παράκτιους υδροφορείς. Τα φράγματα αυτά έχουν ως στόχο να εμποδίσουν την διείσδυση του θαλασσινού νερού προς τη στεριά ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν και την αποθηκευτική ικανότητα γλυκού νερού του υδροφορέα. Το κόστος μιας τέτοιας εφαρμογής εξαρτάται σημαντικά από το βάθος της εφαρμογής και κατά συνέπεια από το βάθος του ίδιου του υδροφορέα, το μήκος του τοιχίου και από την διαθεσιμότητα των υλικών από τα οποία πρόκειται να κατασκευαστεί.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός όπως περιγράφεται από τον Todd (1980) πρόκειται για την επαύξηση της φυσικής κίνησης του επιφανειακών υδάτων προς τα υπόγεια. Προς το παρόν είναι διαθέσιμες ορισμένες τεχνικές για την επίτευξη αυτού του σκοπού, όπως ο διασκορπισμός νερού και οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού (εικόνα 4). Η χρήση γεωτρήσεων διπλής λειτουργίας ενδείκνυται οικονομικά σε σχέση με την κατασκευή ειδικών γεωτρήσεων άντλησης. Ο βασικός σκοπός των γεωτρήσεων άντλησης είναι να ξεπεραστεί το πρόβλημα του υψηλού κόστους του επιφανειακού διασκορπισμού νερού σε περιοχές όπου αυτό δεν είναι εύκολα

εφικτό. Μια άλλη ενδιαφέρουσα τεχνική αποτελεί και η κατασκευή μικρών επιφανειακών φραγμάτων για την μείωση της επιφανειακής απορροής. Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει την αύξηση του ρυθμού της κατείσδυσης με μικρό κόστος. Πρόκειται για φράγματα απλής τεχνολογίας που μπορούν να κατασκευαστούν από υλικά συνήθως διαθέσιμα στο τοπικό περιβάλλον (εικόνα 5,6). Η χωροθέτηση αυτών γίνεται σε ρέματα με σκοπό τη μείωση της ταχύτητας απορροής και κατά συνέπεια την αύξηση της κατείσδυσης.



Εικόνα 4

Η υποχώρηση της υφάλμυρης σφήνας σε ένα σενάριο εντατικού εμπλουτισμού.

Πηγή: Solinst, (www.solinst.com)

Επεξεργασία – Μετάφραση: Αλέξανδρος Μαντόγλου



Εικόνα 5

Φράγματα για την αύξηση της διήθησης στην Νοτιοανατολική Τυνησία.

Πηγή: Gabriels D., Ouessar M., 2010.



Εικόνα 6

Τα φράγματα κατακράτησης περιορίζουν την επιφανειακή απορροή και αυξάνουν τη διήθηση.

Πηγή: Gabriels D., Ouessar M., 2010.

3. Γενικά στοιχεία της Ν. Θήρας

3.1 Γεωγραφική Θέση και χαρακτηριστικά της Νήσου

Η Θήρα βρίσκεται στο νότιο άκρο του νομού Κυκλάδων έχει έκταση 75.7 km² και πληθυσμό 15550 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Είναι ημιορεινή με ψηλότερη κορυφή τον Πρ. Ηλία (565m) στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Η Θήρα μαζί με τη Θηρασία και το Ασπρονήσι αποτελούν υπολείμματα του προϊστορικού, μεγαλύτερου, νησιού με το όνομα Στρογγύλη -από το τότε σχήμα του- και είναι διατεταγμένα σε σχήμα δακτυλίου γύρω από μια βαθιά ωοειδή λεκάνη που σχηματίστηκε από την καταβύθιση του κέντρου της Στρογγύλης λόγω μεγάλης ηφαιστειακής έκρηξης και όπου εισέρευσε η θάλασσα. Η Θήρα αποτελεί τόπο ιδιαίτερης ιστορικής και αρχαιολογικής σημασίας με φυσικό κάλλος μοναδικό σε παγκόσμια κλίμακα.

Η Θήρα είναι ουσιαστικά ότι απέμεινε μετά από μία σφοδρή ηφαιστειακή έκρηξη η οποία κατέστρεψε τον πρώιμο εγκατεστημένο πολιτισμό στο τότε ένα νησί και δημιούργησε την παρούσα γεωλογική καλδέρα. Στο κέντρο του νησιού σχηματίστηκε μια μεγάλη τετραγωνική εσωτερική θάλασσα με διαστάσεις περίπου 12 επί 7 km, η οποία περιβάλλεται από απόκρημνες πλαγιές ύψους 300m στις τρεις πλευρές. Το κύριο νησί κλίνει προς τα κάτω και σταδιακά βυθίζεται στο αιγαίο. Στην τέταρτη πλευρά, η εσωτερική θάλασσα χωρίζεται από το αιγαίο από ένα άλλο πολύ μικρότερο νησί ονομαζόμενο Θηρασία. Η εσωτερική θάλασσα ενώνεται με το υπόλοιπο πέλαγος σε δύο περιοχές, βορειοδυτικά και νοτιοδυτικά. Τα βάθος της καλδέρας που φτάνει τα 400 m, καθιστά δυνατό σε οποιουδήποτε μεγέθους πλοίο να αγκυροβολήσει στον προστατευμένο κόλπο, υπάρχει επίσης πρόσφατα κατασκευασμένη μαρίνα στη περιοχή Βλυχάδα στην

νοτιοδυτική ακτή. Ο κύριος λιμένας του νησιού βρίσκεται στον Αθηνιό. Η πρωτεύουσα, Φηρά, βρίσκεται στην κορυφή της απόκρημνης πλαγιάς βλέποντας κάτω προς την εσωτερική θάλασσα. Τα ηφαιστειακά πετρώματα παρόντα από τις πρώιμες εκρήξεις συμπεριλαμβάνουν τον ολιβίνη και περιέχουν μικρές ποσότητες κεροστίλβη.

Είναι το ποιο ενεργό ηφαιστειακό κέντρο στο ηφαιστειακό τόξο του νοτίου αιγαίου, αν και αυτό που απομένει πλέον είναι μία μερικώς βυθισμένη καλδέρα. Το ηφαιστειακό τόξο είναι περίπου 500 km σε μήκος και περίπου 20 με 40 km σε πλάτος. Η περιοχή πρωτοπαρουσίασε ηφαιστειακή δραστηριότητα περίπου 3 - 4 εκατομμύρια χρόνια πριν, αν και η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Θήρα άρχισε πριν περίπου 2 εκατομμύρια χρόνια, με την εξώθηση δακτιτικής λάβας από οπές γύρω από το Ακρωτήριο.

Το νησί είναι ο τόπος μίας από των μεγαλύτερων ηφαιστειακών εκρήξεων καταγεγραμμένων στην ιστορία: της Μινωικής έκρηξης, η οποία συνέβη πριν 3600 χρόνια στην ακμή του μινωικού πολιτισμού. Η έκρηξη άφησε πίσω μία μεγάλη καλδέρα περιτριγυρισμένη από ηφαιστειακή τέφρα εκατοντάδων μέτρων βάθους και μπορεί να είχε οδηγήσει έμμεσα στην κατάρρευση του Μινωικού πολιτισμού στη νήσο Κρήτη, 110 km νότια, με τη δημιουργία μεγάλου τσουνάμι. Μία άλλη δημοφιλής θεωρία λέει ότι η έκρηξη της Θήρας είναι η πηγή του θρύλου της Ατλαντίδος.

3.2 Ανθρωπογενή στοιχεία

3.2.1 Δημογραφικά – Πληθυσμιακά στοιχεία

Ο μόνιμος πληθυσμός του νησιού παρατίθεται στον πίνακα 1 κατά δημοτική ενότητα όπως καταγράφηκε στην απογραφή του 2011.

Πίνακας 1

Δ.Ε. Θήρας	Πληθυσμός 2011	Κοιν. Οίας	Πληθυσμός 2011
Δ.Κ. Θήρας	1857	Δ.Κ. Θηρασίας	319
Δ.Κ. Ακρωτηρίου	489	Δ.Κ. Οίας	1226
Δ.Κ. Βόθωνος	756		
Δ.Κ. Βουρβούλου	535		
Δ.Κ. Εμπορείου	3085		
Δ.Κ. Έξω Γωνιάς	395		
Δ.Κ. Επισκοπής Γωνιάς	1462		
Δ.Κ. Ημεροβιγλίου	535		
Δ.Κ. Καρτεράδου	1293		
Δ.Κ. Πύργου Καλλίστης	912		
Δ.Κ. Μεσαριάς	2092		
Δ.Κ. Μεγαλοχωρίου	594		
ΣΥΝΟΛΟ	14005	ΣΥΝΟΛΟ	1545

3.2.2 Βιομηχανικές δραστηριότητες

Γενικά, στα νησιά του Αιγαίου δεν παρατηρείται έντονη βιομηχανική δραστηριότητα, λόγω διαφόρων δυσκολιών.

Στην νήσο Θήρα έχουν καταγραφεί 19 βιομηχανίες, οι οποίες ανήκουν στις κατηγορίες:

- Οινοποιείο
- Ποτοποιείο
- Παραγωγή Ασβέστου
- Παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος
- Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος

Στη νήσο Θήρα, το ποσό ύδατος που καταναλώνεται από τη βιομηχανία ανέρχεται στα **16.480m³ ετησίως** και κατανέμεται γεωγραφικά ως εξής:

- Δήμος Θήρας = 14.280 m³ (18 μονάδες),
- Κοινότητα Οίας = 2.200 m³ (1 μονάδα).

Ο Δήμος Θήρας παρουσιάζει την εντονότερη δραστηριότητα, ιδιαίτερα στους εξής κλάδους:

- Οινοποιεία, με συνολική ετήσια κατανάλωση νερού 6.480 m³
- Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος, με συνολική ετήσια κατανάλωση νερού 3.500 m³

- Παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος, με συνολική ετήσια κατανάλωση νερού 3.000 m³

Οι καταναλώσεις ανά παραγωγικό κλάδο, στο σύνολο της νήσου Θήρας, παρουσιάζονται στον πίνακα 2 που ακολουθεί.

Πίνακας 2

Παραγωγικός Κλάδος	Νερό σε m ³ /έτος
Ποτά	
Οινοποιεία	6.480
Ποτοποιεία	1.000
Δομικά Υλικά	
Παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος	3.000
Παραγωγή Ασβέστου	2.500
Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος	
Παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος	3.500

3.3 Κλίμα

Το κλίμα του νησιού είναι δροσερό λόγω των βορειοανατολικών ανέμων και ο χειμώνας είναι ήπιος με μέση θερμοκρασία 10°C. Οι βροχές είναι συχνές το χειμώνα και σχεδόν ανύπαρκτες το καλοκαίρι. Το έδαφος είναι εύφορο και ευνοεί την καλλιέργεια των

αμπελιών και της ντομάτας. Το νησί είναι σχεδόν άνυδρο με ελάχιστα πηγαία νερά.

Τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο ο καιρός χαρακτηρίζεται από ζεστές μέρες με σύνηθες απρόβλεπτες αλλαγές της θερμοκρασίας. Οι μήνες Ιούνιος και Σεπτέμβριος, χαρακτηρίζονται κυρίως από ηλιόλουστες μέρες με μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες. Οι καλοκαιρινοί μήνες Ιούλιος και Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες του έτους με ξηρό κλίμα και συχνά ψυχρό αέρα τα βράδια. Σε αυτούς τους μήνες παρουσιάζονται και τα γνωστά μελτέμια του Αιγαίου Πελάγους, τα οποία ξεκινούν απότομα και μπορεί να διαρκέσουν πολλές μέρες. Τέλος, οι μήνες Οκτώβριος και Φεβρουάριος χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες με λογικές ποσότητες βροχόπτωσης.

Μήνες	Διακύμανση θερμοκρασίας (°C)
Δεκέμβριος – Ιανουάριος - Φεβρουάριος - Μάρτιος	8 - 15
Νοέμβριος – Απρίλιος - Μάιος	16 - 22
Ιούνιος – Ιούλιος - Αύγουστος	23 - 30

Το κλίμα της Σαντορίνης παρουσιάζει ιδιομορφίες - παρόλο ότι είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων είναι και το ψυχρότερο - που οφείλονται στο ότι (Γιούργα, 1991):

- Υπάρχει πολύ δροσιά κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι τις πρωινές κυρίως ώρες και ομίχλη το βράδυ.

- Το έδαφος είναι λευκού χρώματος και ως εκ τούτου έχει αφενός αυξημένη ακτινοβολία και αφετέρου περιορισμένη απορρόφηση ηλιακής θερμότητας.
- Υπάρχει υψηλή μέση σχετική υγρασία.
- Η ένταση των ανέμων – σε σύγκριση με τα άλλα Κυκλαδωνήσια – είναι μεγαλύτερη.
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία του νησιού είναι μικρότερη των υπολοίπων νησιών των Κυκλάδων.
- Οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες

Σύμφωνα με τη Δρόσου (2005) εφαρμόζοντας τη μέθοδο Emburger-Sauvage για τον καθορισμό του βιοκλιματικού τύπου της κάθε περιοχής βρίσκεται ότι η Σαντορίνη ανήκει στον ημίξηρο βιοκλιματικό τύπο με χειμώνα θερμό (Δρόσου, 2005). Επίσης, εφαρμόζοντας την μέθοδο de Philippis και Bagnoulis βρίσκεται πως ο χαρακτήρας του μεσογειακού κλίματος της Θήρας είναι ο Ξηρο-θερμομεσογειακός (Δρόσου, 2005).

3.4 Υδρευτική κατάσταση

Ο Δήμος Θήρας προς το παρόν υδρεύεται από υπόγεια νερά μέσω γεωτρήσεων και από μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης. Σύμφωνα με την Κοινοπραξία Υδατοσυστημάτων Αιγαίου οι ανάγκες του Δήμου Θήρας καλύπτονται σε ποσοστό 60% από τα δίκτυα της ΔΕΥΑ Θήρας και κατά 40% από υδροπωλητές. Η Κοινότητα της Οίας καλύπτει τις ανάγκες της αξιοποιώντας τη μέθοδο της αφαλάτωσης. Το νερό από την μονάδα φτάνει να καλύψει ολόκληρη την περιοχή, ακόμα και σε φάση αιχμής. Η Θηρασία υδρεύεται με μεταφορά νερού μέσω πλοίων από το Λαύριο. Το πρόγραμμα υδροδότησης της Θηρασίας, εντάχθηκε σε ευρύτερο πρόγραμμα του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (πλέον Υ.ΠΕ.Κ.Α) για την υδροδότηση μικρών νησιών. Στα αρχεία της ΔΕΥΑΘ υπάρχει μελέτη με τίτλο: «Υδρογεωλογική – Υδρολογική Μελέτη Νήσου Σαντορίνης» η οποία αναλύει την κατάσταση των υδατικών πόρων του νησιού και προβαίνει σε προτάσεις. Οι προτάσεις επιγραμματικά είναι οι ακόλουθες:

- Δίκτυο ελέγχου υπόγειου υδροφορέα
- Μονάδες αφαλάτωσης
- Λιμνοδεξαμενές
- Λεκάνες διήθησης ή φρεάτια κατείσδυσης, σε κατάλληλες θέσεις των λεκανών απορροής (εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα)
- Αξιοποίηση εκροών βιολογικών καθαρισμών μετά από κατάλληλη επεξεργασία

3.4.1 Ύδρευση δήμου Θήρας.

Ο Δήμος Θήρας προς το παρόν υδρεύεται από υπόγεια νερά μέσω γεωτρήσεων και από νέες μονάδες αφαλάτωσης.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Φηρών** υδρεύεται από 9 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή 70m^3 στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης στη θέση Κατοικίες δυναμικότητας $55\text{m}^3/\text{h}$. Από το αντλιοστάσιο αυτό τροφοδοτείται, με την βοήθεια ενδιάμεσου αντλιοστασίου, στη θέση Ψαράδικα, η κεντρική δεξαμενή χωρητικότητας 600m^3 . Οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Φηρών κυμαίνονται από $350\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $1250\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι. Επιπλέον, στο Δημοτικό διαμέρισμα Φηρών στη θέση Έξω Γιαλός, λειτουργεί μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αντίστροφης όσμωσης δυναμικότητας $2000\text{ m}^3/\text{d}$.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Καρτεράδου** υδρεύεται από 6 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή 40m^3 στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας $35\text{m}^3/\text{h}$. Από το αντλιοστάσιο αυτό τροφοδοτείται διπλή δεξαμενή συνολικής χωρητικότητας 550m^3 . Το ένα μέρος της δεξαμενής τροφοδοτεί τον Καρτεράδο με βαρυτικό αγωγό και το άλλο μέρος με πιεστικό συγκρότημα. Οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Καρτεράδου κυμαίνονται από $200\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $840\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Βουρβούλου** υδρεύεται από 3 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή χωρητικότητας 60m^3 στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας $12\text{m}^3/\text{h}$. Από το κεντρικό αντλιοστάσιο το

νερό οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 100m^3 η οποία υδρεύει τον Κάτω Βουρβούλο και από εκεί με αντλητικό συγκρότημα σε δεξαμενή χωρητικότητας 100m^3 που τροφοδοτεί των Άνω Βουρβούλο. Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Βουρβούλου κυμαίνονται από $100\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $270\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Βόθωνα και Μεσσαριάς** υδρεύονται από κοινού από 5 υδρογεωτρήσεις. Το νερό συλλέγεται σε κοινή δεξαμενή χωρητικότητας 600m^3 μέσω ενδιάμεσου αντλιοστασίου δυναμικότητας $35\text{m}^3/\text{h}$ στο οποίο υπάρχει και δεξαμενή χωρητικότητας 50m^3 . Η κεντρική δεξαμενή βρίσκεται στον Βόθωνα και αποτελεί σταθμό μεταφόρτωσης νερού με υδροφόρες για περιοχές στις οποίες δεν μπορούμε να καλύψουμε προς το παρόν διαφορετικά τις ανάγκες τους.

Συνολικά οι καταναλώσεις στα Δ.Δ. Βόθωνα και Μεσσαριάς κυμαίνονται από $200\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $580\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Ακρωτηρίου** υδρεύεται αποκλειστικά με μεταφορά νερού με υδροφόρες από την κεντρική δεξαμενή Βόθωνα – Μεσσαριάς στην κεντρική δεξαμενή του Ακρωτηρίου χωρητικότητας 500m^3 . Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ.Δ.

Ακρωτηρίου κυμαίνονται από $50\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $110\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Μεγαλοχωρίου** υδρεύεται με μεταφορά νερού με υδροφόρες από την κεντρική δεξαμενή Βόθωνα – Μεσσαριάς στην κεντρική δεξαμενή του Μεγαλοχωρίου χωρητικότητας 1200m^3 . Η δεξαμενή του Μεγαλοχωρίου λειτουργεί

και ως ομβροσυλλέκτης ο οποίος καλύπτει τις ανάγκες του χωριού τους χειμερινούς μήνες. Οι καταναλώσεις του Δ.Δ. Μεγαλοχωρίου κυμαίνονται από $40\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $100\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Εμπορείου** υδρεύεται από 2 γεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή χωρητικότητας 25m^3 στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας $16\text{m}^3/\text{h}$. Από το αντλιοστάσιο το νερό οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 50m^3 . Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Εμπορείου κυμαίνονται από $150\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $350\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Στο Εμπορείο είναι προς εκτέλεση το έργο επισκευής υπάρχουσας δεξαμενής χωρητικότητας 400m^3 , αντικατάσταση κεντρικού καταθλιπτικού αγωγού από το κεντρικό αντλιοστάσιο προς την δεξαμενή υδροδότησης του Δ.Δ. Εμπορείου, αντικατάσταση καταθλιπτικών αγωγών γεωτρήσεων και ενεργοποίηση νέας γεώτρησης με προσθήκη νέου τμήματος αγωγού. Το έργο θα καλύψει τις υπάρχουσες ανάγκες υδροδότησης του Δ.Δ. Εμπορείου αλλά και θα εξαλείψει τα προβλήματα από συνεχείς βλάβες και διαρροές στο υπάρχον δίκτυο.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Έξω Γωνιάς** υδρεύεται με μια γεώτρηση η οποία οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 100m^3 στο κεντρικό αντλιοστάσιο και από εκεί με αντλητικό συγκρότημα δυναμικότητας $14\text{m}^3/\text{h}$ στην κεντρική δεξαμενή ύδρευσης χωρητικότητας 60m^3 . Υπάρχει δυνατότητα σε περίπτωση ανάγκης το χωρίο να υδρευθεί και από την γεώτρηση η οποία λειτουργεί για τις ανάγκες της Μέσα Γωνιάς, οικισμού του Δ.Δ. Επισκοπής Γωνιάς. Παράλληλα πλησίον στην κεντρική δεξαμενή ύδρευσης

υπάρχει υπόσκαφη παλιά ομβροδεξαμενή χωρητικότητας 400m^3 για την οποία εξετάζεται η επισκευή της. Το έργο αυτό θα εξυπηρετήσει στην αποθήκευση μεγαλύτερου όγκου νερού και στην περίπτωση επικοινωνίας με την δεξαμενή της Μέσα Γωνιάς θα ενισχυθεί τόσο ο οικισμός της Μέσα Γωνιάς αλλά και το κεντρικό δίκτυο ύδρευσης Καμαρίου με το οποίο επικοινωνεί η δεξαμενή της Μέσα Γωνιάς. Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Έξω Γωνιάς κυμαίνονται από $60\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $120\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Το **Δημοτικό Διαμέρισμα Επισκοπής Γωνιάς** υδρεύεται συνολικά από 10 υδρογεωτρήσεις. Εκ των οποίων οι 7 γεωτρήσεις τροφοδοτούν την κεντρική δεξαμενή ύδρευσης Καμαρίου χωρητικότητας 600m^3 και η οποία επικοινωνεί βαρυτικά με δεύτερη δεξαμενή με την επωνυμία "Χριστοφόρα" χωρητικότητας 500m^3 η οποία ενισχύεται με άλλες δυο γεωτρήσεις. Για την κάλυψη των αναγκών τμημάτων δικτύων σε υψηλότερο σημείο από τις δεξαμενές λειτουργεί πιεστικό συγκρότημα με δεξαμενή 12m^3 που τροφοδοτείται από την δεξαμενή "Χριστοφόρας". Τέλος όπως αναφέρθηκε και στην ανωτέρω παράγραφο για τις ανάγκες ύδρευσης του οικισμού Μέσα Γωνιάς λειτουργεί μια γεώτρηση η οποία στέλνει το παραγόμενο νερό στην κεντρική δεξαμενή Μέσα Γωνιάς, θέση Ταξιάρχης, χωρητικότητας 150m^3 .

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ.Δ. Επισκοπής Γωνιάς κυμαίνονται από $450\text{m}^3/\text{day}$ ως ελάχιστο τον χειμώνα και $1960\text{m}^3/\text{day}$ ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Στο παρακάτω πίνακα 3 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις που έχουν καταγραφεί ανά τετράμηνο σε κάθε Δημοτικό Διαμέρισμα για το 2006 μετά από τις καταμετρήσεις των υδρομέτρων.

Πίνακας 3

α/α	Δημοτικό διαμέρισμα	Α' Τετράμηνο (m ³)	Β' Τετράμηνο (m ³)	Γ' Τετράμηνο (m ³)	Σύνολο έτους (m ³)
1	Ακρωτηρίου	2.848	3.493	3.909	10.250
2	Βόθωνα	6.787	12.208	10.161	29.156
3	Βουρβούλου	5.148	9.185	8.899	23.232
4	Έξω Γωνιάς	4.771	7.127	5.498	17.396
5	Εμπορείου	9.906	13.598	14.900	38.404
6	Ημεροβιγλίου	Δεν υπάρχουν δεδομένα	Δεν υπάρχουν δεδομένα	Δεν υπάρχουν δεδομένα	-
7	Επισκοπή Γωνιάς	46.070	155.993	81.029	283.092
8	Καρτεράδου	14.625	27.635	26.061	68.321
9	Μεγαλοχωρίου	1.261	2.896	3.588	7.745
10	Μεσσαριάς	13.653	21.620	20.935	56.208
11	Πύργου Καλλίστης	Δεν υπάρχουν δεδομένα	Δεν υπάρχουν δεδομένα	Δεν υπάρχουν δεδομένα	-
12	Φηρών	29.984	86.021	58.240	174.245
Συνολικά ετήσια κυβικά (m ³) :					708.049

Πηγή: ΔΕΥΑΘ

Η μονάδα αφαλάτωσης της Οίας είναι δυναμικότητας 900 m³/h. Η αιχμή παρουσιάζει τιμή που κυμαίνεται γύρω στα 950 m³/h. Για την κάλυψη αυτής της διαφοράς αλλά και για εφεδρεία, υπάρχουν δεξαμενές, χωρητικότητας 2500 m³.

3.4.2 Διαμόρφωση πωλήσεων νερού.

Η πώληση του νερού, σύμφωνα με τα τιμολόγια που έχουν εκδοθεί, έχει παρουσιάσει σταδιακή αύξηση από το έτος 1995. Η τιμή πώλησης του νερού λόγω του υψηλού κόστους αφαλάτωσης είναι υψηλή. Η τιμή παραγωγής ανέρχεται σε 1,5 € και η τιμή πώλησης σε 3,6 € περίπου το κυβικό μέτρο. Στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 4) παρουσιάζονται τα στοιχεία για τις πωλήσεις νερού μεταξύ των ετών 1995 – 2005.

Πίνακας 4

Έτος	Όγκος πωλήσεων (m ³)	Ποσοστό αύξησης (%)
1995	23.773	
1996	32.000	34,6
1997	45.000	40,6
1998	53.000	17,7
1999	63.387	19,5
2000	73.000	17,1
2001	87.234	19,5
2002	113.510	23,1
2003	115.236	1,5
2004	116.900	1,4
2005	136.524	14,4

Πηγή: ΔΕΥΑΘ

3.4.3 Μελλοντικά υδρευτικά έργα.

Για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών του Δήμου Θήρας σε πόσιμο νερό η ΔΕΥΑΘ κινείται στην χωροθέτηση μονάδων αφαλάτωσης σε τρία σημεία του νησιού και συγκεκριμένα κατά την Κοινοπραξία Υδατοσυστημάτων Αιγαίου:

1) Για την μελλοντική κάλυψη των αναγκών των Δημοτικών Διαμερισμάτων Επισκοπής Γωνιάς, Έξω Γωνιάς, Μεσσαριάς και Βόθωνα προβλέπεται η χωροθέτηση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού δυναμικότητας 5.000m³ ανά ημέρα στην θέση αεροδρόμιο.

2) Για την μελλοντική κάλυψη των αναγκών του Δημοτικού Διαμερίσματος Εμπορείου και λοιπά Δημοτικά Διαμερίσματα προβλέπεται η χωροθέτηση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού δυναμικότητας 5.000m³ ανά ημέρα σε περιοχή κοντά στην ΜΕΛ Εμπορείου.

Για την εξοικονόμηση νερού στην Κοινότητα της Οίας, είχε πραγματοποιηθεί μελέτη για πρόταση επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων υδάτων από τους βιολογικούς καθαρισμούς για άρδευση, η οποία όμως απορρίφθηκε ως μη πρωτοποριακή. Η Κοινότητα σχεδίασε να προχωρήσει σε νέα μελέτη, όπου για την αξιοποίηση των επεξεργασμένων εκροών του βιολογικού καθαρισμού προς άρδευση, να χρησιμοποιούνται οι παλαιωμένες μεμβράνες της μονάδας αφαλάτωσης, οι οποίες προορίζονται για απόρριψη μετά την αντικατάστασή τους.

4. Γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά Ν. Θήρας

4 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν οι βασικές πτυχές του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος όπως η γεωλογική και η υδροστρωματογραφική δομή, το είδος του υδροφόρου μέσου (πορώδες ή ρωγμώδες) φυσικοχημικές διεργασίες, υδραυλικές ιδιότητες καθώς και οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι η κατανομή και διαμόρφωση των υδροφόρων σχηματισμών καθώς και των αδιαπέρατων ή ημιπερατών σχηματισμών που παρεμβάλλονται ή τους πλαισιώνουν. Ανάλογου ενδιαφέροντος είναι επίσης και το πάχος των επιμέρους σχηματισμών καθώς και η συνέχεια στη λιθολογική και γεωλογική τους διάρθρωση.

Τα υδρολογικά χαρακτηριστικά σε γενικές γραμμές περιλαμβάνουν, την ανάπτυξη και οριοθέτηση των υδροφόρων σχηματισμών της Νήσου, τις ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν ή ελέγχουν την κίνηση του υπόγειου νερού, την εκτίμηση αξόνων ροής και τροφοδοσίας καθώς και την περιγραφή των υδραυλικών και φυσικών ορίων του υδροφορέα.

Τα στοιχεία που αφορούν αυτό το κεφάλαιο συλλέχθηκαν από τον Δρ. Υδρογεωλογίας Γιαννουλόπουλο Π.

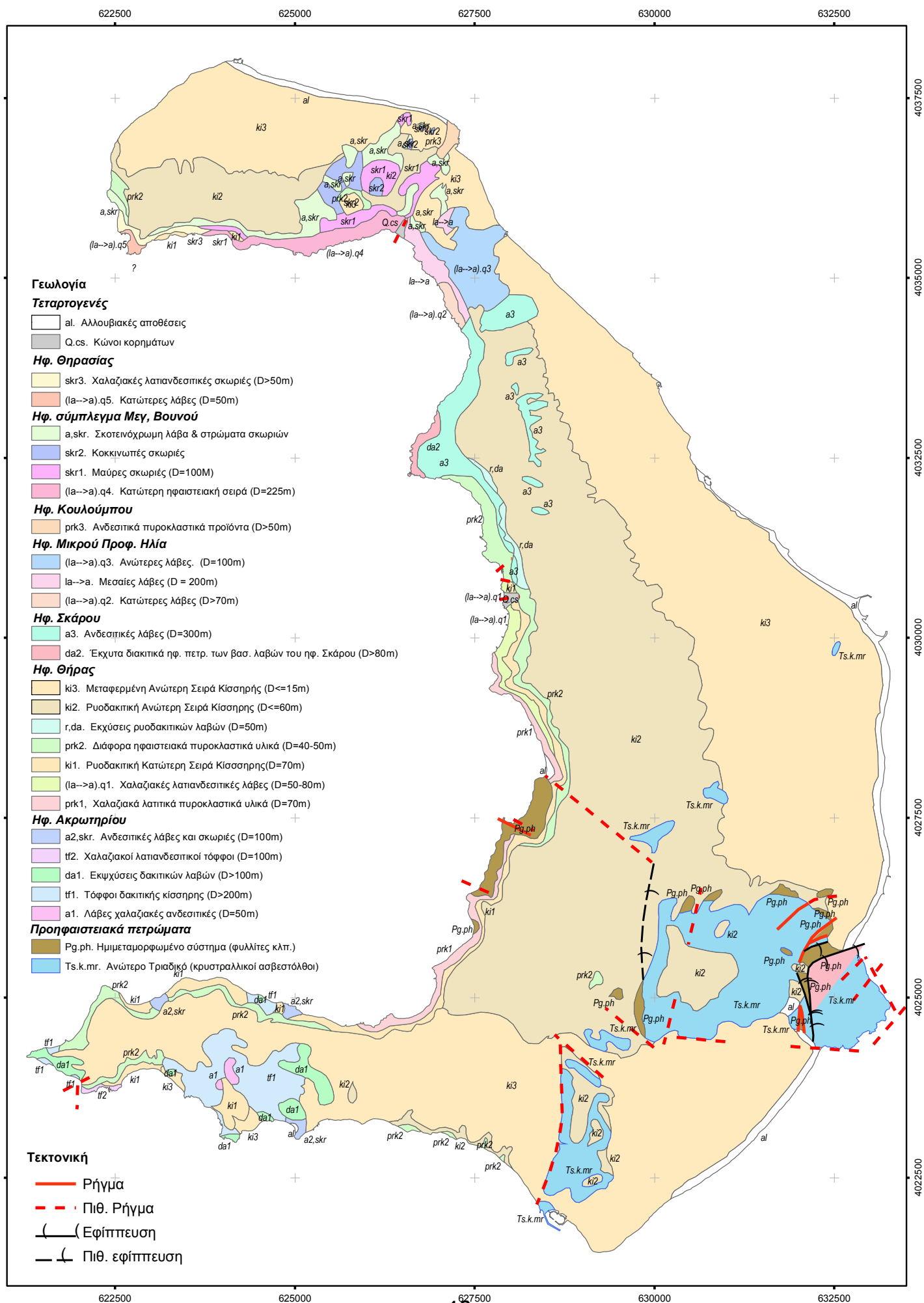
4.1 Γεωλογική δομή της περιοχής.

Η γεωλογική διάρθρωση της νήσου αποτυπώνεται λεπτομερώς στο σχετικό γεωλογικό χάρτη (βλ. χάρτης 1) έκδοσης ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50.000 επεξεργασμένος από τον Γιαννουλόπουλο Π.

Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει ότι η γεωλογική δομή του νησιού αποτελείται ως επί το πλείστον από διάφορα ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία ταξινομούνται ανάλογα με τα αντίστοιχα κέντρα ηφαιστειακής δραστηριότητας. Υπάρχει ποικιλία ηφαιστειακών πετρωμάτων τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά στο χάρτη 1.

Στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού εμφανίζεται επιφανειακά το προηφαιστειακό μεταμορφωμένο υπόβαθρο του νησιού στο οποίο διακρίνονται δύο διαφορετικοί λιθολογικοί σχηματισμοί, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι του Αν. Τριαδικού και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των φυλλιτών. Οι φυλλίτες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά μεταφλύσχη και περιέχουν ενστρώσεις ελαφρά μεταμορφωμένου γραουβάκη, κροκαλοπαγών και φακούς κρυσταλλικών ασβεστολίθων και πρασινοσχιστολίθων.

Τα γεωλογικά στοιχεία παραχωρήθηκαν από τον Δρ. Υδρογεωλογίας Γιαννουλόπουλο Π.



Χάρτης 1 Γεωλογικός Χάρτης Ν. Θήρας

Παραχώρηση: Giannouloropoulos P.

4.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

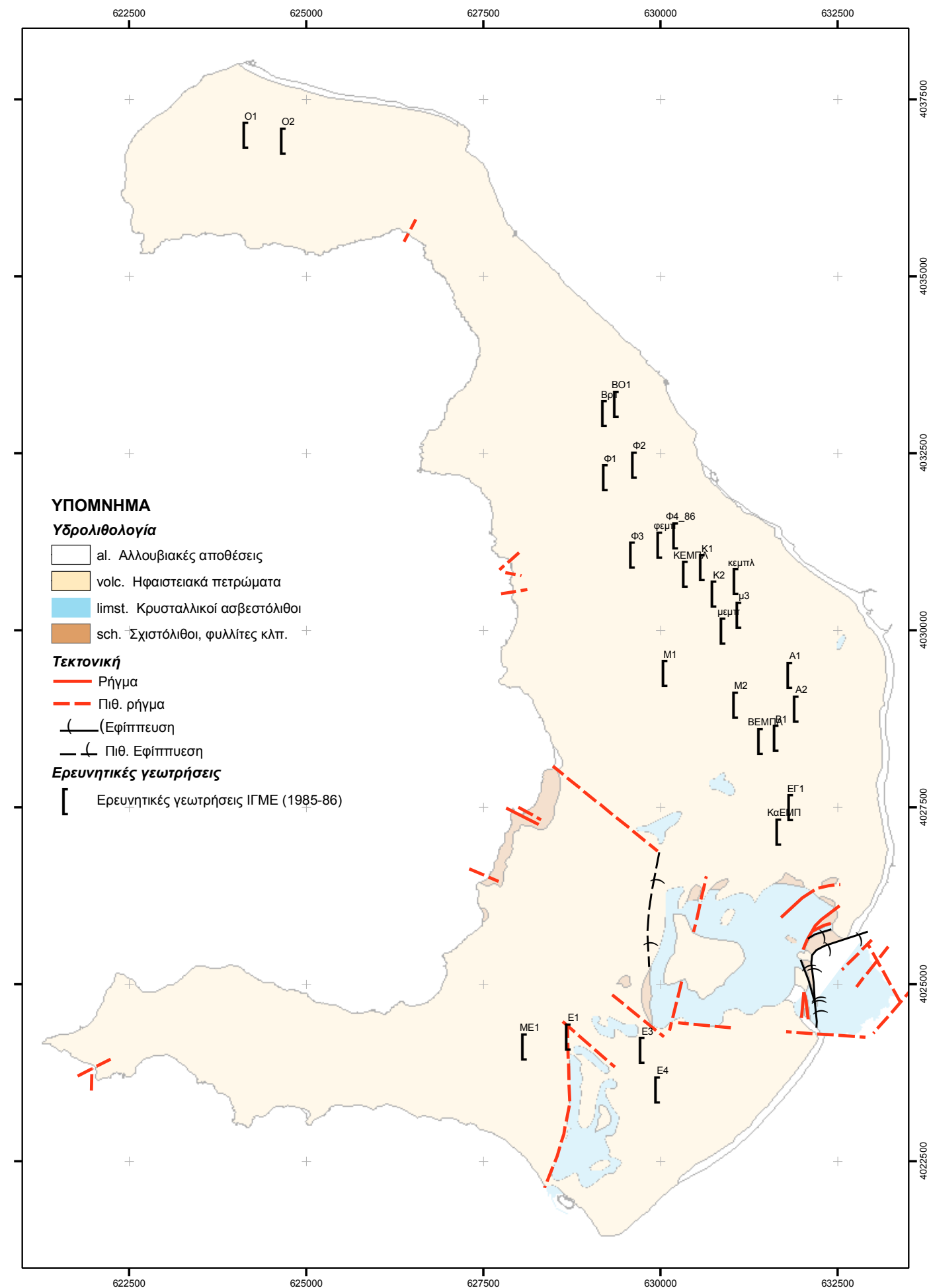
Η κατανομή των υδρολιθολογικών ενοτήτων, τα όρια και η γεωμετρία των υδροφόρων σχηματισμών, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά όπως η βάση και το πάχος αυτών, οι υδραυλικές τους ιδιότητες, οι μεταβολές των υδρολογικών και ποιοτικών τους χαρακτηριστικών όπως η πιεζομετρία και η συγκέντρωση των χλωριόντων, καθώς και το υδατικό τους ισοζύγιο αποτελούν βασικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Ορισμένα στοιχεία που προκύπτουν από τις μέχρι τώρα μελέτες είναι:

- Οι διάφοροι λιθολογικοί σχηματισμοί που παρουσιάζονται στο σχετικό γεωλογικό χάρτη (χάρτης 1) ταξινομούνται σε τέσσερις διαφορετικές υδρολιθολογικές ενότητες (βλ. χάρτης 2). Αναπτύσσονται στους διάφορους ηφαιστειακούς σχηματισμούς και στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Οι φυλλιτικοί σχηματισμοί, σύμφωνα με τα μέχρι τώρα διαθέσιμα στοιχεία, χαρακτηρίζονται ως πρακτικά αδιαπέρατοι και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.
- Η υδροφορία που αναπτύσσεται στα ηφαιστειακά πετρώματα δεν έχει διακριθεί σε επιμέρους ενότητες. Από διάφορες γεωτρητικές έρευνες έχει γίνει προσπάθεια ταξινόμησης της υδροφορίας σε επιμέρους ορίζοντες τύρφης. Σε γενικές γραμμές, στα ηφαιστειακά πετρώματα διακρίνονται δύο κύριες υδρογεωλογικές ενότητες, αυτή του βόριου τμήματος (βόρεια του Προφήτη Ηλία) και αυτή του νότιου τμήματος που αναπτύσσεται στην ευρύτερη περιοχή του Εμπορείου –

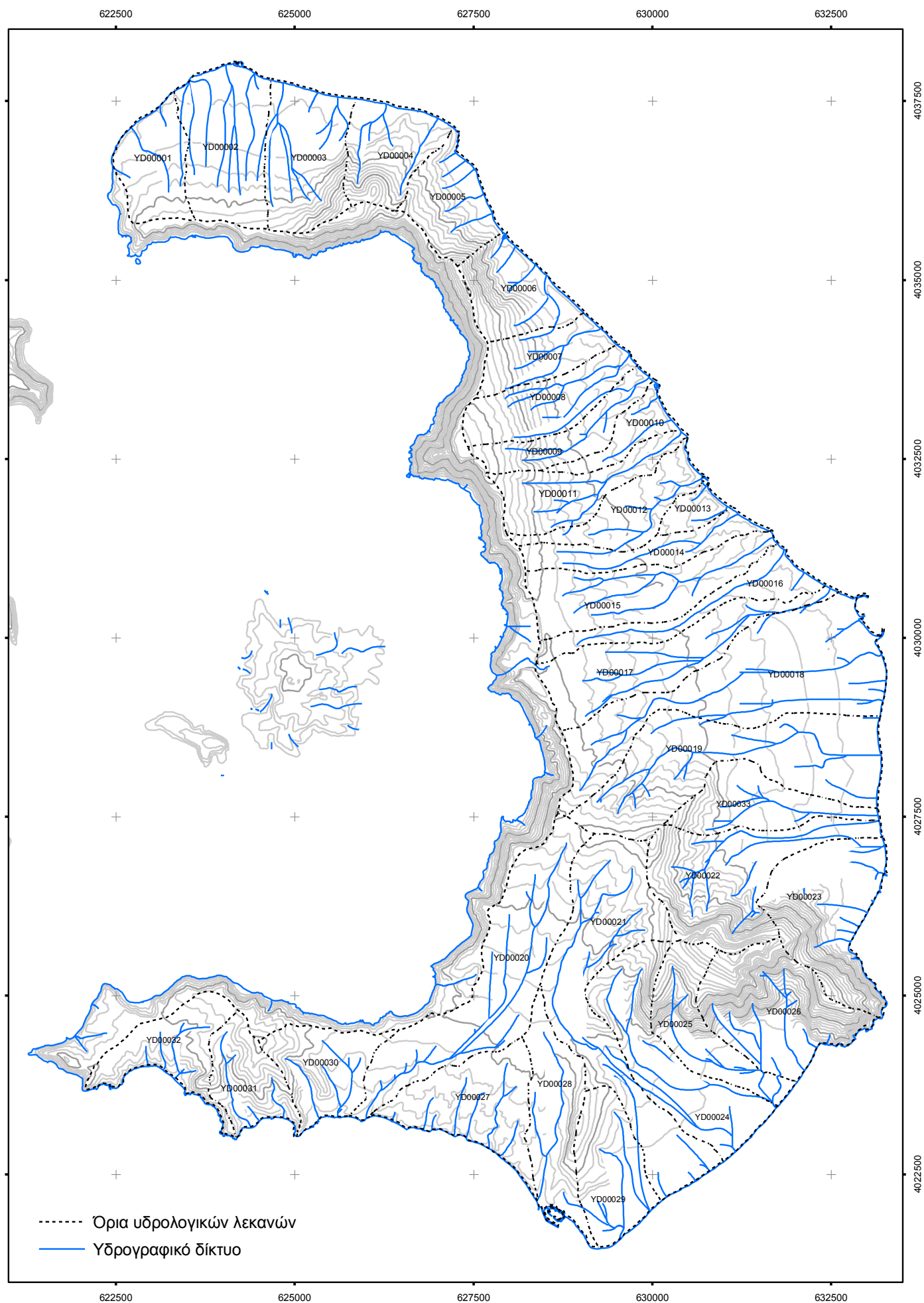
Ακρωτηρίου. Στη βόρεια ενότητα βρίσκεται και ο υδροφορέας Βουρβούλου – Καμαρίου που είναι και ο υδροφορέας μελέτης.

- Ο υδροφόρος σχηματισμός που έχει παρουσιάσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της ανάπτυξης των σχετικών μοντέλων στο παρελθόν (Mantoglou A., Giannouloroulos P. 2004.) είναι αυτός της ευρύτερης περιοχής του αεροδρομίου. Τα γεωγραφικά του όρια προσεγγιστικά εκτείνονται νότια, έως τις βόρειες παρυφές του όρους Προφήτης Ηλίας, βόρεια έως την περιοχή του ρέματος Καρτεράδος. Καλύπτει τις ευρύτερες περιοχές Καρτεράδου, Μονόλιθου, Μεσσαριάς, Βόθωνα και Καμαρίου.
- Ο υδροφορέας που αναπτύσσεται στο νότιο τμήμα της νήσου στην περιοχή του Εμπορείου, σε ότι αφορά στα πιθανά εκμεταλλεύσιμα υδατικά του αποθέματα, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή αυτή από το ΙΓΜΕ (1985, 1986) απέδωσαν υφάλμυρο νερό.

Τα υδρογεωλογικά στοιχεία παραχωρήθηκαν από τον Δρ. Υδρογεωλογίας Γιαννουλόπουλο Π.



Χάρτης 2 Υδρολιθολογικός Χάρτης Ν. Θήρας



Χάρτης 3 Υδρολογικές λεκάνες και υδρογραφικό δίκτυο

Παραχώρηση: Giannouloupoulos P.

**5. Προσδιορισμός κατείσδυσης N.
Θήρας με το μοντέλο ακόρεστης ροής
CLASS U3M-1D**

5.1 Το εργαλείο CLASS U3M-1D

Το CLASS U3M-1D είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης της κατείσδυσης της εδαφικής υγρασίας στην ακόρεστη ζώνη. Χρησιμοποιώντας και επιλύοντας την εξίσωση του Richards, το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στην ακόρεστη ζώνη. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα μεταβλητό χρονικό βήμα το οποίο αυξομειώνεται αναλόγως και προσαρμόζεται στην παροδικότητα των κλιματικών συνθηκών. Το υδατικό ισοζύγιο υπολογίζεται για κάθε εδαφικό υλικό χωριστά και οι διακυμάνσεις στην εξάτμιση, τις διαλυμένες ουσίες και την αποστράγγιση προσομοιώνονται κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Το σφάλμα στον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου που σχετίζεται με τις αριθμητικές προσεγγίσεις ποσοτικοποιείται για κάθε εδαφικό υλικό.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του υδατικού ισοζυγίου, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση του Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{\alpha}(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]$$

Όπου: K_{α} είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού υλικού για ακόρεστη ροή, ψ το ύψος της πίεσης (όπου για την ακόρεστη ζώνη $\psi < 0$), z το υψόμετρο σε κατακόρυφο σύστημα αναφοράς, θ η εδαφική υγρασία και t ο χρόνος.

Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται για τη λειτουργία του προγράμματος είναι ένα αρχείο των κλιματικών συνθηκών της

περιοχής με τη μορφή χρονοσειράς όπου περιέχονται οι ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής. Επιπλέον, απαιτείται επιλογή των παραμέτρων των εδαφικών υλικών, της εδαφικής χρήσης, των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους, του χρονικού βήματος, της κατανομής του ριζοστρώματος και της εδαφικής εξατμισμού. Με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του προγράμματος δημιουργούνται 5 αρχεία εξόδου τα οποία περιέχουν τις διαφορετικές παραμέτρους του ισοζυγίου.

5.2 Στάδια του προγράμματος

Για τη δημιουργία του μονοδιάστατου μοντέλου κατείσδυσης του υδροφορέα Βουρβούλου-Καμαρίου, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Αρχικά κατασκευάστηκε το αρχείο εισόδου των κλιματικών δεδομένων στο οποίο περιέχονται οι ημερομηνίες για μια περίοδο 28 ετών, οι ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης σε mm και οι ημερήσιες τιμές της εξάτμισης σε mm. Το αρχείο δημιουργήθηκε σε μορφή MS EXCEL (coma separated value file) όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 5.

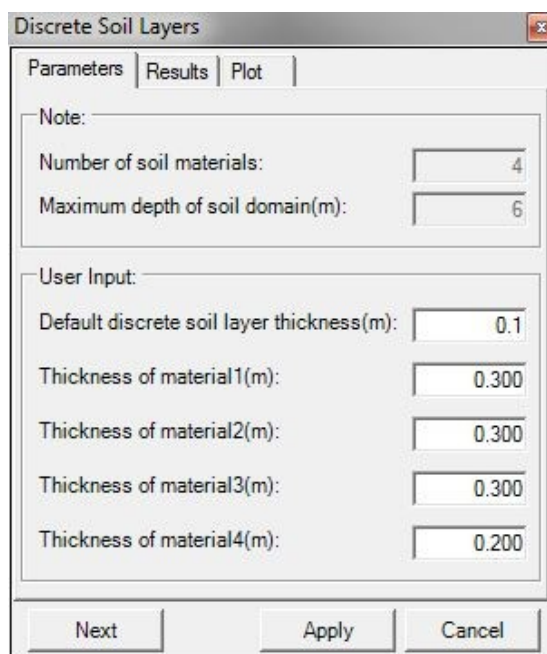
Πίνακας 5. Αρχείο κλιματικών δεδομένων.

	A	B	C	D	E
1	'Date;Rain;Evap				
2	'(dd/mm/yyyy);(mm);(mm)				
3	01/01/1974	0	0.897		
4	02/01/1974	0	1		
5	03/01/1974	13.15224	1.007		
6	04/01/1974	0	0.814		
7	05/01/1974	0	0.745		
8	06/01/1974	0	0.632		
9	07/01/1974	0	0.803		
10	08/01/1974	0	0.805		
11	09/01/1974	2.848255	0.779		
12	:	:	:		
13	.	.	.		

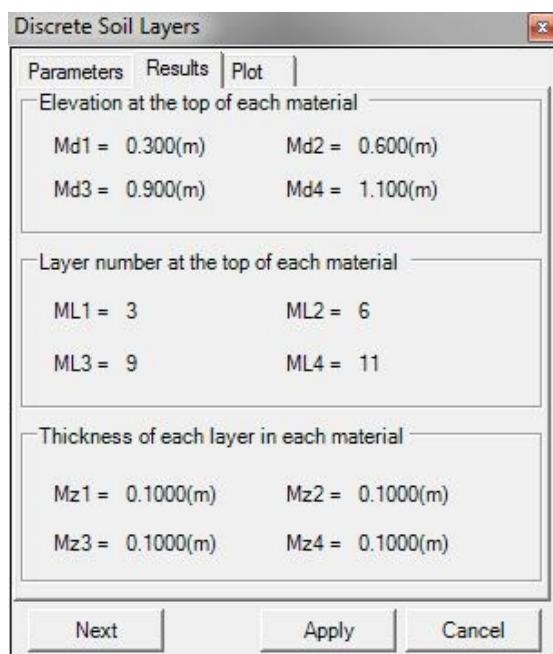
Λόγω της μη ύπαρξης επαρκών καταγεγραμμένων ημερήσιων κλιματικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκαν τιμές της Ν. Μήλου. Οι τιμές αυτές προσαρμόστηκαν με πολλαπλασιασμό του συντελεστή που προέκυψε από τη διαίρεση των ετήσιων τιμών της Ν. Θήρας με αυτές της Ν. Μήλου. Λόγω του γεγονότος ότι και τα δύο νησιά βρίσκονται στην ίδια ευρύτερη περιοχή (Ανατολικές Κυκλάδες), θεωρούμε ότι οι βροχοπτώσεις σχετίζονται.

Α. Παράμετροι για τη διάκριση του εδαφικού προφίλ.

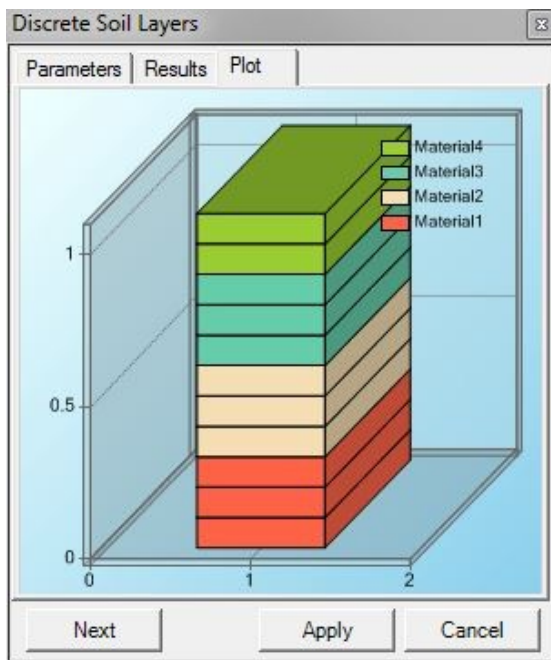
Το πρώτο βήμα είναι ο ορισμός των διαφορετικών επιπέδων εδαφικού υλικού για το εδαφικό προφίλ που πρόκειται να μοντελοποιηθεί. Ο μέγιστος αριθμός εδαφικών υλικών που μπορούν να μοντελοποιηθούν είναι 4 με σταθερό πάχος σε όλη την έκταση του υδροφόρου το οποίο ορίστηκε σε 1.1m. Θεωρήθηκαν 4 εδαφικά στρώματα τα οποία ορίστηκαν σε 0,20m το επιφανειακό και σε 0,30m για τα υπόλοιπα 3 (εικόνες 7,8,9).



Εικόνα 7 Εισαγωγή εδαφικών παραμέτρων.



Εικόνα 8 Εδαφικές παράμετροι.



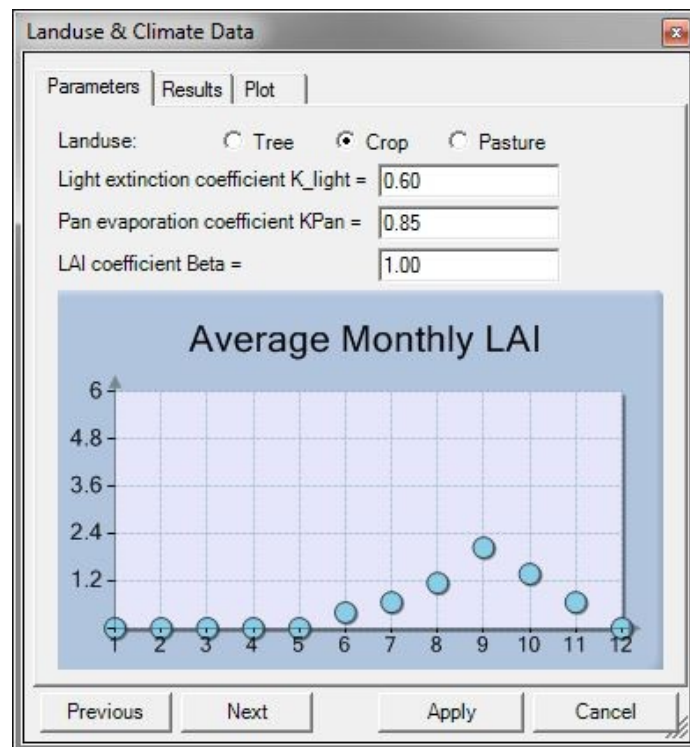
Εικόνα 9 Απεικόνιση εδαφικών στρώσεων.

Στις εικόνες 7,8 και 9 φαίνεται η εισαγωγή των διαφόρων εδαφικών υλικών και η δημιουργία των στρώσεων πάχους 0,1m όπως ορίζει το πρόγραμμα. Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, το κατώτερο εδαφικό υλικό είναι το material 1 ενώ το επιφανειακό είναι το material 4.

Για την επίλυση της εξίσωσης Richards το πρόγραμμα χωρίζει το πάχος του υδροφόρου σε ισοπαχείς στρώσεις. Λόγω της μη γραμμικότητας της εξίσωσης, η επίλυσή της γίνεται με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Όσο μικρότερο οριστεί το πάχος των στρώσεων τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της λύσης. Έχει βρεθεί ότι για πάχη μικρότερα του 0,1m ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται αυξάνεται κατά πολύ χωρίς σημαντική αλλαγή στην ακρίβεια της λύσης (CLASS U3M-1D user guide). Σε αυτή τη χρήση το πάχος των στρώσεων ορίστηκε σε 0,1m.

B. Φυτοκάλυψη και παράμετροι κλίματος

Σε αυτό το σημείο εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν την εδαφοκάλυψη η οποία στη προκειμένη ορίζεται ως καλλιέργειες (crop). Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να οριστεί από το χρήστη ο δείκτης της επιφάνειας του φυλλώματος (Leaf Area Index – LAI) οπότε και προσαρμόστηκε ανάλογα ώστε να προσομοιάσει κατά το δυνατόν την φυτοκάλυψη της Ν. Θήρας. Ο δείκτης LAI ορίζεται ως η συνολική επιφάνεια του φυλλώματος των φυτών εντός μιας ορισμένης επιφάνειας προς το εμβαδό της επιφάνειας αυτής. Επιπρόσθετα εισάγεται ο συντελεστής Light extinction coefficient που προσδιορίζει την μείωση στο ηλιακό φως που φτάνει στο έδαφος λόγω της αντανάκλασης από τα φυτά. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της δυνητικής εξάτμισης και της δυνητικής διαπνοής που προέρχονται από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή στα δεδομένα εισόδου. Στη συνέχεια η είσοδος του συντελεστή Pan evaporation coefficient (KPan), είναι αυτή που επιτρέπει τη μετατροπή της εξατμισοδιαπνοής όπως μετράται από τα εξατμισίμετρα σε δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Τέλος, ο συντελεστής LAI coefficient Beta χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του δείκτη LAI όσο το δυνατόν καλύτερα σύμφωνα με τις μηνιαίες βροχοπτώσεις. Στην παρακάτω εικόνα 10 φαίνονται οι συντελεστές όπως τροποποιήθηκαν για τη χρήση “crop”.



Εικόνα 10 Μηνιαίες τιμές δείκτη φυλλώματος.

Γ. Υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους.

Σε αυτό το στάδιο, καλείται ο χρήστης να εισάγει τις παραμέτρους που ορίζουν τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού. Επειδή αυτές δεν είναι πάντα γνωστές, όπως και στην προκειμένη περίπτωση, υπάρχει δυνατότητα επιλογής του εδαφικού υλικού από λίστα με προκαθορισμένες τις υδραυλικές ιδιότητες. Έτσι βάση της γνωστής επιφανειακής γεωλογικής σύστασης της περιοχής, επιλέχθηκαν τα ακόλουθα εδαφικά υλικά. Για το επιφανειακό στρώμα (material 4), αμμοπηλώδες έδαφος (sandy loam) με K_{sat} 106,1 cm/day, για τα επόμενα δύο στρώματα (material 3, material 2) επιλέχθηκε αμμοπηλώδης πηλός (sandy clay loam) με K_{sat} 31,44 cm/day, ενώ για το κατώτερο στρώμα (material 1) επιλέχθηκε έδαφος από μάργες που προσομοιάζει καλά τα συμπιεσμένα πυροκλαστικά υλικά. (silt loam) με K_{sat} 10,8 cm/day.

Επιπλέον το πρόγραμμα απαιτεί από το χρήστη την επιλογή του υδραυλικού μοντέλου που σε συνδυασμό με τις εδαφικές παραμέτρους θα δημιουργήσει μια σειρά εξισώσεων ώστε να βοηθήσει στην επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης Richards. Ανάμεσα στα μοντέλα Van Genuchten, Vogel and Cislersona και Brooks and Corey, επιλέχθηκε αυτό του Van Genuchten ως ένα από τα πιο διαδεδομένα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα (εικόνα 11, 12) .

Parameters for soil hydraulic properties

Parameters | Results | Plot

Number of values in the SHP table NTab: 100

First pressure head value in the SHP table hTab1 (m): -1E-08

Last pressure head value in the SHP table hTabN (m): -100

Pressure head at field capacity hFC (m): -1

Pressure head at wilting point for crops hWiltC (m): -80

Ksub (cm/day): 3.4999776

Hydraulic model: ☒ van Genuchten ☐ Vogel and Cislersona ☐ Brooks and Corey

Material	thetaR	thetaS	alpha(1/cm)	n	Ksat(cm/day)
1	0.067	0.45	0.02	1.41	10.8
2	0.1	0.39	0.059	1.48	31.44
3	0.1	0.39	0.059	1.48	31.44
4	0.065	0.41	0.075	1.89	106.1

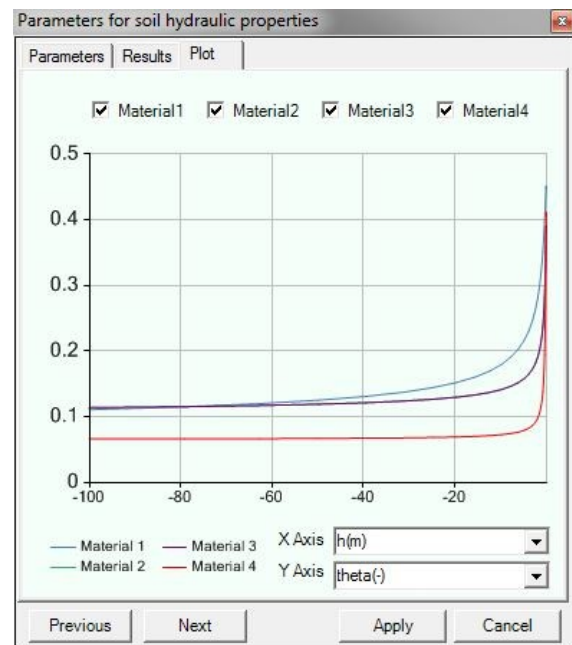
Select preset parameters by soil catalog

Material1: Silt Loam Material2: Sandy Clay Loam

Material3: Sandy Clay Loam Material4: Sandy Loam

Previous Next Apply Cancel

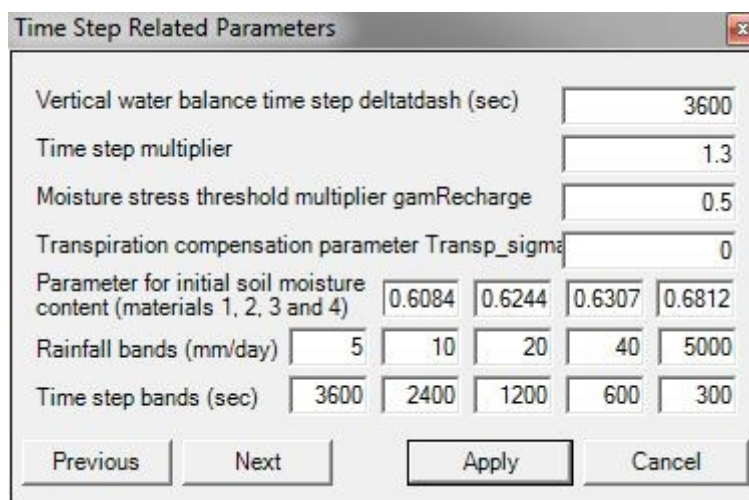
Εικόνα 11 Εισαγωγή ιδιοτήτων των εδαφών.



Εικόνα 12 Υδραυλικές ιδιότητες εδαφών.

Δ. Εισαγωγή παραμέτρων σχετιζόμενων με το χρονικό βήμα.

Σε αυτό το στάδιο ορίζονται οι παράμετροι του χρονικού βήματος. Αρχικά εισάγεται το χρονικό βήμα ίσο με 3600 sec (1 ώρα), αν επιλεγεί μεγαλύτερο χρονικό βήμα τα αποτελέσματα προκύπτουν αλλοιωμένα ενώ με μικρότερο χρονικό βήμα αυξάνεται κατά πολύ ο υπολογιστικός χρόνος χωρίς ιδιαίτερη βελτίωση στα αποτελέσματα. Στη συνέχεια, ζητείται ο πολλαπλασιαστής του βήματος βάσει του οποίου το χρονικό βήμα αυξομειώνεται αναλόγως της βροχόπτωσης, ο οποίος έχει οριστεί ως 1.3. Οι παράμετροι της αρχικής εδαφικής υγρασίας εισάγονται όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 13.

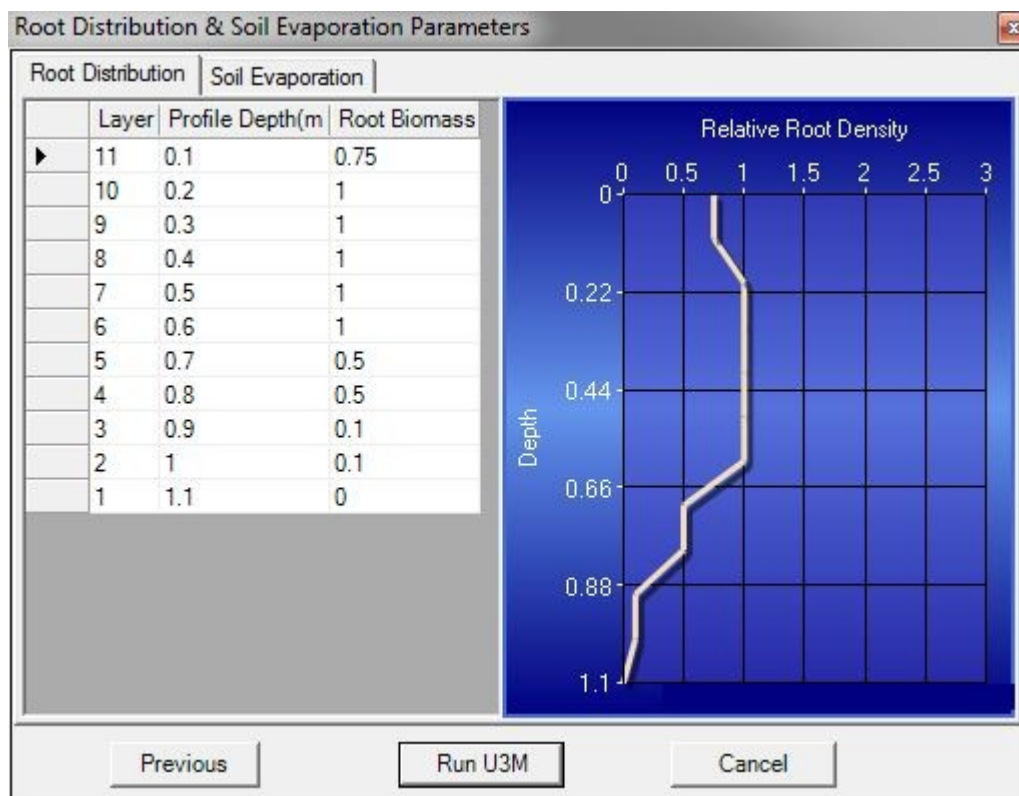


Time Step Related Parameters					
Vertical water balance time step Δt (sec)	3600				
Time step multiplier	1.3				
Moisture stress threshold multiplier $\gamma_{mRecharge}$	0.5				
Transpiration compensation parameter $Transp_sigma$	0				
Parameter for initial soil moisture content (materials 1, 2, 3 and 4)	0.6084	0.6244	0.6307	0.6812	
Rainfall bands (mm/day)	5	10	20	40	5000
Time step bands (sec)	3600	2400	1200	600	300
Previous Next Apply Cancel					

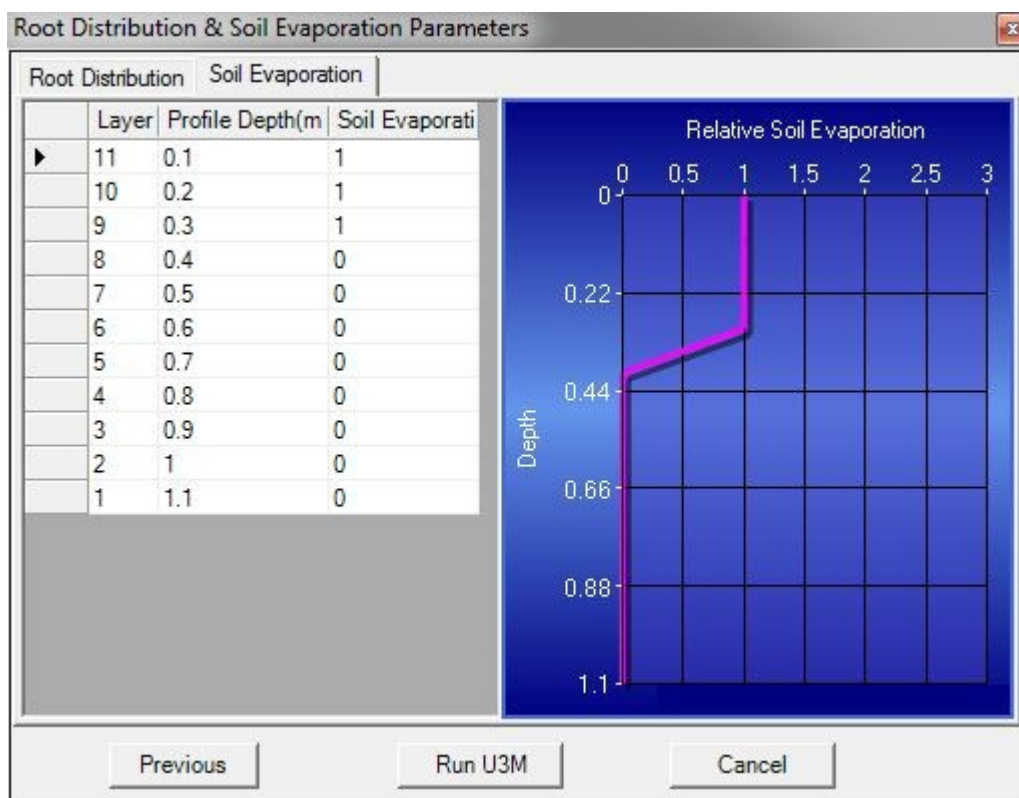
Εικόνα 13 Παράμετροι χρονικού βήματος.

Ε. Παράμετροι κατανομής ριζοστρώματος και της εδαφικής εξάτμισης.

Σε αυτό το στάδιο εισάγεται η πυκνότητα των ριζών των φυτών σε κάθε εδαφική στρώση όπως αυτές ορίστηκαν στο βήμα Γ. Η κατανομή των ριζών υπολογίζεται από το πρόγραμμα και έχει άμεση σχέση με τον τύπο της χλωρίδας που επιλέχθηκε όπως επίσης και με τα εδαφικά υλικά. Τέλος εισάγονται οι παράμετροι για την εδαφική εξάτμιση. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα παραπάνω (εικόνες 14, 15).



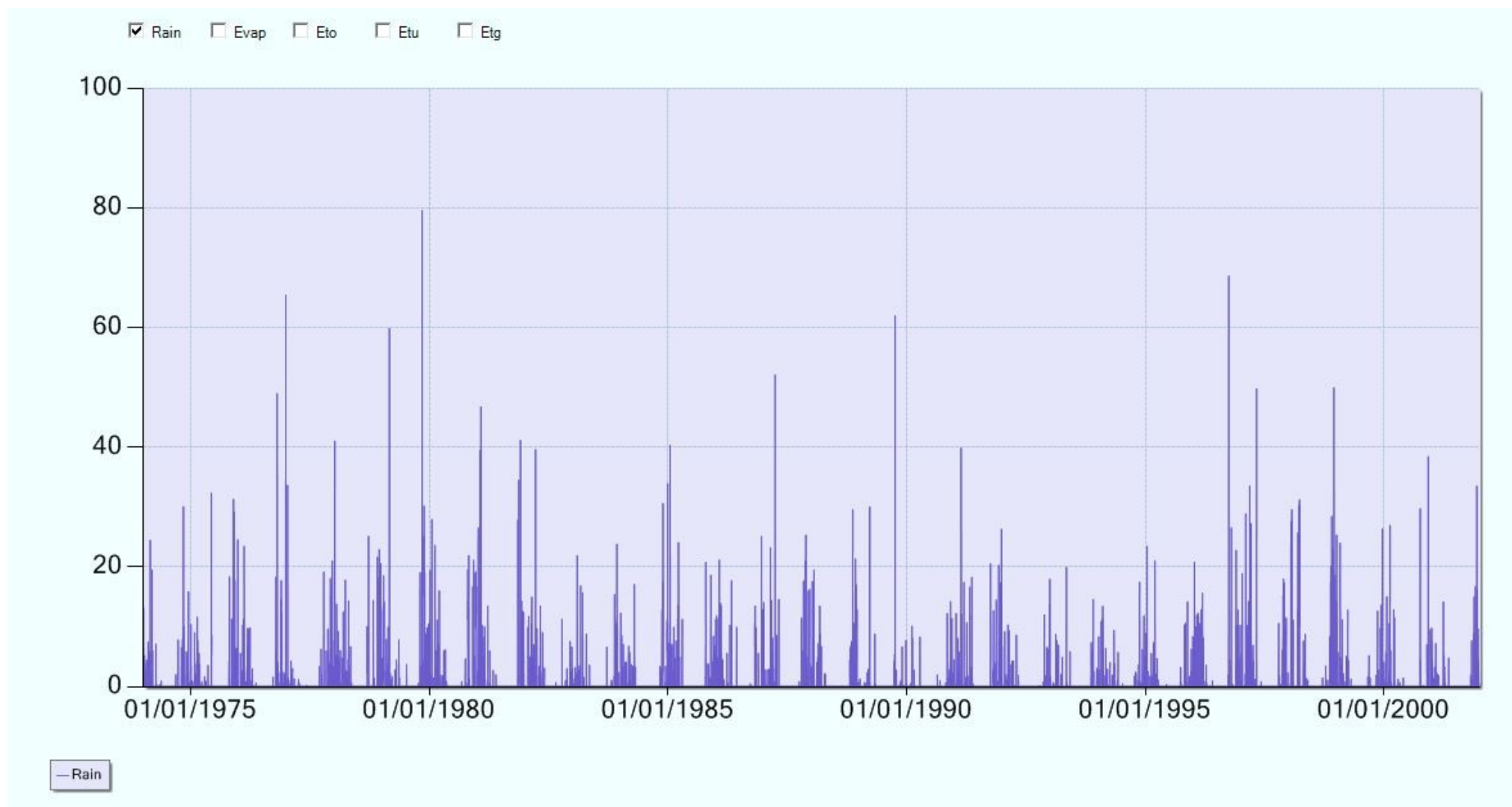
Εικόνα 14 Κατανομή του ριζοστρώματος.



Εικόνα 15 Παράμετροι εδαφικής εξάτμισης.

5.3 Εξαγόμενα του προγράμματος

Μετά την είσοδο όλων των απαραίτητων δεδομένων και το ορισμό του αρχείου εισόδου το πρόγραμμα είναι σε θέση να αρχίσει τους υπολογισμούς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω στις εικόνες 16 και 17.



Εικόνα 16 Κατανομή της βροχόπτωσης

Date	Cumulative Leakage(mm)	Cumulative Plant Transpirati	Cumulative Soil Evaporation(Daily Leakage(mm)	Daily Transpiration(mm)	Daily Evaporation(mm)
26/11/2001	1127.08	1276.48	6384.25	0	0.24	0.59
27/11/2001	1127.08	1276.8	6385.05	0	0.31	0.8
28/11/2001	1127.08	1277.07	6385.74	0	0.27	0.69
29/11/2001	1127.08	1277.26	6386.22	0	0.19	0.49
30/11/2001	1127.08	1277.44	6386.69	0	0.18	0.47
01/12/2001	1127.08	1277.44	6387.48	0	0	0.78
02/12/2001	1127.08	1277.44	6388.21	0	0	0.73
03/12/2001	1127.08	1277.44	6388.89	0	0	0.68
04/12/2001	1127.08	1277.44	6389.71	0	0	0.82
05/12/2001	1127.08	1277.44	6390.24	0	0	0.54
06/12/2001	1127.08	1277.44	6390.87	0	0	0.63
07/12/2001	1127.09	1277.44	6391.51	0	0	0.64
08/12/2001	1127.09	1277.44	6392.09	0	0	0.58
09/12/2001	1127.09	1277.44	6392.63	0	0	0.54
10/12/2001	1127.09	1277.44	6393.12	0	0	0.49
11/12/2001	1127.09	1277.44	6393.63	0	0	0.51
12/12/2001	1127.09	1277.44	6394.23	0	0	0.6
13/12/2001	1127.09	1277.44	6394.86	0	0	0.63
14/12/2001	1127.09	1277.44	6395.4	0	0	0.54
15/12/2001	1127.09	1277.44	6396.29	0	0	0.89
16/12/2001	1127.09	1277.44	6396.95	0	0	0.66
17/12/2001	1127.09	1277.44	6397.37	0	0	0.42
18/12/2001	1127.09	1277.44	6397.78	0	0	0.41
19/12/2001	1127.09	1277.44	6398.26	0	0	0.47
20/12/2001	1127.09	1277.44	6398.93	0	0	0.67
21/12/2001	1127.09	1277.44	6399.54	0	0	0.62
22/12/2001	1127.09	1277.44	6400.33	0	0	0.79
23/12/2001	1127.09	1277.44	6401.19	0	0	0.86
24/12/2001	1127.09	1277.44	6401.85	0	0	0.66
25/12/2001	1127.09	1277.44	6402.4	0	0	0.55
26/12/2001	1127.09	1277.44	6403.08	0	0	0.68
27/12/2001	1127.09	1277.44	6403.63	0	0	0.54
28/12/2001	1127.09	1277.44	6404.2	0	0	0.57
29/12/2001	1127.09	1277.44	6405.03	0	0	0.83
30/12/2001	1127.09	1277.44	6405.9	0	0	0.87
31/12/2001	1127.1	1277.44	6406.62	0	0	0.71

Εικόνα 17 Τιμές εξόδου για την ημερήσια διήθηση.

Από τα παραπάνω ενδιαφέρον για την κατάρτιση του υδάτινου ισοζυγίου παρουσιάζει η αθροιστική κατείσδυση καθώς και η μέση υπερετήσια τιμή της κατείσδυσης η οποία μετά από αναγωγή της σε ημερήσια τιμή θα χρησιμεύσει στο μοντέλο εκτίμησης των αντλήσεων. Από τις εξόδους του προγράμματος προκύπτει αθροιστική κατείσδυση από 01/01/1974 έως και 31/12/2001 είναι 1127.1 mm. Η μέση υπερετήσια τιμή της κατείσδυσης είναι 40.25mm η οποία αντιστοιχεί στο 4.66% της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στο νησί.

Από βιβλιογραφική έρευνα εργασιών διάφορων ερευνητών βρέθηκε ότι η τιμή της κατείσδυσης που προέκυψε από την εφαρμογή CLASS συμφωνεί σε γενικές γραμμές με προηγούμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα από εμπειρικά στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τον Δρ. Γιανουλόπουλο Π. παλιότερα είχε υπολογιστεί ετήσια κατείσδυση για όλο το νησί 38.27 mm ανά έτος. Η εκτιμηθείσα λοιπόν τιμή της κατείσδυσης κρίνεται ικανοποιητική για να χρησιμοποιηθεί παρακάτω στην εκτέλεση του μοντέλου εκτίμησης της μέγιστης αιφόρου άντλησης.

6. Μοντέλο εκτίμησης μέγιστης αιφόρου άντλησης – Βελτιστοποίηση αντλήσεων.

6 Μοντέλα Υφαλμύρισης Παράκτιων Υδροφορέων

Για την εκτίμηση του μετώπου της υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφορείς έχουν δημιουργηθεί αρκετά υπολογιστικά εργαλεία. Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν την έκταση της υφαλμύρισης σε μια περιοχή βάσει ορισμένων δεδομένων. Τα εργαλεία αυτά ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες αναλόγως της θεωρητικής προσέγγισης που χρησιμοποιούν. Αυτές είναι τα μοντέλα sharp interface και τα μοντέλα variable density. Στα μοντέλα sharp interface, εφαρμόζεται η προσέγγιση Ghyben Herzberg που θεωρεί ότι δεν υπάρχει ανάμειξη μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού στον υδροφορέα οπότε δημιουργείται διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υδάτινων σωμάτων διαφορετικής πυκνότητας. Αντίθετα τα μοντέλα variable density θεωρούν ότι η πυκνότητα μεταβάλλεται ομαλά σε μια ζώνη από την πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού έως και την πυκνότητα του θαλασσινού. Επειδή οι υπολογισμοί στις δύο περιπτώσεις διεξάγονται διαφορετικά, τα μοντέλα αυτά έχουν διαφορά ως προς τα εξαγόμενα αποτελέσματα αλλά και ως προς τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου καθώς και ως προς την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ. Προηγούμενες εργασίες όπως των Karatzas and Pinder (1993), S.M. Karterakis et al. (2007) και Mantoglou A. (2003) έχουν γίνει με σκοπό την διαχείριση των αντλήσεων σε αντίστοιχες περιπτώσεις χρησιμοποιώντας μοντέλα και αριθμητικές μεθόδους για την εύρεση λύσης.

6.1 Η μεθοδολογία του προγράμματος.

Η βελτιστοποίηση των αντλήσεων γίνεται με το πρόγραμμα που αναπτύχτηκε στα πλαίσια προηγούμενων εργασιών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων του ΕΜΠ σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Αρχικά καταρτίζεται το υδατικό ισοζύγιο βάσει των δεδομένων που εισάγει ο χρήστης και χρησιμοποιώντας ορισμένα αρχεία εισόδου για την χωρική κατανομή των δεδομένων. Στη συνέχεια, βάσει περιορισμών που εισάγονται από τον χρήστη γίνεται βελτιστοποίηση για τις αντλήσεις ώστε να αυξηθεί η συνολική απόδοση τους.

Το πρόγραμμα επιλύει την εξίσωση της υπόγειας ροής χρησιμοποιώντας τον κώδικα πεπερασμένων διαφορών του MODFLOW.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q = 0$$

Όπου K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, N είναι η επιφανειακή τροφοδοσία, Q είναι ο ρυθμός άντλησης και b είναι το πάχος του υδροφόρου στρώματος. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση του επιπλέοντος φακού γλυκού νερού το πάχος του υδροφόρου στρώματος στο οποίο πραγματοποιείται ροή του γλυκού νερού είναι $b = h_f - d + \xi$.

Ο κώδικας για τη βελτιστοποίηση των αντλήσεων που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στον μη γραμμικό προγραμματισμό. Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού άντλησης από όλες τις γεωτρήσεις που υπόκεινται σε έναν αριθμό

περιορισμών επιβεβλημένων προκειμένου να προστατεύεται ο υδροφορέας από την υφαλμύριση.

Έστω $Q_i; i = 1, \dots, M$ είναι οι ρυθμοί άντλησης των M γεωτρήσεων του παράκτιου υδροφορέα. Οι συντεταγμένες $(x_i, y_i); i = 1, \dots, M$ των γεωτρήσεων θεωρούνται γνωστές. Το πρόβλημα εκφράζεται σε ένα σταθερό πλαίσιο βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση το άθροισμα των ρυθμών άντλησης και μη γραμμικούς περιορισμούς σκοπός των οποίων είναι η προστασία των γεωτρήσεων από την υφαλμύριση

$$\left. \begin{array}{l} \text{maximize: } Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_M \\ \text{subject to: } \xi_{ti}(Q_1, Q_2, \dots, Q_M) > \xi_{wi}, \quad i = 1, \dots, M \\ Q_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, M \\ Q_i \leq Q_{max,i}, \quad i = 1, \dots, M \end{array} \right\}$$

όπου Q_1, Q_2, \dots, Q_M είναι οι μεταβλητές απόφασης. Η πρώτη ομάδα περιορισμών έχει ως σκοπό τη διατήρηση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού κάτω από ένα ορισμένο βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας στη θέση της γεώτρησης (εικόνα 3).

Η δεύτερη ομάδα περιορισμών επιβάλλει θετικούς ρυθμούς άντλησης για κάθε γεώτρηση, ενώ η τρίτη ομάδα περιορίζει τον μέγιστο ρυθμό άντλησης κάθε γεώτρησης ώστε να διατηρηθεί χωρικά μια ομοιομορφία για την αποφυγή ανισορροπιών λόγω των υπερβολικά μεγάλων ρυθμών άντλησης από ορισμένες γεωτρήσεις. Άξιο σημείωσης είναι ότι αν και η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική, το πρόβλημα σε σχέση με τις μεταβλητές απόφασης είναι μη γραμμικό λόγω του ότι η δεύτερη ομάδα περιορισμών είναι μη γραμμική σε σχέση με τις μεταβλητές απόφασης.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης με μη γραμμικούς περιορισμούς, λύνεται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του διαδοχικού τετραγωνικού προγραμματισμού (SQP). Μια αποδοτική και ακριβής λύση σε αυτό το πρόβλημα εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος του προβλήματος σε όρους αριθμού περιορισμών και σχεδιαστικών μεταβλητών αλλά και από τα χαρακτηριστικά της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Μια λύση για το πρόβλημα του μη γραμμικού προγραμματισμού απαιτεί μια επαναληπτική διαδικασία για να οριστεί η κατεύθυνση αναζήτησης. Στην βελτιστοποίηση με περιορισμούς, ο γενικός σκοπός είναι να μετατραπεί το πρόβλημα σε ένα ευκολότερο υπο-πρόβλημα το οποίο μπορεί να επιλυθεί και να χρησιμοποιηθεί ως η βάση μίας επαναληπτικής διαδικασίας.

Η εφαρμογή του SQP απαιτεί συνέχεια της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών όπως επίσης και της ύπαρξης παραγώγων. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης μπορεί να χρειαστεί αρκετές επαναλήψεις για να συγκλίνει σε κάποια λύση και μπορεί να παρουσιάσει ευαισθησία σε αριθμητικές προσεγγίσεις όπως η αποκοπή ή το σφάλμα στρογγυλοποίησης στον υπολογισμό της κλίσης των πεπερασμένων διαφορών της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιπλέον, το πρόγραμμα μπορεί να συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο αντί για το ολικό. Η έναρξη του προγράμματος με διαφορετικές αρχικές συνθήκες, μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση του ολικού ελαχίστου. Με την αλλαγή των μεταβλητών που παίρνουν μέρος στον υπολογισμό των πεπερασμένων διαφορών των κλίσεων της αντικειμενικής συνάρτησης, ή την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων μπορεί πιο εύκολα να επιτευχθεί η εύρεση του ολικού ελαχίστου.

6.2 Προβλέψεις από προηγούμενες εφαρμογές του προγράμματος

Εδώ γίνεται εκτέλεση του προγράμματος βελτιστοποίησης με τις παραμέτρους όπως είχαν οριστεί αρχικά στην παρουσίαση των Mantoglou A. and Giannouloropoulos P. (2004). Ο σκοπός της εκτέλεσης αυτής είναι να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων των επόμενων σεναρίων ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα.

Σε αυτή την εκτέλεση το βάθος όλων των γεωτρήσεων ορίστηκε το ίδιο σε όλες τις γεωτρήσεις και ίσο με 15m ($d_{min}=15$).

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m ($d=80$).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 ($n_{well}=30$).

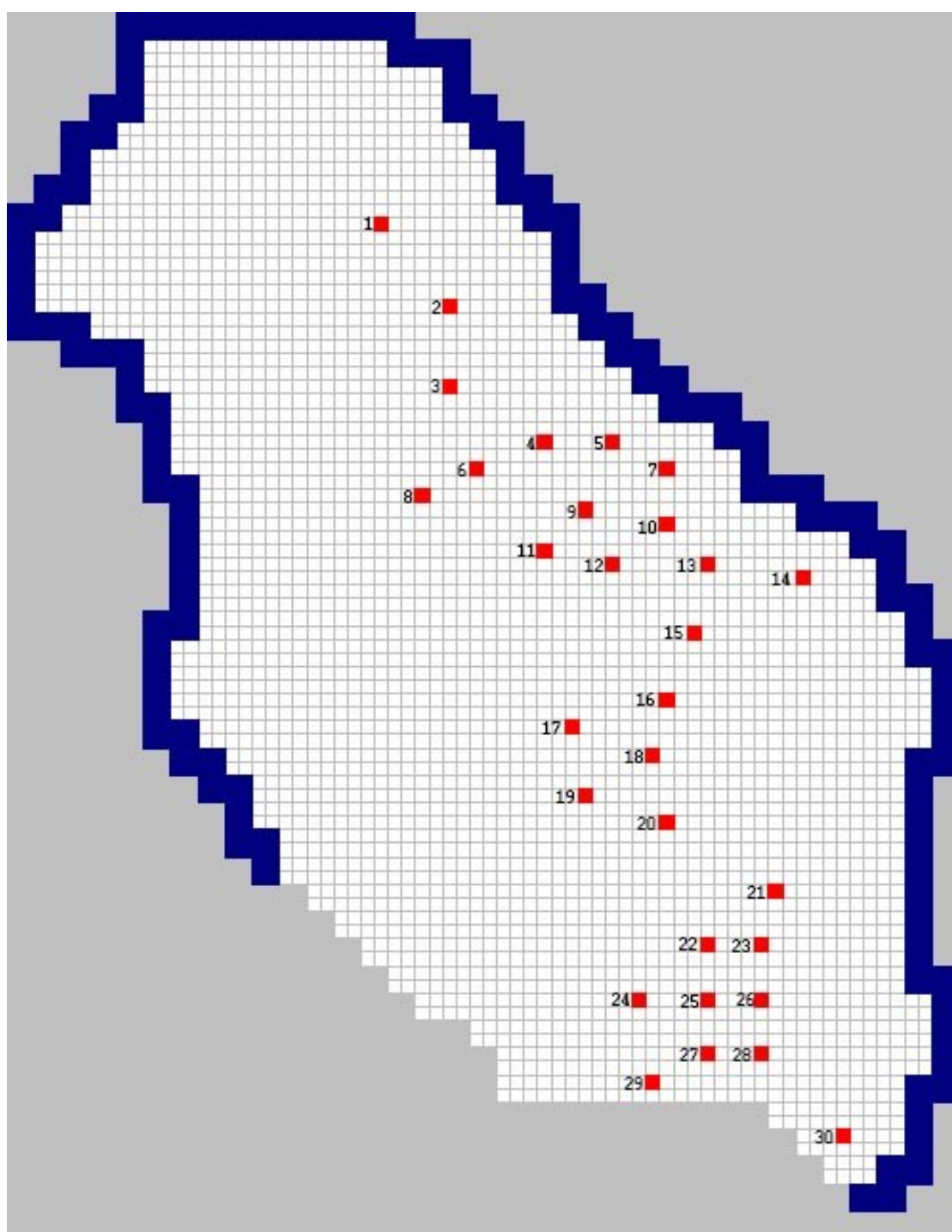
Οι γεωτρήσεις παρουσιάζονται αριθμημένες στην εικόνα 18

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.025 gr/cm^3 ($r_s=1.025$).

Παρακάτω φαίνεται ο ορισμός των παραμέτρων στον κώδικα.

```
2 - rf=1.000;  
3 - rs=1.025;  
  
3 - dmin=15;  
4 - nwell=30;  
5 - d=80;
```



Εικόνα 18 Θέση των γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την εκτέλεση καταγράφηκαν στο αρχείο output.dat. Από αυτά, εκείνα που μας αφορούν είναι οι αντλήσεις κάθε γεώτρησης, η αθροιστική αντλούμενη ποσότητα νερού και η τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού με τον χρωματικό κώδικα των βαθών για την εποπτική εκτίμηση της έκτασης της υφαλμύρισης.

Από την εκτέλεση αυτή προκύπτει:

30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-87.795	1
1	22	33	-61.521	2
1	28	33	-67.198	3
1	32	40	-36.802	4
1	32	45	-18.670	5
1	34	35	-55.819	6
1	34	49	-12.039	7
1	36	31	-87.087	8
1	37	43	-32.572	9
1	38	49	-23.811	10
1	40	40	-59.775	11
1	41	45	-43.185	12
1	41	52	-30.503	13
1	42	59	-24.071	14
1	46	51	-48.766	15
1	51	49	-50.230	16
1	53	42	-64.937	17
1	55	48	-42.513	18
1	58	43	-150.00	19
1	60	49	-54.912	20
1	65	57	-76.330	21
1	69	52	-69.580	22
1	69	56	-41.059	23
1	73	47	-97.257	24
1	73	52	-41.615	25
1	73	56	-31.248	26
1	77	52	-39.669	27
1	77	56	-16.141	28
1	79	48	-71.692	29
1	83	62	0.0000	30

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

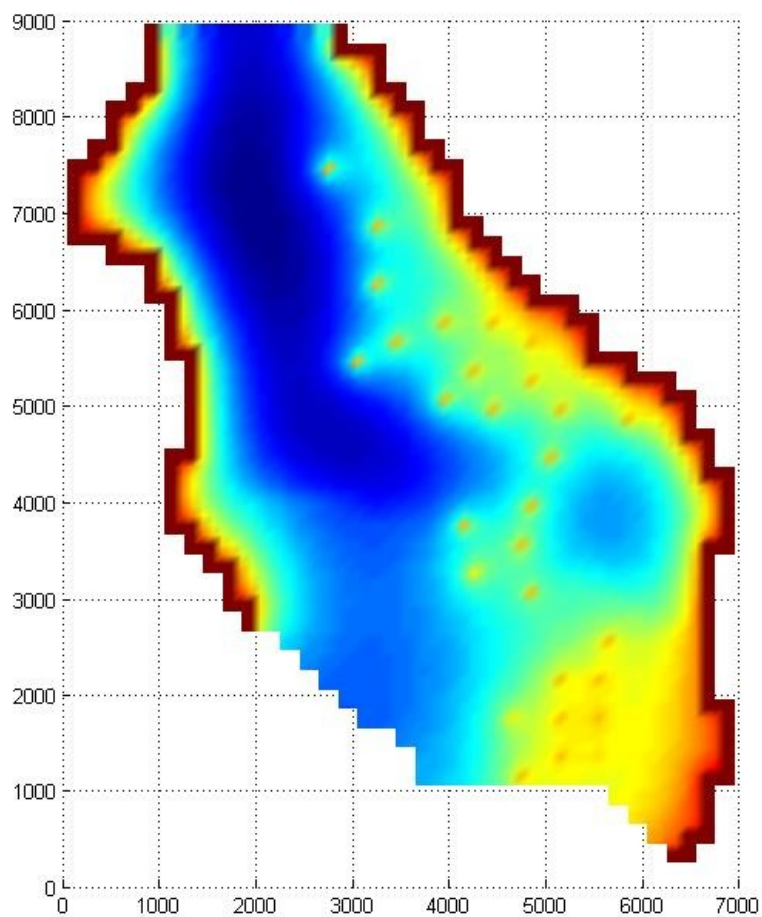
CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T

IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9621.7227	CONSTANT HEAD =	26.3609
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =		TOTAL IN =	
		1164481.7500 3190.3608	
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	603550.5630	CONSTANT HEAD =	1653.5631
WELLS =	560931.5000	WELLS =	1536.7987
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =		TOTAL OUT =	
		1164482.0000 3190.3618	
IN - OUT =		IN - OUT =	
		-0.2500 -9.7656E-04	
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

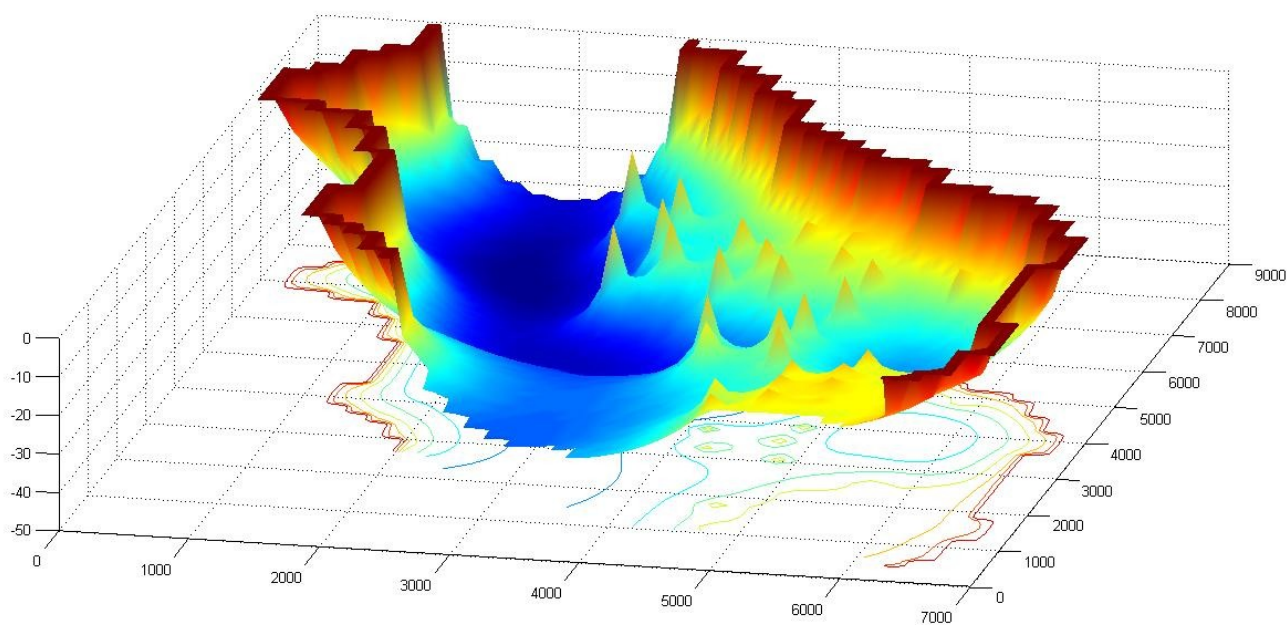
Στα παραπάνω φαίνονται οι αρνητικές τιμές των αντλήσεων της κάθε γεώτρησης όπως διαμορφώθηκαν από την μέθοδο ελαχιστοποίησης που εφαρμόστηκε¹.

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 19 και 20.

¹ Οι τιμές φαίνονται αρνητικές διότι για την μεγιστοποίηση των τιμών έγινε ελαχιστοποίηση των αντίστοιχων αρνητικών. Η φυσική σημασία των τιμών προκύπτει από την απόλυτη τιμή των αρνητικών τιμών των αντλήσεων (stress rate).



Εικόνα 19 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 20 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

7. Διερεύνηση σεναρίων άντλησης για περιορισμό της υφαλμύρισης

7.1 Αλλαγή του περιορισμού της ανύψωσης του υφάλμυρου νερού

7.1.1 Περιορισμός της ανύψωσης του υφάλμυρου νερού κοντά στην επιφάνεια του υδροφορέα.

Λόγω της μορφής του φακού που έχει ο υδάτινος όγκος στον υδροφορέα μελέτης, η ανύψωση του υφάλμυρου νερού κοντά στην επιφάνεια του υδροφορέα μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες. Σε ένα τέτοιο σενάριο ο φακός του γλυκού νερού θα παρουσίαζε κενά (τρύπες κατά τον κατακόρυφο πληρωμένες με υφάλμυρο νερό) τα οποία πιθανότατα θα μπορούσαν να έχουν ραγδαία αύξηση μεγέθους ειδικότερα στο επίπεδο παράλληλο στην επιφάνεια του υδροφορέα σε βάθος μερικών μόνο μέτρων. Από το σημείο αυτό και μετά είναι ζήτημα χρόνου η πλήρης υφαλμύριση του υδροφορέα στην περίπτωση της συνέχισης των αντλήσεων. Για τον περιορισμό ενός τέτοιου ενδεχομένου, είναι σκόπιμο να περιοριστεί το μέγιστο ύψος που είναι δυνατόν να φτάσει το υφάλμυρο νερό.

Για να γίνει αυτό μέσω του κώδικα πρέπει να οριστεί στην συνάρτηση το βάθος d_{min} μεγαλύτερο από ότι στην αρχική εκτέλεση. Υπενθυμίζεται ότι το d_{min} στο πρόγραμμα αντιστοιχεί στο βάθος των γεωτρήσεων².

² Η σημασία του d_{min} δεν είναι το βάθος της πραγματικής γεώτρησης της περιοχής, αλλά το μέγιστο βάθος στο οποίο μέσω του προγράμματος επιτρέπεται να φτάσει η «σφήνα». Αυτό επειδή $d_{min} - \xi_w = c$ όπου $c \leq 0$ από τους περιορισμούς της ελαχιστοποίησης.

7.1.1.1 Περιορισμός της ανύψωσης στο βάθος των 20m από την επιφάνεια του υδροφορέα.

Σε αυτή την εκτέλεση το βάθος όλων των γεωτρήσεων ορίστηκε το ίδιο και ίσο με 20m ($d_{min}=20$).

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m ($d=80$).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 ($n_{well}=30$).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.025 gr/cm^3 ($r_s=1.025$).

Από την εκτέλεση αυτή προκύπτει:

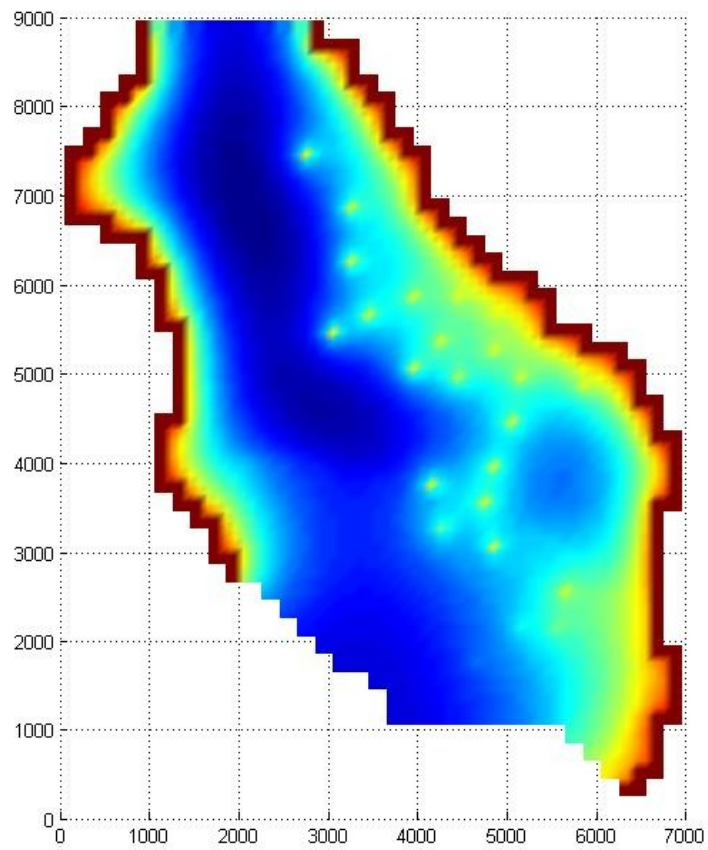
30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-81.539	1
1	22	33	-56.691	2
1	28	33	-64.331	3
1	32	40	-34.465	4
1	32	45	-14.255	5
1	34	35	-54.707	6
1	34	49	-6.6743	7
1	36	31	-85.266	8
1	37	43	-32.263	9
1	38	49	-21.988	10
1	40	40	-60.178	11
1	41	45	-40.994	12
1	41	52	-27.934	13
1	42	59	-16.951	14
1	46	51	-48.341	15
1	51	49	-51.680	16
1	53	42	-72.017	17
1	55	48	-47.784	18
1	58	43	-150.00	19
1	60	49	-74.580	20
1	65	57	-113.51	21
1	69	52	-55.624	22
1	69	56	-69.093	23
1	73	47	-40.233	24
1	73	52	0.0000	25
1	73	56	0.0000	26
1	77	52	0.0000	27
1	77	56	0.0000	28
1	79	48	0.0000	29
1	83	62	0.0000	30

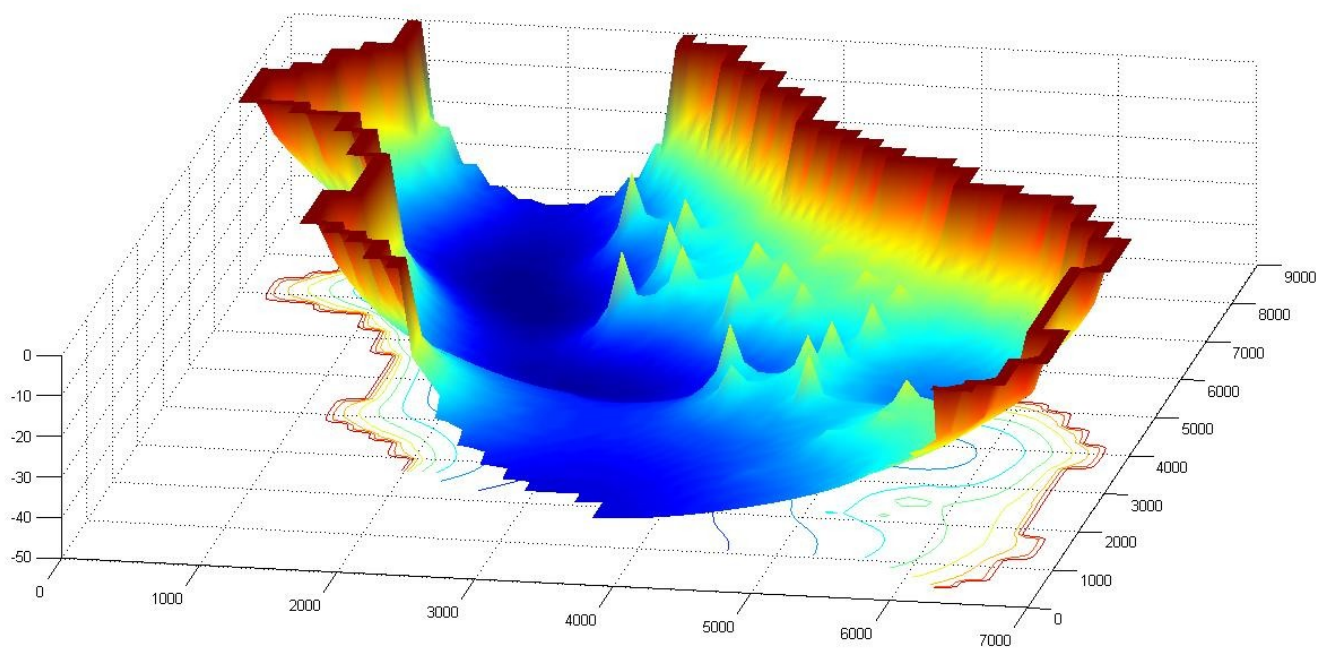
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9363.0762	CONSTANT HEAD =	25.6523
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1164223.1200	TOTAL IN =	3189.6523
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	682023.6250	CONSTANT HEAD =	1868.5579
WELLS =	482200.2500	WELLS =	1321.0966
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1164223.8700	TOTAL OUT =	3189.6543
IN - OUT =	-0.7500	IN - OUT =	-1.9531E-03
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 21 και 22.



Εικόνα 21 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 22 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Όπως είναι φανερό, η αντλούμενη ποσότητα νερού ώστε να μην υπάρχει υφαλμύριση σε βάθος μικρότερο των 20m μειώθηκε αρκετά, μάλιστα σε 6 παράκτιες γεωτρήσεις οι αντλήσεις μηδενίστηκαν δείχνοντας ότι δεν υπάρχει περιθώριο άντλησης για την εφαρμογή του παραπάνω περιορισμού. Για το ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος υφαλμύρισης των 15m από την ΜΣΘ η μέγιστη επιτρεπόμενη ετήσια αθροιστική άντληση διαμορφώνεται σε 560931.50 m³/year, ενώ για ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος 20m από τη ΜΣΘ. η μέγιστη επιτρεπόμενη αθροιστική ετήσια άντληση διαμορφώνεται σε 482200.25 m³/year. Για αύξηση λοιπών του περιθωρίου ασφάλειας κατά 5m η μείωση των μεγίστων ετήσιων τιμών διαμορφώνεται σε ποσοστό 14.04%.

7.1.1.2 Περιορισμός της ανύψωσης στο βάθος των 25m από την επιφάνεια του υδροφορέα.

Σε αυτή την εκτέλεση το βάθος όλων των γεωτρήσεων ορίστηκε το ίδιο και ίσο με 25m (d_{min}=25).

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m (d=80).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 (n_{well}=30).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm³ (r_f=1.000).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.025 gr/cm³ (r_s=1.025).

Από την εκτέλεση αυτή προκύπτει:

30 WELLS

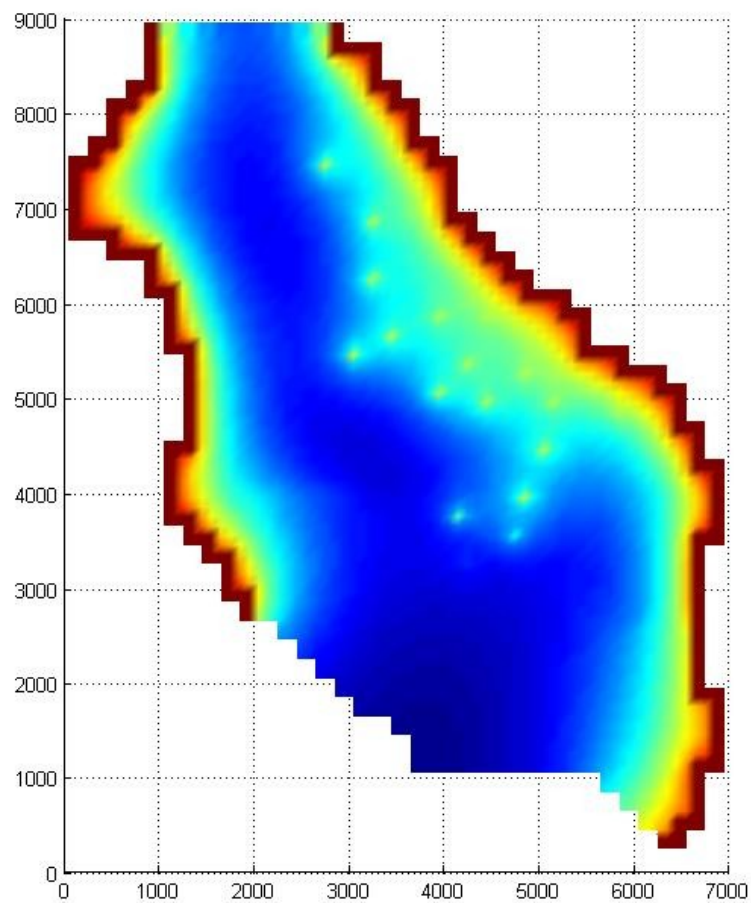
LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.

1	16	28	-73.576	1
1	22	33	-50.594	2
1	28	33	-60.963	3
1	32	40	-31.862	4
1	32	45	-8.7609	5
1	34	35	-54.283	6
1	34	49	0.0000	7
1	36	31	-84.974	8
1	37	43	-30.988	9
1	38	49	-18.893	10
1	40	40	-63.727	11
1	41	45	-46.486	12
1	41	52	-26.340	13
1	42	59	-10.152	14
1	46	51	-54.455	15
1	51	49	-74.404	16
1	53	42	-91.433	17
1	55	48	-56.581	18
1	58	43	-57.626	19
1	60	49	0.0000	20
1	65	57	0.0000	21
1	69	52	0.0000	22
1	69	56	0.0000	23
1	73	47	0.0000	24
1	73	52	0.0000	25
1	73	56	0.0000	26
1	77	52	0.0000	27
1	77	56	0.0000	28
1	79	48	0.0000	29
1	83	62	0.0000	30

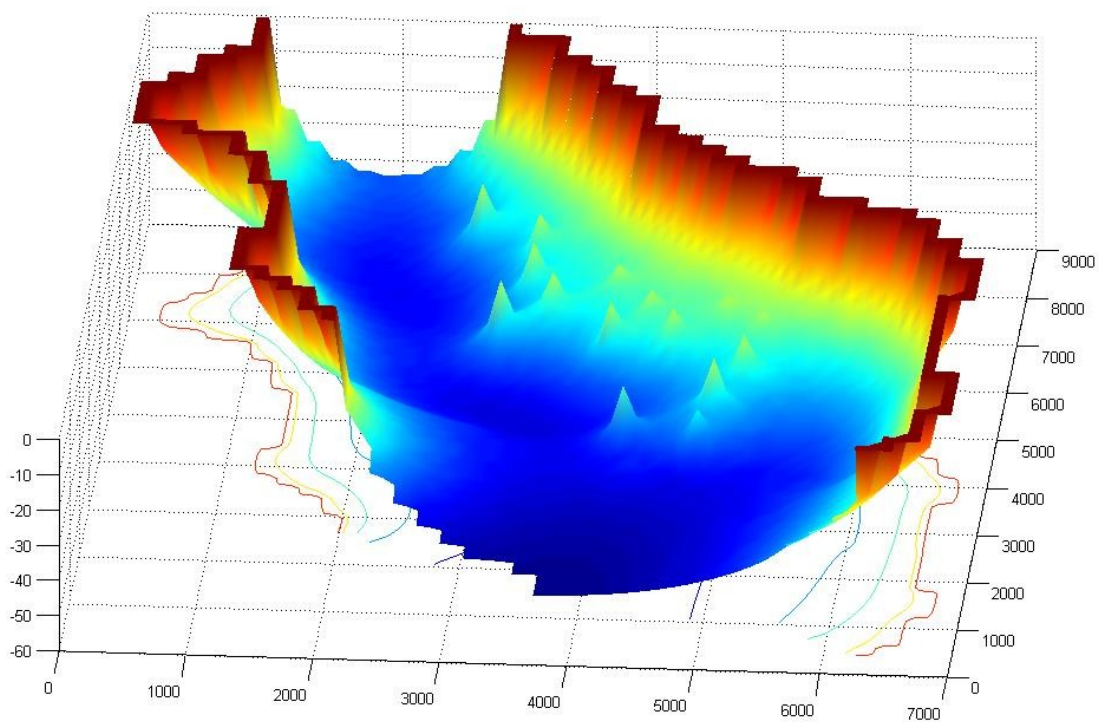
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9029.3066	CONSTANT HEAD =	24.7378
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1163889.2500	TOTAL IN =	3188.7378
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	836814.7500	CONSTANT HEAD =	2292.6431
WELLS =	327075.1560	WELLS =	896.0963
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1163889.8700	TOTAL OUT =	3188.7393
IN - OUT =	-0.6250	IN - OUT =	-1.4648E-03
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 23 και 24.



Εικόνα 23 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 24 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Με την παραπέρα αύξηση του ελάχιστου βάθους υφαλμύρισης από τα 20m στα 25m ο μέγιστος όγκος νερού που δύναται να αντληθεί σε ένα έτος μειώθηκε περισσότερο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι μηδενίστηκαν οι ρυθμοί άντλησης άλλων 5 γεωτρήσεων ακόμα και κοντά στις κεντρικές περιοχές της νήσου. Η συνολική ετήσια αθροιστική άντληση φτάνει τα 327075.16 m³/year. Το νούμερο αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της προς άντληση ποσότητας γλυκού νερού κατά 41.61% συγκριτικά με το αρχικό σενάριο του βάθους των 15m από τη ΜΣΘ.

Γίνεται φανερό λοιπών ότι αύξηση του επιτρεπόμενου βάθους υφαλμύρισης προκειμένου να μειωθεί ο κίνδυνος ανύψωσης του μετώπου κοντά στη ΜΣΘ έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ποσότητα νερού που μπορεί να εξαχθεί από τον υδροφορέα. Ένα τέτοιο σενάριο μείωσης της αντλούμενης ποσότητας νερού αν και είναι περιβαλλοντικά ωφέλιμο στην πραγματικότητα μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες για την καθημερινή ζωή και την ανάπτυξη της οικονομίας σε ένα νησί. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να εξεταστούν και εναλλακτικά σενάρια για τη διαχείριση των αντλήσεων.

7.1.2 Αύξηση του περιορισμού του βάθους στις κεντρικές και μείωση του στις παράκτιες γεωτρήσεις.

Με την άρση του περιορισμού της ταπείνωσης του βάθους της διεπιφάνειας στις περιφερειακές γεωτρήσεις αναμένεται αύξηση της δυνατότητας άντλησης αυτών. Αυτό μπορεί να έχει όμως σαν συνέπεια την διείσδυση της υδάτινης σφήνας προς το εσωτερικό της νήσου. Το γεγονός αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί αν στο εσωτερικό της νήσου τεθεί ένας περιορισμός ώστε να μην επιτραπεί η άνοδος της διεπιφάνειας σε βάθος χαμηλότερο από αυτό των παράκτιων γεωτρήσεων.

Μια τέτοια αντιμετώπιση μπορεί να δοκιμαστεί προκειμένου να διαπιστωθεί αν αξίζει να «θυσιαστούν» παράκτιες ζώνες προκειμένου να διατηρηθεί η ευαίσθητη γεωμετρία του επιπλέοντος φακού. Λόγω του μεγάλου βάθους του υδροφορέα και της μη ύπαρξης αδιαπέρατου γεωλογικού σχηματισμού στον πυθμένα του, όπως έχει προαναφερθεί, το γλυκό νερό του υδροφορέα επιπλέει πάνω στο υφάλμυρο νερό.

Είναι φανερό λοιπόν ότι δεν έχει σημασία μόνον ο περιορισμός του μετώπου της υφαλμύρισης στις παράκτιες ζώνες αλλά σε όλη την έκταση της νήσου. Επίσης είναι φανερό ότι σε περίπτωση εμφάνισης υφαλμύρισης σε κεντρικά σημεία της νήσου αυτό θα έχει δυσμενέστερες συνέπειες συγκριτικά με την εμφάνιση υφαλμύρισης σε μία ήδη υφαλμυρισμένη παράκτια ζώνη.

Με αυτό το σκεπτικό θα γίνει προσπάθεια να διατηρηθεί μεγάλο βάθος γλυκού νερού στα κεντρικά της νήσου ενώ θα επιτραπεί υποχώρηση του γλυκού νερού σε παράκτιες περιοχές.

7.1.2.1 Περιορισμός της ανύψωσης κεντρικά στα 20m και περιφερειακά στα 10m.

Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται να διερευνηθεί το αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός τέτοιου σεναρίου. Συγκεκριμένα, τα βάθη των γεωτρήσεων ορίζονται όπως φαίνεται στον πίνακα 5.

Πίνακας 5

Αριθμός γεώτρησης	Βάθος
1	20
2	20
3	20
4	20
5	20
6	20
7	20
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	20
15	20
16	20
17	20

18	20
19	20
20	20
21	20
22	20
23	20
24	20
25	20
26	10
27	10
28	10
29	10
30	10

Για να γίνει αυτό στο πρόγραμμα τα βάθη ορίστηκαν χειροκίνητα υπό τη μορφή διανύσματος όπως φαίνεται παρακάτω.

```
3 - dmin=[20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;20;10;10;10;10;10;10] '
4 - nwell=30;
5 - d=80;
```

Όπως και σε προηγούμενες δοκιμές:

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m (d=80).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 (nwell=30).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.025 gr/cm^3 ($r_s=1.025$).

Από την εφαρμογή των παραπάνω προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

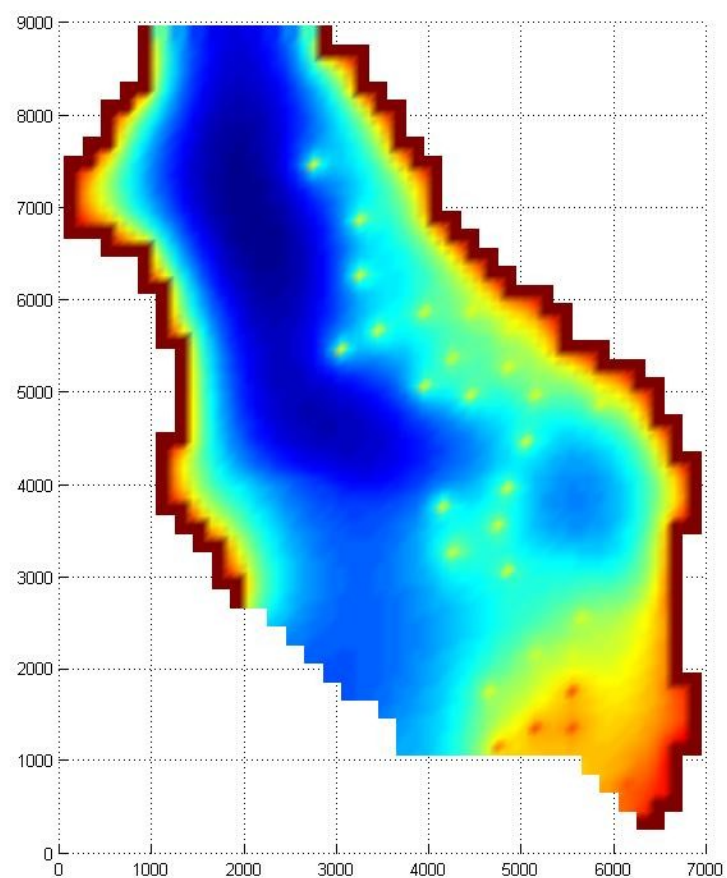
30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-81.493	1
1	22	33	-56.629	2
1	28	33	-64.162	3
1	32	40	-34.353	4
1	32	45	-14.236	5
1	34	35	-54.223	6
1	34	49	-6.6100	7
1	36	31	-84.153	8
1	37	43	-30.900	9
1	38	49	-21.579	10
1	40	40	-58.615	11
1	41	45	-42.222	12
1	41	52	-27.435	13
1	42	59	-16.548	14
1	46	51	-46.975	15
1	51	49	-48.672	16
1	53	42	-61.226	17
1	55	48	-40.437	18
1	58	43	-150.00	19
1	60	49	-50.611	20
1	65	57	-60.977	21
1	69	52	-50.895	22
1	69	56	-15.321	23
1	73	47	-85.093	24
1	73	52	-2.2727	25
1	73	56	-69.713	26
1	77	52	-62.871	27
1	77	56	-45.857	28
1	79	48	-87.689	29
1	83	62	-19.071	30

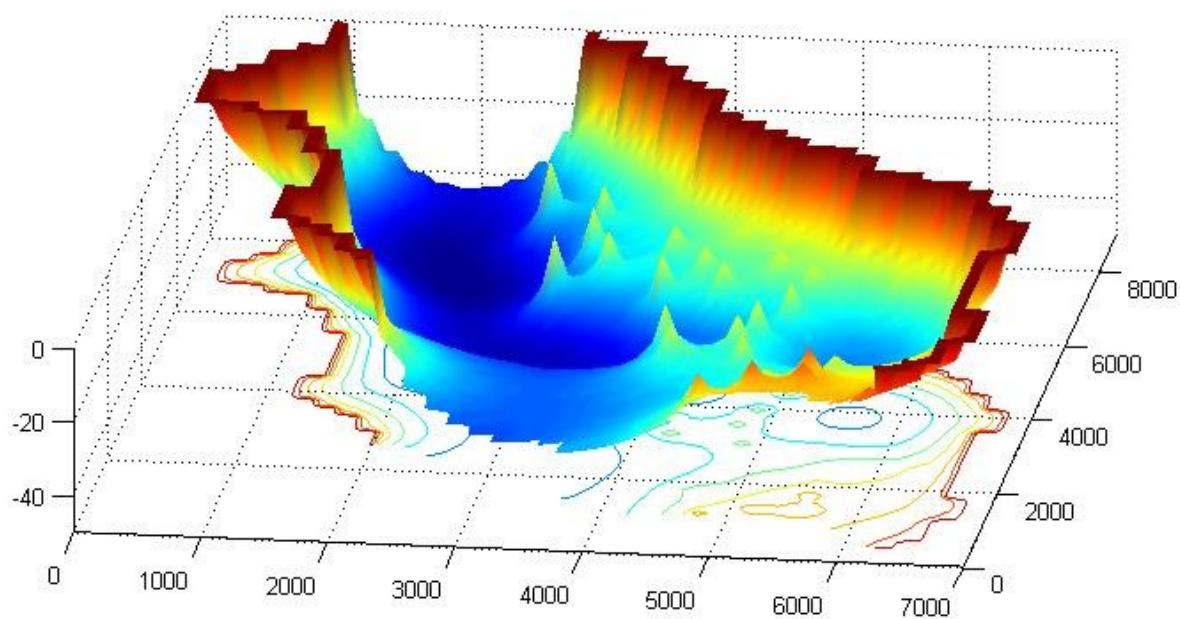
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS
PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9366.0762	CONSTANT HEAD =	25.6605
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1164226.1200	TOTAL IN =	3189.6604
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	620070.3750	CONSTANT HEAD =	1698.8230
WELLS =	544156.0630	WELLS =	1490.8385
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1164226.5000	TOTAL OUT =	3189.6616
IN - OUT =	-0.3750	IN - OUT =	-1.2207E-03
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 25 και 26.



Εικόνα 25 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 26 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Όπως ήταν αναμενόμενο η συνολική ποσότητα του νερού που μπορεί να αντληθεί έχει αυξηθεί σε σχέση με τη δοκιμή 7.1.1.1 όπου το βάθος είχε οριστεί στα 20m. Συγκεκριμένα, η συνολική ημερήσια ποσότητα της άντλησης ανήλθε σε 1490.84 m³/d από 1321.10 m³/d και 896.10 m³/d για τον περιορισμό του βάθους των 20m και 25m αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα είναι λογικό δεδομένου ότι ο περιορισμός του βάθους των 20m έχει αρθεί στις παράκτιες γεωτρήσεις και έγινε 10m.

7.1.2.2 Περιορισμός της ανύψωσης στα 25m, 20m και 15m από κεντρικές προς περιφερειακές γεωτρήσεις.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 28 υπάρχει ανάγκη περεταίρω προστασίας των κεντρικών γεωτρήσεων, για το λόγο αυτό, οι γεωτρήσεις 16,17,18,19,20 περιορίζονται σε ανύψωση του υφάλμυρου νερού στα 25m βάθος. Ταυτόχρονα επιδιώκεται η μείωση του ύψους και στις παράκτιες γεωτρήσεις 5,7,17 στα 10m βάθους. Στον πίνακα 6 που ακολουθεί φαίνονται τα βάθη όπως ορίστηκαν για αυτή τη δοκιμή.

Πίνακας 6

Αριθμός γεώτρησης	Βάθος
1	20
2	20
3	20
4	20

5	10
6	20
7	10
8	20
9	20
10	20
11	20
12	20
13	20
14	10
15	20
16	25
17	25
18	25
19	25
20	25
21	20
22	20
23	20
24	20
25	20
26	10
27	10
28	10

29	10
30	10

Όπως και σε προηγούμενες δοκιμές:

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m ($d=80$).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 ($n_{well}=30$).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.025 gr/cm^3 ($r_s=1.025$).

Από την εφαρμογή των παραπάνω προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

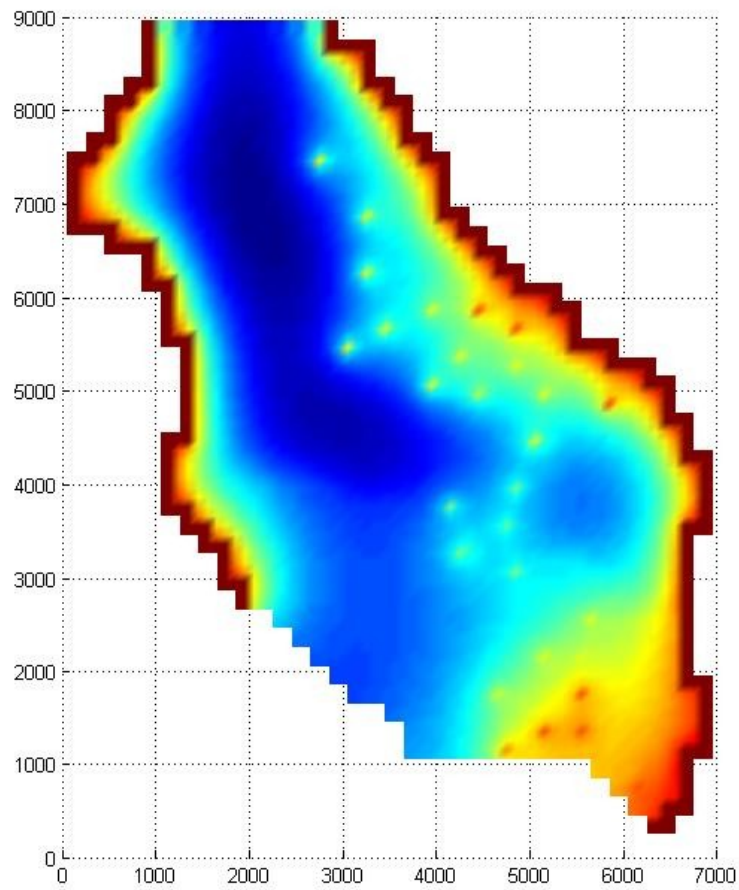
30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-81.493	1
1	22	33	-56.529	2
1	28	33	-63.960	3
1	32	40	-31.449	4
1	32	45	-29.628	5
1	34	35	-54.057	6
1	34	49	-22.637	7
1	36	31	-84.638	8
1	37	43	-29.135	9
1	38	49	-17.925	10
1	40	40	-59.598	11
1	41	45	-40.230	12
1	41	52	-26.163	13
1	42	59	-34.300	14
1	46	51	-49.706	15
1	51	49	-41.857	16
1	53	42	-55.262	17
1	55	48	-33.308	18
1	58	43	-131.93	19
1	60	49	-38.507	20
1	65	57	-66.660	21
1	69	52	-60.505	22
1	69	56	-17.203	23
1	73	47	-88.107	24
1	73	52	-3.4110	25
1	73	56	-70.517	26
1	77	52	-65.606	27
1	77	56	-46.598	28
1	79	48	-86.238	29
1	83	62	-19.184	30

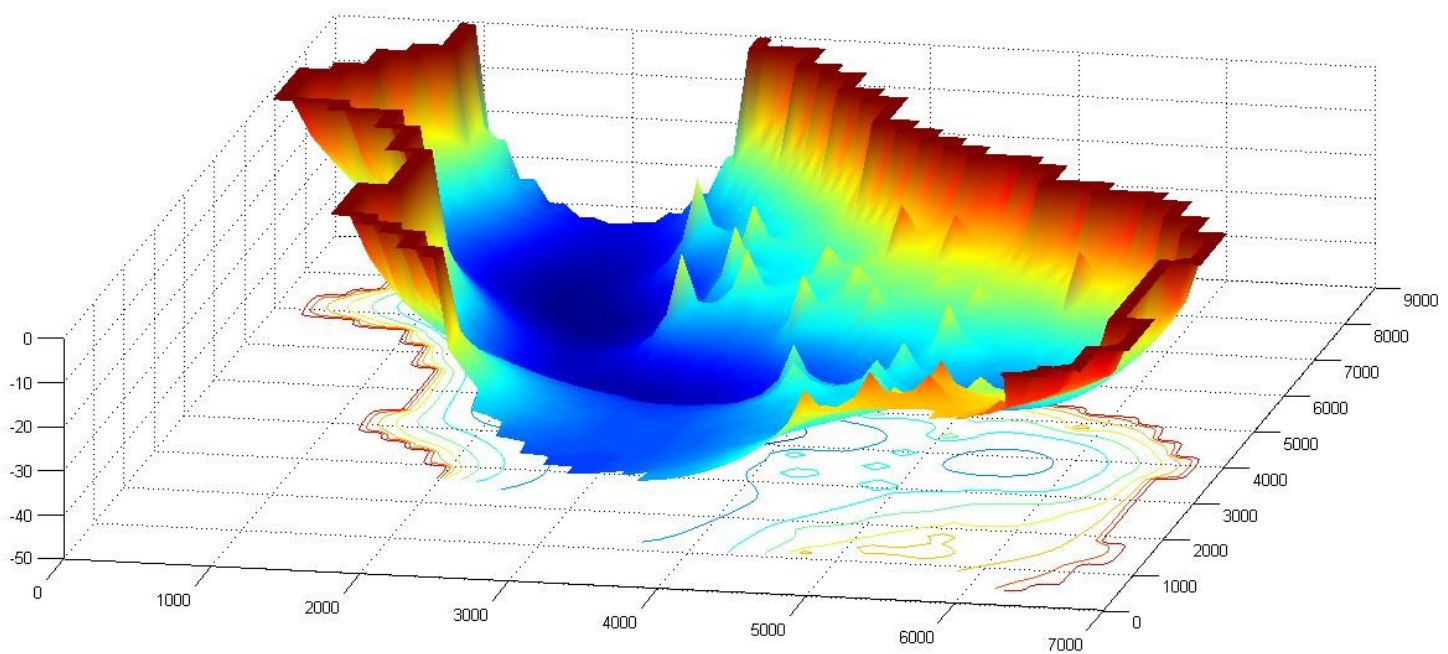
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9365.4033	CONSTANT HEAD =	25.6586
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1164225.3700	TOTAL IN =	3189.6587
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	614412.2500	CONSTANT HEAD =	1683.3213
WELLS =	549813.8130	WELLS =	1506.3392
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1164226.0000	TOTAL OUT =	3189.6606
IN - OUT =	-0.6250	IN - OUT =	-1.9531E-03
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 27 και 28.



Εικόνα 27 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 28 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Όπως φαίνεται και από αυτή τη δοκιμή τα αποτελέσματα των αντλήσεων αυξήθηκαν με την αθροιστική ετήσια τιμή αντλήσεων να πλησιάζει αρκετά στην αρχική τιμή των αντλήσεων. Συγκεκριμένα, η συνολική ημερήσια τιμή των αντλήσεων ανήλθε σε 1506.34 m³/d ενώ η αρχική τιμή αναφοράς είναι τα 1536.80 m³/d. Έχει ενδιαφέρον και αξία λοιπόν η περαιτέρω διερεύνηση συνδυασμών αντλήσεων ώστε να διατηρηθεί η βιωσιμότητα του υδροφορέα.

7.2 Εφαρμογή διόρθωσης για νερό μικρότερης πυκνότητας.

Ο συνήθης τρόπος υπολογισμού του βάθους της διεπιφάνειας του γλυκού – αλμυρού νερού, με την μέθοδο Ghyben – Herzberg μαζί με τις παραδοχές Dupuit είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη αναλυτικών λύσεων σε πολλά προβλήματα υφαλμύρισης. Στη βάση αυτών των παραδοχών ο Strack (1976) ανέπτυξε μια θεωρία ενιαίου δυναμικού για τον υπολογισμό των κρίσιμων ρυθμών άντλησης για ένα σενάριο παράκτιων αντλήσεων. Η παραδοχή της διεπιφάνειας και ειδικότερα της θεώρησης του Strack χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μελέτη της εισχώρησης της υφαλμύρισης και για την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων σε παράκτιες περιοχές. Η παραδοχή της διεπιφάνειας ωστόσο παραβλέπει την ανάμειξη και έμμεσα θεωρεί ότι το αλμυρό νερό παραμένει στάσιμο. Συνεπώς, αυτή η προσέγγιση, υπερεκτιμά τη διείσδυση του θαλασσινού νερού και υποβαθμίζει τους ρυθμούς άντλησης για την παροχή γλυκού νερού.

Οι Pool & Carrera (2011) διερευνήσανε το σφάλμα που εισάγεται με τη χρήση των παραπάνω προσεγγίσεων και συμπεριέλαβαν τις επιδράσεις της διασποράς στην διατύπωση του Strack. Για το σκοπό αυτό, εκτέλεσαν αριθμητικές τρισδιάστατες προσομοιώσεις ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Έτσι βρήκαν ότι οι εξισώσεις του Strack μπορούν να επεκταθούν και για την περίπτωση της ζώνης ανάμειξης αν ο παράγοντας των πυκνοτήτων πολλαπλασιαστεί με έναν εμπειρικό συντελεστή διασποράς $[1 - (\alpha_T/b')^{1/6}]$, όπου α_T είναι ο συντελεστής της εγκάρσιας

διασποράς και b' είναι το πάχος του υδροφορέα. Βρέθηκε λοιπόν ότι αυτός ο παράγοντας μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για την εκτίμηση του κρίσιμου ρυθμού άντλησης αλλά και για τη διόρθωση της εκτίμησης του βάθους της διεπιφάνειας με την μέθοδο Ghyben – Herzberg.

Αν και δεν είναι ακόμα γνωστό αν η παραπάνω πρόταση ισχύει και για την περίπτωση του επιπλέοντος φακού, διότι η πρόταση αναφέρεται σε υδροφορέα όπου το γλυκό νερό συναντά την βάση του, με επιφύλαξη, θα γίνει προσαρμογή της πυκνότητας σε χαμηλότερη τιμή στα πλαίσια της διερεύνησης της εργασίας.

Έτσι επιλέγεται τιμή διορθωμένης πυκνότητας για το θαλασσινό νερό $r_s=1.01427 \text{ gr/cm}^3$.

Έτσι η πυκνότητα του αλμυρού νερού στο πρόγραμμα αντικαθίσταται με τη νέα όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα.

```
2 - | rf=1.000; % άέääέέι äáñîð æøðêîð íäñîð (gr/cm3) (îñέæäðáέ äðî ðî ðñóðç)
3 - | rs=1.01427; % άέääέέι äáñîð äêîðñîð íäñîð (gr/cm3) (îñέæäðáέ äðî ðî ðñóðç)

30 - | ksi2n=sqrt(2*phin./(1.01427*0.01427));
```

Σε αυτή την εκτέλεση το βάθος όλων των γεωτρήσεων ορίστηκε το ίδιο και ίσο με 15m ($d_{min}=15$).

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m ($d=80$).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 ($n_{well}=30$).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.01427 gr/cm^3 ($r_s=1.01427$).

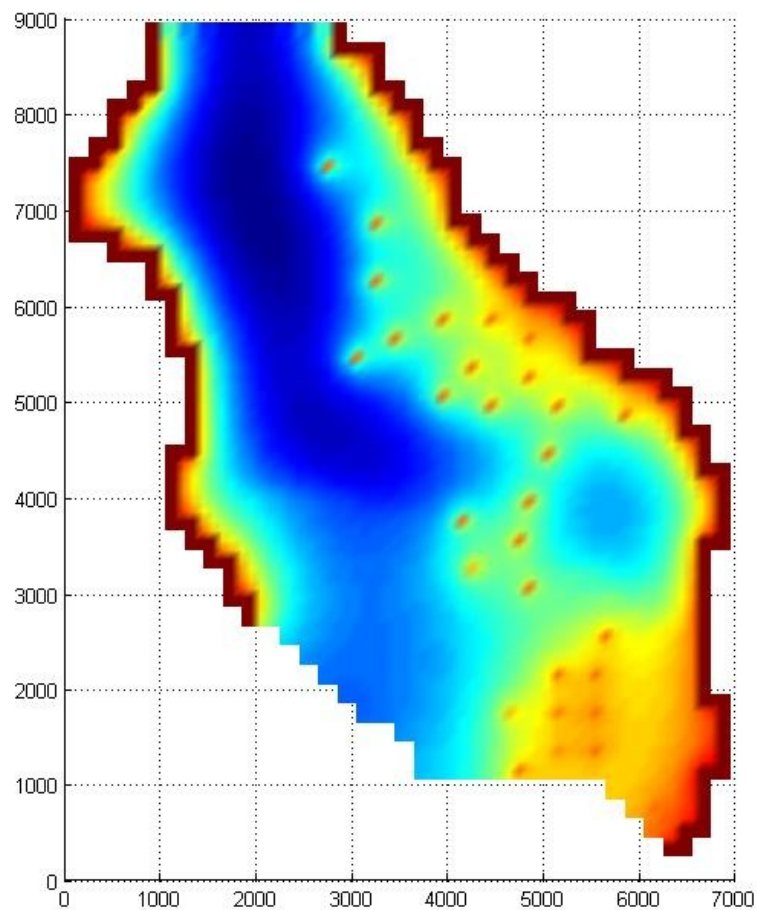
30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-91.319	1
1	22	33	-64.257	2
1	28	33	-68.893	3
1	32	40	-38.215	4
1	32	45	-21.204	5
1	34	35	-56.712	6
1	34	49	-15.109	7
1	36	31	-88.684	8
1	37	43	-33.142	9
1	38	49	-25.125	10
1	40	40	-60.476	11
1	41	45	-43.486	12
1	41	52	-32.230	13
1	42	59	-28.263	14
1	46	51	-49.737	15
1	51	49	-50.981	16
1	53	42	-66.509	17
1	55	48	-43.354	18
1	58	43	-150.00	19
1	60	49	-56.380	20
1	65	57	-81.301	21
1	69	52	-72.695	22
1	69	56	-44.441	23
1	73	47	-96.123	24
1	73	52	-38.760	25
1	73	56	-33.222	26
1	77	52	-30.145	27
1	77	56	-34.749	28
1	79	48	-76.581	29
1	83	62	-13.132	30

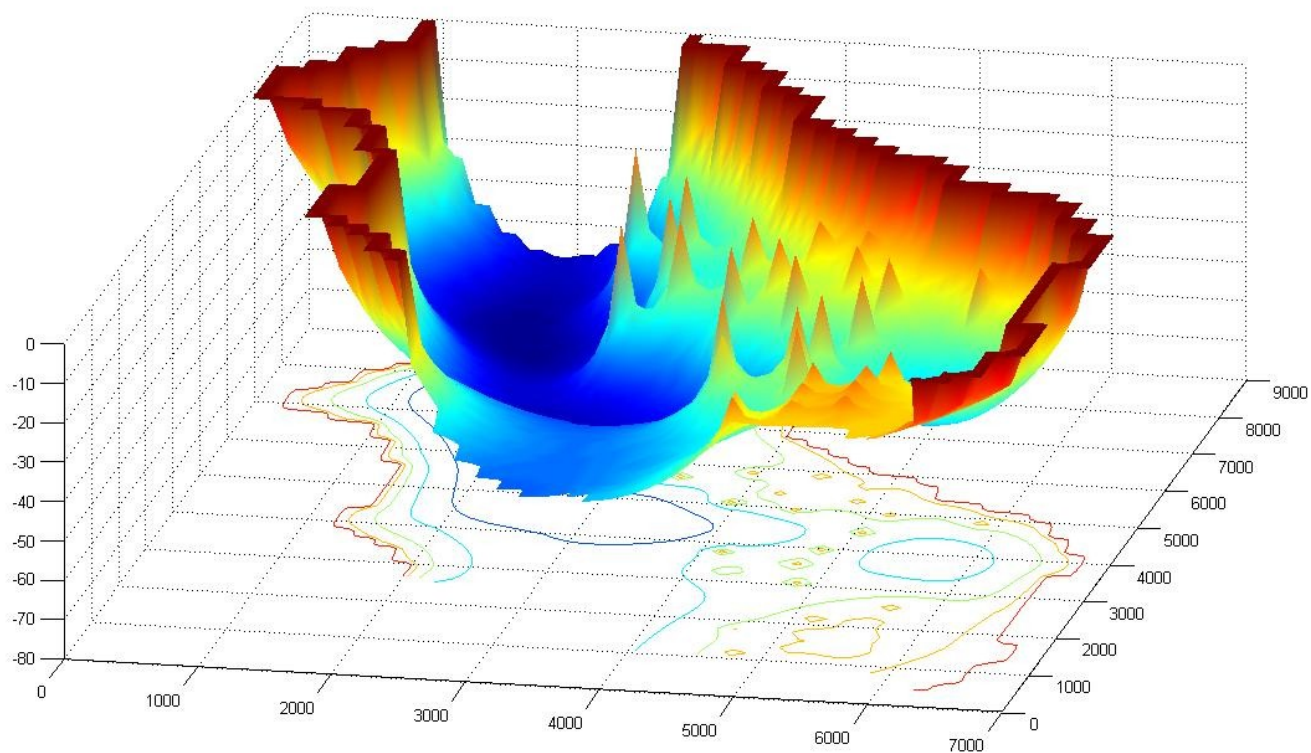
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9764.8789	CONSTANT HEAD =	26.7531
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1164624.8700	TOTAL IN =	3190.7532
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	578717.5000	CONSTANT HEAD =	1585.5275
WELLS =	585907.6880	WELLS =	1605.2266
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1164625.2500	TOTAL OUT =	3190.7539
IN - OUT =	-0.3750	IN - OUT =	-7.3242E-04
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 29 και 30.



Εικόνα 29 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 30 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Με την εφαρμογή της μείωσης της πυκνότητας του θαλασσινού νερού από 1.025 gr/cm^3 σε 1.01427 gr/cm^3 είναι αναμενόμενο ότι η εισχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης θα είναι μικρότερη από ότι στην αρχική περίπτωση. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στην διεπιφάνεια από την πλευρά της θάλασσας είναι μειωμένες. Έτσι σε αυτή τη δοκιμή προέκυψε δυνατότητα παραπάνω άντλησης μέχρι να φτάσει υφάλμυρο νερό στις γεωτρήσεις-σημεία ελέγχου. Συγκεκριμένα, η συνολική ημερήσια αντλούμενη ποσότητα νερού ανήλθε στην τιμή των $1605.23 \text{ m}^3/\text{d}$ σε αντιδιαστολή με την αρχική τιμή της αρχικής εκτέλεσης των $1536.80 \text{ m}^3/\text{d}$. Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της δυνατότητας άντλησης κατά 4.45% .

7.3 Εφαρμογή διόρθωσης της πυκνότητας του θαλασσινού νερού για νερό μεγαλύτερης αλατότητας.

Στην πραγματικότητα το νερό της ανατολικής μεσογείου έχει μεγαλύτερη αλατότητα από τη μέση τιμή των ωκεανών που έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σε πολλές περιπτώσεις. Όντας σχεδόν πλήρως περιορισμένη ανάμεσα σε χερσαία τμήματα η μεσόγειος θάλασσα έχει ιδιαίτερες συνθήκες που έχουν επηρεαστεί από το γεγονός αυτό. Οι παλίρροιες είναι ελάχιστες ως αποτέλεσμα της πολύ περιορισμένης σύνδεσης με τον ατλαντικό ωκεανό. Η εξάτμιση υπερβαίνει κατά πολύ τις κατακρημνίσεις, τις ποτάμιες και επιφανειακές απορροές, γεγονός που είναι βασικής σημασίας για την κυκλοφορία του νερού στη λεκάνη της μεσογείου. Η εξάτμιση είναι ιδιαίτερα υψηλή στο ανατολικό ήμισυ, οδηγώντας στην πτώση της στάθμης του νερού και στην αύξηση της αλατότητας του προς τα ανατολικά (*Kay-Christian Emeis et al., 2000*). Στην περιοχή του Αιγαίου Πελάγους, η πυκνότητα του νερού μπορεί να πάρει τιμές έως και 1029.64 kg/m^3 (*Zervakis et al., 2000*).

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να γίνει δοκιμή για μεγαλύτερη πυκνότητα νερού. Η προσομοίωση θα γίνει για την στρογγυλοποιημένη τιμή της πυκνότητας του θαλασσινού νερού στα 1030 kg/m^3 .

Σε αυτή τη δοκιμή λοιπόν,

Το βάθος του υδροφορέα έχει οριστεί στα 80m ($d=80$).

Ο αριθμός των γεωτρήσεων ίσος με 30 ($n_{well}=30$).

Το βάθος των γεωτρήσεων ίσο με 15m ($d_{min}=15$).

Η πυκνότητα του γλυκού νερού ίση με 1.000 gr/cm^3 ($r_f=1.000$).

Η πυκνότητα του θαλασσινού νερού ίση με 1.030 gr/cm^3 ($r_s=1.0230$).

Από αυτή τη δοκιμή προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα.

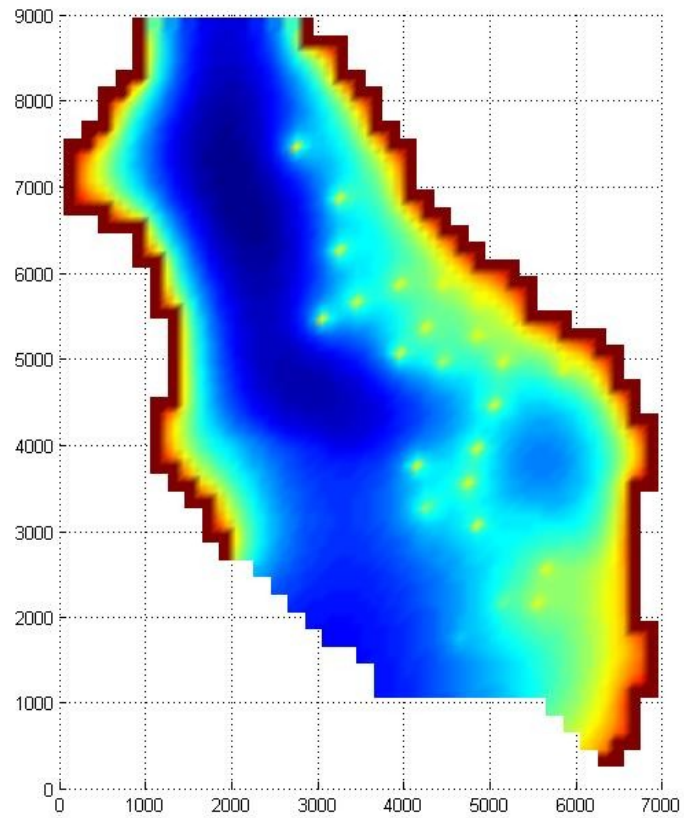
30 WELLS

LAYER	ROW	COL	STRESS RATE	WELL NO.
1	16	28	-86.139	1
1	22	33	-60.245	2
1	28	33	-66.445	3
1	32	40	-36.275	4
1	32	45	-17.638	5
1	34	35	-55.596	6
1	34	49	-10.799	7
1	36	31	-86.640	8
1	37	43	-33.416	9
1	38	49	-24.114	10
1	40	40	-60.716	11
1	41	45	-37.411	12
1	41	52	-30.252	13
1	42	59	-22.229	14
1	46	51	-49.213	15
1	51	49	-51.861	16
1	53	42	-66.891	17
1	55	48	-38.045	18
1	58	43	-150.00	19
1	60	49	-58.485	20
1	65	57	-78.953	21
1	69	52	-80.193	22
1	69	56	-48.695	23
1	73	47	-86.919	24
1	73	52	-49.530	25
1	73	56	-39.292	26
1	77	52	-7.1172	27
1	77	56	0.0000	28
1	79	48	-52.283	29
1	83	62	0.0000	30

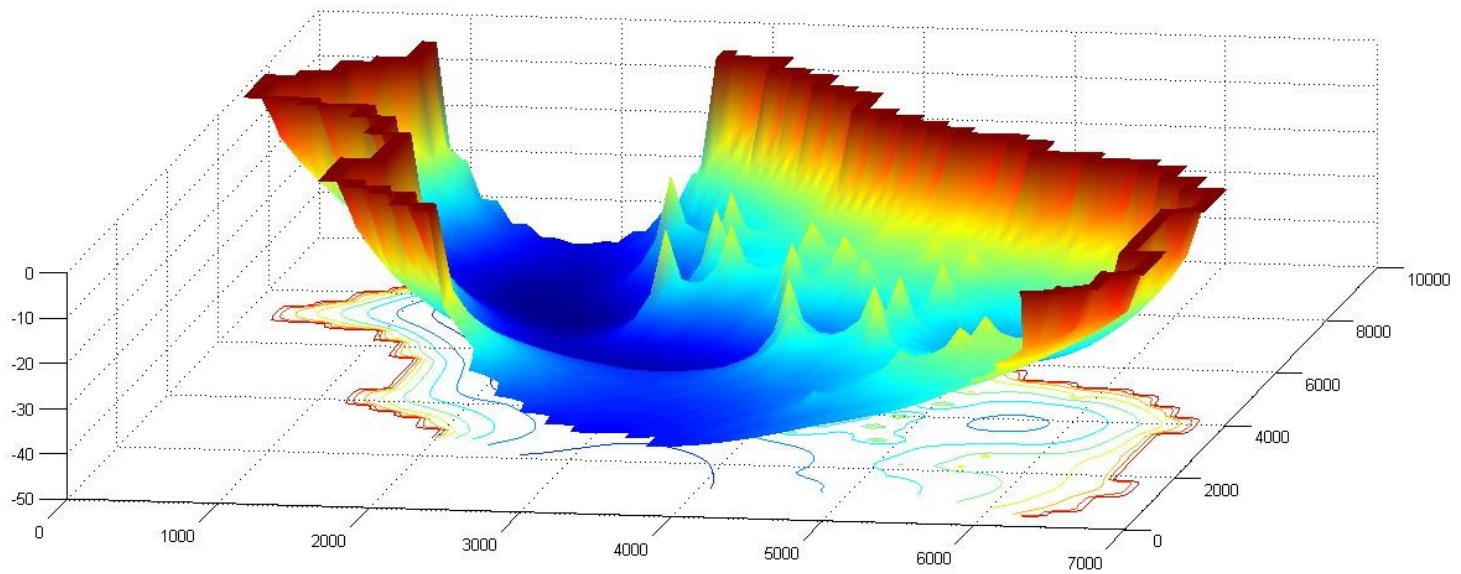
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
CONSTANT HEAD =	9553.2344	CONSTANT HEAD =	26.1732
WELLS =	0.0000	WELLS =	0.0000
RECHARGE =	1154860.0000	RECHARGE =	3164.0000
TOTAL IN =	1164413.2500	TOTAL IN =	3190.1733
OUT:		OUT:	
----		----	
CONSTANT HEAD =	622245.9380	CONSTANT HEAD =	1704.7834
WELLS =	542167.8750	WELLS =	1485.3915
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	1164413.7500	TOTAL OUT =	3190.1748
IN - OUT =	-0.5000	IN - OUT =	-1.4648E-03
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 31 και 32.



Εικόνα 31 Απεικόνιση της ανύψωσης της διεπιφάνειας, το μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει μεγάλο βάθος ενώ αντίστοιχα το κόκκινο μικρό.



Εικόνα 32 Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.

Στην περίπτωση αυτής της δοκιμής ή μέγιστη ετήσια ποσότητα γλυκού νερού που μπορεί να αντληθεί από τον υδροφορέα δεν μπορεί να ξεπερνά τα $54216.88 \text{ m}^3/\text{year}$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε μείωση της άντλησης στο 3.35% σε σχέση με την αρχική τιμή αναφοράς των $560931.5 \text{ m}^3/\text{year}$.

Όπως είναι γνωστό, σύμφωνα με τη προσέγγιση των Ghyben & Herzberg, μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δύο υδάτινων σωμάτων επιφέρει μεγαλύτερη διείσδυση υφάλμυρου νερού στον υδροφορέα. Το γεγονός αυτό προσθέτει μια παραπάνω εξήγηση και στο γιατί στη λεκάνη της Μεσογείου το φαινόμενο της υφαλμύρισης είναι τόσο έντονο. Έτσι είναι φυσικό να περιορίζεται η δυνατότητα άντλησης γλυκού νερού από τον υδροφορέα.

8. Συμπεράσματα και προτάσεις

8 Γενικά συμπεράσματα για τη διαχείριση των αντλήσεων της Ν.Θήρας

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της Ν. Θήρας, μια προσπάθεια ανάλυσης ποσοτικών χαρακτηριστικών για τα υδατικά αποθέματα του κεντρικού υδροφορέα του νησιού Βουρβούλου – Καμαρίου. Επίσης έγινε προσπάθεια προσδιορισμού του υδατικού ισοζυγίου του εδάφους προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσότητα του νερού προερχόμενου από κατακρημνίσματα που καταλήγει τελικά στον υδροφορέα.

Η εκτίμηση της κατείσδυσης έγινε με τη βοήθεια της σουίτας CLASS και συγκεκριμένα με τη χρήση του εργαλείου CLASS U3M-1D. Η τιμή που προέκυψε για την κατείσδυση θεωρήθηκε ρεαλιστική συγκρινόμενη με προηγούμενες εκτίμησης ερευνητών και κρίθηκε ικανοποιητική για χρήση σε περεταίρω υπολογισμούς και εκτιμήσεις.

Εν συνεχεία, με χρήση του κώδικα βελτιστοποίησης μέγιστης αειφόρου άντλησης έγινε διερεύνηση σεναρίων άντλησης τα οποία θα μπορούσαν να αποδώσουν μεγαλύτερη συνολικά αντλούμενη ποσότητα νερού ανά έτος από προηγούμενες ερευνητικές προτάσεις. Για κάθε τέτοιο σενάριο ορίζονταν εκ των προτέρων η οριακή συνθήκη της εισχώρησης της υφαλμύρισης και γίνονταν συσχετισμός περιβαλλοντικού κόστους και οφέλους.

Επιπλέον με χρήση του παραπάνω μοντέλου έγιναν διορθώσεις που προτάθηκαν από τους Pool & Carrera αναφορικά με την χρήση μοντέλων sharp interface για την περιγραφή της υφαλμύρισης. Τέλος, έγινε σενάριο διόρθωσης της πυκνότητας του

θαλασσινού νερού λόγω της αυξημένης αλατότητας της λεκάνης της Μεσογείου.

Η Σαντορίνη είναι ένα νησί μεγάλου τουριστικού ενδιαφέροντος λόγω της φυσικής της ομορφιάς αλλά και της μοναδικότητας της λόγω της καλδέρας που σχηματίστηκε λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Κάθε χρόνο προσελκύει πολλούς επισκέπτες ενώ λόγω της τουριστικής ανάπτυξης ο μόνιμος πληθυσμός έχει αρχίσει να αυξάνεται. Είναι αυτονόητο λοιπόν ότι οι πιέσεις για παροχή άριστης ποιότητας πόσιμου νερού και νερού χρήσης είναι μεγάλες και συνεχώς αυξάνονται. Σε συνδυασμό μάλιστα με την μεταβολή του κλίματος και την μείωση των κατακρημνίσεων στην ανατολική Μεσόγειο, καθώς και με την ολοένα βαθύτερη εισχώρηση του υφάλμυρου νερού λόγω της παρούσας κατάστασης της υφαλμύρισης, το πρόβλημα εντείνεται και χωρίς την κατάλληλη διαχείριση και λήψη μέτρων, εντείνεται και με το πέρασμα του χρόνου η εύρεση βιώσιμης λύσης όλο και απομακρύνεται.

Γενικά το κλίμα της Ν. Θήρας είναι άνυδρο ειδικά κατά τους θερινούς μήνες. Αυτό καθιστά αναγκαία την άρδευση με αντλούμενο νερό των καλλιεργούμενων εκτάσεων.

8.1 Συμπεράσματα από την προσομοίωση της κατείσδυσης με το μοντέλο ακόρεστης ροής CLASS U3M-1D.

Η μέση υπερετήσια τιμή της κατείσδυσης, όπως υπολογίστηκε μέσω του προγράμματος CLASS U3M-1D για τη χρονική περίοδο 1974 – 2001 είναι ίση με 40.25mm/έτος. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή και χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τους υπόλοιπους υπολογισμούς. Λόγω έλλειψης ημερήσιων κλιματικών δεδομένων για το νησί της Σαντορίνης, χρησιμοποιήθηκαν γνωστά δεδομένα από μετρήσεις στη Μήλο. Η ύπαρξη όμως των ετησίων υψών βροχής επιτρέπει την στάθμιση των δεδομένων της Μήλου ώστε να μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις βροχοπτώσεις της Σαντορίνης. Αναφορικά με τα εδαφικά δεδομένα, λόγω πάλι της έλλειψης ακριβών πληροφοριών, έγινε εμπειρική επιλογή του τύπου εδάφους που θεωρήθηκε ότι προσομοιάζει καλύτερα την ακόρεστη ζώνη της περιοχής.

8.2 Συμπεράσματα από τις εφαρμογές του μοντέλου της μέγιστης αιφόρου άντλησης.

Η ποσότητα του νερού που μπορεί να αντληθεί από τον υδροφόρο μεταβάλλεται ανάλογα με τους περιορισμούς που τίθενται στον αλγόριθμο της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αρχικά όπως πρωτοπαρουσιάστηκε το πρόγραμμα ο περιορισμός ήταν το υφάλμυρο νερό να μην ανέλθει σε βάθος μικρότερο των 15m από τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτός ο περιορισμός έδωσε μέγιστη ετήσια άντληση 560931.5 m³. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε ως

μέτρο σύγκρισης της αποτελεσματικότητας των διαφορετικών επιλογών στα εφαρμοζόμενα σενάρια.

Η πρώτη σειρά αλλαγών έγινε ως προς το βάθος της ανύψωσης του υφάλμυρου νερού. Σκοπός ήταν να βρεθεί πώς σχετίζεται αυτή η παράμετρος με την δυνατότητα άντλησης του υδροφορέα. Στην πρώτη δοκιμή επιλέχτηκε το ύψος της υφάλμυρης σφήνας να μην ξεπερνά τα 20m βάθους ενώ στην δεύτερη δοκιμή το βάθος ορίστηκε στα 25m. Από αυτές προέκυψε, ετήσια αντλούμενη ποσότητα 482200.25 m³ και 327075.16 m³ αντίστοιχα που αντιστοιχούν σε μείωση κατά 14.04% και κατά 41.61% από την αρχική τιμή των αντλήσεων. Είναι φανερό λοιπόν πως κάθε αύξηση των περιθωρίων ασφαλείας αναφορικά με την εισχώρηση της υφαλμύρισης, μπορεί επιφέρει μείωση της δυνατής αντλούμενης ποσότητας νερού, που ανάλογα με το βαθμό ασφαλείας που είναι επιθυμητός, μπορεί να κυμαίνεται από μικρό ποσοστό έως και σημαντικό κλάσμα αυτής.

Η δεύτερη σειρά αλλαγών είχε να κάνει με την διαφοροποίηση των περιορισμών βάθους αναλόγως της θέσης των γεωτρήσεων. Εδώ πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές όπου στην πρώτη δημιουργήθηκαν δύο κατηγορίες γεωτρήσεων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκαν ορισμένες περιφερειακές γεωτρήσεις για τις οποίες τέθηκε ο περιορισμός της ανύψωσης στα 10m ενώ για τις κεντρικές αυτός ορίστηκε στα 20m. Σκοπός εδώ είναι να διαπιστωθεί αν υπάρχει δυνατότητα αύξησης της συνολικής άντλησης χωρίς να εισχωρήσει η υφαλμύριση κεντρικά στο νησί και ποιες οι συνέπειες μιας τέτοιας επιλογής. Σε αυτό το σενάριο η ετήσια αθροιστική άντληση ανήλθε στα 544156.06 m³ που αντιστοιχεί σε μείωση κατά 2.99%. Στην δεύτερη δοκιμή,

δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες γεωτρήσεων, η μια κατηγορία αποτελείτο από περιφερειακές γεωτρήσεις με περιορισμό ανύψωσης σε βάθος 10m, η επόμενη κατηγορία αποτελείτο από κεντρικότερες γεωτρήσεις με περιορισμό ανύψωσης στα 20m, ενώ δημιουργήθηκε και Τρίτη κατηγορία με κεντρικές γεωτρήσεις σε σημεία που παρατηρήθηκε πιθανότητα διακοπής της συνέχειας του φακού με μέγιστη ανύψωση της υφάλμυρης σφήνας στα 25m βάθους. Από αυτή τη δοκιμή προέκυψε μέγιστη δυνατή ετήσια άντληση 549813.81 m^3 με διαφορά μόλις 1.98% από το αρχικό σενάριο. Από τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί και δυνατότητες που ενδεχομένως να παρέχουν την δυνατότητα αύξησης των αντλήσεων προσφέροντας ένα βαθμό προστασίας σε ορισμένες περιοχές.

Η τρίτη αλλαγή αφορά περισσότερο στον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος και στην επίλυσή του. Σύμφωνα με τους Pool & Carrera (2011) η εισαγωγή ενός συντελεστή διόρθωσης της σχέσης των πυκνοτήτων του γλυκού και του αλμυρού νερού, μπορεί να εισάγει τη διόρθωση για την ανάμειξη στην σχέση Ghyben – Herzberg. Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω η πυκνότητα του θαλασσινού νερού μετά από τις διορθώσεις διαμορφώθηκε στην τιμή $\rho_s = 1.01427 \text{ gr/cm}^3$. Από αυτή την εφαρμογή προέκυψε αύξηση της δυνατότητας άντλησης στα $585907.69 \text{ m}^3/\text{year}$. Αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση κατά 4.45% από ότι την αρχική θεώρηση. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι έχει σημαντικότητα και ο τρόπος που θα επιλεγεί προκειμένου να περιγραφεί το πρόβλημα.

Τέλος, επιχειρήθηκε η αλλαγή της πυκνότητας που χρησιμοποιήθηκε για το θαλασσινό νερό προκειμένου να

περιγραφεί καλύτερα η αυξημένη αλατότητα που συναντάται στη λεκάνη της Μεσογείου θάλασσας. Έτσι θεωρήθηκε νέα πυκνότητα για το θαλασσινό νερό ίση με 1.030 gr/cm^3 . Από τα παραπάνω προέκυψε μέγιστη δυνατότητα άντλησης $542167.88 \text{ m}^3/\text{year}$ που αντιστοιχεί σε μείωση κατά 3.35% σε σχέση με την ποσότητα του αρχικού σεναρίου.

Τα σενάρια που σχεδιάστηκαν, δίνουν μία καλή πρώτη εικόνα για την συμπεριφορά του συστήματος και το πώς μπορούν οι αλλαγές των αντλήσεων να επηρεάσουν τον συγκεκριμένο υδροφορέα. Τα παραπάνω δεν αποτελούν όμως κάτι περισσότερο από υποθέσεις, απλοποιήσεις και μαθηματικές περιγραφές ενός φυσικού συστήματος του οποίου η συμπεριφορά εξαρτάται από πολλές παραμέτρους για τις οποίες ή δεν υπάρχει επαρκής πληροφορία είτε υπάρχει άγνοια. Επιπλέον, είναι καλό να επισημανθεί ότι επιλέχθηκε η χρήση μίας εκ των μεθόδων προσέγγισης για τέτοιου είδους προβλήματα χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι αυτή είναι και η βέλτιστη. Γίνεται λοιπόν φανερό ότι όσα έγιναν παραπάνω είναι ένα καλό πρώτο βήμα για τη διερεύνηση διαφόρων περιπτώσεων άντλησης και σε καμία περίπτωση δεν είναι αρκετά για την κατάστρωση ενός διαχειριστικού σχεδίου για τα υδάτινα αποθέματα της περιοχής.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια αντίστοιχων διπλωματικών εργασιών με σκοπό τη διερεύνηση των διαφορετικών δυνατοτήτων άντλησης υπό ορισμένες συνθήκες σε έναν από τους πλέον απειλούμενους παράκτιους υδροφορείς. Ως εκ τούτου έχουν γίνει αρκετές απλοποιήσεις και στην περιγραφή του προβλήματος αλλά και στον τρόπο επίλυσης και επεξεργασίας των δεδομένων. Μιας και απώτερος στόχος δεν είναι η επίλυση ενός τέτοιου σύνθετου προβλήματος, το οποίο απαιτεί συνεργασία πολλών φορέων και κατοίκων αλλά και ενδεχόμενη κατασκευή τεχνικών έργων, η παρούσα επικεντρώθηκε στη διερεύνηση των αρχών και των μηχανισμών που διέπουν τα φαινόμενα, καθώς και στην καλύτερη δυνατή χρήση υπολογιστικών εργαλείων για την προσομοίωση της πραγματικότητας. Έτσι όπως και σε κάθε αντίστοιχη εργασία υπάρχουν πτυχές που δεν έχουν αναλυθεί και αναπτύχτει πλήρως ενώ πολλές φορές μπορεί να μην έχουν ληφθεί καν υπόψη εσκεμμένα και μη. Ορισμένες λοιπών προτάσεις για περεταίρω έρευνα αλλά και βελτίωση περιλαμβάνονται παρακάτω.

- **Κατανομή της κατείσδυσης χρονικά σύμφωνα με τα επεισόδια βροχόπτωσης.**

Σε αυτή την εργασία για λόγους απλότητας θεωρήθηκε σταθερός ρυθμός κατείσδυσης καθ όλη τη διάρκεια του έτους. Ο ρυθμός αυτός δίνει την ημερήσια κατείσδυση η οποία προέκυψε από τη μέση τιμή των ετήσιων καεισδύσεων που με τη σειρά τους προέκυψαν από την διαίρεση της αθροιστικής κατείσδυσης με το σύνολο των ετών για τα οποία υπολογίστηκε. Αυτή η προσέγγιση

είναι πιθανόν να εισάγει σφάλμα στο υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα και κατά συνέπεια στην ποσότητα νερού που είναι εφικτό να αντληθεί. Έτσι προτείνεται να καταμεριστεί χρονικά η κατείσδυση σύμφωνα με τα επεισόδια βροχόπτωσης όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα. Τέτοια δυνατότητα δίνεται και από το πρόγραμμα CLASS U3M-1D.

- **Κατανομή της κατείσδυσης χωρικά σύμφωνα με τη μορφολογία αλλά και τη γεωλογία του εδάφους.**

Εκτός από την διαφοροποίηση της κατείσδυσης στο χρόνο η ποσότητα του νερού που κατεισδύει τελικά στον υδροφορέα εξαρτάται από το εδαφικό υλικό και συγκεκριμένα από τις υδραυλικές του ιδιότητες. Στην παρούσα περίπτωση θεωρήθηκε σε όλη την ζώνη διήθησης ίδιο εδαφικό υλικό με τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες σε κάθε σημείο. Στην πραγματικότητα υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις από θέση σε θέση ακόμα και αν η γεωλογία της περιοχής θεωρείται όμοια. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την κατείσδυση και κατά συνέπεια το υδατικό ισοζύγιο, είναι η κλίση του εδάφους. Το ποσοστό του νερού που τελικά θα διηθηθεί αντί να απομακρυνθεί με επιφανειακή απορροή παρουσιάζει αντίστροφη αναλογία με την κλίση του εδάφους. Και σε αυτή την περίπτωση το έδαφος θεωρήθηκε επίπεδο ώστε να γίνει χρήση του μοντέλου CLASS U3M-1D. Για μεγαλύτερη πιστότητα στα αποτελέσματα του υδατικού ισοζυγίου κρίνεται σκόπιμο να ληφθούν υπόψη και τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής και διήθησης.

- **Χρήση μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας για την περιγραφή της υφαλμύρισης αντί του μοντέλου διεπιφάνειας.**

Σε αυτή την εργασία έγινε χρήση του μοντέλου MODFLOW για την επίλυση του υδατικού ισοζυγίου και της υφαλμύρισης. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην θεωρία sharp interface όπως προτάθηκε από τους Ghyben & Herzberg. Αν και στην τελευταία δοκιμή έγινε μια προσπάθεια προσομοίωσης με την διόρθωση που εισήγαγαν οι Pool & Carrera, αξίζει να διερευνηθεί και η εκδοχή της χρήσης μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας όπως γίνεται με το πρόγραμμα FEFLOW.

- **Έλεγχος και χρήση όλων των γεωτρήσεων άντλησης που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα στο νησί.**

Επειδή ο σκοπός της εργασίας είναι διερευνητικός, για λόγους απλούστευσης επιλέχθηκε η χρήση 30 γεωτρήσεων άντλησης. Προκειμένου να μπορέσει να γίνει ακριβέστερη προσομοίωση της κατάστασης, αλλά και για να μπορέσουν να εξαχθούν αξιοποιήσιμα συμπεράσματα για τη διαχείριση του νερού στο νησί θα έπρεπε να συμπεριληφθούν υπόψη όλες οι γεωτρήσεις από τις οποίες αντλείται νερό. Η καταγραφή των αντλητικών γεωτρήσεων σε ένα νησί όπως η Θήρα είναι εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση, αρκεί να αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι περίπου το 50% του χρησιμοποιούμενου ύδατος στο νησί παρέχεται από ιδιώτες υδροπωλητές. Έτσι η καταγραφή και μόνο των γεωτρήσεων στη νήσο συνιστά από μόνη της μεγάλο βήμα στην κατάρτιση σχεδίου διαχείρισης των υδάτων.

- **Διερεύνηση μεθόδων και σεναρίων για τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα καθώς και των επιπτώσεων στην δυνατότητα των αντλήσεων.**

Στην παρούσα εργασία, έγινε προσπάθεια να βρεθεί η μέγιστη δυνατότητα άντλησης του υδροφορέα με την προϋπόθεση της σταθερής παροχής συνεχούς άντλησης. Τα αποτελέσματα προέκυψαν σύμφωνα με το υδατικό ισοζυγίου του υδροφορέα με τη φυσική του τροφοδοσία. Είναι ενδιαφέρον να γίνει μελέτη για σενάρια άντλησης και εμπλουτισμού κοντά στην υφάλμυρη ζώνη για την ανάσχεση του φαινομένου της υφαλμύρισης καθώς και σεναρίων εμπλουτισμού για αύξηση της ποσότητας του νερού στον υδροφορέα. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι ο υδροφορέας Βουρβούλου – Καμαρίου είναι περιορισμένος σε χωρητικότητα και οι ανάγκες υδροδότησης του νησιού αυξάνονται συνεχώς, είναι άξιο να γίνουν μελέτες για σενάρια εμπλουτισμού ιδιαίτερα με την χρήση μικρών φραγμάτων σε χείμαρρους για την κατακράτηση και μείωση του νερού της απορροής.

- **Διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων υδροδότησης σε συνδυασμό με τις αντλήσεις καθώς και της σχέσης κόστους ωφέλειας.**

Στην περίπτωση της συνολικής διαχείρισης των υδατικών πόρων αλλά και της υδροδότησης της νήσου δεν θα πρέπει να λείπει ο

έλεγχος και άλλων πρόσφορων εναλλακτικών λύσεων. Το θέμα της υδροδότησης εκτός από περιβαλλοντικό ζήτημα είναι και ζήτημα κατεξοχήν οικονομικό. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να γίνει διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων υδροδότησης όπως είναι για παράδειγμα, η μεταφορά νερού με πλοία, η αφαλάτωση με αντίστροφη όσμωση, η αφαλάτωση με ηλιακή εξάτμιση, η απορρόφηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας, η συλλογή ομβρίων κ.α. Τέτοιες προτάσεις απαιτούν και μελέτη του κόστους κατασκευής λειτουργίας και συντήρησης καθώς και των οχλήσεων στο περιβάλλον που μπορεί να προκληθούν.

Βιβλιογραφία - Αναφορές

Έντυπες εκδόσεις – Βιβλία

Καρατζάς, Γ. ,Ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων,
Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013

Τσακίρης, Γ., Υδατικοί πόροι 1. Τεχνική υδρολογία, Εκδόσεις
Συμμετρία, Αθήνα, 1995

Επιστημονικά άρθρα

1. Atkinson, T.C. (1986) Soluble rock terrains. In: A Handbook of Engineering Geomorphology, (ed. P.G. Fookes & P.R. Vaughn), Survey University Press, 241-257.
2. Elder, J. W. (1967) J. Fluid Mechanics. 27 (3), 609-623
3. Emeis, K-C et al., (2000), Temperature and salinity variations of Mediterranean Sea surface waters over the last 16,000 years from records of planktonic stable oxygen isotopes and alkenone unsaturation ratios, Palaeo
4. Freeze, R.A., and Cherry, J.A., (1979), Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 604 p.
5. Gabriels D., Ouessar M., Assesment of gabion groundwater recharge dams in the watershed of wadi Oum Zessar (Southeast Tunisia), Arid and Semi Arid Development

through Water Augmentation, Valparaiso, Chile, December, 2010.

6. Holzbecher E., (1998), Modeling density-driven flow in porous media. Springer Publ., New York: 286p .
7. Hubbert, K., (1949), The theory of groundwater motion, The journal of geology, volume XLVIII.
8. Karatzas, G.P., Pinder, G.F., 1993. Groundwater management using numerical simulation and the outer approximation method for global optimization. Water Resources Research 29 (10), 3371–3378.
9. Karterakis S.M., G.P. Karatzas, M. Papadopoulou (2007) 'Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria' Journal of Hydrology, Vol. 342, pp. 270–282
10. Kopsiaftis, G., (2009), Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island, Desalination.
11. Kourakos G., Mantoglou A., (2009), Pumping optimization of coastal aquifers based on evolutionary algorithms and surrogate modular neural network models, Advances in water resources.
12. Mantoglou, A., 2003. Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion. Water Resources Research 39 (12) (Art. No. 1335 DEC 4)

13. Mantoglou, A. and Giannouloupoulos , P., Sustainable yield of coastal aquifers: simulation, optimization and application to Santorini island. In: Protection and restoration of the environment VII, Mykonos, Greece, (2004)
14. Pichler, H., et al. (1980) "Comments on the geological map of the Santorini Islands." Doumas, C. Papers and proceedings of the second international scientific congress on Thera and the Aegean world II.
15. Pool, M., Carrera, J., (2011), A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers, Water resources research.
16. Strack, O.D.L., (1976), "A single Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers", Water Resources Research., 12,1165-1174 .
17. Todd, D.K., (1980), Ground-water hydrology (Second Edition): John Wiley and Sons, New York, 535 p.
18. Voss, C.I., Souza, W.R., (1987), Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater – saltwater transition zone, Water resources research, 23,10,1851-1866.
19. Zervakis et al., (2004), On the response of the Aegean sea to climatic variability: A review, International journal of climatology.

Τεχνικές εκθέσεις – Λοιπές εργασίες

CLASS U₃M-1D user guide, Unsaturated Moisture Movement Model, Jai Vaze, Narendra Kumar Tuteja, Jin Teng

Seawater Intrusion Affecting Ground Water on Lopez Island, Washington, U.S. geological survey Fact Sheet 057-00

Solinst, Controlling and Managing Saltwater Intrusion, [www.solinst.com/ resources/papers/101c4salt.php](http://www.solinst.com/resources/papers/101c4salt.php)

Αποστολάκη, Μ., (2007), Δίκτυο αειφόρων νήσων, Σαντορίνη (Θήρα), ΕΜΠ.

Γιούργα, Χ., (1991), Η αλλαγή του παραδοσιακού προτύπου διαχείρισης της γης στο αρχιπελάγους του αιγαίου: επιπτώσεις στα νησιωτικά οικοσυστήματα, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Δρόσου, Κ., (2005), Παρόν και μέλλον της αμπελοκαλλιέργειας στη Σαντορίνη, Διαχείριση και προοπτικές, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Αριστοτέλης Μαντόγλου, Προσομοίωση και διαχείριση παράκτιων υδροφορέων, Σχολή αγρονόμων και τοπογράφων Ε.Μ.Π. 2003.

Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου. Φάση Β: Ανάλυση Υποδομών και Χρήσεων & Δεδομένα Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2006