

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**« ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΜΕΣΑΡΙΑΣ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ »**

**ΕΚΠΟΝΗΣΗ : ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ**  
**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΤΟΓΛΟΥ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το νερό αποτελεί τον σημαντικό φυσικό πόρο. Ο συνολικός όγκος στη γη εκτιμάται στα  $1370 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$ , από το οποίο μόνο το 0,6% αποτελεί αξιοποιήσιμο πόρο. Το 98% αυτού είναι υπόγειο αλλά όχι εκμεταλλεύσιμο στο σύνολο του αφού το 50% βρίσκεται σε πολύ μεγάλο βάθος.

Οι διαθέσιμες ποσότητες νερού είναι άνισα κατανεμημένες στο χώρο. Αυτό δημιουργεί μεγάλα προβλήματα ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά ιδιαίτερα του καλοκαιρινούς μήνες που οι απαιτήσεις για νερό είναι υψηλές λόγω του τουρισμού. Η υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να οδηγήσει στην υφαλμύρωσή τους και στην σταδιακή καταστροφή τους. Για την διαφύλαξη των παράκτιων υδροφορέων απαιτείται η ορθολογική χρήση αυτών.

Στα πλαίσια της σωστής διαχείρισης των υδάτινων πόρων καθορίζονται οι βέλτιστες ποσότητες της άντλησης εξασφαλίζοντας την ποιότητα των διαθέσιμων υδατινών πόρων. Αυτές εξαρτώνται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τις υδραυλικές παραμέτρους και την τροφοδοσία του υδροφορέα. στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται ο υπόγειος υδροφορέας της Σαντορίνης και αναζητούνται οι βέλτιστε παροχές άντλησης για την ασφάλεια του. Εξετάζονται διάφορα σενάρια τροφοδοσίας καθώς και η συμπεριφορά του υδροφορέα σε καθένα από αυτά. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων απαιτείται η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα.

Η συμβολή του επιβλέποντα καθηγητή κ. Α. Μαντόγλου στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν καθοριστική. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την συνεργασία και την βοήθεια που μου προσφερε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Γ. Κοψιαύτη βοήθεια που μου πρόσφερε για την εκτέλεση του προγράμματος και τον συμφοιτητή μου Αργυρό Αργυρίδη για τις πληροφορίες που μου έδωσε σχετικά με το προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
ABSTRACT.....	II
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο της Πτυχιακής Εργασίας.....	1
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	2
1.4 Εισαγωγή στο σύστημα υπόγειου υδροφορέα.....	4
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ.....	6
2.1. Υπόγεια νερά και υδροφορείς.....	6
2.2. Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων.....	6
2.3.1. Νόμος του Darcy.....	8
2.3.2. Εξίσωση συνέχειας.....	9
2.3.3 Θεωρία οριζόντιας ροής.....	12
2.3.4 Αρχικές και οριακές συνθήκες.....	13
2.3.5 Δίκτυα γραμμών ροής και δυναμικού.....	14
3. ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	15
3.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης.....	15
3.2 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg.....	16
3.3 Ανάλυση κατά Strack.....	18
3.4 Υπαρξη φρέατος άντλησης.....	21
2.8 Εκτελούμενοι υπολογισμοί.....	23
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	25
4.1 Εισαγωγή.....	25
4.2 Περιγραφή λειτουργίας του Modflow.....	26
4.2.1 Το μαθηματικό μοντέλο.....	26
4.2.2 Διακριτοποίηση Υδροφορέα.....	27
4.2.3 Εξίσωση ροής με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.....	29
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΗ ΜΕΣΑΡΙΑ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ.....	35
5.1 Εισαγωγή.....	35
5.2 Υδρολιθολογία ευρύτερης περιοχής.....	35

5.3 Υδροφόροι σχηματισμοί .....	37
5.3 Σχεδίαση του μοντέλου του υδροφορέα .....	43
5.3.1 Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου.....	43
5.3.2 Οριακές συνθήκες (Boundary conditions) .....	45
5.3.3 Εισαγωγή παραμέτρων.....	46
5.4 Εκτέλεση του μοντέλου .....	48
6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ .....	53
6.1 Εισαγωγή.....	53
6.2 Σενάριο μείωσης της άντλησης .....	54
6.3 Σενάρια μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας.....	56
6.3.1 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 5%.....	56
6.3.2 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 10% .....	58
6.3.3 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 15% .....	59
6.3.4 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 20% .....	60
6.3.5 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 30% .....	61
6.4 Σενάριο τεχνητού εμπλουτισμού .....	64
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	69
7.1 Ανακεφαλαίωση και επιμέρους συμπεράσματα .....	69
7.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου σχηματισμού και των σεναρίων άντλησης και τροφοδοσίας.....	70
7.3 Προτάσεις- Μέτρα .....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	94

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: διαφορικός όγκος αναφοράς.....	9
Σχήμα 3.1: (α) τομή φρεάτιου υδροφορέα, (β) τομή περιορισμένου υδροφορέα.(Κουράκος, 2009).....	17
Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του φρεάτιου υδροφορέα για τον καθορισμό των παραμέτρων. Περίπτωση που ο κώνος τέμνει τη βάση του υδροφορέα. ....	18
Σχήμα 3.3: Τομή υδροφόρου Σαντορίνης όπου φαίνεται ο φακός γλυκού νερού καθώς και τα όρια της υφαλμύρωσης.....	19
Σχήμα 3.4: Φρεάτιος υδροφορέας με άντληση. ....	22
Σχήμα 3.5: Συνοπτική απεικόνιση θέσεων της διεπιφάνειας κατά την άντληση φρέατος. (από τον J. Bear).....	23
Σχήμα 4.1: Διακριτοποιημένος Υδροφορέας (McDonald and Harbaugh, 1988) .....	27
Σχήμα 4.2: Διαφορά ανάμεσα σε σχηματισμό με κέντρο το κελί (block-centered formulation) και με κέντρο το σημείο (point-centered formulation). (McDonald and Harbaugh, 1988) .....	28
Σχήμα 4.3: Κελί i, j, k με τα έξι γειτονικά του. (McDonald and Harbaugh, 1988) .....	29
Σχήμα 4.4: Ροή από κελί i, j-1, k στο κελί i, j, k.(McDonald and Harbaugh, 1988) .....	30
Σχήμα 5.1: Γεωλογικός Χάρτης Ν. Θήρας (Pichler et. al., 1980.....	36
Σχήμα 5.2: Όρια υπόγειου υδροφορέα Μεσαριάς της Σαντορίνης.....	37
Σχήμα 5.3: Κατανομή Δημοτικών και Ιδιωτικών γεωτρήσεων. ....	39
Σχήμα 5.4: Εικονίδιο εισαγωγής τύπου υδροφορέα στο PMWIN.....	44
Σχήμα 5.5: Οριακές συνθήκες και χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα στο PMWIN.....	46
Σχήμα 5.6: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας (K) του υδροφορέα .....	47
Σχήμα 5.7: Χάρτης ισοδυναμικών γραμμών σε περιβάλλον του PMWIN .....	49
Σχήμα 5.8: Χάρτης ισοπιεζομετρικών γραμμών .....	50
Σχήμα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού στον υδροφορέα της Σαντορίνης.....	51

<b>Σχήμα 6.1:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10% της αρχικής και μείωσης της άντλησης κατά 10% της αρχικής.....	55
<b>Σχήμα 6.2:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής άντλησης κατά 8%.....	56
<b>Σχήμα 6.3:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 5% και τη άντλησης κατά 13% της αρχικής.....	57
<b>Σχήμα 6.5:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 10% και τη άντλησης κατά 19% της αρχικής. ....	59
<b>Σχήμα 6.6:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 20% και τη άντλησης κατά 29% της αρχικής. ....	61
<b>Σχήμα 6.7:</b> (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30%. ....	62
<b>Σχήμα 6.8:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 30% και της αρχικής άντλησης κατά 40% .....	63
<b>Σχήμα 6.9:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30% της αρχικής και μείωσης της άντλησης κατά 40% της αρχικής.....	64
<b>Σχήμα 6.10:</b> Υποψήφιες περιοχές εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού.....	65
<b>Σχήμα 6.11:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης τεχνητό εμπλουτισμό και αύξηση της τροφοδοσίας κατά 12%. ....	66
<b>Σχήμα 6.12:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης τεχνητό εμπλουτισμό και αύξηση της άντλησης κατά 8%.....	67
<b>Σχήμα Π1:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής	

<b>Σχήμα Π2:</b> (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5%.....	75
<b>Σχήμα Π3:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 5% και της άντλησης κατά 5% της αρχικής. ....	76
<b>Σχήμα Π4:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 5% της αρχικής. ....	77
<b>Σχήμα Π5:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 13% της αρχικής. ....	78
<b>Σχήμα Π6:</b> (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10%. ....	79
<b>Σχήμα Π7:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 10% και τη άντλησης κατά 10% της αρχικής. ....	80
<b>Σχήμα Π8:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 19% της αρχικής. ....	81
<b>Σχήμα Π9:</b> (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15%. ....	82
<b>Σχήμα Π10:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 15% και μείωσης της άντλησης κατά 15% της αρχικής. ....	83
<b>Σχήμα Π11:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 15% και μείωσης της άντλησης κατά 24% της αρχικής. ....	83
<b>Σχήμα Π12:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 15% της αρχικής. ....	84

<b>Σχήμα Π13:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 24% της αρχικής. ....	85
<b>Σχήμα Π14:</b> (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20%. ....	86
<b>Σχήμα Π15:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 20% και μείωσης της άντλησης κατά 20% της αρχικής. ....	87
<b>Σχήμα Π16:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 20% της αρχικής. ....	88
<b>Σχήμα Π17:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 29% της αρχικής. ....	89
<b>Σχήμα Π18:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 30% της αρχικής. ....	90
<b>Σχήμα Π19:</b> Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 30% και μείωσης της άντλησης κατά 30% της αρχικής. ....	91
<b>Σχήμα Π20:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με τεχνητό εμπλουτισμό και αύξησης της άντλησης κατά 12%. ....	92
<b>Σχήμα Π21:</b> Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με τεχνητό εμπλουτισμό και αύξησης της άντλησης κατά 8%. ....	93



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο υπόγειος παράκτιος υδροφορέας της Μεσαριάς στην Σαντορίνη αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των αναγκών του νησιού. Λόγω των αυξημένων αντλήσεων στην περιοχή τα υπόγεια νερά συνεχώς υποβαθμίζονται ποιοτικά με αποτέλεσμα την εισροή του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα και την πιθανή υφαλμύρωση του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της Σαντορίνης. Συγκεκριμένα, γίνεται προσομοίωση της υπόγειας ροής και εξετάζονται διάφορα σενάρια μείωσης τροφοδοσίας και άντλησης καθώς και ένα σενάριο τεχνητού εμπλουτισμού προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υδροφορέα και να προταθούν λύσεις για την προστασία αυτού από το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

Το μοντέλο προσομοίωσης της ροής που χρησιμοποιήθηκε, εφαρμόζεται σε παράκτιους φρεάτιους υδροφορείς σε συνθήκες μόνιμης ροής και βασίζεται στην θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, στην προσέγγιση του Ghyben-Herzberg, στις παραδοχές της οριζόντιας ροής και στη ανάλυση του Strack. Η σχεδίαση και η εφαρμογή του έγινε στο PMWIN, όπου και υπολογίστηκε το δυναμικό  $\varphi$ , ενώ ο υπολογισμός του πιεζομετρικού φορτίου και το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας έγιναν σε περιβάλλον Matlab

Τα σενάρια άντλησης και τροφοδοσίας σχεδιαστήκαν με σκοπό την προστασία του υδροφορέα από την είσοδο του θαλασσινού νερού. Στα σενάρια αυτά αναζητήθηκε η βέλτιστη παροχή άντλησης ώστε να θεωρείται ασφαλής ο υδροφορέας, σύμφωνα με κάποιους περιορισμούς που είχαν τεθεί. Η εύρεση των βέλτιστων αυτών τιμών έγινε με δοκιμές.

## **ABSTRACT**

The coastal aquifer of Messaria in the island of Santorini consist the main source of the water supply in the area. Due to the increasing pumping in the area, the underground waters are continuously demoted, as far as their quality, something that leads to the influx of the sea water in the aquifer and possibly to its salinity.

The goal of this research is the study of the underground of water wagon system in Santorini. More specifically, we apply a model of simulation of flow of coastal aquifer and we examine the different scenarios of reducing the recharge and pumping scenario. We also examine a scenario of artificial enrichment in order to estimate the attribute of the aquifer and find the solutions in order to avoid the problem of salinity.

The model of simulation of flow that was used , is applied in coastal underground aquifers, in steady-state conditions and is based on the abrupt fresh-saltwater interface, on the Ghyben-Herzberg approximation, on the horizontal flow approximations and on Strack's analysis. PMWIN program was used for the design and the application of the model and for the computing of potential  $\phi$ . Matlab was used for the calculation of the hydraulic heads and the depth of the interface under the level of the sea.

The scenarios of the pumping and the recharge were achieved in order to protect the aquifer from the influx of the sea water. In those scenarios, and according to some confinements, we searched for the best supply pumping in order to keep the aquifer safe. The search of those supplies was achieved with testing.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1 Γενικά

Η νήσος Σαντορίνη είναι ένα νησί μικρής σχετικά έκτασης με περιορισμένα υπόγεια υδατικά αποθέματα. Από εξέταση των διαθέσιμων στοιχείων της υδρογεωλογικής έρευνας του νησιού, προκύπτει ότι τα υπόγεια νερά υποβαθμίζονται συνεχώς ποιοτικά λόγω των αυξημένων αντλήσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα της εισροή θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς που οδηγεί στη σταδιακή υφαλμύρωση τους.

Ένα ενδιαφέρον διαχειριστικό πρόβλημα είναι οι ασφαλείς ποσότητες νερού που είναι δυνατόν να αντληθούν από τους υδροφόρους σχηματισμούς χωρίς να εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Οι διαθέσιμες αυτές ποσότητες χαρακτηρίζονται ως «ασφαλής απόδοση» (safe yield) του υδροφορέα. Ο γενικότερος όρος αυτού είναι «βιώσιμη ή αειφόρος απόδοση» (sustainable yield). Το μέγεθος αυτό προκύπτει από ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα πολυετών παρατηρήσεων του υδροφορέα.

Για την διερεύνηση των παραπάνω προβλημάτων εφαρμόστηκαν μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων νερών. Σύμφωνα με τις απαραίτητες παραδοχές, εφαρμόζεται ένα κατανεμημένο μοντέλο προσομοίωσης χωροχρονικών μεταβολών, το Modflow.

#### 1.2 Αντικείμενο της Πτυχιακής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του φρεάτιου παράκτιου υδροφορέα στην περιοχή της Μεσαριάς-Αεροδρομίου στην νήσο Σαντορίνη καθώς και η μελέτη σεναρίων άντλησης και τροφοδοσίας για τον υπό εξέταση υδροφορέα. Εξετάζεται ο υδροφορέας και επιζητείται η ποσότητα της άντλησης για την αποφυγή της υφαλμύρωσης των φρεάτων.

Κατά την μελέτη του προβλήματος ορίζεται ένα ακριβές μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψη το πραγματικό σχήμα του υδροφορέα και τα ιδιαίτερα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Εκτελούνται διάφορα σενάρια άντλησης και τροφοδοσίας και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υδροφορέα υπό άντληση και την κίνηση του μετώπου θαλασσινού νερού.

Εξετάζονται έξι σενάρια τροφοδοσίας και άντλησης, όπου η τροφοδοσία μειώνεται καθώς και ένα σενάριο αύξησης της τροφοδοσίας. Η εξέταση των προβλημάτων αυτών έγκειται στον υπολογισμό της παροχής άντλησης νερού αποφεύγοντας την υπαλμύρωση των πηγαδιών. Οικονομικοί ή λειτουργικοί παράγοντες δεν λαμβάνονται υπόψη ενώ οι περιορισμοί που τίθενται σκοπεύουν αποκλειστικά στην προστασία των φρεάτων από την είσοδο του θαλασσινού νερού.

### **1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας**

Μετά την γενική παρουσίαση του θέματος και των στόχων της διπλωματικής εργασίας αναπαρίσταται η λειτουργία του υπόγειου υδροφορέα βασισμένη στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου. Εισάγονται και επεξηγούνται οι έννοιες της προσομοίωσης. Στα άλλα έξι κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφονται λεπτομερώς η έννοιες και αναλύονται οι διάφορες εργασίες που έγιναν με βάση αυτές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, που ακολουθεί, γίνεται μια σύντομη αναφορά στην υδραυλική των υπόγειων νερών. Δίνονται ορισμοί για κάποιες παραμέτρους της κίνησης του υπόγειου νερού, όπως είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταφορικότητα ή διοχετευτικότητα, η αποθηκευτικότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα. Επίσης διευκρινίζεται τότε ένα μέσο είναι ιστροπικό ή ανισότροπο και τότε ένα μέσο ονομάζεται ομοιογενές ή ανομοιογενές. Γίνεται, ακόμη, αναφορά στον νόμο του Darcy, μελετάται η εξίσωση συνέχειας για όλα τα μέσα και περιγράφεται η θεωρία της οριζόντιας ροής.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς το πρόβλημα της υπαλμύρωσης στους παράκτιους υδροφορείς, που συνήθως εμφανίζεται λόγω των υπεραντλήσεων. Αναφέρεται η προσέγγιση των Badon Ghyben και Herzberg

και παρουσιάζεται η ανάλυση κατά Strack, στην οποία βασίζεται η μελέτη της κίνησης του μετώπου του θαλασσινού νερού αναλόγως της παροχής άντλησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της προσομοίωσης και περιγράφεται το μοντέλο στο οποίο βασίστηκε η προσομοίωση του υπό εξέταση υδροφορέα. Περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του Modflow, το τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματική εργασίας, με εκτενή αναφορά στο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται και την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζεται από το Modflow για σύνθετους υδροφορείς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής αναφορά στην προσομοίωση του παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα της Μεσάριας-Αεροδρομίου στην νήσο Σαντορίνη, αφού πρώτα μελετηθεί η υδρολιθολογία και οι υδραυλικοί σχηματισμοί της ευρύτερης περιοχής της νήσου. Παρουσιάζονται, επίσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, οι υδραυλικές παράμετροι, οι αρχικές και οριακές συνθήκες, η τροφοδοσία και η οι αντλήσεις του εξεταζόμενου υδροφορέα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την σχεδίαση και την εφαρμογή της προσομοίωσης είναι το PMWIN, το οποίο βασίζεται στην θεώρησης της απότομης διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού. Με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο, υπολογίζεται το δυναμικό, όπως ορίζεται από τον Strack, και με την βοήθεια του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab, υπολογίζεται η τελική μορφή της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού με την εφαρμογή της προσέγγισης των Ghyben και Herzberg.

Στο έκτο κεφάλαιο εφαρμόζονται διάφορα σενάρια τροφοδοσίας και άντλησης στον φρεάτιο υδροφορέα της Μεσαριάς με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς του υδροφορέα σε διάφορες συνθήκες. Εξετάζεται, αρχικά ένα σενάριο μείωσης της άντλησης ώστε να επιτευχθεί η ασφάλεια του υδροφορέα με τα υπάρχοντα στοιχεία. Στη συνέχεια, τα σενάρια βασίζονται στην μείωση της τροφοδοσίας της περιοχής κατά ποσοστά από 5% έως 30%, όπου το τελευταίο θεωρείται ως ακραίο σενάριο. Για κάθε σενάριο ελέγχεται αν ο υδροφορέας έχει υφαλμυρωθεί και ορίζονται, με δοκιμές, οι τιμές της άντλησης ώστε να αποφευχθεί η υφαλμύρωση των φρεάτων άντλησης. Τέλος, εξετάζεται και ένα σενάριο τεχνητού εμπλουτισμού του υπόγειου

υδροφορέα και αναζητείται το ποσοστό αύξησης της τροφοδοσίας για την ασφάλεια του υδροφορέα. Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων των σεναρίων τίθενται κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι αναφέρονται στον αντίστοιχο κεφάλαιο. Τέλος παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα κάποιων χαρακτηριστικών σεναρίων.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται μια μικρή ανακεφαλαίωση των προαναφερθέντων θεμάτων και αναφέρονται τα συμπεράσματα της εξέτασης του υπόγειου υδροφορέα καθώς και των διαφόρων σεναρίων που εφαρμόστηκαν για τον εξεταζόμενο υδροφορέα. Τέλος, κατατίθενται προτάσεις για την βιωσιμότητα του συγκεκριμένου υδροφόρου συστήματος της νήσου Σαντορίνη.

Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας παρατίθενται παράρτημα. Σε αυτό παρουσιάζονται σχηματικά σε τρισδιάστατη απεικόνιση η διεπιφάνεια του γλυκού-αλμυρού νερού και με ισοπιεζομετρικές γραμμές το πιεζομετρικό φορτίο όπως έχει υπολογιστεί από την μετατροπή του δυναμικού του Strack των σεναρίων που δεν παρουσιάζονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

#### **1.4 Εισαγωγή στο σύστημα υπόγειου υδροφορέα**

Ο υπόγειος υδροφορέας αποτελεί ένα σύστημα το οποίο περιγράφεται από διάφορες παραμέτρους που αλληλεπιδρούν με διάφορους τρόπους. Το σύστημα αυτό αποτελεί από εισόδους και εξόδους. Αυτές μπορεί να είναι:

- ✓ Φυσικές διεργασίες, όπως είναι οι κατακρημνίσεις, η πλευρική εισροή και η εκροή γλυκού νερού στη θάλασσα ή
- ✓ Τεχνητές διεργασίες, όπως είναι τροφοδοσία με τεχνητό εμπλουτισμό, οι αντλήσεις κτλ.

Κατά την ανάλυση το συστήματος ακολουθούνται κάποια βήματα. Αυτά είναι:

- i. Ορισμός του προβλήματος
- ii. Καθορισμός του υδατικού συστήματος και η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων όπως είναι οι διαστάσεις, το σχήμα, οι οριακές συνθήκες και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα
- iii. Ορισμός αντικειμενικών σκοπών
- iv. Ορισμός των περιορισμών

Στην περίπτωση της εξέτασης του προβλήματος της υφαλμύρωσης οι περιορισμοί μπορεί να είναι ισότητας, σύμφωνα με τους οποίους ορίζεται μια συγκεκριμένη τιμή που δεν πρέπει να είναι ίση/ες μια ή περισσότερες υδραυλικές παράμετροι, ή ανισότητας όπου ορίζεται η μέγιστη ή ελάχιστη τιμή που δεν πρέπει να ξεπεραστεί ή να πάει κάτω από αυτή.

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στους υπόγειους υδροφορείς αποτελείται από ένα σύνολο διαφορικών και αριθμητικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν τη κίνηση του υπόγειου νερού. Αυτές είναι η εξίσωση συνέχειας και ο νόμος του Darcy και στην περίπτωση της υφαλμύρωσης οι εξισώσεις του Strack και η προσέγγιση των Ghyben και Herzberg.

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των αναλυτικών μοντέλων ή των αριθμητικών μεθόδων. Για την ροή στους υπόγειους υδροφορείς χρησιμοποιείται οι αριθμητικές μέθοδοι. Η ανάγκη χρήσης αυτών προέκυψε από τις αδυναμίες των αναλυτικών σχέσεων σε πρακτικά προβλήματα εφαρμογής. Ακανόνιστα γεωμετρικά όρια, πολύπλοκοι συνδυασμοί αρχικών και οριακών συνθηκών, ανομοιογένεια και ανισοτροπία των εκτεταμένων υδροφορέων, αλλά και έντονες φορτίσεις του κάθε συστήματος είτε φυσικές είτε τεχνητές είναι αδύνατο να συνυπάρξουν κάτω από μια σειρά απλουστευμένων υποθέσεων που συνήθως απαιτείται για τον υπολογισμό μια αναλυτικής λύσης. (Λατινόπουλος, 1986)

Για την επίλυση του συστήματος δημιουργείται ένα μοντέλο προσομοίωσης στο οποίο εφαρμόζεται το αριθμητικό μοντέλο επίλυσης, όπως προαναφέρθηκε. Η διαδικασία της προσομοίωσης αποτελείται από:

- Τον καθορισμό των στόχων του μοντέλου
- Την περιγραφή των χαρακτηριστικών του υδρογεωλογικού συστήματος
- Επιλογή του κατάλληλου λογισμικού για την επίλυση το μαθηματικού μοντέλου της ροής. (Γιαννουλόπουλος, 2000)

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ****2.1. Υπόγεια νερά και υδροφορείς**

Τα υπόγεια νερά είναι μέρος του υδρολογικού κύκλου. Βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και μπορούν να συλλεχθούν μέσω φρεάτων, σηράγγων ή αποστραγγιστικών αγωγών ή ρέουν φυσικά προς την επιφάνεια μέσω πηγών (Νάνου-Γιάνναρου, 2006). Η ροή των υπόγειων νερών γίνεται μέσω των υδροφορέων. Πρόκειται για γεωλογικούς σχηματισμούς που περιέχουν νερό και επιτρέπουν την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού (Λατινόπουλος, 1986).

Συνήθως η ροή του νερού στους υδροφορείς αναφέρεται σαν ροή σε πορώδη μέσα, όπως εξετάζεται και στη συγκεκριμένη εργασία. Σε αυτά, το εδαφικό σώμα διακρίνεται στον εδαφικό σκελετό που αποτελείται από στερεά ύλη και διάκενα ή πόρους μέσα από τα οποία πραγματοποιείται η ροή.

Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι ελεύθερης επιφάνειας οι υδροφορείς ταξινομούνται σε υπό πίεση ή περιορισμένους υδροφορείς και σε φρεάτιους ή μη περιορισμένους υδροφορείς αντίστοιχα. Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας για τους φρεάτιους και της πιεζομετρικής για τους περιορισμένους υδροφορείς καθορίζει το υδραυλικό φορτίο, το οποίο ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης  $h_p$  και το υψόμετρο  $z$  :

$$h = h_p + z = p/\gamma + z$$

Στους φρεάτιους υδροφορείς το  $h$  καθορίζει τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας ενώ στους περιορισμένους υδροφορείς προσδιορίζει την πίεση του νερού σε κάθε σημείο του υδροφορέα και ονομάζεται πιεζομετρικό φορτίο  $\varphi$ .

**2.2. Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων**

Οι βασικότερες παράμετροι του υδροφορέα που καθορίζουν την κίνηση του νερού είναι:



- **Υδραυλική Αγωγιμότητα  $K$  ( $LT^{-1}$ )**

Εκφράζει την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους του πορώδους μέσου. Αποτελεί τη σταθερά του νόμου του Darcy, έχει διαστάσεις ταχύτητας και εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και του πορώδους μέσου (Νάνου-Γιαναρού,2006).

- **Μεταφορικότητα ή διοχετευτικότητα ( $L^2T^{-1}$ )**

Εκφράζεται ως το γινόμενο του πάχους  $B$  ενός ομογενούς και ισότροπου περιορισμένου υδροφορέα επί την υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  και συμβολίζεται ως ακολούθως:

$$T=K*B$$

Η έννοια της διοχετευτικότητας :

- Έχει νόημα μόνο για δισδιάστατη ή οριζόντια ροή.
- Συνήθως χρησιμοποιείται για τους υπό πίεση υδροφορείς.
- Μπορεί να επεκταθεί και σε στρώματα μη ομογενή ή μεταβλητού πάχους  $B$ .

- **Ομογένεια και ισοτροπία υδροφορέων**

Οι έννοιες της ομογένειας και της ισοτροπίας αναφέρονται κυρίως στην ιδιότητα της φυσικής διαπερατότητας.

Ένα πορώδες μέσο θεωρείται ομογενές εάν η διαπερατότητα είναι ίδια σε όλα τα σημεία του. Αλλιώς, το πορώδες μέσο ονομάζεται ανομογενές.

Εάν η διαπερατότητα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου είναι ανεξάρτητη από την ασκούμενη διεύθυνση, τότε το πορώδες μέσο καλείται ισότροπο στο συγκεκριμένο σημείο. Αλλιώς, ονομάζεται ανισότροπο. Κατ' αναλογία η έννοια της ισοτροπίας για δισδιάστατα πεδία ροής επεκτείνεται στις ιδιότητες της υδραυλικής αγωγιμότητας και της διοχετευτικότητας.

(Νάνου,1996)

- **Αποθηκευτικότητα ( $L^{-1}$ )**

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ένας υδροφορέας προσλαμβάνει ή αποδίδει νερό, διακρίνονται τα εξής δύο είδη:

- **Αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα ή ελαστική αποθηκευτικότητα**

Αυτή διακρίνεται σε:

**Ειδική αποθηκευτικότητα  $S_o$ :** είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου  $\Delta\phi$ .

$$S_o = \frac{\Delta V_T}{V_T * \Delta\phi}$$

Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος.

**Αποθηκευτικότητα υδροφορέα  $S_s$ :** ισούται με τον όγκο νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου  $\Delta\phi$ .

$$S_s = \frac{\Delta V_T}{A * \Delta\phi}$$

Είναι μικρότερη από την φρεάτια αποθηκευτικότητα και χρησιμοποιείται στη δισδιάστατη ροή. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος.

• **Αποθηκευτικότητα φρεάτιου υδροφορέα ή φρεάτια αποθηκευτικότητα** (αδιάστατο μέγεθος)

Ορίζεται ως ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας και συμβολίζεται ως:

$$S = \frac{\Delta V_w}{A * \Delta h}$$

### 2.3. Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών

Σ' αυτή την ενότητα, αναλύεται εκτενώς το μαθηματικό μοντέλο, εξετάζοντας τις εξισώσεις και τις αρχικές οριακές συνθήκες που συνθέτουν το πρόβλημα των υπόγειων νερών.

#### 2.3.1. Νόμος του Darcy

Σύμφωνα με τον Darcy, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από θέσεις υψηλότερων προς θέσεις χαμηλότερων ενεργειακών σταθμών. Η ενεργειακή στάθμη στο υπόγειο νερό εξαρτάται από τη θέση και την πίεση, γιατί η κινητική ενέργεια είναι πρακτικά ασήμαντη λόγω του μικρού μεγέθους

ταχυτήτων. Η κίνηση του νερού χάνει ενέργεια λόγω των τριβών στα τοιχώματα του στερεού εδαφικού σκελετού. Η απώλειά της ανά μονάδα μήκους έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι ανάλογη της ταχύτητας του υπόγειου νερού για στρωτή ροή. ( Νάνου, 2006)

Ο νόμος του Darcy μπορεί να διατυπωθεί με την εξής μορφή:

$$q = \frac{Q}{A} = K * J \quad (2.1)$$

,όπου q είναι η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy. Ως ειδική παροχή θεωρείται ο όγκος του νερού που περνά ανά μονάδα χρόνου από μια μοναδιαίου εμβαδού διατομή, κάθετη στην διεύθυνση της ροής.

Το K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ή συντελεστής διαπερατότητας και το J είναι η υδραυλική κλίση που εκφράζεται ως  $J = \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} = \frac{\Delta\phi}{L}$ .

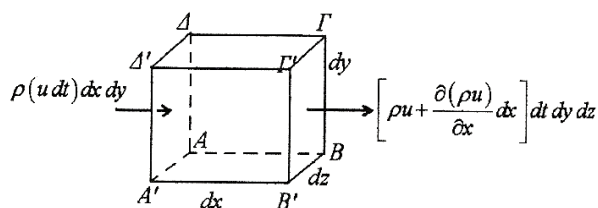
Για τρισδιάστατη ροή ομογενούς ισότροπου πορώδους μέσου, ο νόμος του Darcy διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} q_x &= K * J_x = -K \frac{\partial\phi}{\partial x} = n * V_x \\ q_y &= K * J_y = -K \frac{\partial\phi}{\partial y} = n * V_y \\ q_z &= K * J_z = -K \frac{\partial\phi}{\partial z} = n * V_z \end{aligned} \quad (2.2)$$

,όπου n είναι το πορώδες, V είναι η ταχύτητα και φ είναι το πιεζομετρικό φορτίο.

### 2.3.2. Εξίσωση συνέχειας

Η ροή σε πορώδη μέσα περιγράφεται από την εξίσωση διατήρησης της μάζας ή εξίσωση συνέχειας. Η μάζα του νερού σε διαφορικό όγκο διατηρείται, δηλαδή η μάζα που εισέρχεται μείον την μάζα που εξέρχεται ανά μονάδα χρόνου, ισούται με την μεταβολή της μάζας στον διαφορικό όγκο.



Σχήμα 2.1: διαφορικός όγκος αναφοράς

Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho^* q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho^* q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho^* q_z)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho^* n)}{\partial t} \quad (2.3)$$

,όπου  $q_x, q_y, q_z$  = ειδική παροχή στους τρεις άξονες

$\rho$  = πυκνότητα του ρευστού

$n$  = πορώδες εδάφους

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή αποθηκευτικότητας  $S_0$  για τον περιορισμένο υδροφορέα έχουμε:

$$\frac{\partial(\rho^* q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho^* q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho^* q_z)}{\partial z} = -\rho^* S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.4)$$

Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται στον χώρο. Επομένως η (2.4) γίνεται:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.5)$$

Και προσθέτοντας και τον όρο φόρτισης  $W$  ( $L^{-1}$ ) έχουμε:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} + W \quad (2.6)$$

Για τις διάφορες περιπτώσεις υδροφορέα και τρισδιάστατη ροή είναι:

### Μη Μόνιμη Ροή

- Μη ομογενής ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x * \frac{\partial \phi_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y * \frac{\partial \phi_y}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z * \frac{\partial \phi_z}{\partial z}) = -S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.7)$$

- Μη ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x} (K * \frac{\partial \phi_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K * \frac{\partial \phi_y}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K * \frac{\partial \phi_z}{\partial z}) = -S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.8)$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$K_x * \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + K_y * \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + K_z * \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = -S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.9)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = -\frac{S_0}{K} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.10)$$

Στην περίπτωση της **μόνιμης ροής** ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις με το δεξί σκέλος αυτών να είναι ίσο με 0.

Για μόνιμη ροή σε ομογενή και ισότροπο υδροφορέα η εξίσωση συνέχειας ονομάζεται **εξίσωση Laplace** και ισούται με:

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = 0 \quad (2.11)$$

Για δισδιάστατη ροή οι παραπάνω εξισώσεις τροποποιούνται ως εξής:

➤ **Περιορισμένος Υδροφορέας και μη μόνιμη ροή**

- Μη ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x * \frac{\partial \phi_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y * \frac{\partial \phi_y}{\partial y}) = -S \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \quad (2.12)$$

,όπου S= αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα

T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>= μεταφορικότητα κατά την διεύθυνση x και y αντίστοιχα  
(L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>)

Q= συνολική παροχή άντλησης ή τροφοδοσίας (L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>)

Περιλαμβάνονται σημειακές ή κατανεμημένες πηγές. Έχει θετικό πρόσημο όταν πρόκειται για πηγάδια άντλησης και αρνητικό για πηγάδια φόρτισης.

- Μη ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x} (T * \frac{\partial \phi_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T * \frac{\partial \phi_y}{\partial y}) = -S \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \quad (2.13)$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$T_x * \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + T_y * \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.14)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$T (\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2}) = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.15)$$

Στην μόνιμη ροή το δεξί σκέλος των παραπάνω είναι ίσο με 0. Άρα στον ομογενή και ισότροπο υδροφορέα ισχύει:

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} = 0 \quad (2.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται εξίσωση Laplace.

### ➤ Φρεάτιος Υδροφορέας

Αντικαθιστούμε το πιεζομετρικό φορτίο  $\phi$  με το βάθος ροής  $h$ . Επίσης στους φρεάτιους υδροφορείς ισχύει ότι  $T = K \cdot h$ . Επομένως έχουμε:

- Μη ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x \cdot h \cdot \frac{\partial h_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \cdot h \cdot \frac{\partial h_y}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (2.17)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$K \cdot \frac{\partial}{\partial x} (*h \cdot \frac{\partial h_x}{\partial x}) + K \cdot \frac{\partial}{\partial y} (*h \cdot \frac{\partial h_y}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (2.18)$$

Οι εξισώσεις (2.17) και (2.18) δεν είναι γραμμικές. Ύστερα από γραμμικοποίηση τους η (2.18) γίνεται:

$$K \cdot h \left( \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} \right) = -S_o \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \quad (2.19)$$

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται μόνο αν οι μεταβολές στην στάθμη της θάλασσας είναι πολύ μικρές συγκριτικά με το συνολικό πάχος του υδροφορέα. Αλλιώς, χρησιμοποιείται η (2.18).

### 2.3.3 Θεωρία οριζόντιας ροής

Η θεωρία της οριζόντιας ροής ισχύει όταν το πάχος του υδροφορέα είναι σημαντικά μικρότερο, συγκρινόμενο με τις οριζόντιες διαστάσεις αυτού. Σύμφωνα με αυτή, γίνεται η παραδοχή ότι η ροή είναι βασικά οριζόντια και αγνοούνται οι κατακόρυφες συνιστώσες της ταχύτητας. Απλοποιεί σημαντικά τη μαθηματική ανάλυση της ροής και ισοδυναμεί με την θεώρηση κατακόρυφων ισοδυναμικών γραμμών και πιεζομετρικού φορτίου ανεξαρτήτου από την συντεταγμένη  $z$ . Η μεθοδολογία που βασίζεται στην παραδοχή της οριζόντιας ροής, εφαρμόζεται κυρίως στους φρεάτιους υδροφορείς και είναι γνωστή ως υδραυλική θεωρία Dupuit (Νάνου, 2006)

Υποθέτοντας οριζόντια ροή σε ισότροπο και ανομοιογενή περιορισμένο υδροφορέα, η εξίσωση ροής γίνεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} (T \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.20)$$

,όπου  $S$  είναι η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και  $T$  η μεταφορικότητα και ισούται με  $T = K * b$ , όπου  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα.

### 2.3.4 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Για την επίλυση τους προβλήματος ροής υπόγειου υδροφορέα επιλέγεται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει την ροή. Κατά την επίλυση αυτού είναι αναγκαίο να ορισθούν:

- Η γεωμετρία του πεδίου ροής
- Οι αρχικές συνθήκες, δηλαδή να καθοριστεί η συνάρτηση δυναμικού  $\phi$  σε κάποια ορισμένη χρονική στιγμή που συνήθως συμβολίζεται με  $t=0$ .
- Οι οριακές συνθήκες ,δηλαδή η συμπεριφορά τους ροής στα όρια του υπό εξέταση υδροφορέα. Στα πρακτικά προβλήματα συνηθέστερες οριακές συνθήκες είναι οι ακόλουθες:

- Όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου

Είναι τα όρια στα οποία ασκείται γνωστό πιεζομετρικό φορτίο, πιθανόν μεταβαλλόμενο στο χρόνο με γνωστό τρόπο. Τέτοιου είδους όρια παρατηρούνται όταν το πεδίο ροής συνορεύει με κάποιο υδάτινο δυναμικό. Μία ειδική περίπτωση είναι όταν στο όριο το ασκούμενο πιεζομετρικό φορτίο είναι σταθερό με αποτέλεσμα να αποτελεί και ισοδυναμική γραμμή. Έτσι μπορεί να υπάρξει ροή μόνο κάθετα από ή προς τον υδροφορέα. Τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται **συνθήκες Dirichlet** ή **οριακές συνθήκες πρώτου τύπου**.

- Όρια δεδομένης εισροής ή εκροής

Όρια στα οποία υπάρχει δεδομένη εισροή ή εκροή ρευστού από ή τον γειτονικό υδροφορέα αντίστοιχα. Αυτά παρατηρούνται όταν ο υπό εξέταση υδροφορέας τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από κάποιον άλλον υδροφορέα. Ειδική περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη αδιαπέρατου ορίου, δηλαδή μηδενικής εισροής ή εκροής. Όταν η εισροή ή η εκροή είναι σταθερή, τότε το όριο αυτό αποτελεί και γραμμή ροής. Τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται **συνθήκες Neumann** ή **οριακές συνθήκες δευτέρου τύπου**.

### 2.3.5 Δίκτυα γραμμών ροής και δυναμικού

Γραμμή ροής ρευστού είναι η γραμμή που έχει ως ιδιότητα σε μια δεδομένη χρονική στιγμή  $t$  να είναι σαν εφαπτόμενη, σε οποιοδήποτε σημείο τους, το διάνυσμα τους ταχύτητας.

Γραμμές ίσου δυναμικού ή ισοδυναμικές γραμμές ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων με ίση τιμή δυναμικού. Οι γραμμές αυτές ενώνουν σημεία που έχουν ίδιο υδραυλικό φορτίο και ίδιο πιεζομετρικό φορτίο για τους περιορισμένους υδροφορείς. Έτσι, λοιπόν, οι ισοδυναμικές γραμμές για τους φρεάτιους υδροφορείς αποτελούν μια αναπαράσταση τους ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα.

Οι γραμμές ροής και οι γραμμές δυναμικού στα σημεία που διασταυρώνονται, διασταυρώνονται υποχρεωτικά κάθετα.



### ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

#### 3.1 Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Η διαχείριση των υπόγειων νερών είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της εισροής θαλασσινού νερού στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων. Ως υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων ορίζεται η ύπαρξη τους υδροφορείς όχι μόνο γλυκού αλλά και υφάλμυρου νερού.

Η υφαλμύρωση υπόγειου υδροφορέα αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και εμφανίζεται τόσο σε φρεάτιο όσο και σε περιορισμένο υδροφορέα. Η διείσδυση θαλασσινού νερού μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς λόγους (π.χ. κλιματικές αλλαγές, ανύψωση της στάθμης της θάλασσας) όσο και σε ανθρωπογενείς παράγοντες (υπεραντλήσεις) και συνηθέστερα σε συνδυασμό των δύο. Όταν ο ρυθμός άντλησης σε φρέατα κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλάσσιο νερό εισρέει στους υδροφορείς, καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Αυτό παρατηρείται κυρίως στα νησιά του Αιγαίου, όπου η αύξηση του τουρισμού τους θερινούς μήνες σε συνδυασμό με την ανεπάρκεια υδάτινων πόρων οδηγούν στην αξιοποίηση του υδάτινου δυναμικού.

Λόγω της διαφοράς της πυκνότητας του γλυκού νερού ( $1.000 \text{ cm}^3/\text{gr}$ ) με το αλμυρό ( $1.025 \text{ cm}^3/\text{gr}$ ) δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας γνωστή ως διεπιφάνεια. Η διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού οριοθετεί την αλάτινη σφήνα, δηλαδή το τμήμα του υδροφορέα στο οποίο έχει εισέλθει το θαλασσινό νερό. Χαρακτηριστικά σημεία τους είναι το χείλος, το οποίο ορίζεται ως το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα, και το πόδι της αλάτινης σφήνας, όπου ονομάζεται το σημείο τομής της διεπιφάνειας με την επιφάνεια της θάλασσας.

Το φυσικό σύστημα των παράκτιων υδροφορέων είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, λόγω τους ανάμειξης δύο υγρών διαφορετικής πυκνότητας και η μελέτη τους είναι ιδιαίτερα δύσκολη με μεγάλο αριθμό μετρήσεων. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης που προσεγγίζουν το φυσικό σύστημα. Τα μαθηματικά μοντέλα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας και τα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας. Τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας θεωρούν ότι μεταξύ του γλυκού και του θαλασσινού νερού μεσολαβεί μια ζώνη στην οποία η μεταβολή τους πυκνότητας του νερού γίνεται σταδιακά. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν καλύτερα το φυσικό σύστημα. Για την επίλυσή τους, απαιτείται η γνώση των παραμέτρων τους διασποράς του άλατος που είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι εξαιρετικά πολύπλοκες με αποτέλεσμα να καθιστούν την διαδικασία επίλυσής του ιδιαίτερα χρονοβόρα. Τα μοντέλα απότομης διεπιφάνειας θεωρούν ότι η μετάβαση από το αλμυρό στο γλυκό νερό γίνεται απότομα. Παρότι αποτελούν μια απλουστευμένη προσέγγιση του φυσικού συστήματος, οι διαφορικές εξισώσεις είναι απλουστευμένες, με λιγότερες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να εξοικονομείται χρόνος για την επίλυση του προβλήματος. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά εάν το πάχος τους διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος τους απότομης διεπιφάνειας.

Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας (απουσία άντλησης) η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Στην περίπτωση τους αυξημένης άντλησης, όπου η φυσική επαναπλήρωση δεν οδηγεί στην αποκατάσταση του υδροφορέα, παρατηρείται πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και κίνηση της διεπιφάνειας στο εσωτερικό μέχρι την επίτευξη τους κατάστασης ισορροπίας.

### **3.2 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg**

Η πρώτη εξίσωση που περιγράφει την αλληλεπίδραση γλυκού-αλμυρού νερού διατυπώθηκε στα τέλη του 1800 από τους Badon Ghyben και Herzberg ως εξής:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} * h_f \quad (3.1)$$

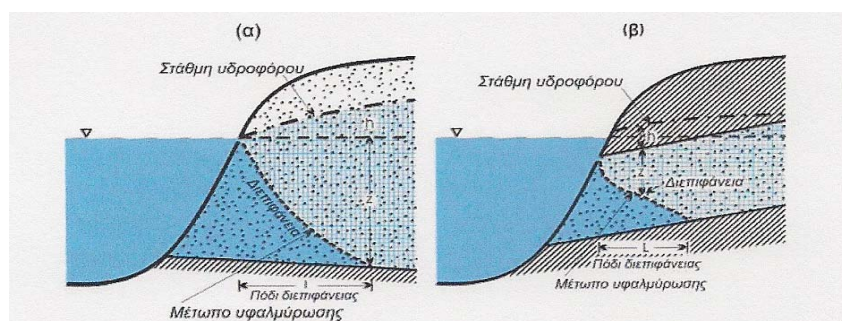
,όπου  $\rho_f$  είναι η πυκνότητα του γλυκού νερού,

$\rho_s$  η πυκνότητα του αλμυρού νερού,

$\xi$  η κάθετη απόσταση από την διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υγρών από την μέση στάθμη της θάλασσας (μσθ) και  $h$  το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο ίδιο σημείο.

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως **εξίσωση Ghyben-Herzberg**, η οποία σχετίζει το σχήμα και τη θέση της διεπιφάνειας με υδρολογικές παραμέτρους του υπόγειου νερού.

Όταν  $\rho_f=1.000 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_s=1.025 \text{ gr/cm}^3$  τότε η απόσταση της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας είναι  $\xi = 40 * h_f$ . Οπότε η διεπιφάνεια στο συγκεκριμένο σημείο απέχει από την επιφάνεια της θάλασσας απόσταση ίση με 40 φορές το  $h_f$ .



**Σχήμα 3.1:** (α) τομή φρεάτιου υδροφορέα, (β) τομή περιορισμένου υδροφορέα.(Κουράκος, 2009)

Η εξίσωση (3.1) βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία μεταξύ των δύο υγρών. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό της κίνησης της διεπιφάνειας, παρόλο που βασίζεται σε υπεραπλουστευμένες παραδοχές. Οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η θεωρία είναι:

- ✓ Η διεπιφάνεια είναι ακίνητη.
- ✓ Η πίεση είναι κοινή και για τις δύο περιοχές.
- ✓ Η ροή θεωρείται οριζόντια (παραδοχή Dupuit).
- ✓ Το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού είναι μηδέν στο σημείο εκροής.

Η τελευταία παραδοχή αποτελεί φανερό σφάλμα της συγκεκριμένης θεωρίας αφού στην πράξη το γλυκό νερό διαφεύγει προς τη θάλασσα. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κάποια πεπερασμένη επιφάνεια εκροής. Επίσης η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.

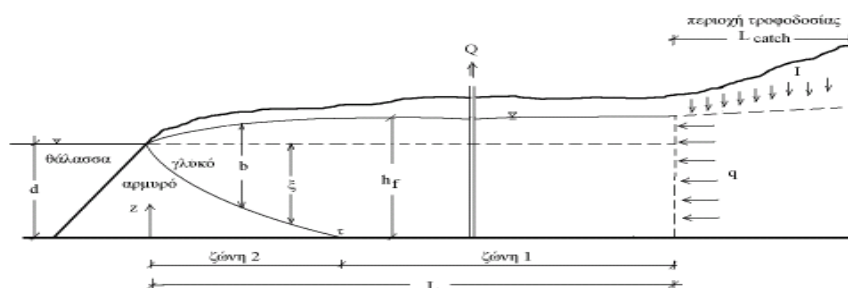
### 3.3 Ανάλυση κατά Strack

Το γενικό πρόβλημα της κίνησης υπόγειων υδάτων σε παράκτιους υδροφορείς είναι πολύπλοκο και απαιτεί πάρα πολλές παραμέτρους που δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν λόγω της ανομοιογένειας των παραμέτρων στο χώρο. Επομένως, καθίσταται απαραίτητο να υπάρξουν απλοποιήσεις του προβλήματος και παραδοχές ώστε να βγουν ορθά συμπεράσματα με βάση τα υπάρχοντα κάθε φορά στοιχεία.

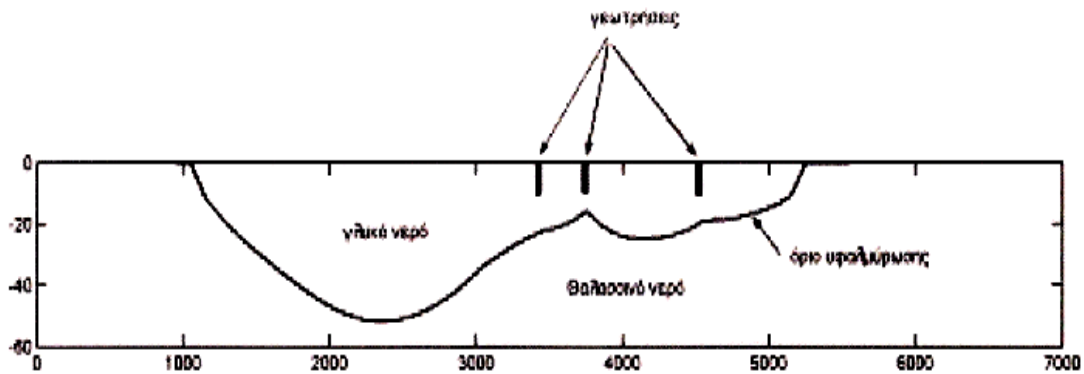
Η συνηθέστερη παραδοχή είναι του ευδιάκριτου ορίου (sharp interface) μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού θεωρώντας ότι το μέτωπο του αλμυρού νερού έχει ουσιαστικά σταθεροποιηθεί και δεν μετακινείται. Η προσέγγιση αυτή ισχύει σε συνθήκες που προσεγγίζουν συνθήκες μόνιμης ροής και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την σχέση Ghyben-Herzberg.

Επίσης, θεωρείται ότι ο υδροφορέας είναι ισότροπος και ομογενής με οριζόντιο αδιαπέρατο πυθμένα. Η γεωμετρία του είναι απλή και γνωστή με γνωστές παραμέτρους.

Τέλος, θεωρείται ότι ο υδροφορέας είναι φρεάτιος με ελεύθερη επιφάνεια, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, και η ροή είναι μόνιμη και οριζόντια για το γλυκό νερό ενώ το αλμυρό παραμένει ακίνητο.



**Σχήμα 3.2:** Σχηματική αναπαράσταση του φρεάτιου υδροφορέα για τον καθορισμό των παραμέτρων. Περίπτωση που ο κώνος τέμνει τη βάση του υδροφορέα.



**Σχήμα 3.3:** Τομή υδροφόρου Σαντορίνης όπου φαίνεται ο φακός γλυκού νερού καθώς και τα όρια της υπαλιμύρωσης.

Όπως φαίνεται στη κάθετη τομή του Σχήματος 3.2 υπάρχει μια διακριτή επιφάνεια που διαχωρίζει το γλυκό από το αλμυρό νερό και έστω  $x_T$  το σημείο όπου η επιφάνεια αυτή τέμνει τον αδιαπέρατο πυθμένα του υδροφορέα. Έτσι διακρίνονται τρεις ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στην ζώνη 1 ο υδροφορέας συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένας φρέατος υδροφορέας με αδιαπέρατο υπόβαθρο. Στην ζώνη 2 θεωρείται ότι το γλυκό νερό επιπλέει πάνω στο θαλασσινό νερό λόγω της διαφοράς ειδικού βάρους. Η ζώνη 3 περιλαμβάνει τις περιοχές τροφοδοσίας του υδροφορέα.

Επίσης, όπως φαίνεται το σχήμα 3.3 το γλυκό νερό μπορεί να σχηματίζει έναν φακό πάνω από το αλμυρό νερό. Αυτό εμφανίζεται σε υπόγειους υδροφορείς με πολύ μεγάλο βάθος.

Θεωρείται ότι δεν υπάρχει ανάμειξη μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού στην ζώνη 2, δηλαδή ότι υπάρχει μια διακριτή διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ αυτών η οποία περιγράφεται από την εξίσωση Ghyben-Herzberg:

$$h_f - d = \delta \cdot \xi \quad (3.2)$$

$$\text{,όπου } \delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \approx 0.025$$

$\rho_s$ =η πυκνότητα του αλμυρού νερού

$\rho_f$ =η πυκνότητα γλυκού νερού

Για μόνιμη οριζόντια ροή, η διαφορική εξίσωση ροής στον φρέατο υδροφορέα για την ζώνη 1 γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \cdot h \cdot \frac{\partial h_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \cdot h \cdot \frac{\partial h_y}{\partial y}) = 0 \quad (3.3)$$

Ενώ στην ζώνη 2 γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K * b * \frac{\partial h_x}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K * b * \frac{\partial h_y}{\partial y}) = 0 \quad (3.4)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να περιγραφούν από την γενική εξίσωση:

$$\nabla(K * b * \nabla h_f) = 0 \quad (3.5)$$

Αν  $N$  είναι η επιφανειακή τροφοδοσία και  $Q_w$  η συνολική άντληση η (3.5) γίνεται:

$$\nabla(K * b * \nabla h_f) + N - Q_w = 0 \quad (3.6)$$

Το πάχος  $b$  του καθαρού νερού δεν είναι το ίδιο για τις ζώνες στην περίπτωση του περιορισμένου και φρεάτιου υδροφορέα.

$$b = h_f \quad \text{φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 1}$$

$$b = h_f - d + \xi \quad \text{φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 2}$$

$$b = B \quad \text{περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 1}$$

$$b = \xi - d + B \quad \text{περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 2}$$

Ακολουθώντας τις εργασίες των Strack (1976) και Cheng and Ouazar (1999) ορίζεται νέο δυναμικό ροής ως εξής:

**Φρεάτιος υδροφορέας:**

$$\phi = \frac{1}{2} [h_f^2 - (1 + \Delta s)d^2] \quad \text{Ζώνη 1} \quad (3.7)$$

$$\phi = \frac{1 + \Delta s}{2\Delta s} (h_f - d)^2 \quad \text{Ζώνη 2} \quad (3.8)$$

**Περιορισμένος υδροφορέας:**

$$\phi = B * h_f + \frac{\Delta s * B^2}{2} - (1 + \Delta s) * B * d \quad \text{Ζώνη 1} \quad (3.9)$$

$$\phi = \frac{(1 + \Delta s)}{2\Delta s} (h_f + \Delta s * b - (1 + \Delta s)d)^2 \quad \text{Ζώνη 2} \quad (3.10)$$

Στη θέση του σημείου επαφής  $x_r$  όπου η διεπιφάνεια συναντά τα αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφορέα ισχύει  $\xi=d$  οπότε η (3.2) δίνει  $h_f = (\Delta s + 1) * d$  και οι εξισώσεις του δυναμικού μετατρέπονται σε:

$$\phi = \frac{\Delta s(1 + \Delta s)}{2} * d^2 \quad \text{Φρεάτιος υδροφορέας} \quad (3.11)$$

$$\phi = \frac{\Delta s}{2} * B^2 \quad \text{Περιορισμένος υδροφορέας} \quad (3.12)$$

Στη θέση τ ισχύει  $\phi_{\alpha\rho} = \phi_{\delta\epsilon\xi} = \phi$ , οπότε η νέα συνάρτηση δυναμικού που ορίζεται από τις εξισώσεις (3.6) είναι συνεχείς στο όριο μεταξύ των ζωνών 1 και 2. Από τις εξισώσεις τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η συνάρτηση δυναμικού φ ικανοποιεί την εξίσωση (Mantoglou, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K * \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K * \frac{\partial \phi}{\partial y}) + N - Q = 0$$

Στην περίπτωση του ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα προκύπτει η εξίσωση Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} = 0$$

Στο χείλος της διεπιφάνειας ισχύει  $x=0$ ,  $\xi=0$ , οπότε  $h_f = d$ . Άρα σύμφωνα με την εξίσωση (3.8) το δυναμικό θα είναι  $\phi=0$ , τόσο στον φρεάτιο όσο και στον περιορισμένο υδροφορέα.

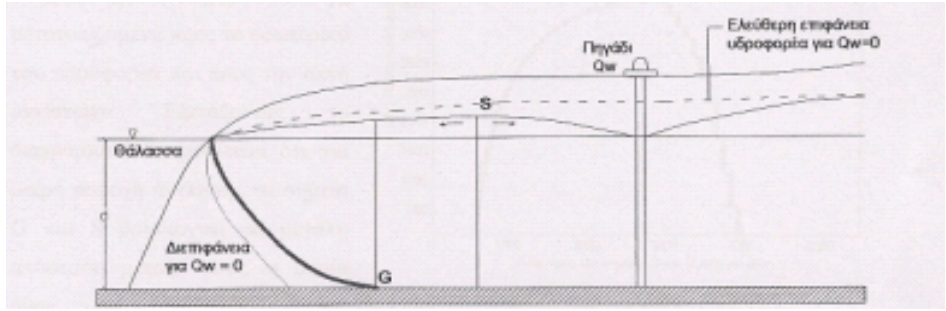
### 3.4 Ύπαρξη φρέατος άντλησης

Έστω ένας παράκτιος υδροφορέας που περιορίζεται στην μία πλευρά από την θάλασσα, αλλά μπορεί να θεωρηθεί ότι στις άλλες κατευθύνσεις είναι άπειρων διαστάσεων. Η παροχή ανά μονάδα πλάτους είναι q. Σε απόσταση  $x_w$  υπάρχει ένα φρέαρ άντλησης  $Q_w$ . Το δυναμικό σε κάθε σημείο του υδροφορέα σύμφωνα με τον Strack υπολογίζεται από την σχέση:

$$\phi = \frac{q}{K} x + \frac{Q_w}{4 * \pi * K} * \ln \left[ \frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (3.13)$$

Η θέση του ποδιού της αλάτινης σφήνας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, αφού είναι γνωστό το δυναμικό, τόσο για φρεάτιο όσο και για περιορισμένο υδροφορέα:

$$\phi_{toe} = \frac{q}{K} x_{toe} + \frac{Q_w}{4 * \pi * K} * \ln \left[ \frac{(x_{toe} - x_w)^2 + y^2}{(x_{toe} + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (3.14)$$



**Σχήμα 3.4:** Φρεάτιος υδροφορέας με άντληση.

Στο σχήμα 3.4 επισημαίνονται τα σημεία

- G: πόδι αλάτινης σφήνας με δυναμικό ίσο με  $\Delta s(1+\Delta s)/2 \cdot d^2$
- S: stagnation point. Οριοθετεί την περιοχή τροφοδοσίας του φρέατος στην ζώνη 2, επισημαίνοντας ουσιαστικά το τέλος του κώνου ταπείνωσης. Λειτουργεί ως υπόγειος υδροκρίτης.

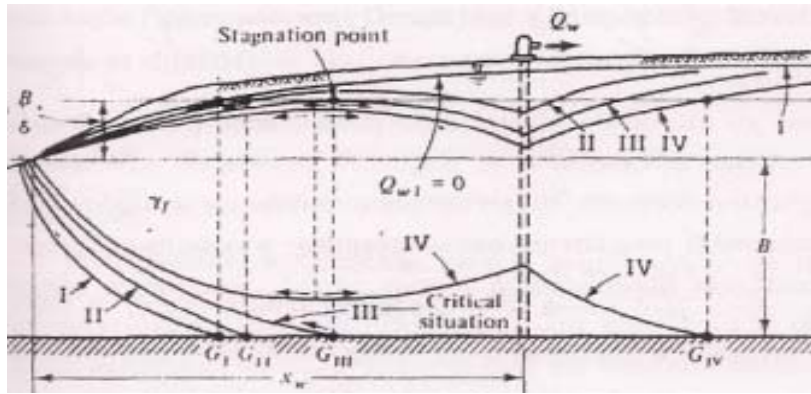
Αύξηση της παροχής άντλησης οδηγεί σε μετατόπιση του σημείου G προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της παροχής  $Q_c$  για την οποία δημιουργείται μια ασταθής κατάσταση των σημείων επαφής, όπου το πόδι της αλάτινης σφήνας G συμπίπτει με το stagnation point και ονομάζεται οριακή θέση. Επιπλέον αύξηση της παροχής άντλησης  $Q_w$ , οδηγεί σε πολύ γρήγορη μετακίνηση της θέσης του σημείου επαφής σε σημεία γύρω από το φρέαρ, δηλαδή για  $Q_w \geq Q_c$  επέρχεται γρήγορη υφαλμύρωση του φρέατος και καταστροφή του. Η κρίσιμη τιμή αυτή της παροχής είναι η μέγιστη δυνατή χωρίς να υφαλμυρωθεί το φρέαρ και δίνεται από τον Strack (1976) και Cheng and Ouazar (1999) από τη σχέση:

$$\phi_t = \frac{q^* x_w}{K} \sqrt{1 - \frac{Q}{\pi^* q^* x_w}} + \frac{Q_c}{2^* \pi^* K} \ln \left[ \frac{1 - \sqrt{\frac{1 - Q_c}{\pi^* q^* x_w}}}{1 + \sqrt{\frac{1 - Q_c}{\pi^* q^* x_w}}} \right] \quad (3.15)$$

Αφού έχει υπολογιστεί το δυναμικό στο πόδι της αλάτινης σφήνας.

Στο Σχήμα 3.5 που ακολουθεί απεικονίζονται συνοπτικά οι θέσεις της διεπιφάνειας που παρουσιάζονται κατά την άντληση φρέατος σε παράκτιο υδροφορέα και αναλύθηκε παραπάνω.





**Σχήμα 3.5:** Συνοπτική απεικόνιση θέσεων της διεπιφάνειας κατά την άντληση φρέατος. (από τον J. Bear)

Όταν τα πηγάδια άντλησης είναι περισσότερα του ενός και αντλούν ταυτόχρονα το δυναμικό προκύπτει σύμφωνα με τους Cheng and Ouazar (1999) από τη σχέση:

$$\phi = \frac{q}{K}x + \sum \frac{Q_i}{4 * \pi * K} * \ln \left[ \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad (3.16)$$

,όπου  $Q_i$  η παροχή άντλησης κάθε φρέατος

$x_i, y_i$  οι συντεταγμένες κάθε φρέατος άντλησης

Η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων ροής με παρουσία φρεάτων αναφέρεται σε ημιαπείρων διαστάσεων. Σε πρακτικά προβλήματα, οι υδροφορείς έχουν πεπερασμένες διαστάσεις και συγκεκριμένα όρια.

Στην περίπτωση τυχαίου σχήματος υδροφορέα με μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα ή τροφοδοσία, η επίλυση με αναλυτικές σχέσεις είναι αδύνατη (Mantoglou, 2004). Εφαρμόζονται τότε αριθμητικές μέθοδοι μέσω μοντέλων, όπως το MODFLOW το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## 2.8 Εκτελούμενοι υπολογισμοί

Ο εξεταζόμενος φρεάτιος υδροφορέας θεωρείται ομογενείς και ισότροπος, τυχαίου σχήματος. Τροφοδοτείται μέσω επιφανειακής κατεΐσδυσης ενώ η απαιτούμενη ποσότητα νερού για τις διάφορες χρήσεις εξασφαλίζεται από αντλήσεις. Ισχύει η εξίσωση συνέχειας:

$$K * \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N - Q_w = 0 \quad (3.17)$$

,όπου  $\phi$  είναι το δυναμικό και

$Q_w$  παίρνει θετικές τιμές στην περίπτωση άντλησης και αρνητικές στην περίπτωση τροφοδοσίας.

Η μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιείται στην περίπτωση του υδροφορέα που μελετάται, είναι όμοια με την εξίσωση οριζόντιας ροής για ομογενή και ισότροπο περιορισμένο υδροφορέα:

$$T * \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N - Q_w = 0 \quad (3.18)$$

Οι διαφορές μεταξύ των εξισώσεων (3.17) και (3.18) είναι ότι αντί του πιεζομετρικού φορτίου  $\eta$  (3.17) χρησιμοποιεί το δυναμικό και αντί της μεταφορικότητας  $T$  χρησιμοποιεί την υδραυλική αγωγιμότητα. Έτσι, ο φρεάτιος παράκτιος υδροφορέας μπορεί να προσομοιωθεί ως ένας συνήθης περιορισμένος υδροφορέας.

Για την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου χρησιμοποιείται το λογισμικό επίλυσης προβλημάτων ροής Modflow, αφού η γεωμετρία του εξεταζόμενου υδροφορέα δεν είναι απλή και έτσι δεν επιτρέπει την επίλυση με αναλυτικές μεθόδους. Με την εκτέλεση του λογισμικού Modflow υπολογίζεται το δυναμικό  $\phi$  σε κάθε φάση.

Η σχέση (2.28), για την ζώνη 2, επιλύεται αρχικά ως προς  $h_f$ :

$$\phi = \frac{1 + \Delta s}{2\Delta s} (h_f - d)^2 \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2 * \Delta s}{1 + \Delta s} * \phi + d} \quad (3.19)$$

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται για κάθε θέση του υδροφορέα και έτσι υπολογίζεται το αντίστοιχο φορτίο του γλυκού νερού  $h_f$ . Υπενθυμίζεται ότι το  $d$  είναι το βάθος του υδροφορέα, από την ελεύθερη επιφάνεια ως τον πυθμένα αυτού.

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

## 4.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση αποτελεί αναπαράσταση της λειτουργίας του υπόγειου υδροφορέα, με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού. Εξετάζεται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης και η εξέλιξη αυτής καθώς και η συμπεριφορά του υδροφορέα σε περιπτώσεις αλλαγής της άντλησης και της τροφοδοσίας.

Σχετικά με την προσομοίωση, υπάρχουν αρκετά μοντέλα που ειδικεύονται σε αυτή. Το μοντέλο στο οποίο βασίστηκε η προσομοίωση του παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα της Σαντορίνης είναι το Modflow.

Το Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988) αποτελεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης και πρόγνωσης της συμπεριφοράς του υπόγειου υδροφορέα. Χρησιμοποιεί την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για να επιλύσει προβλήματα ροής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ως υπολογιστικό εργαλείο για τον προσδιορισμό του δυναμικού  $\phi$ , όπως ορίζεται από τον Strack.

Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά, από επιστημονικούς φορείς και ερευνητικά ιδρύματα, προεπεξεργασίας των δεδομένων εισόδου στο Modflow. Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το Processing Modflow for Windows (PMWIN), που σε συνδυασμό με το Modflow αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσομοίωσης κίνησης υπόγειου νερού.

Στο PMWIN εισάγονται τα δεδομένα όπου καταχωρούνται σε binary αρχεία, για να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα από το Modflow. Ως δεδομένα θεωρούνται το σχήμα, η έκταση, το είδος του υδροφορέα, οι οριακές και οι αρχικές συνθήκες, η τροφοδοσία, οι αντλήσεις κτλ. Ο υδροφορέας αναπαρίσταται ως κάρναβος κατάλληλων διαστάσεων. Σε κάθε κελί του καννάβου αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή δεδομένων και αποτελεσμάτων. Η τελική επίλυση γίνεται από το Modflow.

Στην συνέχεια, με την βοήθεια του περιβάλλοντος του Matlab, και χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Ghyben-Herzberg υπολογίζεται και αναπαρίσταται η θέση και η μορφή της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού.

## 4.2 Περιγραφή λειτουργίας του Modflow

### 4.2.1 Το μαθηματικό μοντέλο

Το Modflow επιλύει τη εξίσωση της συνέχειας στις τρεις διαστάσεις για την κίνηση του υπογείου νερού. Βασίζεται στο νόμο του Darcy σε συνθήκες και μόνιμης και μη μόνιμης ροής. Η εξίσωση αναφέρεται σε στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο του υδροφορέα και περιγράφεται μαθηματικά ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x * \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y * \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z * \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (4.1)$$

Όπου  $K_x, K_y, K_z$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος των αξόνων  $x, y, z$  [ $L T^{-1}$ ]

$h$  είναι το πιεζομετρικό φορτίο [ $L^{-1}$ ]

$W$  είναι η παροχή άντλησης ή τροφοδοσίας του υδροφορέα ανά μονάδα όγκου [ $T^{-1}$ ]

$S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου [ $L^{-1}$ ]

Σε γενικές γραμμές οι παράμετροι  $K_x, K_y, K_z$  και  $S_s$  αποτελούν συναρτήσεις χώρου ( $K_x=K_x(x,y,z)$  κλπ), ενώ η παράμετρος  $W$  είναι συνάρτηση χώρου και χρόνου ( $W=W(x,y,z,t)$ ).

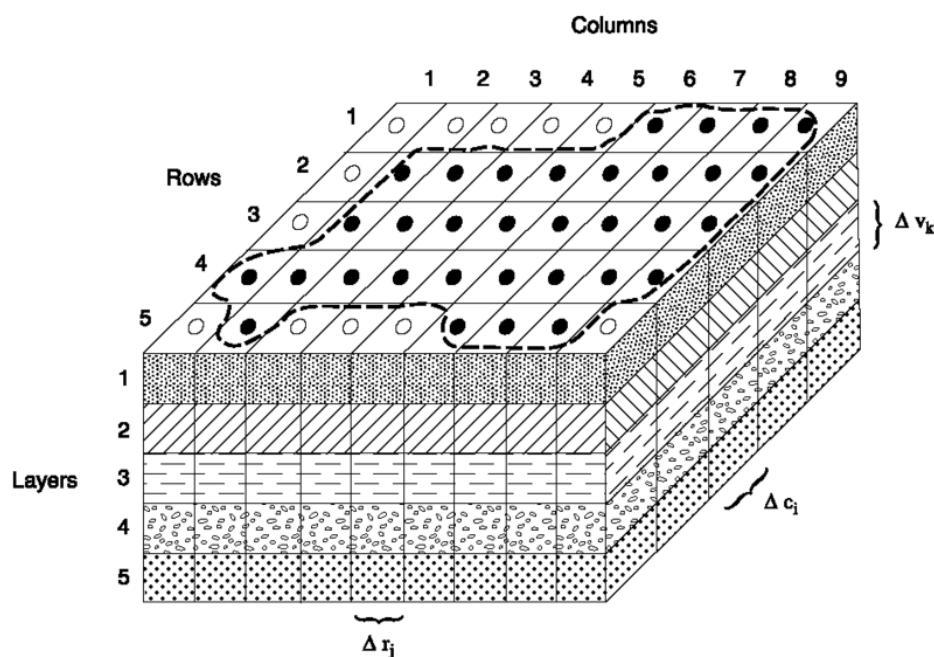
Η εξίσωση (4.1) μαζί με τις οριακές και αρχικές συνθήκες στην περιοχή του συστήματος προσομοίωσης αποτελούν την μαθηματική αναπαράσταση της ροής των υπογείων νερών στο σύστημα. Αποτελεί μια χωροχρονική μεταβολή του υδραυλικού φορτίου  $h(x,y,z,t)$  έτσι ώστε όταν αντικατασταθούν οι παράγωγοι του  $h$  σε σχέση με τον χώρο και τον χρόνο σε αυτή, οι αρχικές και οριακές συνθήκες ικανοποιούνται (McDonald and Harbaugh, 1988).

Η επίλυση της εξίσωσης (4.1) χρησιμοποιείται για απλά προβλήματα ροής. Όταν ο υδροφορέας είναι σύνθετος, σχηματικά ή λειτουργικά, τότε εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι με την βοήθεια κατάλληλων μοντέλων. Στο Modflow εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών. Σε αυτή την

μέθοδο, η διαφορική εξίσωση που αναπαριστά την ροή του ρευστού διακριτοποιείται στο χώρο και το χρόνο (McDonald and Harbaugh, 1988).

#### 4.2.2 Διακριτοποίηση Υδροφορέα

Η εξίσωση ροής (4.1) που προσεγγίζεται αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών βασίζεται στους McDonald and Harbaugh (1988). Το σχήμα 4.1 που ακολουθεί, απεικονίζει έναν χωρικά διακριτοποιημένο υδροφόρο.

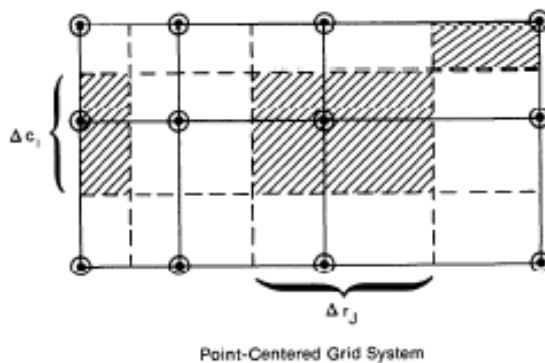
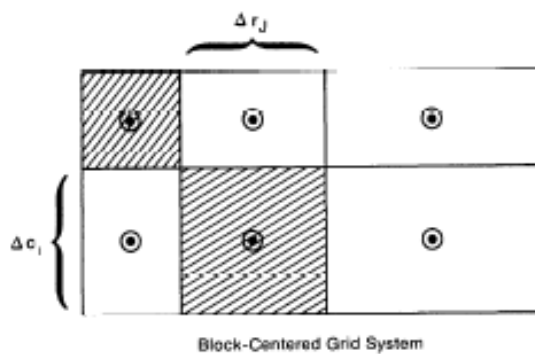






Σχήμα 4.1: Διακριτοποιημένος Υδροφόρος (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ο υδροφόρος αποτελείται από ένα σύνολο φατνίων (κελιών) που σχηματίζουν έναν τρισδιάστατο κάναβο. Η θέση κάθε φατνίου περιγράφεται από την γραμμή (row), τη στήλη (column), και το επίπεδο (layer) που βρίσκονται. Έτσι ορίζεται από τρεις παραμέτρους  $i, j, k$ , όπου  $i$  είναι η γραμμή,  $j$  είναι η στήλη και  $k$  είναι το οριζόντιο επίπεδο που ανήκει. Οι γραμμές και οι στήλες τέμνονται κάθετα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ορθογώνια φατνία σε κάθε επίπεδο. Οι γραμμές θεωρούνται παράλληλες στον άξονα  $x$  και οι στήλες στον άξονα  $y$  του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Επίσης, το πλάτος του φατνίου στον άξονα των  $y$ , δηλαδή σε μια συγκεκριμένη γραμμή  $i$ , είναι  $\Delta c_i$ , το πλάτος αυτού στον άξονα των  $x$ , δηλαδή σε μια συγκεκριμένη

στήλη  $y$ , είναι  $\Delta r_i$  και το πάχος του στο άξονα των  $z$ , δηλαδή σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο  $k$ , είναι  $\Delta v_k$ . Από το σχήμα 4.1 διακρίνεται ότι η αρίθμηση στον άξονα του  $z$  ξεκινά από την κορυφή του υδροφορέα και αυξάνει προς τα κάτω, σε αντιπαράθεση με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

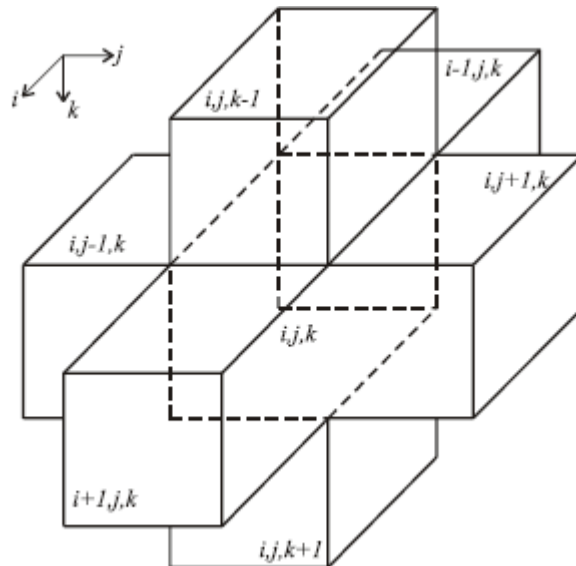
Επιλύοντας την διακριτοποιημένη εξίσωση και χρησιμοποιώντας τις οριακές και αρχικές συνθήκες υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο στο κέντρο του φατνίου, το οποίο ονομάζεται κόμβος. Υπάρχουν δύο εκδοχές για την θέση του κόμβου (block-centered formulation), ο σχηματισμός με κέντρο το κελί και ο σχηματισμός με κέντρο το σημείο (point-centered formulation), οι οποίες φαίνονται και στο σχήμα 4.2 αντίστοιχα.



- Explanation
-  Nodes
  -  Grid Lines
  -  Cell Boundaries for Point Centered Formulation
  -  Cells Associated With Selected Nodes

**Σχήμα 4.2:** Διαφορά ανάμεσα σε σχηματισμό με κέντρο το κελί (block-centered formulation) και με κέντρο το σημείο (point-centered formulation). (McDonald and Harbaugh, 1988)

Για τον υπολογισμό οποιασδήποτε παραμέτρου σε ένα κελί  $i, j, k$  χρησιμοποιούνται τα έξι γειτονικά κελιά  $i-1, j, k$ ,  $i+1, j, k$ ,  $i, j-1, k$ ,  $i, j+1, k$ ,  $i, j, k-1$ ,  $i, j, k+1$ , όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί.



**Σχήμα 4.3:** Κελί  $i, j, k$  με τα έξι γειτονικά του. (McDonald and Harbaugh, 1988)

#### 4.2.3 Εξίσωση ροής με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών

Η εξίσωση ροής υπογείων υδάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας: το άθροισμα όλων των ροών εντός και εκτός του κελιού πρέπει να είναι ίσο με τον ρυθμό μεταβολής της αποθηκευτικότητας εντός αυτού (McDonald and Harbaugh, 1988). Με την υπόθεση ότι η πυκνότητα των υπόγειων υδάτων είναι σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει την ισορροπία της ροής στο κελί είναι:

$$\sum Q_i = SS * \frac{dh}{dt} * \Delta V \quad (4.2)$$

Όπου  $Q_i$  είναι ο ρυθμός ροής του νερού στο κελί [ $L^3T^{-1}$ ]

$SS$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα [ $L^{-1}$ ]

$\Delta V$  είναι ο όγκος του κελιού [ $L^3$ ]

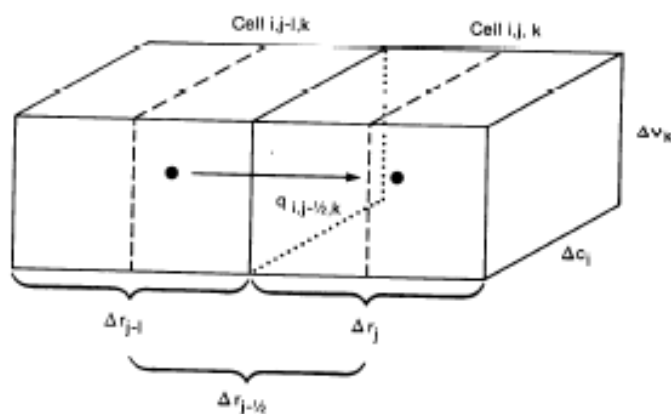
$dh$  είναι η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου σε χρονικό διάστημα  $dt$

Το δεξί μέλος της εξίσωσης (4.2) εκφράζει τη μεταβολή του όγκου του νερού στο κελί σε χρόνο  $dt$ .

Για να απλοποιηθεί η παραπάνω εξίσωση (4.2), οι ροές θεωρούνται θετικές, όταν εισέρχονται κελί  $i, j, k$  και αρνητικές, που συνήθως ενσωματώνονται στο νόμο Darcy, όταν εξέρχονται από αυτό. Μετά από αυτές τις συμβάσεις, η εισροή του νερού στο κελί  $i, j, k$  από το κελί  $i, j-1, k$  κατά την διεύθυνση της γραμμής  $i$  δίνεται από το νόμο Darcy και εκφράζεται ως εξής:

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (4.3)$$

- Όπου  $KR_i$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος της γραμμής  $R_i$  μεταξύ των κόμβων  $i, j, k$  και  $i, j-1, k$  [ $LT^{-1}$ ]  
 $\Delta c_i \Delta v_k$  είναι η επιφάνεια της διατομής μεταξύ των κελιών [ $L^2$ ]  
 $H_{i,j,k} \ h_{i,j-1,k}$  είναι το πιεζομετρικό φορτίο στο κελί  $i, j, k$  και  $i, j-1, k$  αντίστοιχα [ $L$ ]  
 $\Delta r_{j-1/2}$  είναι η απόσταση μεταξύ των κελιών  $i, j, k$  και  $i, j-1, k$  [ $L$ ]



**Σχήμα 4.4:** Ροή από κελί  $i, j-1, k$  στο κελί  $i, j, k$ . (McDonald and Harbaugh, 1988)

Αντίστοιχα, η ροή κατά μήκος της ίδιας γραμμής  $R_i$  μεταξύ των κελιών  $i, j, k$  και  $i, j+1, k$  εκφράζεται ως:

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (4.4)$$

Αντίστοιχες εκφράσεις μπορούν, επίσης, να γραφούν και μεταξύ των υπολοίπων πέντε γειτονικών κελιών του  $i, j, k$  (σχήμα 4.3).



Έτσι κατά την διεύθυνση της στήλης  $C_i$ , η ροή μεταξύ των κελιών  $i-1, j, k$  και  $i, j, k$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \cdot \Delta r_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (4.5)$$

Ομοίως, η ροή μεταξύ των κελιών  $i, j, k$  και  $i+1, j, k$  είναι:

$$q_{i+1/2,j,k} = KC_{i+1/2,j,k} \cdot \Delta r_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}}{\Delta c_{i+1/2}} \quad (4.6)$$

Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση η ροή μεταξύ των κελιών  $i, j, k-1$  και  $i, j, k$  δίνεται από την σχέση:

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta r_k \cdot \frac{h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{K-1/2}} \quad (4.7)$$

Ομοίως, η ροή μεταξύ των κελιών  $i, j, k$  και  $i, j, k+1$  είναι:

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \cdot \Delta c_i \cdot \Delta r_k \cdot \frac{h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}}{\Delta v_{K+1/2}} \quad (4.8)$$

Ο συμβολισμός μπορεί να απλοποιηθεί με το συνδυασμό των διαστάσεων του κελιού και της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ένα ενιαίο σταθερό όρο, την "αγωγιμότητα" (conductance), κατά την διεύθυνση της γραμμής ως CR (κατά την διεύθυνση της στήλης ως CC ενώ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ως CV). Για παράδειγμα:

$$CR_{i,j-1,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \frac{\Delta c_i \cdot \Delta v_k}{r_{j-1/2}} \quad (4.9)$$

Από την εξίσωση (4.8) και (4.9) προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις για κάθε πλευρά του κελιού  $i, j, k$ :

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.10)$$

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.11)$$

$$q_{i,j-1/2,k} = CC_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.12)$$

$$q_{i,j+1/2,k} = CC_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.13)$$

$$q_{i,j,k-1/2} = CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (4.14)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (4.15)$$

Οι εξισώσεις (4.10) έως (4.15) περιγράφουν τις εσωτερικές ροές νερού στο κελί  $i, j, k$  από τα έξι γειτονικά του. Οι εξωτερικές εισροές νερού στο κελί αυτό περιγράφονται από την εξίσωση:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (4.16)$$

,όπου  $a_{i,j,k,n}$  είναι η ροή από την n-ιοστή εξωτερική πηγή στο κελί i, j, k [ $L^3T^{-1}$ ]

$p_{i,j,k,n}$  είναι σταθερά [ $L^2T^{-1}$ ]

$q_{i,l,k,n}$  είναι σταθερά [ $L^3T^{-1}$ ]

Εάν υπάρχουν N εξωτερικές πηγές ή πηγάδια τότε η συνολική ροή του νερού στο κελί i, j, k δίνεται από την σχέση:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad (4.17)$$

Ορίζοντας ως  $P_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n}$  και  $Q_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$  η εξίσωση (4.17) γίνεται:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + Q_{i,j,k,n} \quad (4.18)$$

Εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις στην εξίσωση συνέχειας (4.2) του κελιού i, j, k προκύπτει:

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} = SS_{i,j,k} \cdot \frac{dh_{i,j,k}}{dt} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \quad (4.19)$$

όπου  $\frac{dh_{i,j,k}}{dt}$  είναι η πεπερασμένη διαφορά που αντικαθιστά την

παράγωγο ως προς τον χρόνο [ $LT^{-1}$ ]

$SS_{i,j,k}$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα στο κελί i, j, k [ $LT^{-1}$ ]

$\Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k$  είναι ο όγκος του κελιού i, j, k [ $L^3$ ]

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση συνέχειας τις (4.10) έως (4.15) και την (4.18) αυτή γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-1/2,l,k} \cdot (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + \\ & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,l,k-1} - h_{i,l,k}) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) + \\ & + P_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \cdot \frac{dh_{i,j,k}}{dt} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \end{aligned} \quad (4.20)$$

Η προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών της παραγώγου  $\frac{dh_{i,j,k}}{dt}$ ,

εκφράζεται ως η διαφορά των υδραυλικών φορτίων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές  $t_m$  και  $t_{m-1}$ :

$$\left( \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)_m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (4.21)$$

Επομένως, η παράγωγος του υδραυλικού φορτίου εκφράζεται ως η μεταβολή του  $h$  στο χρονικό διάστημα από την προηγούμενη χρονική στιγμή  $t_{m-1}$  έως την χρονική στιγμή  $t_m$  στην οποία υπολογίζεται το φορτίο. Για τον λόγο αυτό, η προσέγγιση ονομάζεται «οπισθοδρομική διαφορά ή backward difference». Υπάρχουν και άλλοι τρόποι προσέγγισης της παραγώγου του χρόνου όπως η «προς τα μπροστά διαφορά ή forward difference», όπου η παράγωγος προσεγγίζεται μεταξύ των χρονικών βημάτων  $t_m$  και  $t_{m+1}$ , και η «κεντρική διαφορά ή central difference» όταν η παράγωγος προσεγγίζεται μεταξύ των χρονικών βημάτων  $t_{m-1}$  και  $t_{m+1}$ . Η τελευταία, όμως, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες είναι αριθμητικά ασταθής. Η εξίσωση συνέχειας με την προσέγγιση των οπισθοδρομικών διαφορών γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k,m}^m) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,l,k} \cdot (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + P_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} \cdot \Delta r_j \cdot \Delta c_i \cdot \Delta v_k \cdot \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (4.22)
 \end{aligned}$$

Τα γνωστά μεγέθη στη εξίσωση (4.22) είναι ο όρος  $Q_{i,j,k}$ , οι συντελεστές των υδραυλικών φορτίων και το υδραυλικό φορτίο στην αρχή του χρονικού βήματος  $h_{i,j,k}^{m-1}$ . Τα άγνωστα μεγέθη είναι οι επτά τιμές του υδραυλικού φορτίου στο χρονικό βήμα  $m$ . Πρόκειται, λοιπόν, για μια εξίσωση με επτά αγνώστους με αποτέλεσμα να μην μπορεί να λυθεί ανεξάρτητα. Όμως, αυτή η εξίσωση γράφεται για κάθε κόμβο του δικτύου των πεπερασμένων διακοπών και αφού υπάρχει μόνο ένας άγνωστος για κάθε κόμβο τότε προκύπτει ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων με  $n$  αγνώστους.

Για την επίλυση του συστήματος, οι εξισώσεις αναδιατάσσονται έτσι ώστε οι όροι που περιέχουν τη μεταβλητή του υδραυλικού φορτίου στο τέλος του τρέχοντος χρονικού βήματος  $m$  τοποθετούνται στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης ενώ οι άλλοι όροι τοποθετούνται στην δεξιά. Προκύπτει τελικά μια εξίσωση για κάθε κελί μεταβλητού φορτίου στον κλάδο των πεπερασμένων διαφορών ,που σε μορφή πίνακα γράφεται:

$$[A] \{h\} = \{q\}$$

Όπου  $[A]$  είναι ο πίνακας των συντελεστών του υδραυλικού φορτίου στο αριστερό μέρος των εξισώσεων

{h} είναι ένας διανυσματικός πίνακας των τιμών του υδραυλικού φορτίου στο τέλος του χρονικού βήματος m

{q} είναι διάνυσμα των σταθερών όρων για όλους τους κόμβους του δικτύου.

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής το δεύτερο μέλος της εξίσωσης (4.22) είναι ίσο με 0. Δηλαδή:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1/2,k} \cdot (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k,m}^m) + CR_{i,j+1/2,k} \cdot (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-1/2,l,k} \cdot (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + CC_{i+1/2,j,k} \cdot (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} \cdot (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} \cdot (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + P_{i,j,k} \cdot h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = 0
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Ως δεδομένα, χρησιμοποιούνται οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι φορτίσεις (π.χ. άντληση, τροφοδοσία) και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα. Με επαναληπτική διαδικασία υπολογίζονται τα υδραυλικά φορτία στους κόμβους του καννάβου τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Σε περίπτωση μη μόνιμης ροής, το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, δηλαδή διαφορετικά βήματα. Τα δεδομένα είναι οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι φορτίσεις, οι υδραυλικές παράμετροι και τα διάφορα χρονικά βήματα που υπολογίζεται το υδραυλικό φορτίο. Οι αρχικές τιμές των υδραυλικών φορτίων, οι οποίες ορίζονται από τον μελετητή, αποτελούν τα υδραυλικά φορτία στην αρχή του 1<sup>ου</sup> χρονικού βήματος και συμβολίζεται στην (4.22) ως  $h_{i,j,k}^1$  για κάθε κόμβο. Υπολογίζονται οι τιμές των υδραυλικών φορτίων στο τέλος του 1<sup>ου</sup> βήματος  $h_{i,j,k}^2$ . Θεωρώντας ως δεδομένα τα υδραυλικά φορτία  $h_{i,j,k}^2$  υπολογίζονται τα υδραυλικά φορτία στο τέλος του δεύτερου χρονικού βήματος κ.ο.κ. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν τα υδραυλικά φορτία έχουν υπολογιστεί για όλα τα χρονικά βήματα που έχουν ορισθεί. Προκύπτουν, λοιπόν, τόσες τελικές τιμές υδραυλικών φορτίων όσα είναι τα χρονικά βήματα. Ο υπολογισμός των υδραυλικών φορτίων στο τέλος του κάθε βήματος γίνεται, όπως και στην περίπτωση της μόνιμης ροής, με επαναληπτική διαδικασία.

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΗ ΜΕΣΑΡΙΑ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, δημιουργείται αρχικά ένα μοντέλο προσομοίωσης, στο οποίο αποδίδεται το πραγματικό σχήμα και τα ιδιαίτερα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Πάνω σε αυτό το μοντέλο προσομοίωσης έγινε η εκτέλεση του προγράμματος PMWIN και διερευνήθηκαν τα διάφορα σενάρια άντλησης και τροφοδοσίας. Πρόκειται ουσιαστικά για μια πρακτική εφαρμογή σε υδροφορέα τυχαίου σχήματος, μεταβαλλόμενης υδραυλικής αγωγιμότητας και τροφοδοσίας για την περίπτωση της μόνιμης ροής.

Τα απαραίτητα στοιχεία γεωλογίας και υδρογεωλογίας της περιοχής, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω, αντλήθηκαν από μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί στην νήσο Σαντορίνη από τους Π. Γιαννουλόπουλο και Α. Μαντόγλου, «Μαθηματικό μοντέλο του υδροφορέα της Μεσαριάς-Καρτεράδο στην νήσο Σαντορίνη».

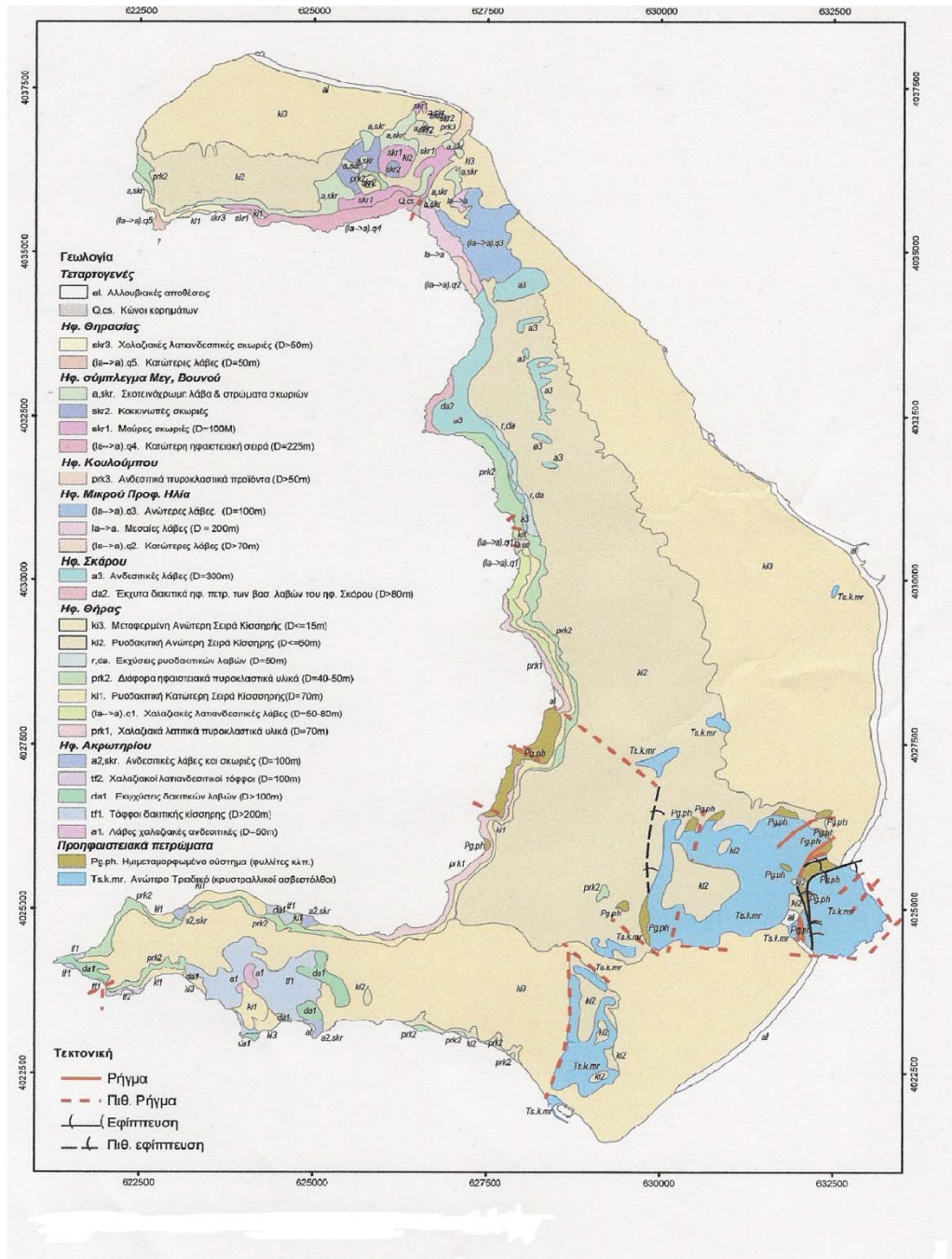
#### 5.2 Υδρολιθολογία ευρύτερης περιοχής

Η υδρολιθολογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών που συναντώνται στη νήσο Σαντορίνη καθορίζουν την διαμόρφωση των υδροφόρων σχηματισμών.

Η γεωλογική διάρθρωση της νήσου αποτυπώνεται λεπτομερώς στο γεωλογικό χάρτη (βλ. σχήμα) έκδοσης ΙΓΜΕ κλίμακας 1:50000 (Pichler et. Al., 1980).

Η γεωλογική δομή της νήσου αποτελείται ως επί το πλείστον από ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία ταξινομούνται ανάλογα με τα κέντρα της ηφαιστειακής δραστηριότητας.

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

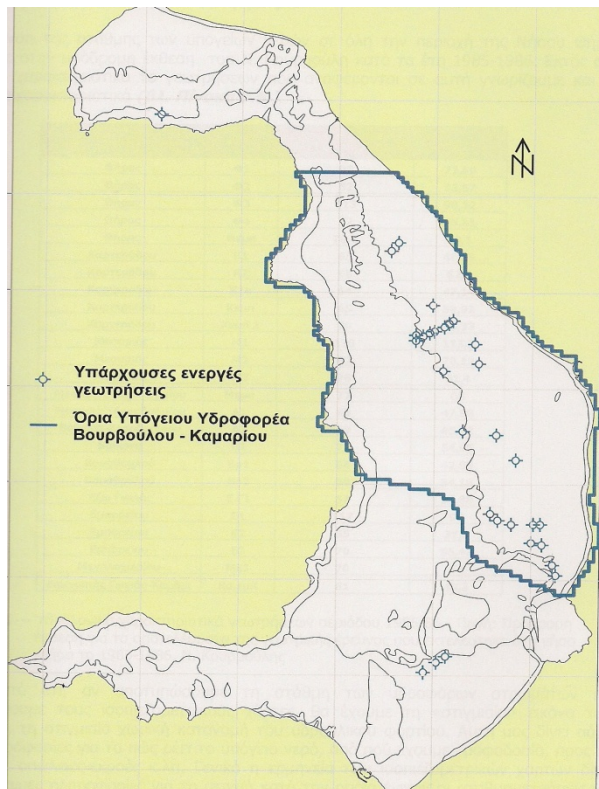


Σχήμα 5.1: Γεωλογικός Χάρτης Ν. Θήρας (Pichler et. al., 1980)

### 5.3 Υδροφόροι σχηματισμοί

Οι διάφοροι λιθολογικοί σχηματισμοί που παρουσιάζονται στο γεωλογικό χάρτη ταξινομούνται σε διαφορετικές υδρολιθολογικές ενότητες οι οποίες είναι, οι κρυσταλλικοί ασβεστόπλιθοι, τα ηφαιστειακά πετρώματα, οι φυλλίτικοι σχηματισμοί και οι αλλουβιακές αποθέσεις. Οι φυλλετικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως πρακτικά αδιαπέρατοι και δεν παρουσιάζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Τα ηφαιστειακά πετρώματα, που καλύπτουν και το σύνολο της νήσου, διακρίνονται σε δύο κύριες υδρολογικές ενότητες, αυτή του βορείου τμήματος (βόρεια του Προφήτη Ηλεία) και αυτή του νοτίου τμήματος που αναπτύσσεται στην ευρύτερη περιοχή του Εμπορείου-Ακρωτηρίου.

Ο υδροφόρος σχηματισμός που εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι αυτός της ευρύτερης περιοχής του Αεροδρομίου. Τα γεωγραφικά του όρια εκτείνονται νότια έως τις βόρειες παρυφές του όρους Προφήτη Ηλεία, και βόρεια έως την περιοχή του ρέματος Καρτεράδος. Καλύπτει τις ευρύτερες περιοχές Καρτεράδου, Μονόλιθου, Μεσαριάς, Βόθωνα και Καμαρίου.



Σχήμα 5.2: Όρια υπόγειου υδροφορέα Μεσαριάς της Σαντορίνης.

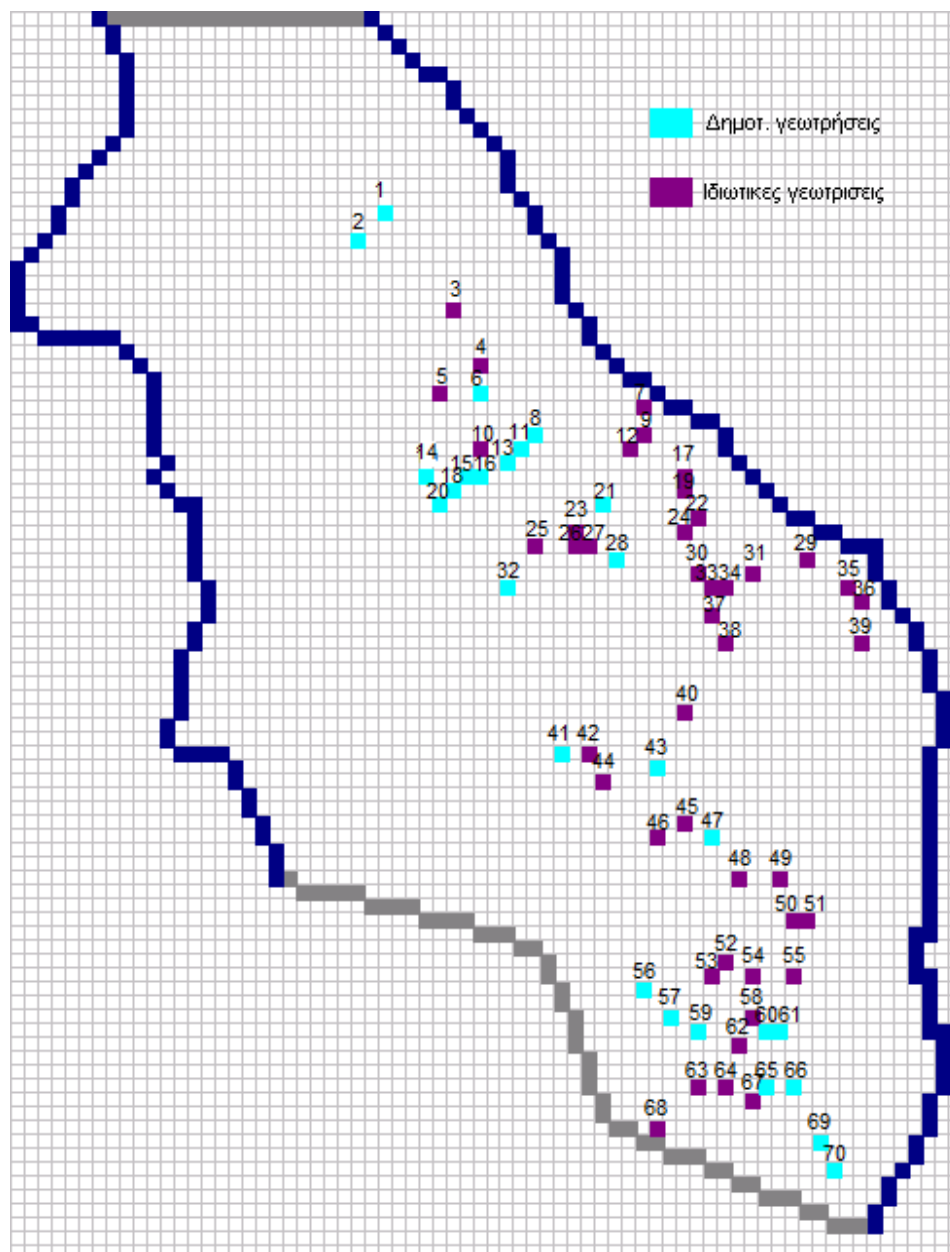
Ο υδροφόρος ορίζοντας που αναπτύσσεται στο νότιο τμήμα της νήσου στην περιοχή του Εμπορείου δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εκμεταλλεύσιμα υδατικά αποθέματα.

Η περιοχή προσομοίωσης περιορίζεται, λοιπόν, στον υδροφόρο σχηματισμό της ευρύτερης περιοχής Μεσαριάς-Αεροδρομίου. Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται ότι είναι "ελεύθερος". Η οροφή του είναι η επιφάνεια του εδάφους. Ωστόσο, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για το βάθος και τη μορφολογία του υποβάθρου του υδροφόρου σχηματισμού. Συνεπώς, για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε αυθαίρετα ως βάση του υδροφόρου στα -200m.

Η βόρεια και νότια πλευρά αποτελούν αδιαπέρατα όρια ενώ ανατολικά και δυτικά συνορεύει με θάλασσα, με αποτέλεσμα να λαμβάνονται ως όρια σταθερού υδραυλικού φορτίου  $h=0$  (συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους – Dirichlet) . Η τροφοδοσία του θεωρείται ότι γίνεται μόνο μέσω επιφανειακής κατείσδυσης.

Η συνολική ετήσια ποσότητα που μπορεί να αντληθεί από τον υδροφορέα, όπως έχει υπολογιστεί στην μελέτη των Π. Γιαννουλόπουλου και Α. Μαντόγλου από πρόγραμμα βελτιστοποίησης, είναι 696128 m<sup>3</sup>/έτος. Από την ποσότητα αυτή το νερό που μπορεί να αντληθεί από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις του Δήμου είναι 303,644 m<sup>3</sup>/έτος, ενώ το υπόλοιπο λόγω της κατανομής των γεωτρήσεων είναι διαθέσιμο για τις υπόλοιπες ιδιωτικές γεωτρήσεις της Νήσου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι υφιστάμενες δημόσιες γεωτρήσεις και οι ιδιωτικές γεωτρήσεις που υπάρχουν ενώ στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ποσότητες που αντλούν οι γεωτρήσεις αυτές.





Σχήμα 5.3: Κατανομή Δημοτικών και Ιδιωτικών γεωτρήσεων.

Πίνακας 5.1: Βέλτιστες παροχές των υφιστάμενων δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων

Αριθμός Γεώτρησης (κελιού)	Παροχή Άντλησης (m <sup>3</sup> /έτος)
<b>Δημοτικές γεωτρήσεις</b>	
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Βουρβούλου	
1	21426
2	24820
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Φηρών	
6	7227

8	4745
11	4745
13	5913
15	5913
16	5913
20	5913
14	15768
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Καρτεράδου	
21	7957
28	5475
32	23981
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Μεσαριάς- Βόθωνα	
41	8395
43	11972
47	10220
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Μέσα-Έξω Γωνιά	
56	16425
57	16425
59	18907
Γεωτρήσεις Δ. Διαμερ. Καμαρίου	
60	7665
61	7665
65	19929
66	11680
69	14819
70	7410
<b>Ιδιωτικές Γεωτρήσεις</b>	
3	18433
4	9235
5	16097
7	3650

9	2117
10	986
12	2117
17	2482
18	5913
19	2482
22	4198
23	4380
24	4198
25	12155
26	4380
27	5475
29	4380
30	3942
31	4709
33	3942
34	3942
35	3833
36	3833
37	7556
38	9782
39	5329
40	10512
42	10585
44	20404
45	10220
46	15330
48	17155
49	13432
50	7519
51	7519
52	16060
53	16060

54	8286
55	8979
58	8030
62	16425
63	19199
64	17520
67	17155
68	20294
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>696128</b>

Η μέση κατακόρυφη τροφοδοσία του υδροφόρου είναι κατανεμημένη ανάλογα με τις επιμέρους υδρολογικές λεκάνες. Οι ποσότητες κατακόρυφης διήθησης του Πίνακα 5.2 («Υπόγεια Απορροή») κατανεμήθηκαν σε 365 ημέρες με αναγωγή σε ημερήσια βάση.

**Πίνακας 5.2:** Υδρολογικές λεκάνες της Ν. Θήρας και μέσο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο.

Υδρολογική Λεκάνη	X	Y	Z	Επιφάνεια (Km <sup>2</sup> )	Περίμετρος (Km)	Μείση Βροχ/ση	Εξάτμιση	Ενεργή Βροχόπτωση ή Απορροή			Υπόγεια Απορροή m <sup>3</sup>	Επιφ. Απορροή m <sup>2</sup>	Αντλίες m <sup>3</sup>	Συνολική Έξοδος m <sup>3</sup>
								mm	m <sup>2</sup>	%				
YD000001	623.050	4,036.700	44.186	1.353	5.125	399.6	373.9	27.3	36866	6.82	33812	2267	0	36867
YD000002	624.000	4,036.850	35.881	2.481	6.861	394	369.8	25.7	63855	6.53	58761	3752	0	63858
YD000003	625.225	4,036.700	64.646	2.183	6.221	417.9	386	33.1	72323	7.93	65414	5324	0	72327
YD000004	626.450	4,036.725	88.840	1.586	5.114	438.6	397.9	41.7	66166	9.51	58848	5821	0	66169
YD000005	627.175	4,036.150	82.175	1.465	5.565	433.4	395	39.5	57906	9.12	51730	4874	0	57909
YD000006	628.175	4,034.875	95.311	1.534	5.050	444.8	400.9	44.9	68827	10.09	60961	6296	0	68830
YD000007	628.525	4,033.925	97.567	1.166	5.084	447.1	402	46	53657	10.29	47469	4961	0	53660
YD000008	628.550	4,033.350	133.411	1.642	6.139	476.1	414.3	62.3	102355	13.09	88457	11476	0	102360
YD000009	628.725	4,033.025	110.473	1.144	6.581	457.9	406.9	51.7	59139	11.29	51961	5817	0	59143
YD000010	629.450	4,032.925	46.261	0.676	5.182	407.7	379	30.1	20359	7.39	18558	1364	0	20360
YD000011	629.100	4,032.150	125.956	1.551	7.154	469.2	411.6	58.2	90302	12.41	78581	9595	0	90305
YD000012	629.375	4,031.975	65.412	1.400	7.355	423.4	388.9	35.7	50035	8.44	45105	3822	0	50038
YD000013	630.600	4,031.800	40.743	0.404	2.870	404.7	376.9	29.2	11811	7.22	10789	769	0	11811
YD000014	629.900	4,031.350	72.546	1.177	7.806	428.9	392.1	37.9	44562	8.83	39991	3572	0	44564
YD000015	630.000	4,030.700	85.013	2.434	8.614	438.5	397.5	42	102295	9.58	90983	8982	0	102300
YD000016	630.400	4,030.450	63.806	1.312	9.503	422.8	388.4	35.6	46708	8.42	42127	3547	0	46710
YD000017	630.500	4,029.700	87.817	2.433	10.238	440.8	398.7	43.1	104910	9.78	93168	9343	0	104915
YD000018	630.975	4,029.050	54.007	4.835	14.072	416	384.3	33.1	159898	7.95	144868	11544	0	159907
YD000019	631.025	4,028.050	91.965	4.301	11.725	445.4	401	45.4	195129	10.19	172870	17776	0	195142
YD000020	627.475	4,025.375	98.602	4.012	12.277	446.6	401.7	45.7	183467	10.24	162340	16878	0	183475
YD000021	629.700	4,024.675	125.651	4.330	14.453	469.9	411.9	58.5	253528	12.46	220636	26859	0	253538
YD000022	631.575	4,026.525	168.550	3.044	9.497	506.1	423.6	82.6	251565	16.33	211107	34391	0	251577
YD000023	632.375	4,025.950	99.341	2.746	7.798	452.9	404.5	49.3	135238	10.87	119223	12881	0	135245
YD000024	630.400	4,024.225	72.347	2.677	9.214	429.2	392.3	38	101772	8.86	91306	8168	0	101777
YD000025	631.000	4,024.600	147.178	1.642	7.219	488.3	418.6	70.1	115094	14.35	98433	13881	0	115099
YD000026	631.875	4,024.775	162.772	2.778	7.301	501.9	422.6	79.6	221001	15.85	186260	29401	0	221012
YD000027	627.225	4,023.275	44.926	2.163	7.652	404.3	376.7	29	62733	7.17	57400	3991	0	62737
YD000028	628.700	4,023.325	55.534	1.833	10.282	414	383.1	32.2	59090	7.79	53635	4163	0	59093
YD000029	629.525	4,022.600	39.071	1.718	5.490	401.8	374.9	28.4	48786	7.07	44733	3017	0	48789
YD000030	625.475	4,023.800	58.370	1.559	5.972	412.5	382.4	31.5	49148	7.64	44670	3408	0	49150
YD000031	624.425	4,023.875	89.378	1.270	5.396	435.7	396.3	40.4	51359	9.28	45788	4394	0	51362
YD000032	623.150	4,024.000	73.747	1.512	8.097	422.4	388.7	34.9	52837	8.27	47636	4017	0	52839
YD000033	631.650	4,027.750	61.728	1.583	7.017	421.7	387.6	35.3	55829	8.36	50395	4199	0	55831
						436.8	394.8	43.0	3,048,550	9.7	2,688,015	290,550	0	3,048,700

### 5.3 Σχεδίαση του μοντέλου του υδροφορέα

Το στάδιο της σχεδίασης του μοντέλου περιλαμβάνει την διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών, την εισαγωγή των υδραυλικών παραμέτρων και των φορτίσεων (π.χ. άντληση, τροφοδοσία) του υδροφορέα. Έτσι επιτυγχάνεται η προσομοίωση του υπό εξέταση υδροφορέα. Η εφαρμογή αυτού οδηγεί στον υπολογισμό του δυναμικού σε κάθε κελί του καννάβου του υδροφόρου σχηματισμού και κατ' επέκταση του υδραυλικού φορτίου, του σχήματος και της θέσης της διεπιφάνειας κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

#### 5.3.1 Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου

- **Εξωτερικά όρια (external boundaries)**

Ο υπό εξέταση υδροφορέας περιορίζεται στην περιοχή της Μεσαριάς-Αεροδρομίου οριοθετείται δυτικά και ανατολικά από την θάλασσα ενώ βόρεια και νότια από αδιαπέρατα όρια (συνθήκη 2<sup>ου</sup> είδους, Neumann). Στην πραγματικότητα αυτό ισχύει για το νότιο όριο λόγω παρουσίας φυλλιτικού υποβάθρου ενώ στο βόρειο όριο η συνθήκη αυτή τεκμηριώνεται με την παρουσία υδραυλικού ορίου (γραμμή ροής).

- **Κατασκευή καννάβου (model grid)**

Η πρώτη ενέργεια κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου είναι η κατασκευή του καννάβου (επιλογή grid → mesh size).

Η μορφή του καννάβου μπορεί να είναι ομοιόμορφη, όταν τα κελία που το αποτελούν είναι ίδιων διαστάσεων, ή ανομοιόμορφη, όταν το μέγεθος των κελίων ποικίλει. Ο ομοιόμορφος κάνναβος προτιμάται από μαθηματικής απόψεως ως προς την αρτιότητα του μοντέλου. Επίσης, αποτελεί καλή επιλογή όταν τα δεδομένα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και όταν το μοντέλο αντιμετωπίζεται συνολικά και δεν εστιάζει σε κάποιες θέσεις. Εν αντιθέσει, ο ανομοιόμορφος κάνναβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που υπάρχουν, αφορούν συγκεκριμένα τμήματα και όταν ενδιαφέρουν κάποιες συγκεκριμένες θέσεις του συστήματος όπως στην περίπτωση μεταφοράς ρύπων.

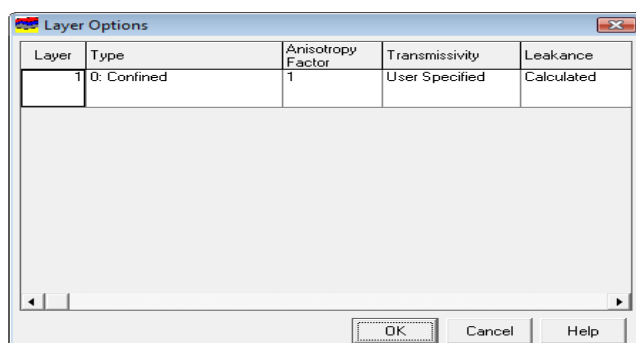
Κατά την προσομοίωση του υδροφορέα της Μεσαριάς εφαρμόζεται ομοιόμορφος κάρναβος, γιατί τα δεδομένα θεωρούνται καλώς διανεμημένα και δεν παρουσιάζεται κάποιο τοπικά ενδιαφέρον.

Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή προσομοίωσης καλύπτει έκταση 7000\*9000m και διακριτοποιείται σε κάρναβο πεπερασμένων διαφορών μεγέθους κελιών διαστάσεων 100\*100m. Το πλήθος των γραμμών είναι 90 και των στηλών 70.

Ο υπό εξέταση υδροφορέας θα προσομοιωθεί σε ένα επίπεδο (layer) , συνολικού πάχους 1m, ώστε η τιμή της μεταφορικότητας  $T$  ( $T=b*K$ ) να είναι ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  του υδροφορέα.

- **Τύπος υδροφορέα**

Ο αντιμετώπιση του υπό εξέταση υδροφορέα έχει αναχθεί σε πρόβλημα ροής περιορισμένου υδροφορέα, αφού έχει θεωρηθεί ότι η τιμή της μεταφορικότητας  $T$  είναι ίση με τη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$  του φρεάτιου υδροφορέα. Έτσι στο πρόγραμμα PMWIN ο υδροφορέας είναι τύπου 0 (0:confined).



Σχήμα 5.4: Εικονίδιο εισαγωγής τύπου υδροφορέα στο PMWIN

- **Οροφή και βάση υδροφορέα (Layer top and bottom)**

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, το πάχος του υδροφορέα θεωρείται 1m. Επομένως, ως οροφή του υδροφορέα εισάγεται στο μοντέλο η τιμή 1 και ως βάση η τιμή 0. (grid→ top/bottom of layers)

### 5.3.2 Οριακές συνθήκες (Boundary conditions)

(grid→ boundary condition →IBOUND)

Ως οριακές συνθήκες ονομάζονται οι συνθήκες ροής που επικρατούν στις θέσεις των ορίων του υδροφορέα. Οι συνηθέστερες κατηγορίες οριακών συνθηκών, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, είναι (Bear J., 1979):

- Το όρια σταθερού φορτίου (συνθήκη Dirichlet-1<sup>ου</sup> είδους)
- Τα όρια δεδομένης εισροής ή εκροής (συνθήκη Neumann-2<sup>ου</sup> είδους)

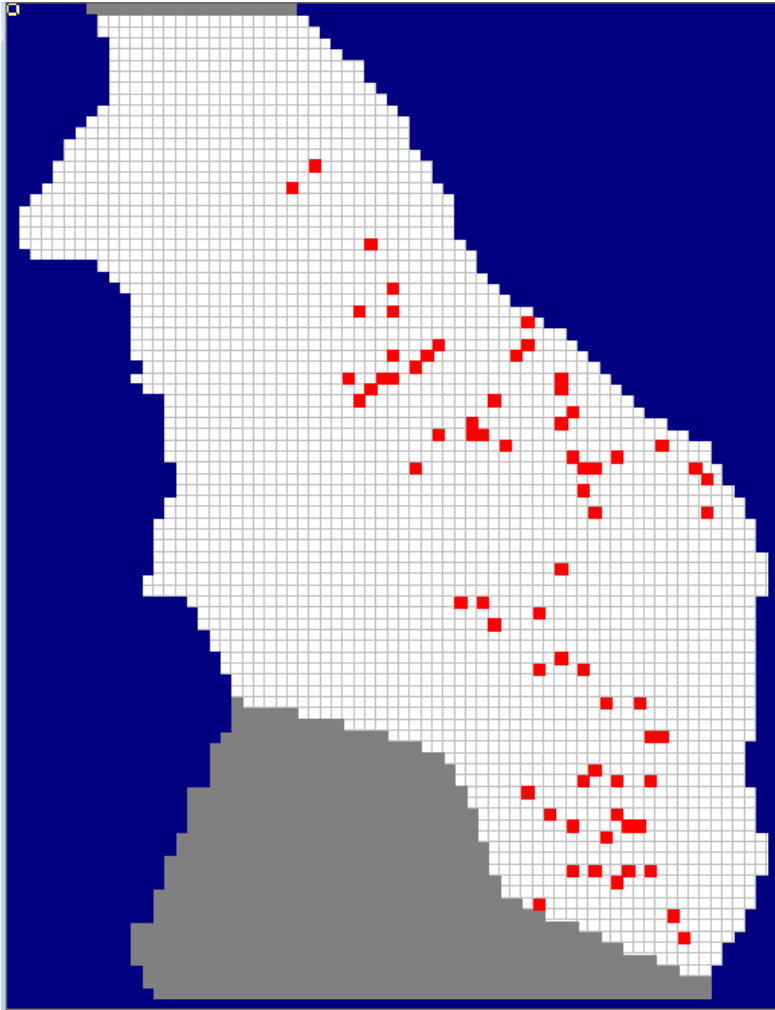
Στον υδροφορέα της Μεσαριάς τα όρια με την θάλασσα, που βρίσκονται δυτικά και ανατολικά του μοντέλου, λαμβάνονται ως όρια σταθερού υδραυλικού φορτίου  $\varphi=0$  και παίρνουν τιμή -1 στο PMWIN σε καθένα από τα κελιά αυτά.

Τα βόρεια και νότια όρια θεωρούνται ως πρακτικά αδιαπέρατα όρια και παίρνουν την τιμή 0 στο πρόγραμμα PMWIN στα κελιά που τα ορίζουν.

Τα ενεργά κελιά, που παίρνουν την τιμή 1, είναι αυτά που το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται από το μοντέλο κατά την εφαρμογή του.

Τα ανενεργά ή κελιά μηδενικής ροής, όπου η τιμή του στο PMWIN, είναι αυτά που δεν υπάρχει ροή από ή προς αυτά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Το μοντέλο δε υπολογίζει υδραυλικά φορτία για τα κελιά αυτά και χρησιμοποιούνται για να απενεργοποιούν τα όρια πέραν του πεδίου ροής. Τα κελιά αυτά αντιστοιχούν σε αδιαπέρατους σχηματισμούς που οριοθετούν τον υδροφορέα βόρεια και νότια.

Στο σχήμα 5.5 φαίνονται οι κατηγορίες οριακών συνθηκών. Με γκρι απεικονίζονται τα αδιαπέρατα όρια (ανενεργά κελιά), με άσπρο τα όρια δεδομένης εισροής (ενεργά κελιά) και με μπλε τα όρια σταθερού φορτίου.



Σχήμα 5.5: Οριακές συνθήκες και χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα στο PMWIN.

### 5.3.3 Εισαγωγή παραμέτρων

- **Χρόνος (time)**

(parameters → times)

Οι μονάδες του χρόνου που επιλέγονται είναι οι ημέρες. Έτσι όλες οι παράμετροι στο μοντέλο αναφέρονται σε μέτρα ανά ημέρα (m/day). Επίσης, επιλέγονται συνθήκες μόνιμης ροής (steady-state). Όταν η προσομοίωση εκτελείται σε μόνιμη ροή δεν χρειάζεται χρονική διακριτοποίηση.

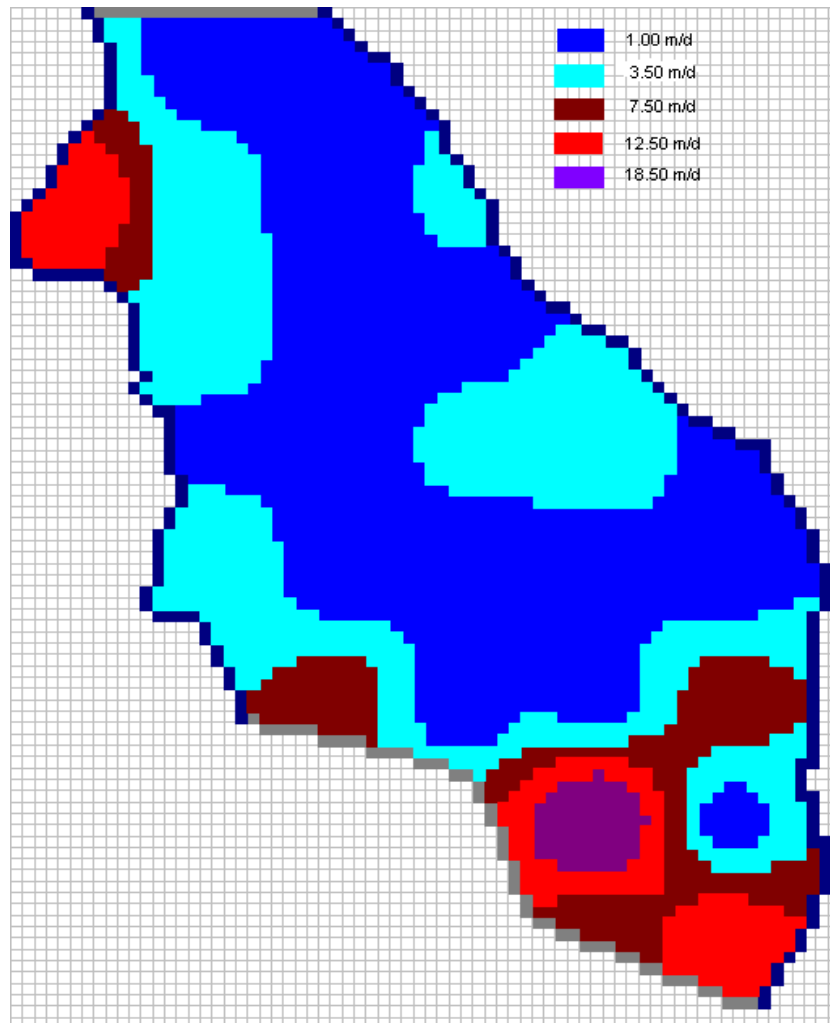
- **Μεταφορικότητα (transmissivity)**

(parameters → transmissivity)

Η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφόρου παρουσιάζεται λεπτομερώς στο Σχήμα 5.6, όπως έχει υπολογιστεί στη μελέτη των



Γιαννολόπουλου κ. Α. Μαντόγλου, με την μέθοδο της πυκνότητα των pilot points.



Σχήμα 5.6: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας (K) του υδροφορέα

- **Εισαγωγή φρεάτων άντλησης (wells)**

(models → MODFLOW → well)

Εισάγονται στον μοντέλο τα δεδομένα των φρεάτων άντλησης όπως αναφέρονται παραπάνω. Οι αντλήσεις εισάγονται σε μονάδες μέτρα ανά ημέρα (m/day) και με αρνητικό πρόσημο, αφού αφαιρούνται από το διαθέσιμο υδατικό απόθεμα του υδροφορέα.

- **Ενεργό πορώδες (effective porosity)**

(parameters → effective porosity)

Η τιμή του ενεργούς πορώδους έχει εκτιμηθεί βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων περίπου ίσο με 0,15. Για τον υπό εξέταση υδροφορέα, το ενεργό πορώδες εισάγεται στο μοντέλο με τιμή ίση με 0.15.

- **Τροφοδοσία υδροφορέα (recharge)**

(models → MODFLOW → recharge)

Η τροφοδοσία προς τον υδροφορέα, δηλαδή της κατείσδυσης, κατανέμεται ανάλογα με τις υδρολογικές λεκάνες που περιέχονται στην έκταση που καλύπτει ο υπό εξέταση υδροφορέας. Στο πρόγραμμα PMWIN οι τιμές της τροφοδοσίας εισάγονται με θετικό πρόσημο, αφού εμπλουτίζουν τον υδροφορέα.

- **Αρχικές συνθήκες (initial hydraulic heads)**

(parameters → initial hydraulic heads)

Με τον όρο αρχικές συνθήκες εννοούνται οι τιμές των υδραυλικών φορτίων ή δυναμικού για κάθε ενεργό κελί ή κελί σταθερού φορτίου που εισάγονται στο πρόγραμμα ως υδραυλικά φορτία ή δυναμικά στην αρχή του χρονικού βήματος. Αυτές χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές εισόδου για να εκτέλεση της επαναληπτικής διαδικασίας και τον υπολογισμό των τελικών υδραυλικών φορτίων ή δυναμικών. Η τιμή που δίνεται στο πρόγραμμα PMWIN ως αρχικές συνθήκες είναι για όλα τα ενεργά κελιά ίση με 5 m/day και αναφέρεται στο δυναμικό.

## 5.4 Εκτέλεση του μοντέλου

Με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων και την δημιουργία των απαραίτητων αρχείων εισόδου εκτελείται το Modflow. Παράγονται:

- ✓ Αρχεία δεδομένων
- ✓ Αρχεία αποτελεσμάτων

Αναλυτικότερα, τα αρχεία δεδομένων (input data files) είναι:

- bas.dat (basic package): αρχικές και οριακές συνθήκες
- bcf.dat (block-centrered flow package): διαστάσεις κελιών και παράμετροι υδροφορέα
- oc.dat (output control)
- pcg2.dat (preconditioned conjugate gradient 2 package)

- rch.dat (recharge package): τροφοδοσία υδροφορέα

Τα αρχεία αποτελεσμάτων (output files) είναι:

- budget.dat: παροχές υπόγειου νερού
- ddown.dat: διαφορά αρχικών τιμών δυναμικού με υπολογισμένες
- heads.dat : αποτέλεσμα επίλυσης, κατανομή τιμών δυναμικού
- output.dat: εκτέλεση προγράμματος και αξιοπιστία αποτελέσματος

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του υδροφορέα παρουσιάζεται σχηματικά, στο σχήμα 5.7 που ακολουθεί, σε περιβάλλον PMWIN. Σε αυτό απεικονίζονται οι τιμές του δυναμικού, όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα, με την μορφή ισοδυναμικών καμπύλων.

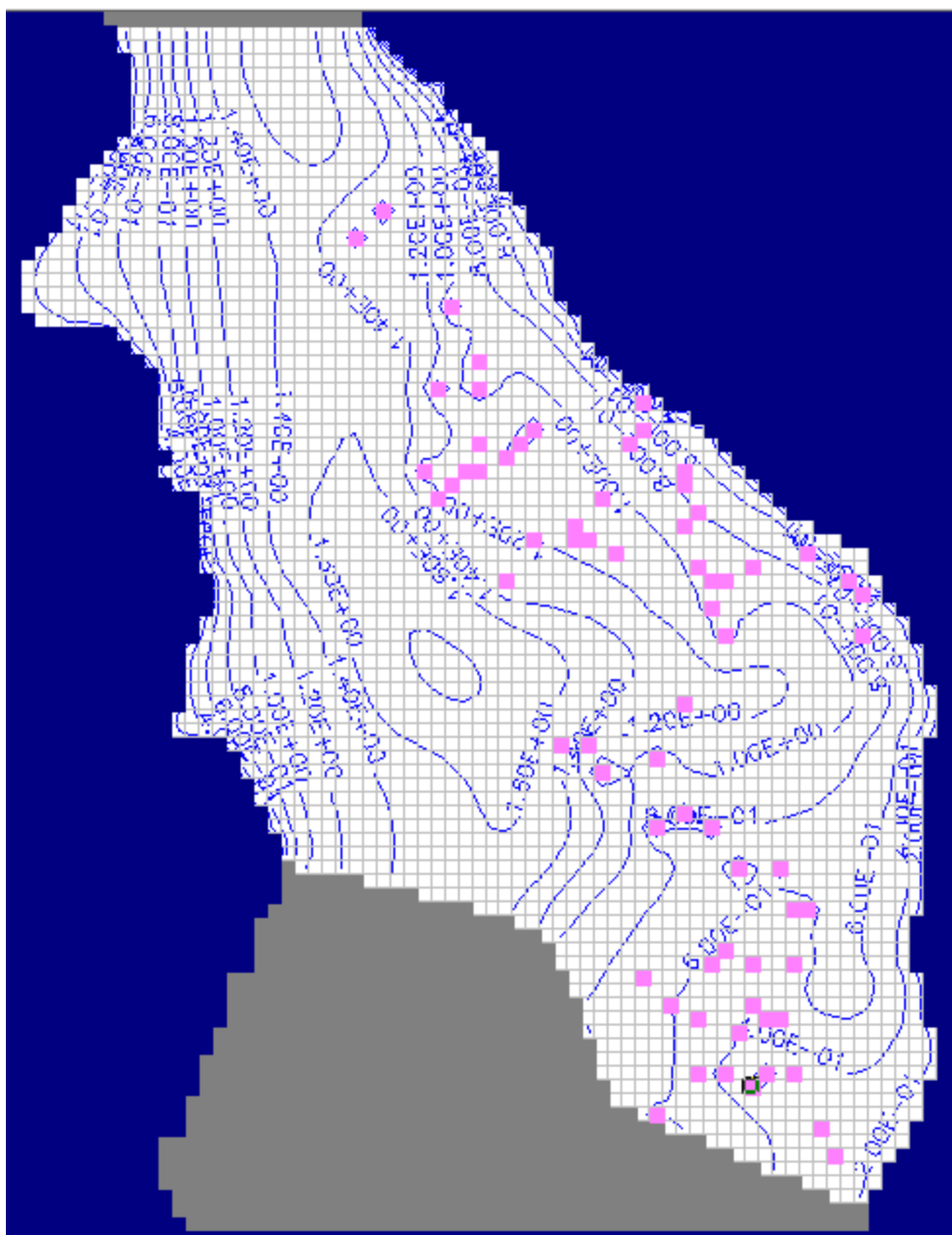


**Σχήμα 5.7:** Χάρτης ισοδυναμικών γραμμών σε περιβάλλον του PMWIN

Στο αρχείο heads.dat βρίσκονται τα αποτελέσματα επίλυσης του προγράμματος, δηλαδή το δυναμικό  $\phi$  κατά Strack. Αυτό το αρχείο χρησιμοποιείται για την μετατροπή του δυναμικού σε υδραυλικό φορτίο, με τη βοήθεια της γλώσσας τεχνικού προγραμματισμού Matlab. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την μετατροπή είναι η σχέση (2.33), δηλαδή:

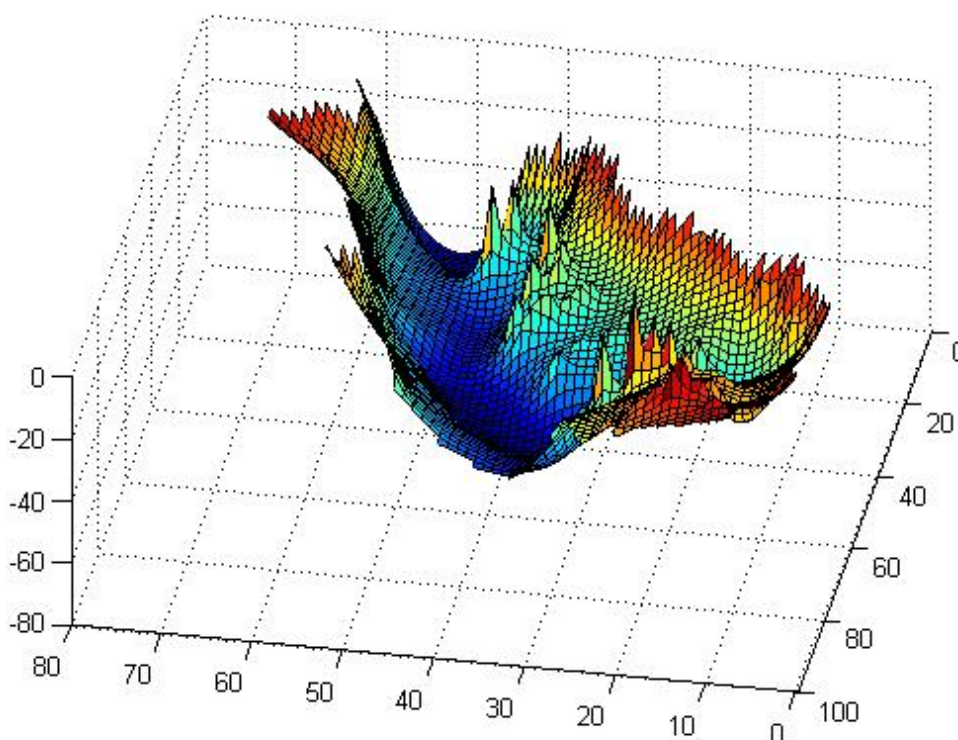
$$\phi = \frac{1 + \Delta s}{2\Delta s} (h_f - d)^2 \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2 * \Delta s}{1 + \Delta s} * \phi} + d$$

Οι τιμές του υδραυλικού φορτίου όπως υπολογίστηκαν από την μετατροπή φαίνονται στο σχήμα 5.8 που ακολουθεί.



Σχήμα 5.8: Χάρτης ισοπιεζομετρικών γραμμών

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Ghyben-Herzberg στον υπό εξέταση υδροφορέα διαμορφώνεται το σχήμα και η θέση της διεπιφάνειας, τα οποία σχετίζονται με υδρολογικές παραμέτρους του υπόγειου νερού. Σύμφωνα με την προσέγγιση Ghyben-Herzberg η διεπιφάνεια σε κάθε σημείο της απέχει από την επιφάνεια της θάλασσας απόσταση ίση με 40 φορές το  $h_f$ . Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η μορφή της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού κάτω από την στάθμη της θάλασσας.



**Σχήμα 5.9:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού στον υδροφορέα της Σαντορίνης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι μπορεί να αντληθεί ( $Q_{total}$ ) χωρίς υπαλμύρωση το 51.4% της συνολικής τροφοδοσίας ( $Q_{in}$ ) του υδροφορέα (δηλαδή  $Q_{total}/Q_{in}=0.51$ ). Επίσης, παρατηρείται ότι η απόσταση της διεπιφάνειας στα σημεία των αντλήσεων από την επιφάνεια της θάλασσας ξεπερνά σε κάποιες θέσεις φρεάτων άντλησης τα 15m, γεγονός που καθιστά επικίνδυνο τον υδροφορέα να υπαλμυρωθεί.

Τέλος, όλες οι τιμές δυναμικού κατά Strack, αλλά και οι τιμές του υδραυλικού φορτιού, είναι θετικές γεγονός που αποδεικνύει ότι με τις συγκεκριμένες τιμές άντλησης, που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα, ο υπό εξέταση υδροφόρος δεν έχει υφαλμυρωθεί.

### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

#### 6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνούνται διάφορα σενάρια με βασικό σκοπό της σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την συμπεριφορά του υδροφορέα.

Αρχικά, θεωρήθηκε απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα σενάριο μείωσης της άντλησης ώστε ή διεπιφάνεια του γλυκού-αλμυρού νερού στις θέσεις των φρεάτων να μην απέχει από την ελεύθερη επιφάνεια μικρότερο από 15m. Στην συνέχεια εξετάστηκαν σενάρια μείωσης της τροφοδοσίας (σε περιπτώσεις ξηρασίας) σε ποσοστά από 5 έως 30%. Για καθένα από τα σενάρια τροφοδοσίας αναζητήθηκαν οι τιμές των βέλτιστων ώστε να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπαλμύρωσης και να θεωρείται ασφαλής ο υπό εξέταση υδροφορέας.

Ως βέλτιστες τιμές άντλησης θεωρούνται αυτές που πληρούν ταυτόχρονα τις παρακάτω προϋποθέσεις που τέθηκαν. Αυτές είναι:

- ✓ Το δυναμικό, όπως ορίζεται από την ανάλυση του Strack, να μην παίρνει αρνητικές τιμές και
- ✓ Η απόσταση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας να είναι μεγαλύτερη από 15m.

Η δεύτερη προϋπόθεση θεωρείται λιγότερο συντηρητική αφού τα 15m θεωρείται σχετικά μικρή απόσταση αλλά στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποφασίστηκε να εκτιμηθούν οι τιμές των αντλήσεων σε πιο ριψοκίνδυνες συνθήκες.

Για τον υπολογισμό των βέλτιστων αντλήσεων των σεναρίων χρησιμοποιούνται διάφορα προγράμματα βελτιστοποίησης. Στα πλαίσια, όμως, της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θεωρήθηκε απαραίτητο η χρήση αυτών των προγραμμάτων και ο υπολογισμός των μέγιστων αντλήσεων έγινε με δοκιμές. Οι δοκιμές αυτές αναφέρονται σε μείωση των τιμών άντλησης των φρεάτων κατά ένα ποσοστό στο σύνολο αυτών.

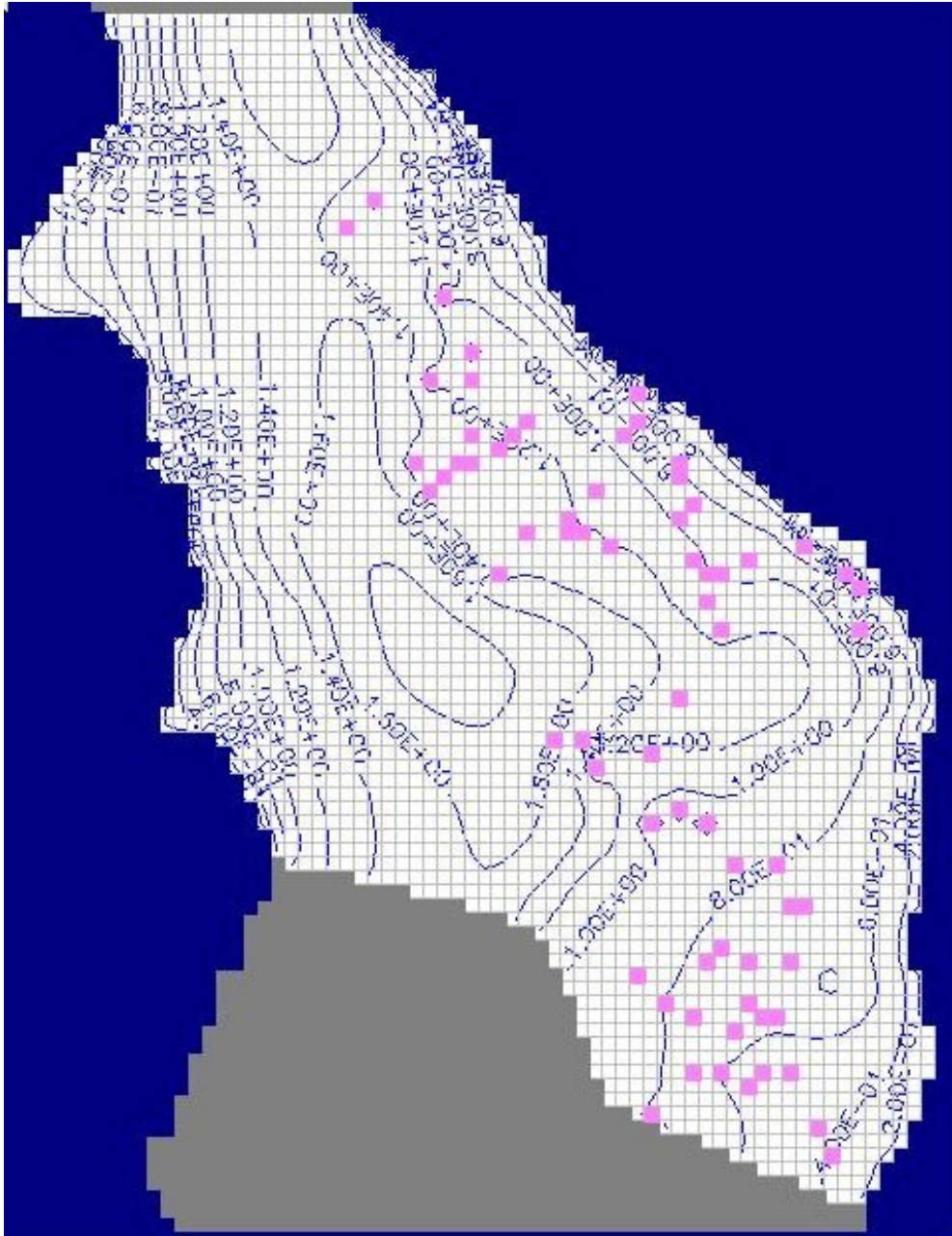
Όλα τα σενάρια σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν στο Modflow. Για τον υπολογισμό των νέων τιμών της τροφοδοσίας και της άντλησης, για την μετατροπή του δυναμικού όπως υπολογίζεται από την ανάλυση του Strack σε πιεζομετρικό φορτίο και για την τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού- αλμυρού νερού χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab.

## 6.2 Σενάριο μείωσης της άντλησης

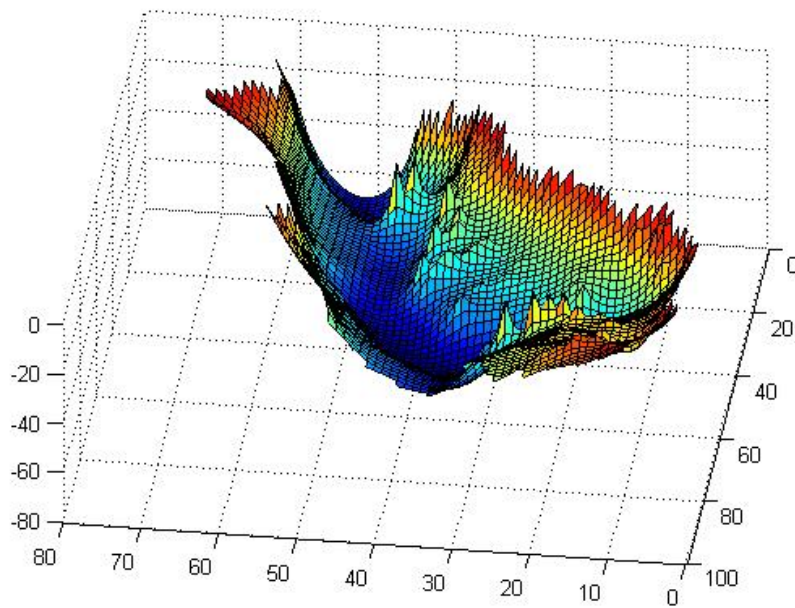
Στην εφαρμογή της προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα της Μεσαριάς στην νήσο Σαντορίνη χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες τιμές άντλησης ώστε να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι η απόσταση της διεπιφάνειας του αλμυρού-γλυκού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας είναι σε ορισμένες θέσεις φρεάτων άντλησης μικρότερη από 15m. Αυτό εμφανίζεται κυρίως στο νότιο τμήμα της νήσου όπου υπάρχουν πολλές γεωτρήσεις σε μικρή απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στις περιοχές αυτές να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες να υφαλμυρωθούν με ενδεχόμενη μικρή αύξηση της άντλησης ή την μείωση της τροφοδοσίας

Το γεγονός αυτό αποτέλεσε την ανάγκη δημιουργίας ενός σεναρίου μείωσης της άντλησης. Τα υπόλοιπα στοιχεία διατηρήθηκαν ίδια και με δοκιμές βρέθηκε ότι οι παροχές των αντλήσεων πρέπει να μειωθούν κατά 8%. Η μείωση έγινε επί του συνόλου των γεωτρήσεων κατά το ίδιο ποσοστό. Ενδεχόμενη μείωση των τιμών των αντλήσεων κατά διαφορετικό ποσοστό για κάθε γεώτρηση δεν είναι ιδιαίτερα εφικτό με την μέθοδο των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αφού οι συνδυασμοί των τιμών των αντλήσεων για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού του σεναρίου είναι άπειροι. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του σεναρίου μείωσης της άντλησης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.





**Σχήμα 6.1:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10% της αρχικής και μείωσης της άντλησης κατά 10% της αρχικής.



**Σχήμα 6.2:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής άντλησης κατά 8%.

### 6.3 Σενάρια μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται διάφορα σενάρια μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του εξεταζόμενου υδροφορέα σε συνθήκες ξηρασίας. Στην συνέχεια εκτελούνται διάφορες δοκιμές για της εύρεση της βέλτιστων τιμών της άντλησης και επίσης των τιμών αυτών ώστε το ελάχιστο βάθος του γλυκού νερού κάτω από τις γεωτρήσεις να μην είναι μικρότερο από το απαιτούμενο.

#### 6.3.1 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 5%

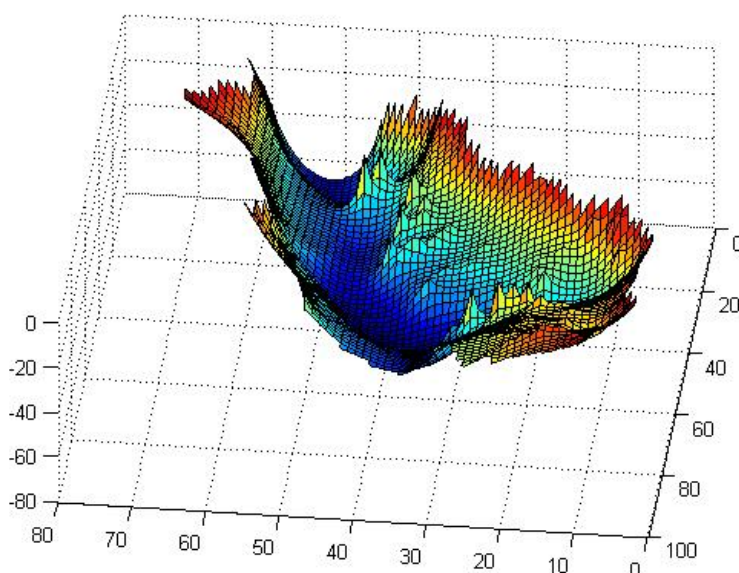
Στο σενάριο αυτό μειώνεται η κατακόρυφη τροφοδοσία κατά 5% της αρχικής σε όλες τις λεκάνες της περιοχής της Μεσαριάς που βρίσκεται ο υπόγειος υδροφορέας. Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν σταθερές. Οι

τιμές των αντλήσεων παραμένουν αρχικά οι ίδιες και εξετάζεται η συμπεριφορά του υδροφορέα.

Με την εφαρμογή της μείωσης της τροφοδοσίας κατά 5% παρατηρείται ότι ο υπόγειος υδροφορέας της Μεσαριάς υφαλμυρώνεται σ' ένα μικρό μέρος στο νότιο τμήμα του. Θεωρείται, λοιπόν, απαραίτητη η εύρεση των βέλτιστων τιμών της άντλησης. Ύστερα από δοκιμές διαπιστώθηκε ότι οι τιμές των αντλήσεων πρέπει να μειωθούν κατά 5% της αρχικής τους τιμής.

Ωστόσο, ο φακός του γλυκού νερού ανεβαίνει προς την επιφάνεια της θάλασσας με αποτέλεσμα να τίθενται σε κίνδυνο πολλές γεωτρήσεις. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στο νότιο τμήμα της νήσου καθώς επίσης και δύο γεωτρήσεις στο ανατολικό τμήμα του υδροφορέα όπου βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση από την ακτή.

Για την αποφυγή αυτού βρέθηκε ότι η άντληση πρέπει να μειωθεί κατά 13% της αρχικής στο σύνολο των γεωτρήσεων. Για την ασφάλεια του υπόγειου υδροφορέα θα πρέπει η συνολική άντληση των γεωτρήσεων του υδροφορέα να είναι το 47% του συνόλου της κατακόρυφης τροφοδοσίας που αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται ο υδροφορέας. Τα αποτελέσματα αυτής της δοκιμής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 6.1 ενώ τα υπόλοιπα παρατίθενται στο παράρτημα.



**Σχήμα 6.3:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 5% και τη άντλησης κατά 13% της αρχικής

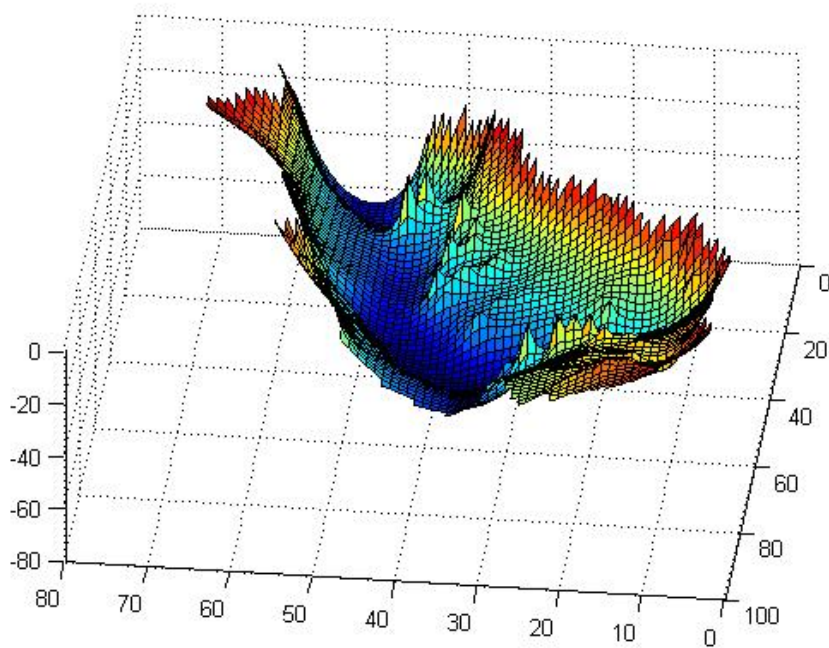
### 6.3.2 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 10%

Στο δεύτερο σενάριο εξετάστηκε η συμπεριφορά του υδροφορέα σε περίπτωση μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 10%. Τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν τα ίδια με τα αρχικά.

Με την συνολική άντληση να είναι η ίδια με την αρχική παρατηρείται υφαλμύρωση των φρεάτων του υπόγειου υδροφορέα που βρίσκονται στο νότιο τμήμα του. Η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων αυτών φαίνονται στο παράρτημα.

Για να επανέλθει ο υδροφορέας στην αρχική του κατάσταση θα πρέπει να μειωθεί η άντληση. Με την μέθοδο των δοκιμών βρέθηκε ότι οι τιμές των αντλήσεων θα πρέπει να μειωθούν κατά 10% της αρχικής. Αυτή είναι η άντληση ώστε να μην υφαλμυρωθεί ο υδροφορέας αλλά η απόσταση της διεπιφάνειας του γλυκού- αλμυρού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας σε ορισμένες θέσεις φρεάτων είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη.

Η ασφάλεια του υδροφορέα από την υφαλμύρωση σύμφωνα με τις προϋποθέσεις εξασφαλίζεται με την μείωση της άντλησης κατά 19% της αρχικής. Όλες οι γεωτρήσεις μειώνονται κατά το ίδιο ποσοστό και έτσι ο φακός του γλυκού νερού βρίσκεται κάτω από τα 15m στις θέσεις αυτών. Η ετήσια συνολική άντληση στο σενάριο αυτό είναι το 46,2% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας του υδροφορέα. Τα αποτελέσματα του σεναρίου μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 10% και της άντλησης κατά 19% φαίνονται σε τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού στο σχήμα 6.5 που ακολουθεί και σε ισοπιεζομετρικές γραμμές στο παράρτημα. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού για τις διάφορες τιμές της άντλησης παρατίθενται στο παράρτημα.



**Σχήμα 6.5:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 10% και τη άντλησης κατά 19% της αρχικής.

### 6.3.3 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 15%

Σε ενδεχόμενη μείωση της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 15% της αρχικής παρατηρείται ο υπόγειος υδροφορέας υφαλμυρώνεται στις θέσεις των γεωτρήσεων στο νότιο τμήμα του υδροφορέα της Μεσαριάς και επίσης στις γεωτρήσεις με αριθμό 1 και 2 που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του υδροφορέα. Η περιοχή που έχει υφαλμυρώθει σαφώς και είναι μεγαλύτερη από τα προηγούμενα σενάρια.

Για να επανέλθει ο υδροφορέας στην αρχική του κατάσταση πρέπει να μειωθεί η άντληση των φρεάτων κατά 15%. Ωστόσο, σε αυτήν την κατάσταση ο υπόγειος υδροφορέας δεν θεωρείται ασφαλής αφού ο φακός του γλυκού νερού ανέχεται σε απόσταση μέχρι και τα 3m σε γεώτρηση από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι γεωτρήσεις όπου ο φακός βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας δεν βρίσκονται κοντά στην ακτή αλλά στο εσωτερικό της νήσου και κυρίως στο νότιο τμήμα αυτού. Για να θεωρηθεί ασφαλής ο υπόγειος υδροφορέας και σε όλες τις θέσεις των γεωτρήσεων και η διεπιφάνεια να απέχει περισσότερο από 15m θα πρέπει οι τιμές να άντλησης

να μειωθούν κατά 24% αρχικής. Έτσι, το ποσοστό της ετήσιας άντλησης των φρεάτων του υδροφορέα είναι το 45,9% της ετήσιας τροφοδοσίας, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του σεναρίου.

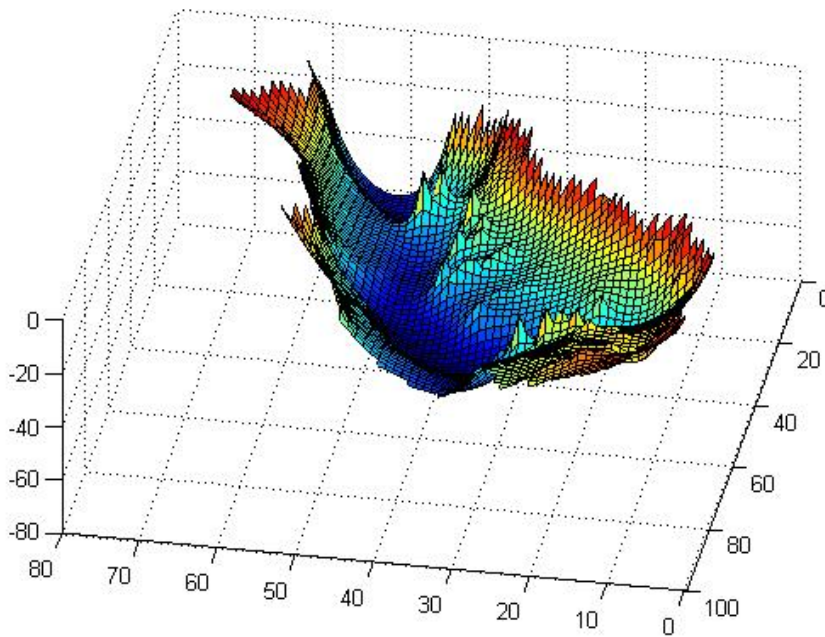
Τα αποτελέσματα του σεναρίου για τις παραπάνω παραδοχές αναπαρίστανται σχηματικά στο παράρτημα.

#### **6.3.4 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 20%**

Στο τέταρτο σενάριο κατακόρυφης τροφοδοσίας έγινε μείωση αυτής κατά 20%. Από την επίλυση της προσομοίωσης με μειωμένη τροφοδοσία παρατηρήθηκε ότι αρκετές γεωτρήσεις έχουν υφαλμυρωθεί σε όλη την έκταση της νήσου. Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκαν διάφορα σενάρια μείωσης της άντλησης ώστε να βρεθούν οι τιμές για τις οποίες θα αποφεύγεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Έτσι, λοιπόν, βρέθηκε ότι οι τιμές της άντλησης θα πρέπει να μειωθούν κατά 20%.

Με τις νέες αυτές τιμές, όμως, ο υδροφορέα είναι πολύ επικίνδυνος αφού η διεπιφάνεια του γλυκού αλμυρού νερού είναι σε απόσταση μικρότερη της επιτρεπόμενης από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια ενδεχόμενη μείωση της άντλησης κατά 29% σε όλες τις γεωτρήσεις με αποτέλεσμα η ετήσια άντληση να αποτελεί το 45,6% της συνολικής τροφοδοσίας όπως υπολογίστηκε στο σενάριο αυτό. Στο σχήμα 6.6 που ακολουθεί αναπαρίστανται τρισδιάστατα η διεπιφάνεια του γλυκού-αλμυρού νερού του υπόγειου υδροφορέα σε ενδεχόμενη μείωση της τροφοδοσίας αλλά και σε αναγκαστική μείωση της άντλησης όπως προβλέπει το σενάριο.

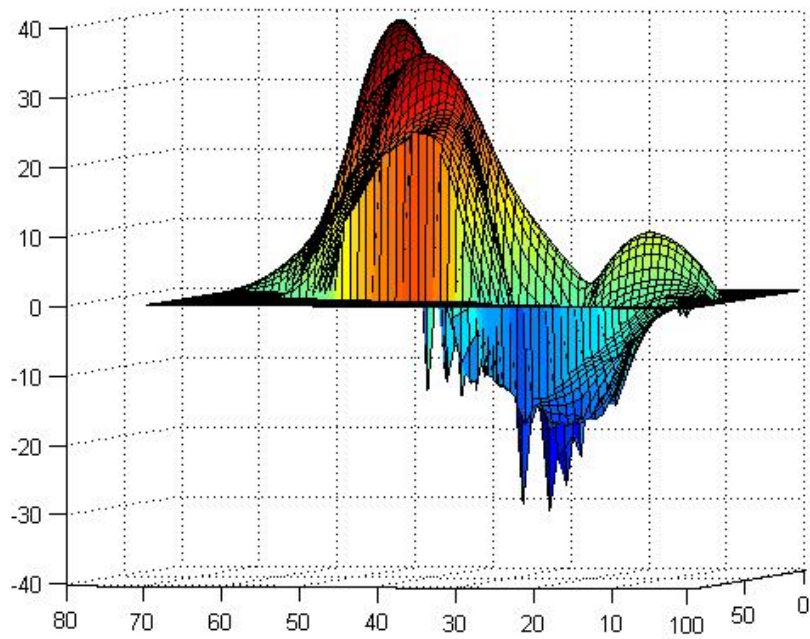
Τα υπόλοιπα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού με δεδομένη μείωση της κατακόρυφης τροφοδοσίας αλλά και τις διάφορες εκδοχές της άντλησης όπως αναλύονται παραπάνω εκθέτονται στα σχήματα του παραρτήματος.



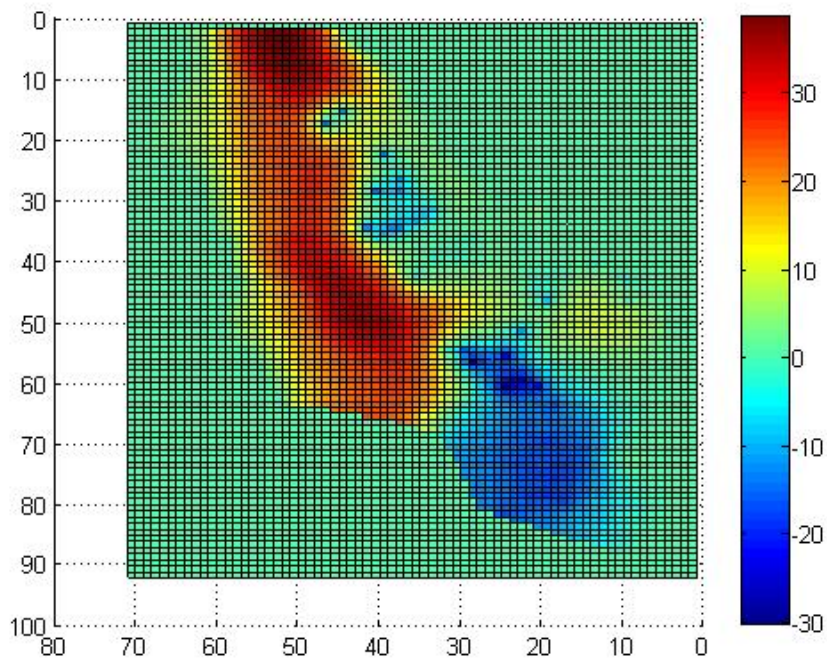
**Σχήμα 6.6:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 20% και τη άντλησης κατά 29% της αρχικής.

### 6.3.5 Σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας κατά 30%

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού αναπτύχθηκε και εξετάστηκε ένα ακραίο σενάριο μείωσης της κατακόρυφης τροφοδοσίας στο οποίο η επιφανειακή τροφοδοσία μειώνεται κατά 30% της αρχικής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από της εφαρμογή της προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα με την προαναφερθείσα μείωση της τροφοδοσίας και διατηρώντας ίδια τα υπόλοιπα στοιχεία αυτού φανερώνουν ότι σε ενδεχόμενες συνθήκες έντονης ξηρασίας ο υπόγειος υδροφορέας της Σαντορίνης θα καταστραφεί σ' ένα μεγάλο τμήμα του, αφού πλήθος γεωτρήσεων (δημοτικές και ιδιωτικές) έχουν υφαλμυρωθεί. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις τιμές του δυναμικού που εμφανίζονται σε αυτά τα σημεία που είναι αρνητικές ενώ σύμφωνα με τον κανόνα του Strack το δυναμικό πρέπει να είναι πάντα θετικό σε υπόγειους υδροφορείς που δεν έχουν υποστεί υφαλμύρωση. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 6.7.



(α)

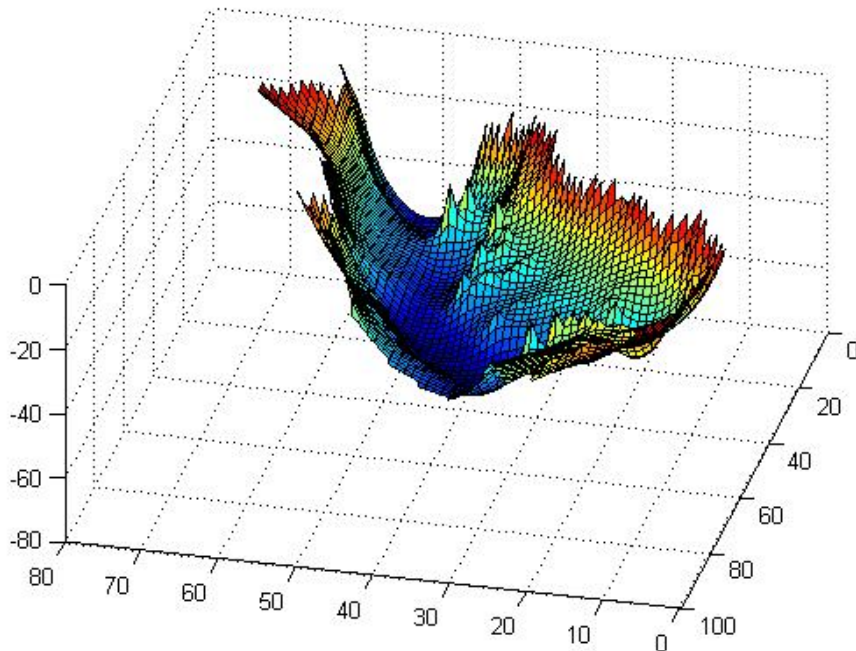


(β)

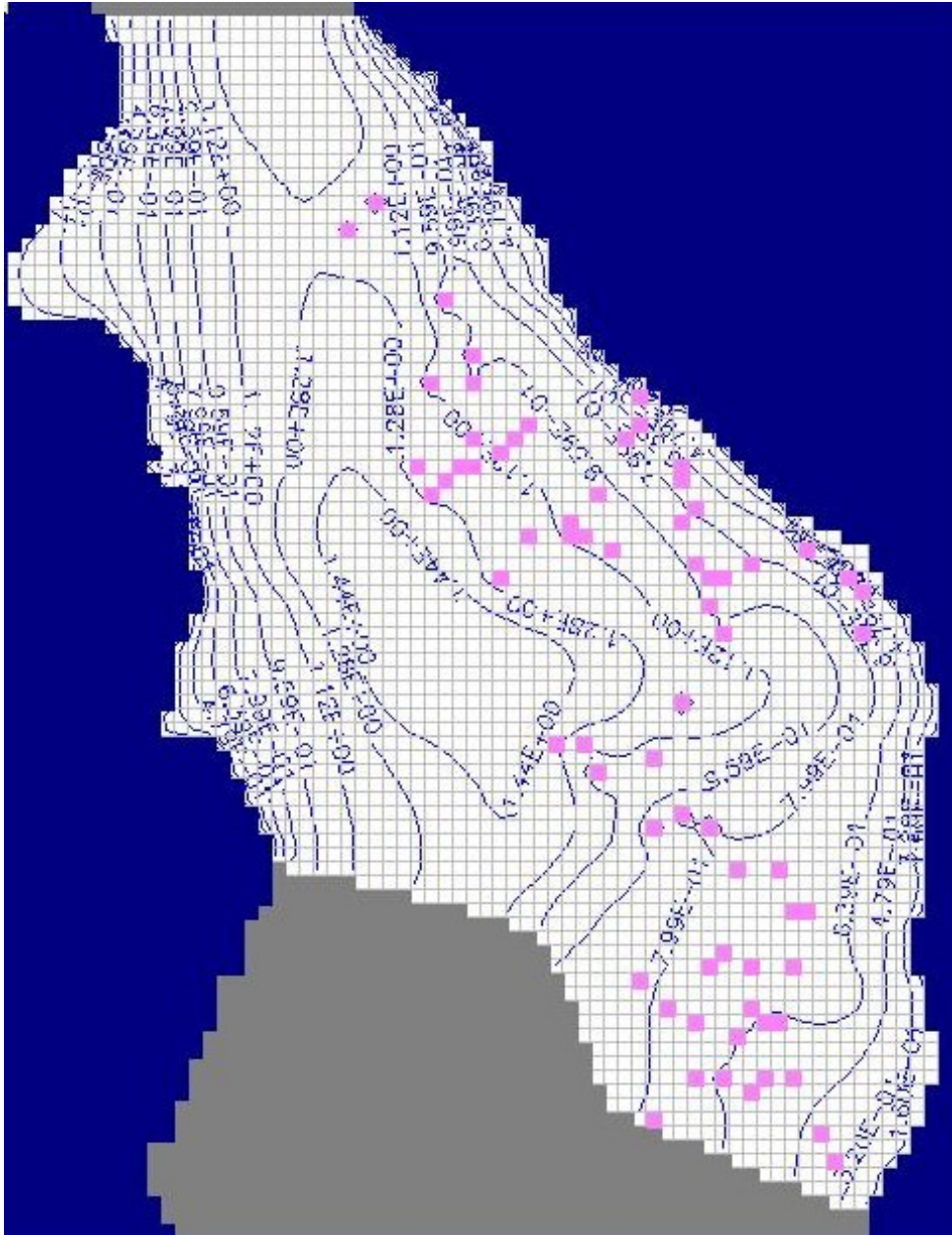
**Σχήμα 6.7:** (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30%.



Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ο υπόγειος υδροφόρος έχει υφαλμυρωθεί σε όλο το νότιο τμήμα του αλλά και στις θέσεις των περισσότερων γεωτρήσεων στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα αυτού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη μείωση της επιφανειακής τροφοδοσίας και στην έντονη άντληση που εμφανίζεται στο νησί. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε ενδεχόμενη μελλοντική μείωση της τροφοδοσίας κατά αυτό το ποσοστό θα πρέπει να μειωθούν οι τιμές της άντλησης των γεωτρήσεων κατά 30%. Για να θεωρείται ασφαλής ο υδροφόρος και η απόσταση του φακού του γλυκού νερού να είναι μεγαλύτερη από 15m, όπως έχει ορισθεί, θα πρέπει η άντληση να μειωθεί περισσότερο και να φτάσει σε ποσοστό μείωσης της τάξης του 40% της αρχικής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνολική άντληση των φρεάτων του υδροφόρα να αποτελεί το 44,03% της συνολικής τροφοδοσίας όπως έχει διαμορφωθεί στο συγκεκριμένο σενάριο. Τα αποτελέσματα αυτού φαίνονται στα παρακάτω σχήματα 6.8 και 6.9.



**Σχήμα 6.8:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 30% και της αρχικής άντλησης κατά 40%

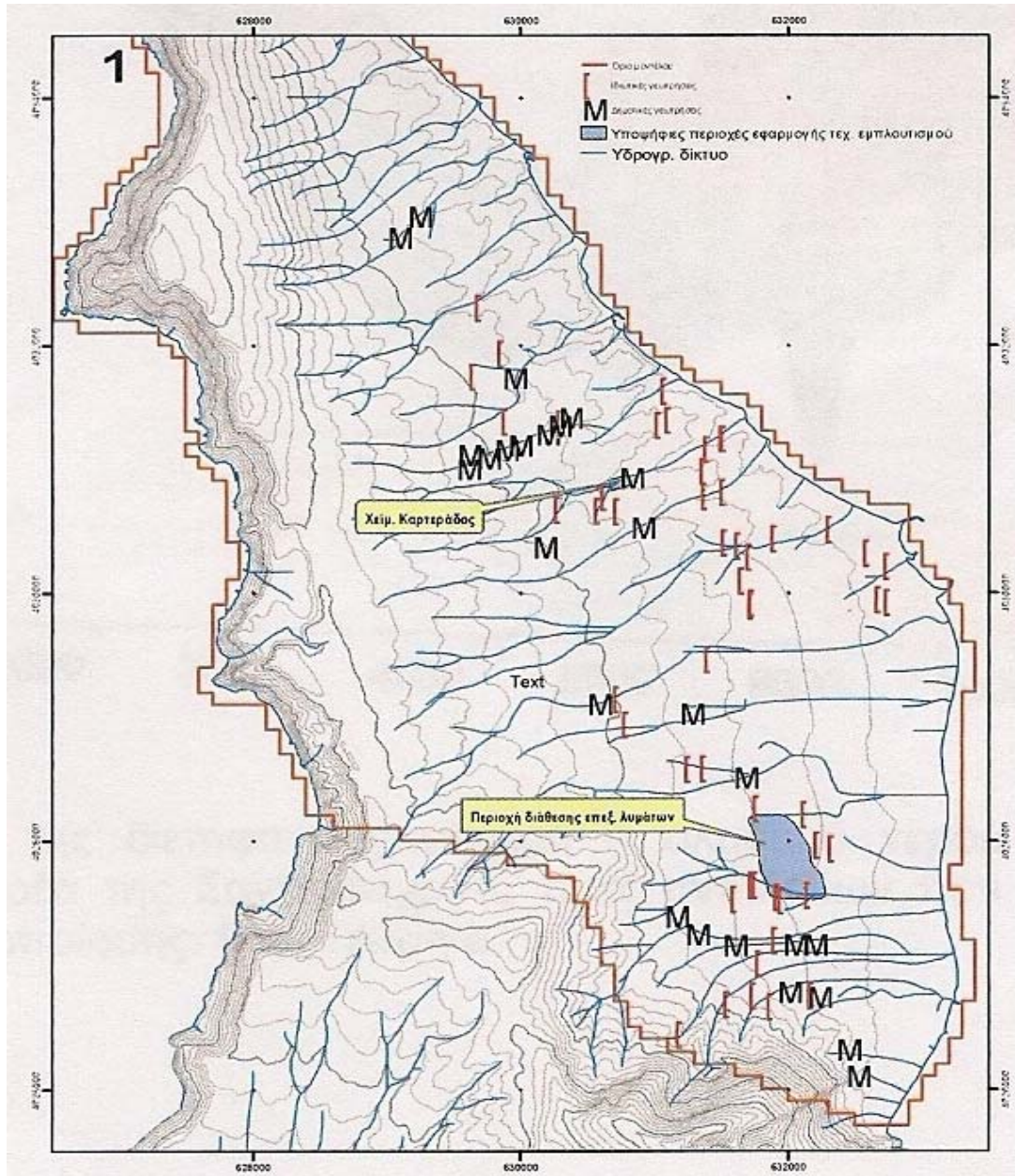


**Σχήμα 6.9:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30% της αρχικής και μείωσης της άντλησης κατά 40% της αρχικής.

#### 6.4 Σενάριο τεχνητού εμπλουτισμού

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η επαναχρησιμοποίηση νερού που προέκυψε μετά από καθαρισμό. Η τροφοδοσία του υδροφορέα μπορεί να γίνει σε δύο συγκεκριμένες περιοχές που βρίσκονται στο κεντρικό και νότιο μέρος του υδροφορέα, όπως φαίνονται στο σχήμα 6.9. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει η τροφοδοσία στη περιοχή διάθεσης

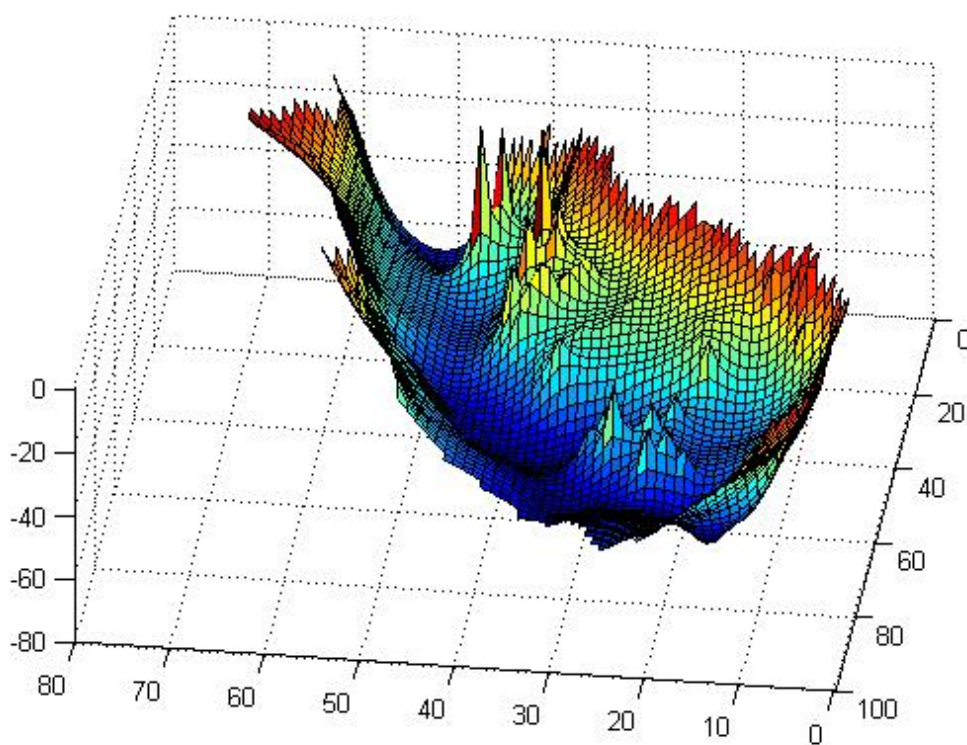
επεξεργασίας λυμάτων αφού εκεί εντοπίστηκε μεγαλύτερο πρόβλημα κατά την επίλυση της προσομοίωσης του υδροφορέα με τα διαθέσιμα στοιχεία της περιοχής.



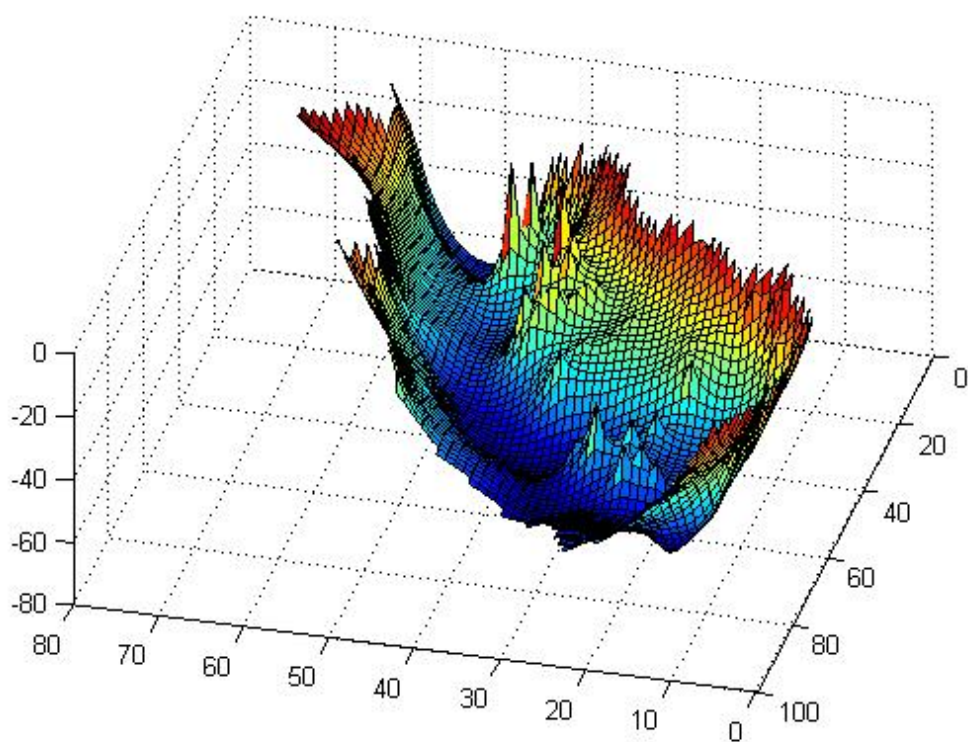
**Σχήμα 6.10:** Υποψήφιες περιοχές εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού.

Η ποσότητα του νερού που τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφορέα ανέρχεται σε 310.981 m<sup>3</sup>/έτος. Στο σενάριο αυτό, λοιπόν, η συνολική κατακόρυφη φυσική τροφοδοσία είναι 1.665.991 m<sup>3</sup>/έτος.

Οι τιμές των βέλτιστων αντλήσεων από τα 70 φρέατα του υδροφορέα υπολογίστηκαν με δοκιμές στο σύνολο των γεωτρήσεων και όχι καθεμιάς ξεχωριστά. Οι τιμές αυτές πληρούν και τις δύο προϋποθέσεις που τέθηκαν στην αρχή. Έτσι η άντληση σε κάθε γεώτρηση μπορεί να αυξηθεί κατά 12% χωρίς να εμφανίζεται το πρόβλημα της υπαλμύρωσης και κατά 8% ώστε να είναι ασφαλής ο υδροφορέας. Τα αποτελέσματα του σεναρίου φαίνονται στα σχήματα 6.11 και 6.12.



**Σχήμα 6.11:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης τεχνητό εμπλουτισμό και αύξηση της τροφοδοσίας κατά 12%.



**Σχήμα 6.12:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφορέα της Σαντορίνης τεχνητό εμπλουτισμό και αύξηση της άντλησης κατά 8%.

Δεν παρατηρείται μεγάλη αύξηση τη άντλησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο εμπλουτισμός γίνεται στο νότιο τμήμα με αποτέλεσμα οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα της νήσου να παρουσιάζουν μικρό πιεζομετρικό φορτίο επομένως η απόστασή τους από την στάθμη της θάλασσας να είναι πολύ μικρή. Η βέλτιστες τιμές γεωτρήσεων γίνεται και σε αυτό το σενάριο με την μέθοδο των δοκιμών στο σύνολο των φρεάτων με αποτέλεσμα οι τρεις γεωτρήσεις που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του υδροφορέα να επηρεάζουν το αποτέλεσμα αφού παρουσιάζουν έντονες διαφορές στο πιεζομετρικό φορτίο από τις υπόλοιπες γεωτρήσεις.

Επίσης, στην περίπτωση που μεγάλες ποσότητες τροφοδοσίας βρίσκονται συγκεντρωμένες σε συγκεκριμένες περιοχές του υδροφορέα, είναι δυνατόν να αντληθούν μεγαλύτερα ποσοστά τροφοδοσίας στα σημεία αυτά. Το αποτέλεσμα αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι ορισμένα από τα φρεάτια άντλησης που βρίσκονται πολύ κοντά στην περιοχή τροφοδοσίας

αντλούν γρήγορα τις ποσότητες νερού που εισέρχονται στον υδροφορέα πριν αυτές παραμείνουν στον υδροφορέα ικανό χρονικό διάστημα επαρκές για τον καθαρισμό τους.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### 7.1 Ανακεφαλαίωση και επιμέρους συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια συντάχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης για τον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της Μεσαριάς-Αεροδρομίου της νήσου Σαντορίνη. Κατά την προσομοίωση του υδροφορέα και την εφαρμογή αυτού απαιτείται η γνώση και η χρήση του μαθηματικού μοντέλου ροής των υπόγειων νερών. Αυτό αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις που προσομοιώνουν την κίνηση των υπόγειων νερών και επιλύονται με μαθηματικά μοντέλα. Αυτές είναι η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση Darcy. Για την επίλυση του φαινομένου της υφαλμύρωσης χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Strack. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς το αριθμητικό μοντέλο και η χρήση αυτού από το πρόγραμμα Modflow.

Η σχεδίαση και η εφαρμογή του υπόγειου υδροφορέα της Μεσαριάς έγινε με την βοήθεια του προγράμματος PMWIN. Σε αυτό εισάχθηκαν ως δεδομένα το ακριβές σχήμα του υδροφορέα, οι οριακές συνθήκες και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα όπως αυτές προέκυψαν από μελέτη του Α. Μαντόγλου το 2003. Τα αποτελέσματα προέκυψαν είναι οι τιμές του δυναμικού στην περιοχή μελέτης όπως ορίζονται από τον Strack. Με την κατάλληλη μετατροπή υπολογίστηκε, σε περιβάλλον Matlab, το πιεζομετρικό φορτίο. Από την διαδικασία αυτή προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για το σχήμα της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού αλλά και για την συμπεριφορά του υδροφορέα στις δεδομένες συνθήκες άντλησης.

Εξετάστηκαν εκτενώς διάφορα σενάρια σε συνθήκες μειωμένης τροφοδοσίας. Για κάθε σενάριο εξετάζεται η συμπεριφορά του υδροφορέα κατά την μείωση της τροφοδοσίας. Ελέγχεται για περίπτωση υφαλμύρωσης αυτού και επιζητείται η ποσότητα της άντλησης ώστε να αποφευχθεί η υφαλμύρωση των φρεάτων. Η διαδικασία αναζήτησης βέλτιστων τιμών άντλησης για τα διάφορα σενάρια έγινε με δοκιμές. Κατά την εφαρμογή αυτή τίθενται κριτήρια τα οποία πρέπει να πληρούνται. Αυτά αφορούν τις τιμές του

δυναμικού κατά Strack και επίσης την απόσταση του διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού από την ελεύθερη επιφάνεια.

Οι τιμές της άντλησης που εισάχθηκαν στο μοντέλο θεωρούνται οι βέλτιστες για την αποφυγή της υφαλμύρωσης και παρατηρείται ότι αποτελούν το 51.4% της μέσης ετήσιας φυσικής τροφοδοσίας που δέχεται ο υδροφορέας. Από το σύνολο των φρεάτων άντλησης στην περιοχή μελέτης το 42% είναι δημόσιες γεωτρήσεις ενώ το υπόλοιπο 58% ανήκει σε ιδιώτες. Ωστόσο, παρατηρείται ότι μερικές από τις ιδιωτικές γεωτρήσεις βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των 500m από την ακτή γεγονός που επιβαρύνει ιδιαίτερα τον υδροφορέα αφού αυξάνεται ο κίνδυνος γρήγορης υφαλμύρωσης μετά από ελάχιστη αύξηση της άντλησης ή μείωση της ετήσιας τροφοδοσίας. Στα σημεία των γεωτρήσεων που βρίσκονται κοντά στην ακτή το πάχος του φακού του γλυκού νερού είναι μικρότερο από αυτών των εσωτερικών γεωτρήσεων.

Σαν γενικό συμπέρασμα τονίζεται ότι δεν θα πρέπει να αντλείται εντατικά στο όριο ο υδροφορέας αφού σε αυτή την περίπτωση κινδυνεύει να υφαλμυρωθεί πολύ γρήγορα μετά από ελάχιστη αύξηση της άντλησης. Για να επανέλθει ο υδροφορέας στην αρχική του κατάσταση μετά από τοπική ή μικρής κλίμακας υφαλμύρωση θα πρέπει τα πηγάδια άντλησης να σταματήσουν την λειτουργία για μακρά περίοδο. Η άντληση μπορεί να αρχίσει μετά από ένα διάστημα με μικρότερες παροχές άντλησης. Μια μεγάλης κλίμακας υφαλμύρωση του υδροφορέα λόγω υπεράντλησης μπορεί να κατέστρεψε τον υδροφορέα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

## **7.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου σχηματισμού και των σεναρίων άντλησης και τροφοδοσίας.**

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός ακριβούς μοντέλου προσομοίωσης της ροής του παράκτιου υδροφορέα της Μεσαριάς-Αεροδρομίου της νήσου Σαντορίνη. Η σχεδίαση αυτού έγινε με τον καλύτερο τρόπο και αναλογικά με τα διαθέσιμα στοιχεία που υπήρχαν για την συγκεκριμένη περιοχή.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιορισμοί που έγιναν στο μοντέλο και οι οποίοι ισχύουν για κάθε μοντέλο υπόγειων νερών. Αυτοί



οφείλονται είτε λόγω της ακρίβειας των υπολογισμών που εκτελούνται από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είτε λόγω της υδρογεωλογίας της περιοχής που προσομοιώνεται από το μοντέλο. Οι υδρολογικές και υδρογεωλογικές παράμετροι που εισάγονται στο μοντέλο αποτελούν μια προσέγγιση των συνθηκών που υπάρχουν στην φύση ακόμη και αν προέρχονται από πληθώρα μετρήσεων. Σε καμία, όμως, περίπτωση δεν μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς. Αυτές εισάγονται σε διαφορεικές εξισώσεις οι οποίες επιλύονται με αριθμητικά μοντέλα που μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο ακριβή.

Υιοθετούνται, επίσης, οι παραδοχές του ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα, του ευδιάκριτου ορίου και της μόνιμης οριζόντιας ροής για το γλυκό νερό ενώ το θαλασσινό θεωρείται ακίνητο. Για την μορφή της διεπιφάνειας χρησιμοποιείται η προσέγγιση των Ghyben-Herzberg.

Για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιείται η εξίσωση της οριζόντιας ροής για ομογενή και ισότροπο υδροφορέα με την διαφορά ότι αντί του πιεζομετρικού φορτίου υπολογίζεται το δυναμικό και αντί της μεταφορικότητας χρησιμοποιείται η υδραυλική αγωγιμότητα. Αυτός είναι και ο λόγος που ο υδροφορέας θεωρείται ως περιορισμένος και η μεταφορικότητα λαμβάνει τιμή ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα. Το πάχος του υδροφορέα εισάγεται στο PMWIN ως μοναδιαίο για να ισχύει η παραπάνω ισότητα.

Οι παράμετροι που καθορίζουν ουσιαστικά τις ποσότητες του υπόγειου νερού που μπορούν να αντληθούν με ασφάλεια είναι η θέση, ο αριθμός και διάταξη των φρεάτων. Η χωροθέτηση του πηγαδιού κοντά στην ακτή ή η γειτνίασή του με αδιαπέρατο όριο αυξάνει τον κίνδυνο υπαλμύρωσης περιορίζοντας την βέλτιστη τιμή άντλησης. Ο μεγάλος αριθμός υδάτων σε συνδυασμό με την αραιή διάταξη των φρεάτων στο εσωτερικό του υδροφορέα εξασφαλίζει υψηλότερες τιμές άντλησης. Η απόσταση μεταξύ των φρεάτων επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Στον υπό εξέταση υδροφορέα παρατηρείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων, δημόσιων και ιδιωτικών συνολικά, και ιδιαίτερα πυκνών με αποτέλεσμα να μπορεί να αντληθεί με ασφάλεια μόλις το 47,3% της τροφοδοσίας. Επίσης στο νότιο τμήμα του υδροφορέα που παρατηρείται πλήθος γεωτρήσεων με αρκετά κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους και άναρχα τοποθετημένες, η απόσταση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού από

την ελεύθερη επιφάνεια είναι αισθητά μικρότερη από τα υπόλοιπα τμήματα του υδροφορέα. Αυτό καθιστά στο νότιο τμήμα ιδιαίτερα επικίνδυνο για υφαλμύρωση σε περίπτωση ελαχίστης αύξησης της άντλησης ή μείωσης της τροφοδοσίας.

Αξιοσημείωτη είναι η επίδραση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα στις τιμές της άντλησης. Όταν η υδραυλική αγωγιμότητα λαμβάνει μικρές τιμές παρεμποδίζεται κίνηση του θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα. Έτσι επιτρέπονται μεγαλύτερες τιμές άντλησης και εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ποσότητα υπόγειου νερού. Αυτό αποτελεί μια ακόμη αιτία που στο νότιο τμήμα του υδροφορέα το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού είναι μειωμένο. Στο σημείο αυτό παρατηρούνται μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και υψηλές τιμές άντλησης.

Επειδή η τροφοδοσία μεταβάλλεται από χρόνο σε χρόνο, διερευνήθηκε αν το ποσοστό της άντλησης είναι σταθερό ή εξαρτάται από την συγκεκριμένη τροφοδοσία του υδροφορέα. Βρέθηκε ότι όταν η σχετική τροφοδοσία αυξάνεται, παρατηρείται μικρή αύξηση της άντλησης ενώ όταν μειώνεται η σχετική τροφοδοσία η άντλησης παρουσιάζει σημαντική μείωση.

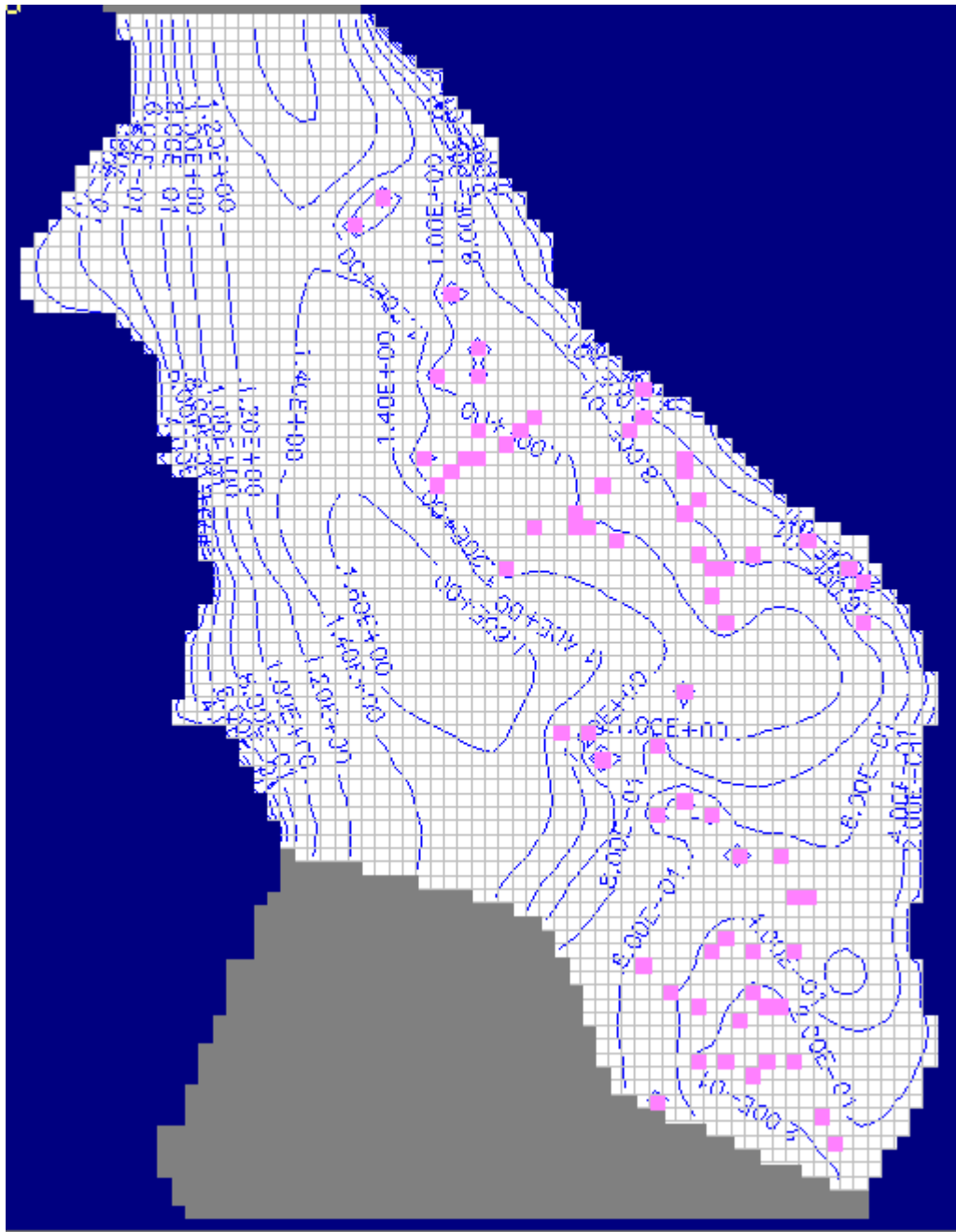
Εξετάστηκε και το σενάριο του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή των επεξεργασμένων λυμάτων της Ε.Ε.Λ. του Καμαρίου και υπολογίστηκε ότι το σενάριο αυτό οδηγεί σε αύξηση των βέλτιστων παροχών άντλησης. Το αποτέλεσμα αυτό πιθανόν να προέρχεται από το γεγονός ότι ορισμένα από τα φρέατα άντλησης βρίσκονται κοντά στις περιοχές τροφοδοσίας και αντλούν γρήγορα τις ποσότητες νερού που εισέρχονται στον υδροφορέα χωρίς αυτές να βρίσκονται ικανοποιητικό διάστημα για τον καθαρισμό τους με αποτέλεσμα να αμφισβητείται η ποιότητα του νερού που αντλείται.

### **7.3 Προτάσεις- Μέτρα**

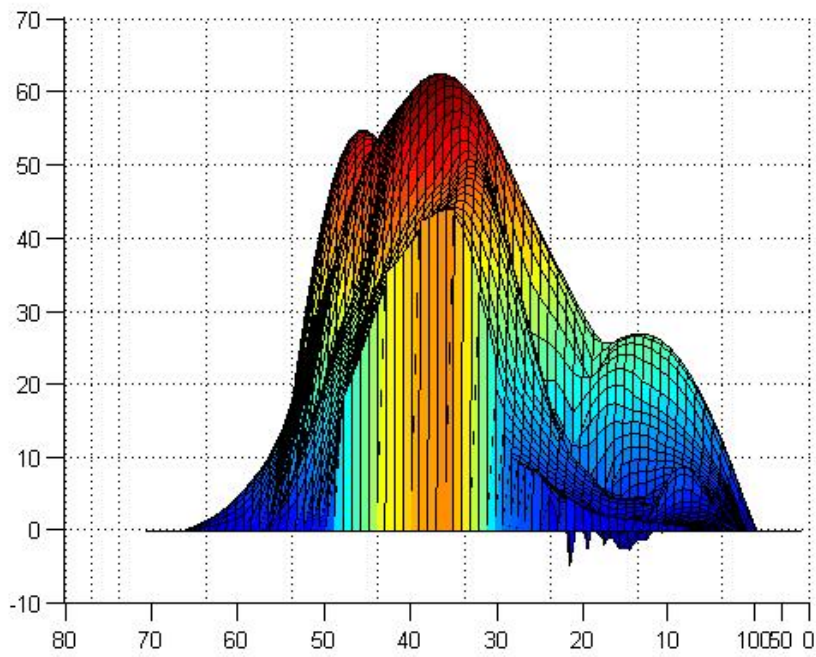
Για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της Σαντορίνης αλλά και για την βελτίωση της επιβαρυμένης εικόνας του προτείνονται μέτρα προστασίας και ανάκαμψης του υπόγειου υδροφορέα. Αυτά είναι:

- Ουσιαστική μείωση των αντλήσεων υπόγειου νερού με αντίστοιχη εξοικονόμηση νερού για άρδευση.
- Υποκατάσταση των υπόγειων υδάτων με επιφανειακά, μέσω έργων ταμίευσης επιφανειακών νερών
- Τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα
- Αξιοποίηση της Ε.Ε.Λ. με ανάπτυξη μεθόδων επαναχρησιμοποίησης των επεξεργασμένων υγρών απόβλητων και την τροφοδοσία του υδροφορέα από αυτά.
- Αξιοποίηση του παράκτιου υφάλμυρου υδροφόρου με εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης.
- Ακριβή και αδιάκοπη γνώση των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και την ποσότητα των υπόγειων υδάτων μέσα από συνεχή συλλογή πρωτογενών στοιχείων.
- Ενημέρωση του κοινού, με αποτέλεσμα την ουσιαστική ευαισθητοποίηση στην χρήση των φυσικών πόρων αλλά και την επαρκή αντίληψη της κρισιμότητας του προβλήματος της υφαλμύρωσης.
- Επιβολή ελέγχου λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων.
- Πιθανή μετεγκατάσταση των πηγαδιών άντλησης. Η εγκατάσταση προς το εσωτερικό της παράκτιας ζώνης είναι συνήθως καλύτερη από την εγκατάσταση κοντά στις ακτές αφού το πάχος του φακού του γλυκού νερού αυξάνεται και επιτρέπει έτσι στα πηγάδια να αντλήσουν από μεγαλύτερο βάθος. Επίσης, μια πιο κατανομημένη διάταξη των φρεάτων άντλησης επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του υδροφορέα.

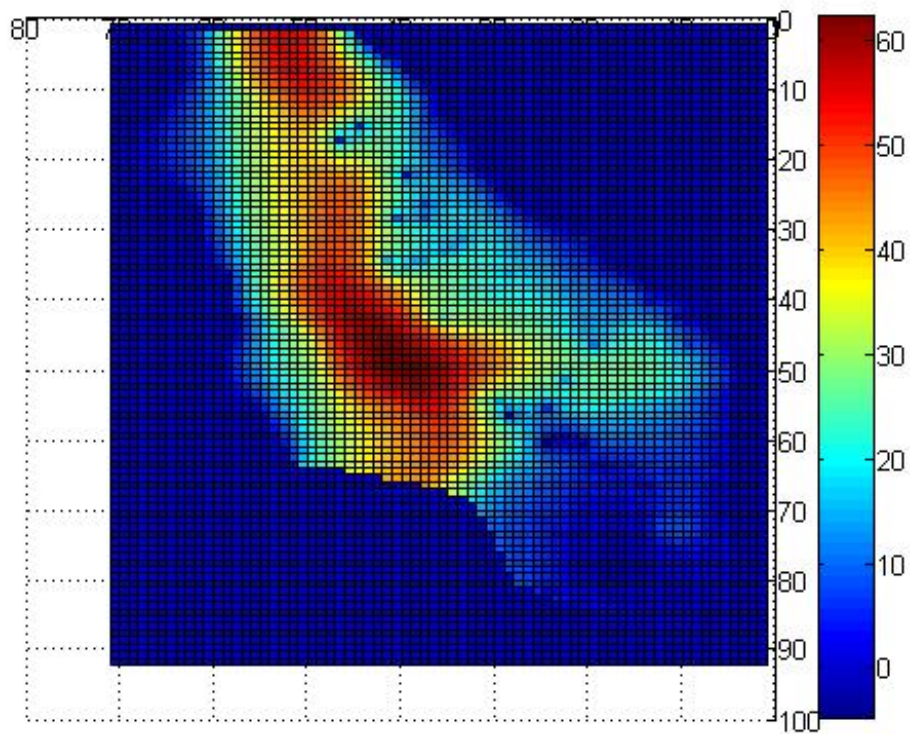
Με την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων μπορεί να επιτευχθεί η προστασία των υπόγειων υδάτινων σχηματισμών από το φαινόμενο της υφαλμύρωσης και αύξηση των υδάτινων αποθεμάτων. Έτσι εξασφαλίζεται η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων.



**Σχήμα Π1:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφορέα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής και ίδιας άντλησης.

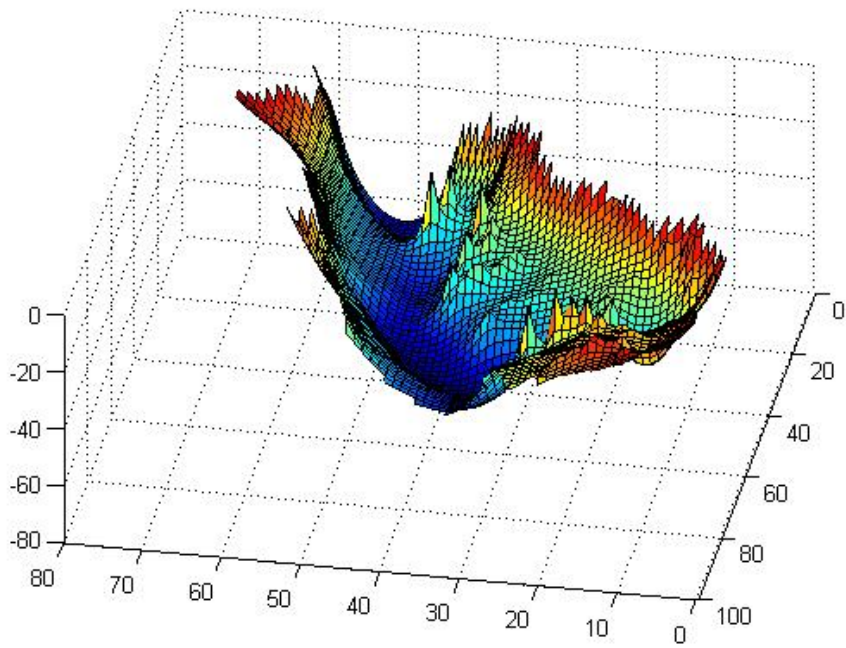


(α)

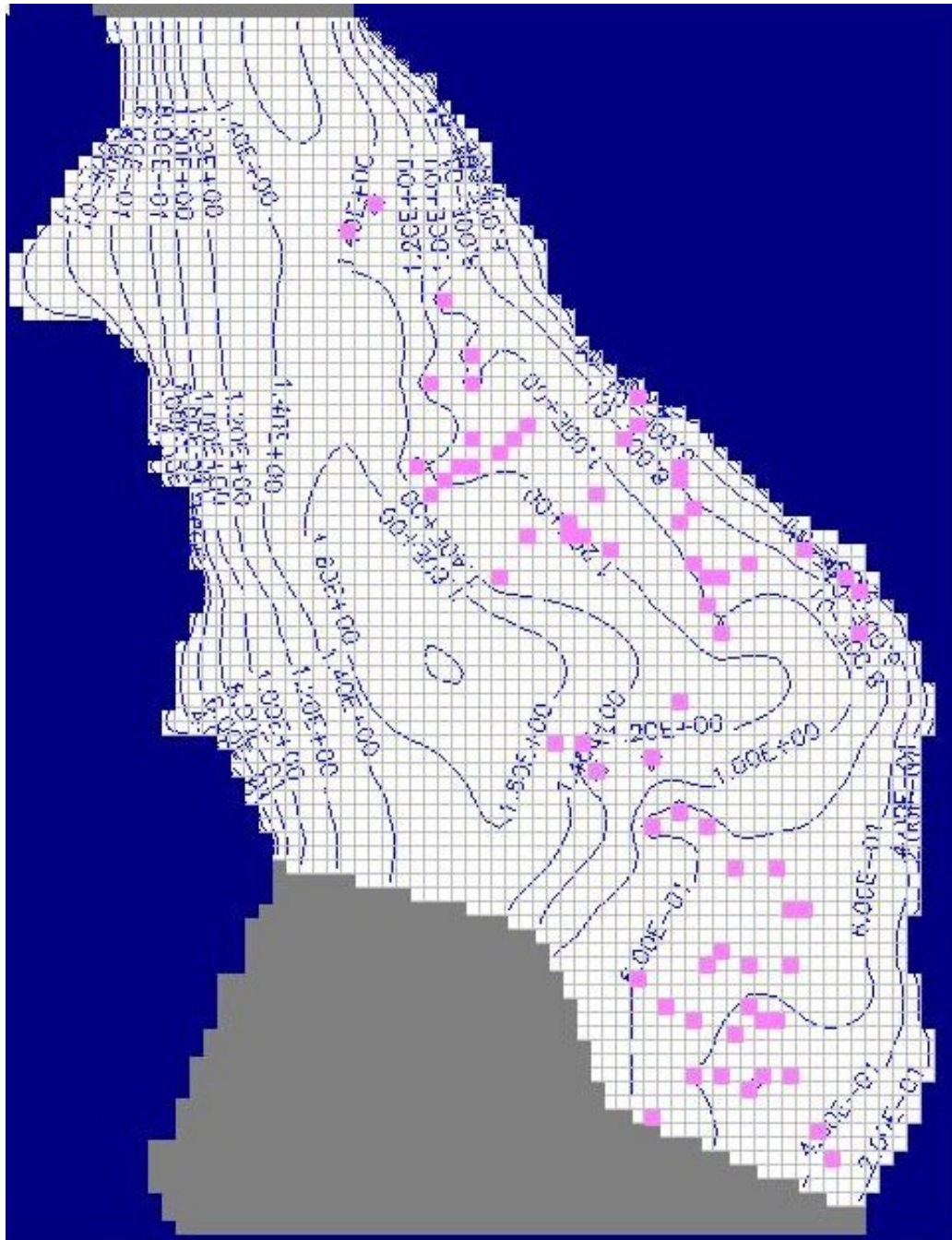


(β)

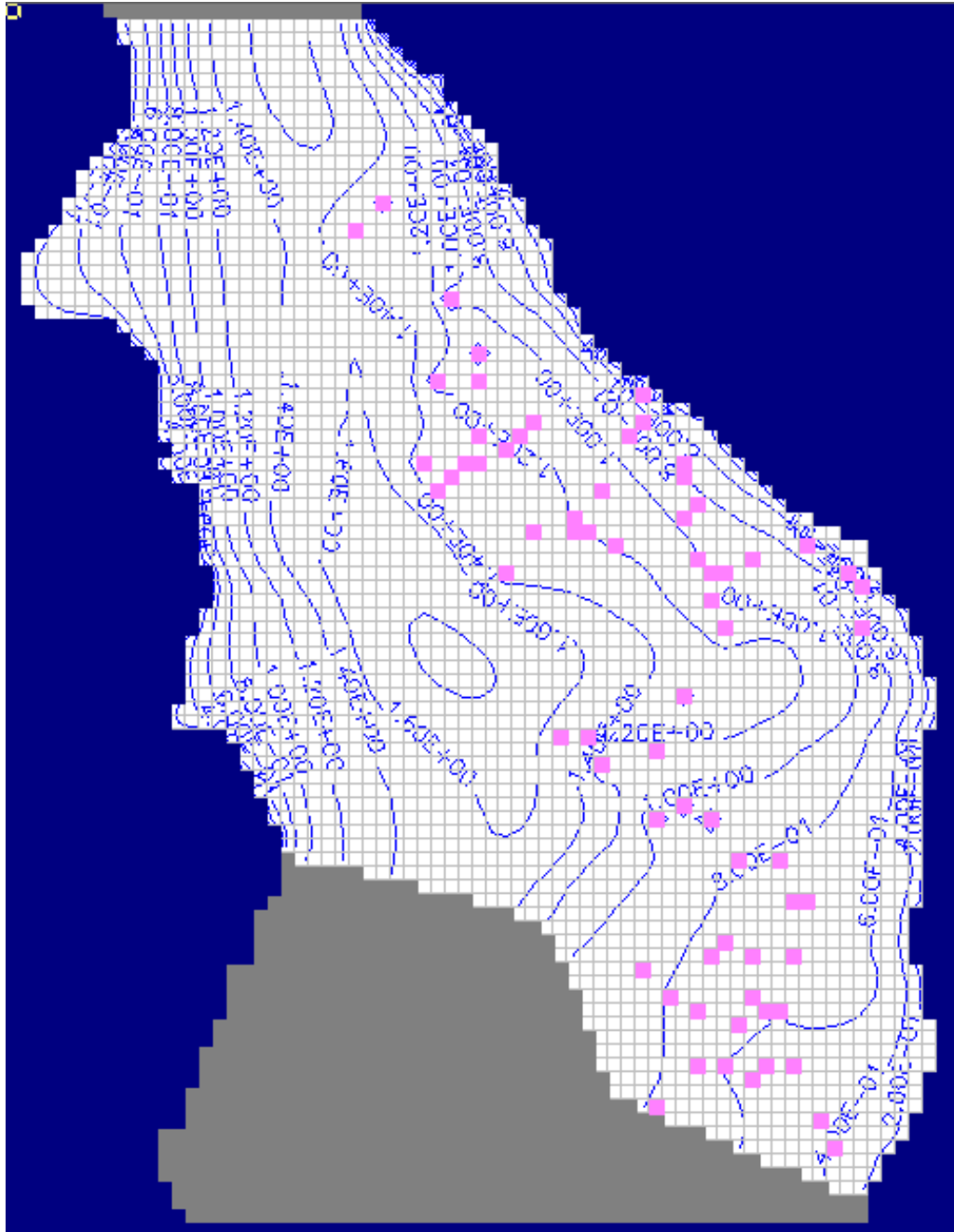
**Σχήμα Π2:** (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5%.



**Σχήμα Π3:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 5% και της άντλησης κατά 5% της αρχικής.

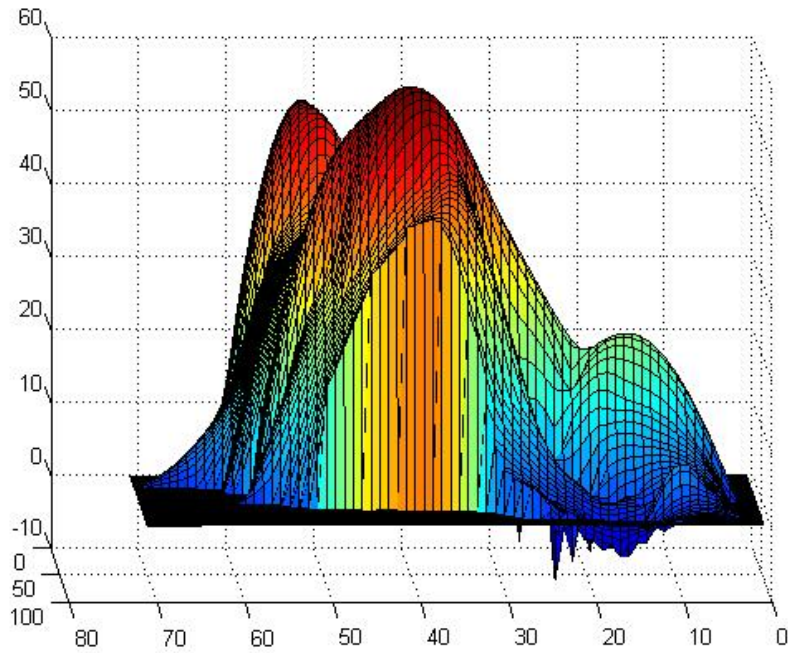


**Σχήμα Π4:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 5% της αρχικής.

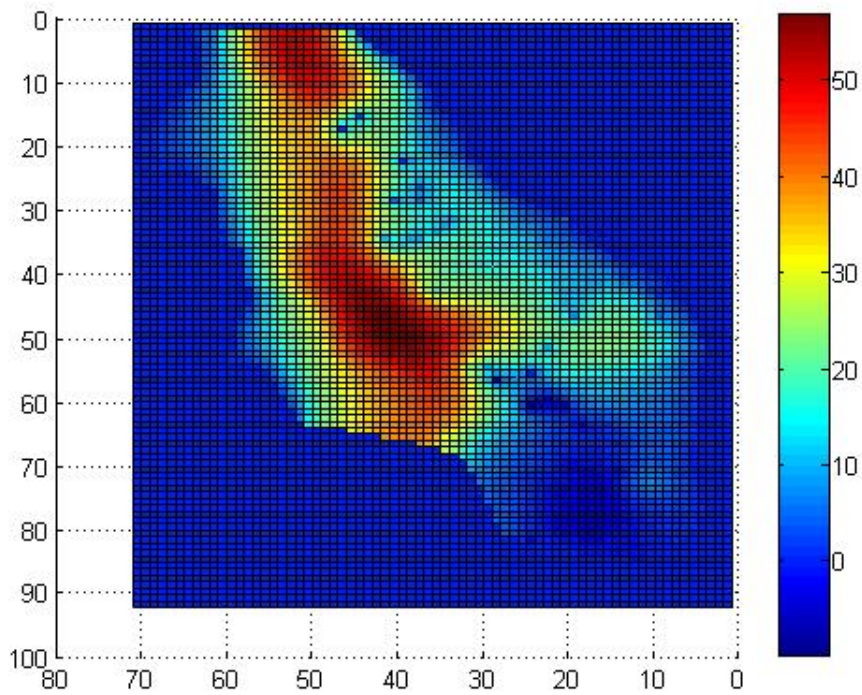


**Σχήμα Π5:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 5% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 13% της αρχικής.



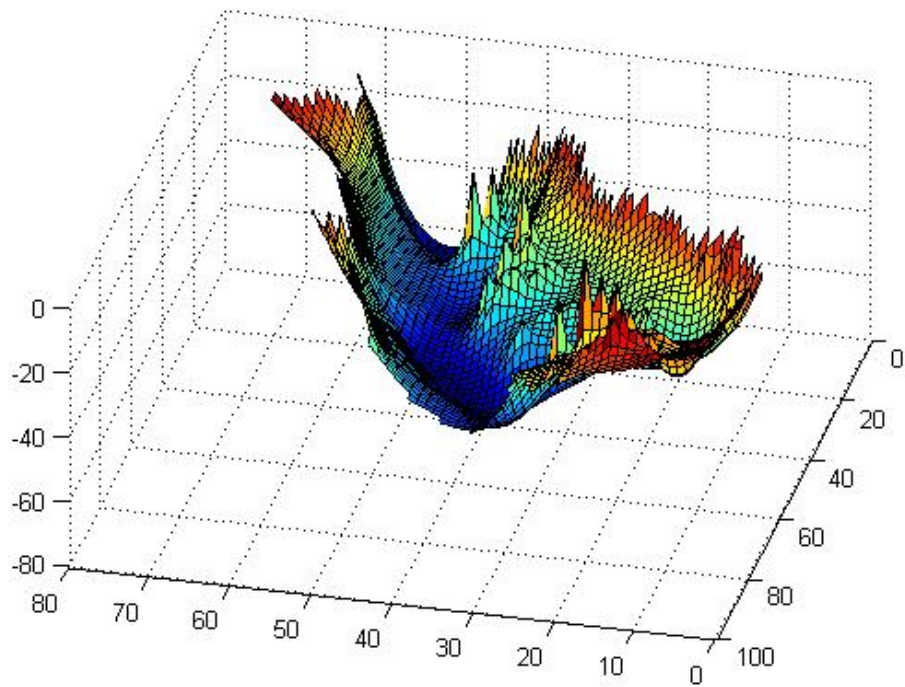


(α)

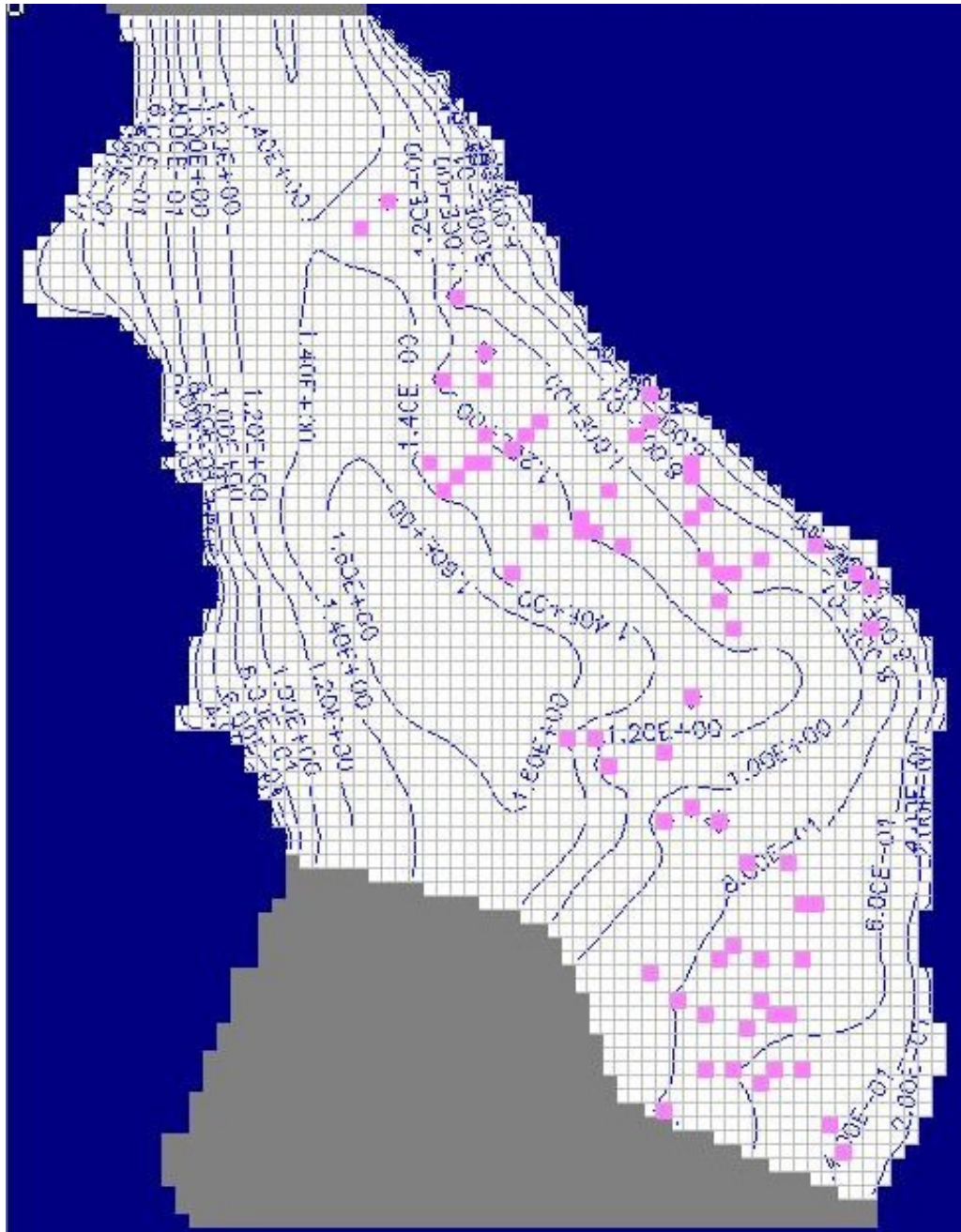


(β)

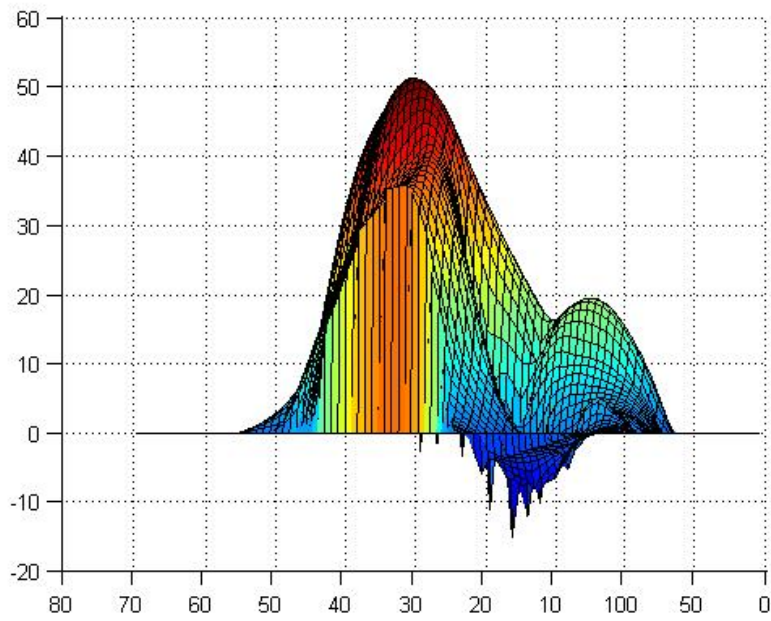
**Σχήμα Π6:** (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10%.



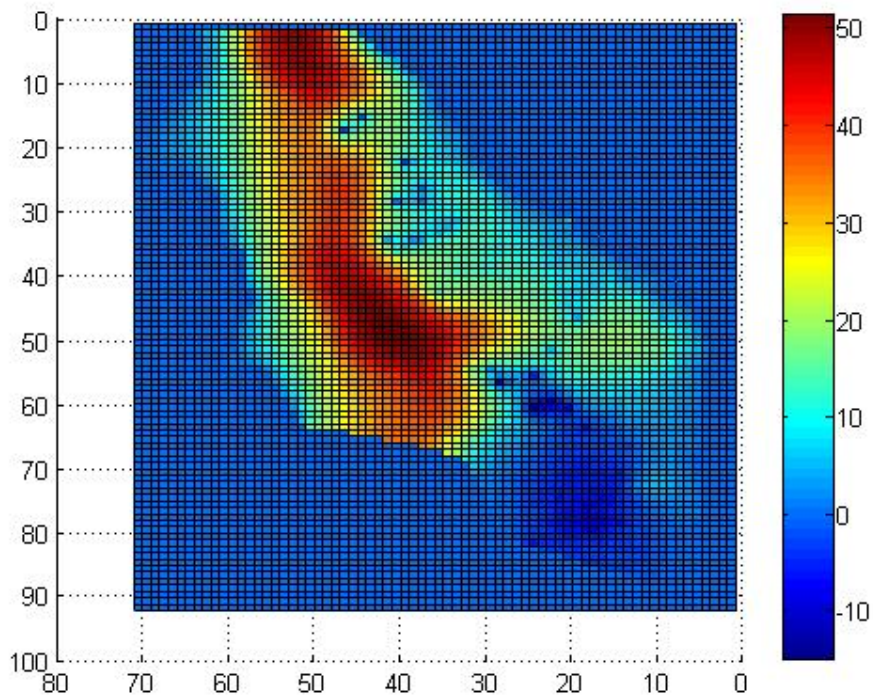
**Σχήμα Π7:** Τρισδιάστατη απεικόνιση του φακού γλυκού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 10% και τη άντλησης κατά 10% της αρχικής.



**Σχήμα Π8:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 10% της αρχικής και μείωση της άντληση κατά 19% της αρχικής.

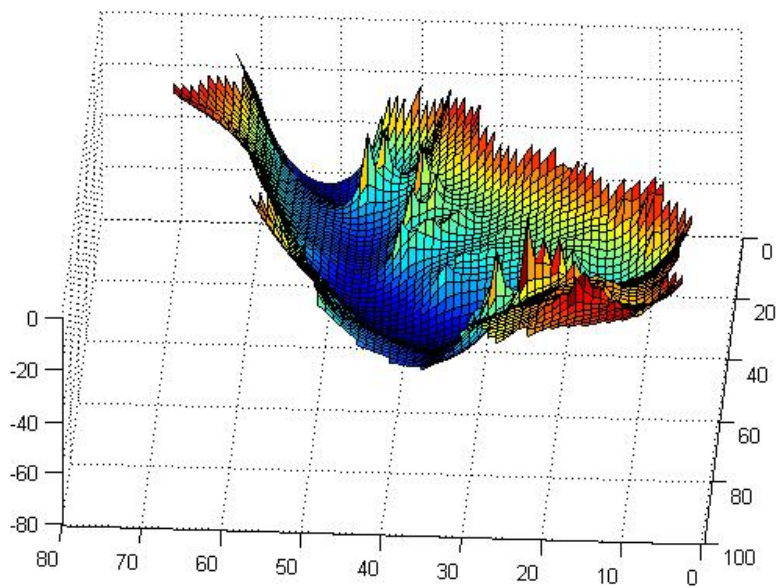


(α)

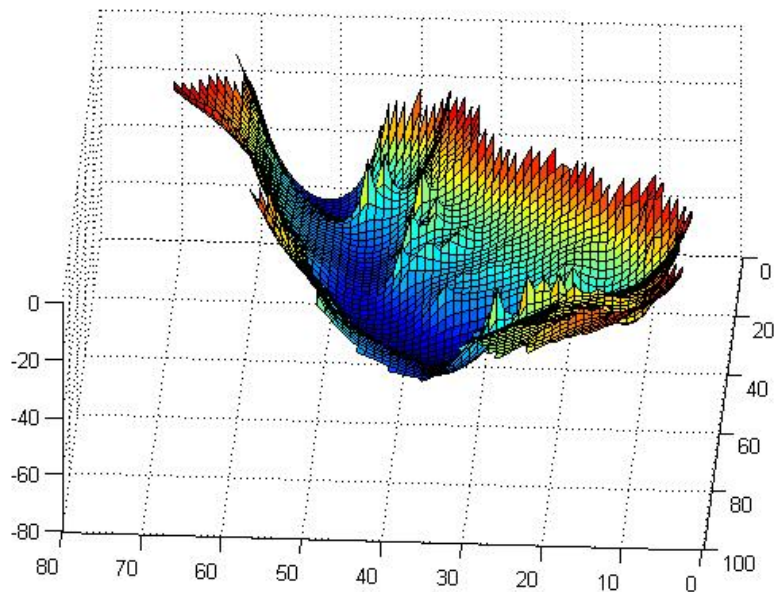


(β)

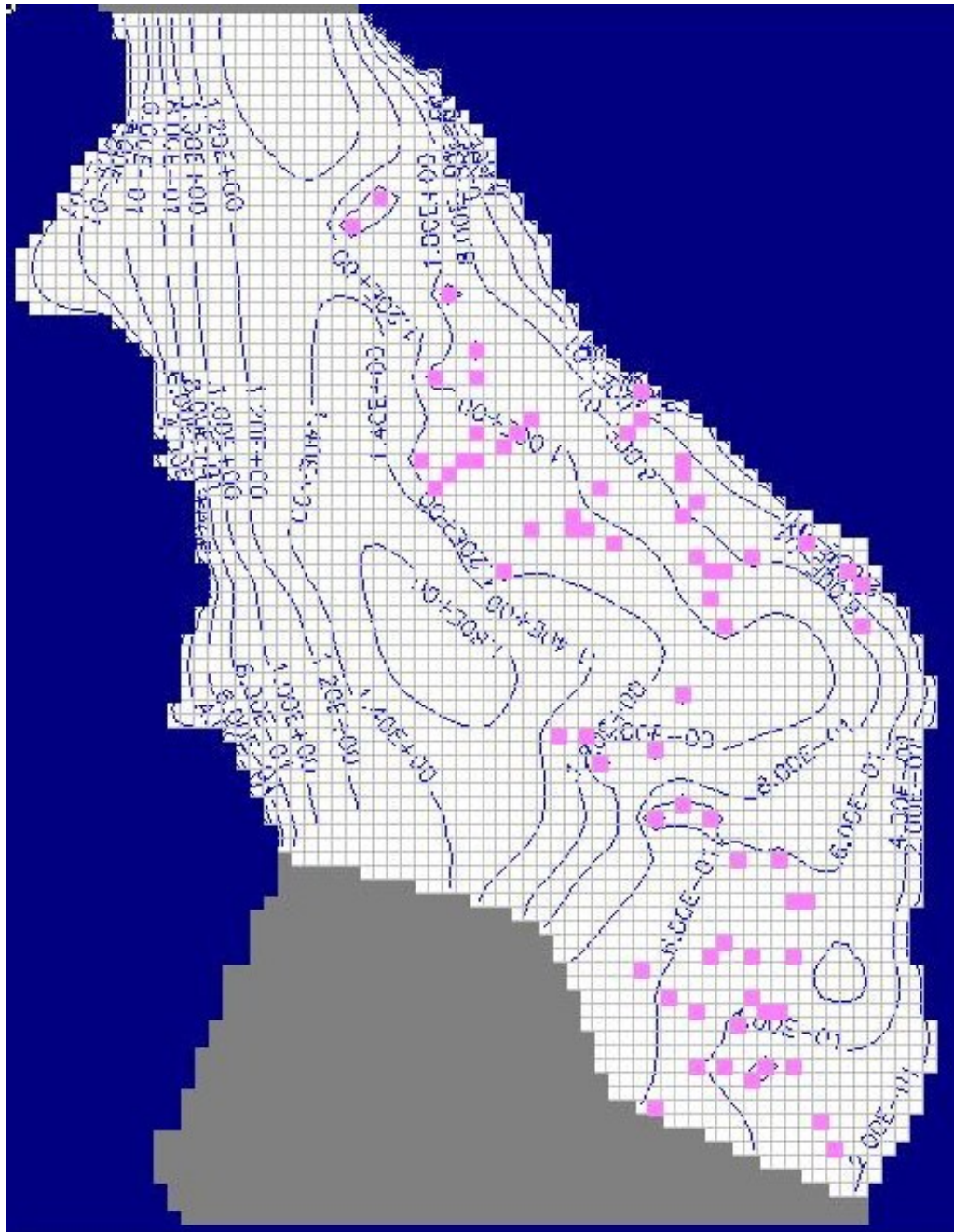
**Σχήμα Π9:** (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15%.



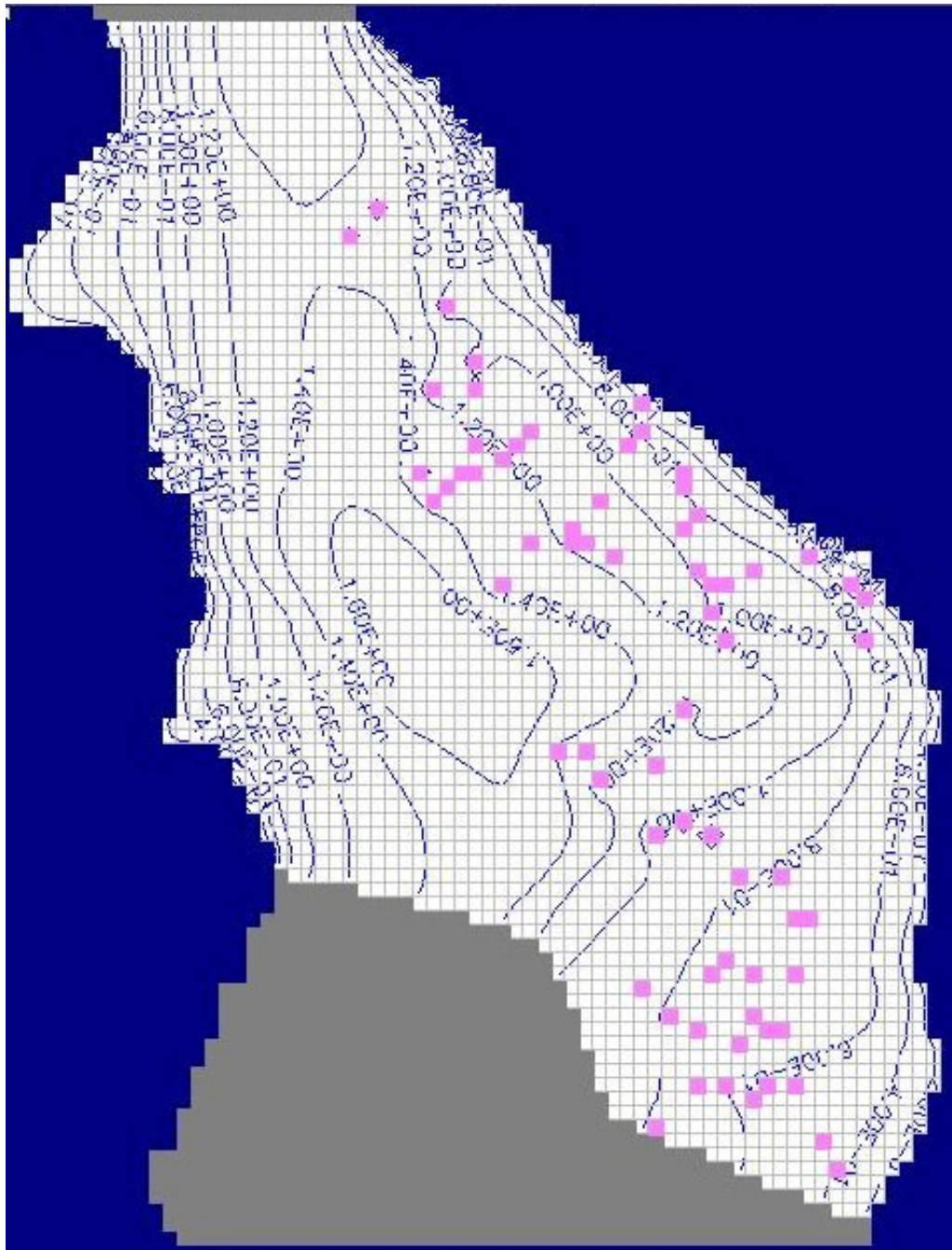
**Σχήμα Π10:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 15% και μείωσης της άντλησης κατά 15% της αρχικής.



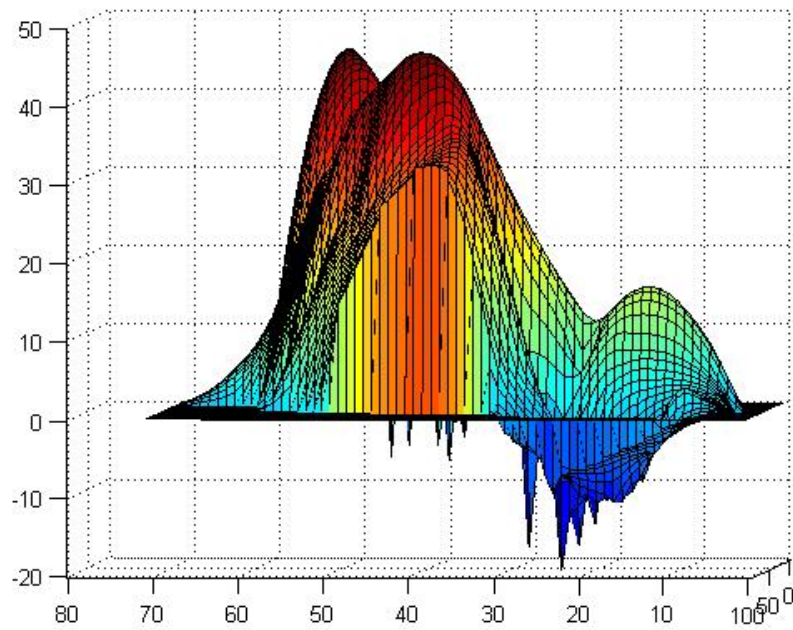
**Σχήμα Π11:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 15% και μείωσης της άντλησης κατά 24% της αρχικής.



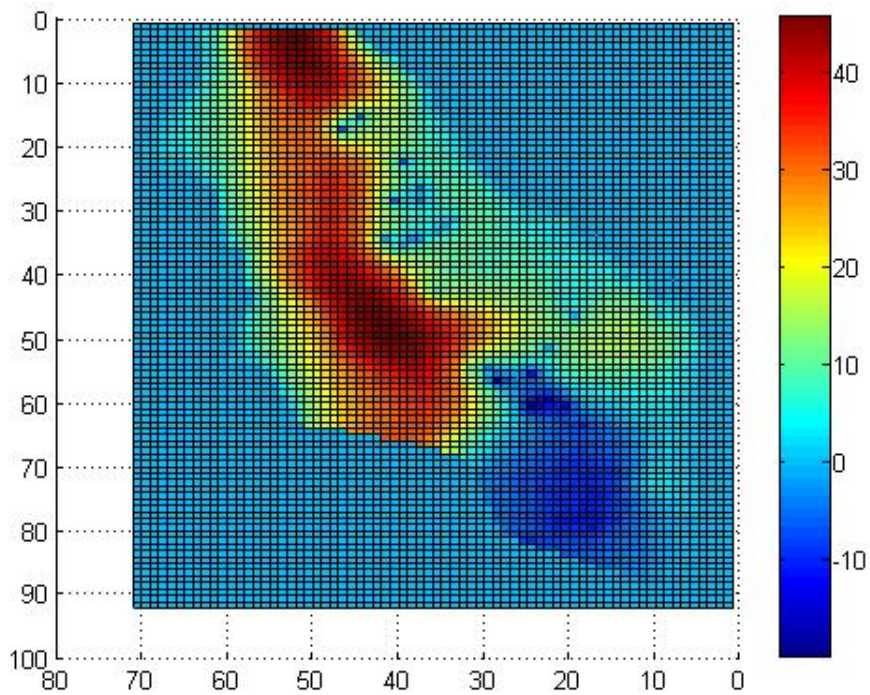
**Σχήμα Π12:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 15% της αρχικής.



**Σχήμα Π13:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 15% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 24% της αρχικής.



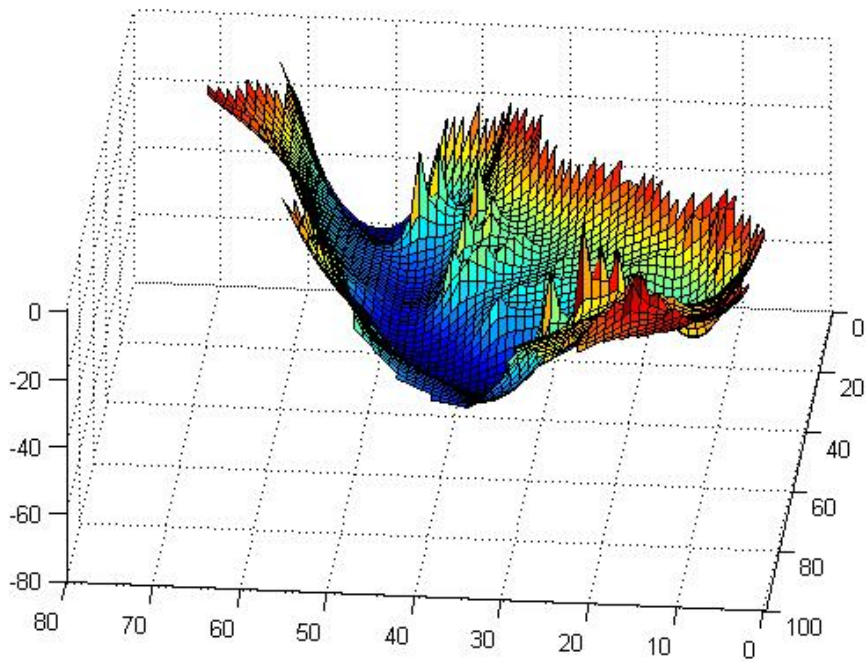
(α)



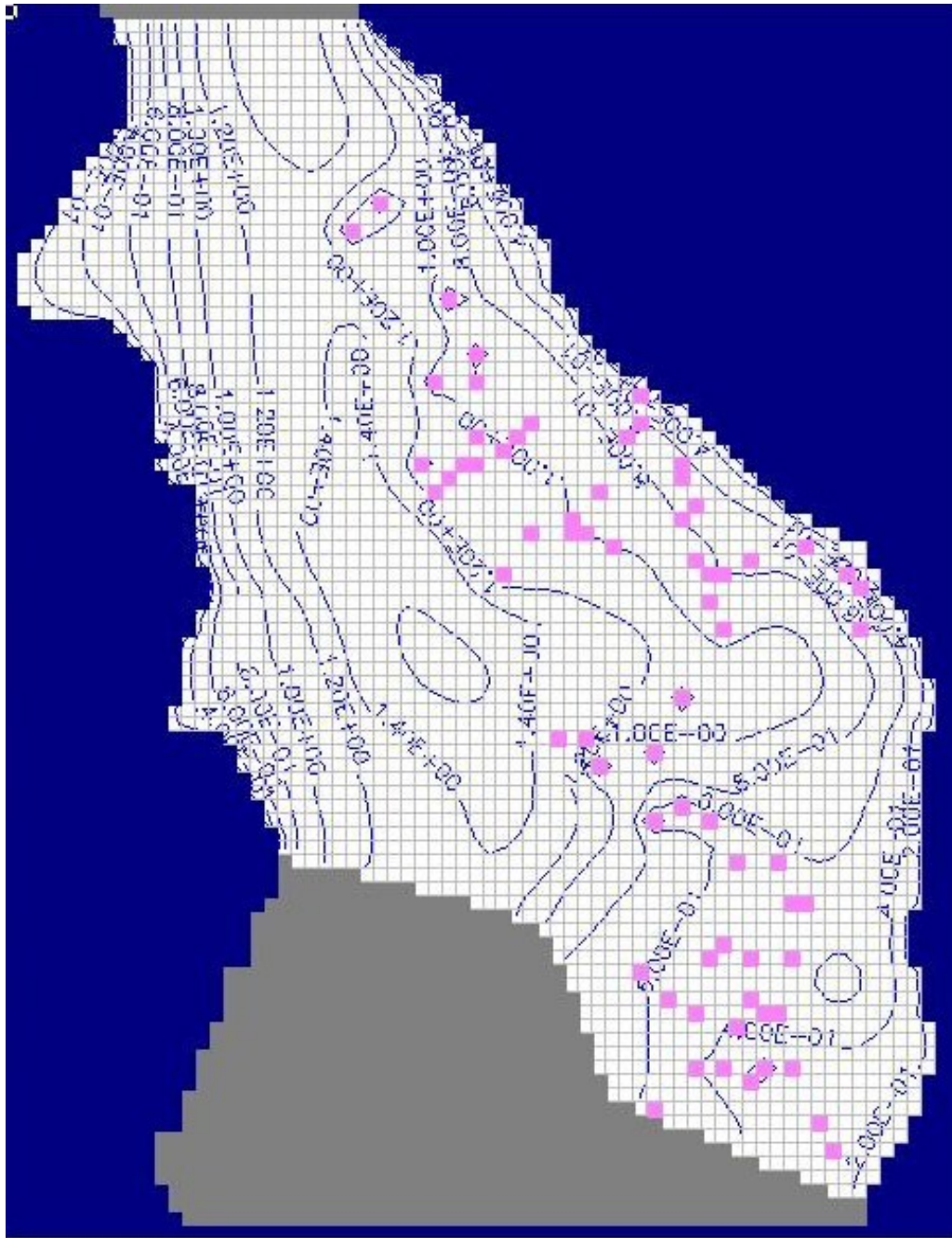
(β)

**Σχήμα Π14:** (α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του υδροφορέα με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20%, (β) Δισδιάστατη απεικόνιση του δυναμικού του Strack με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20%.

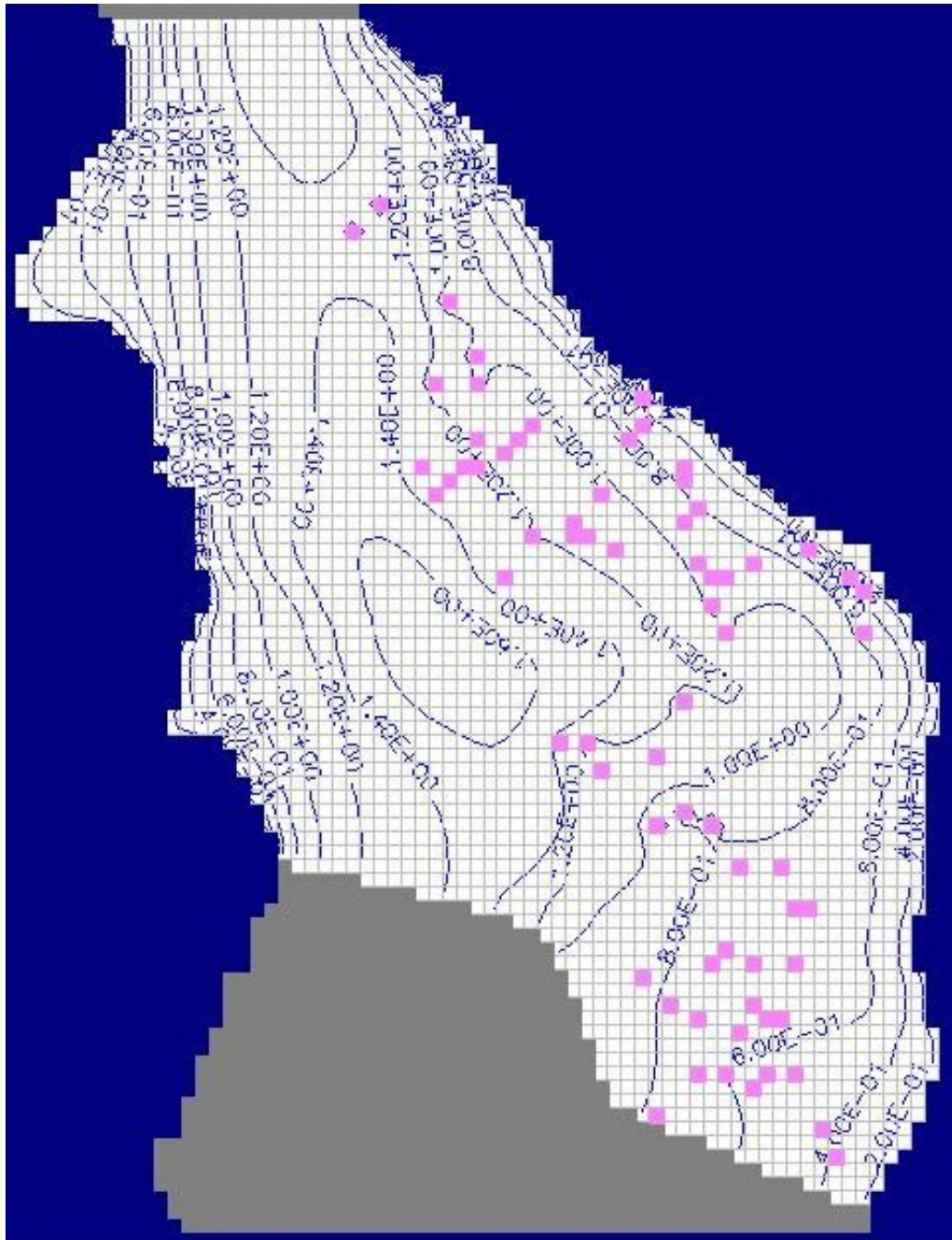




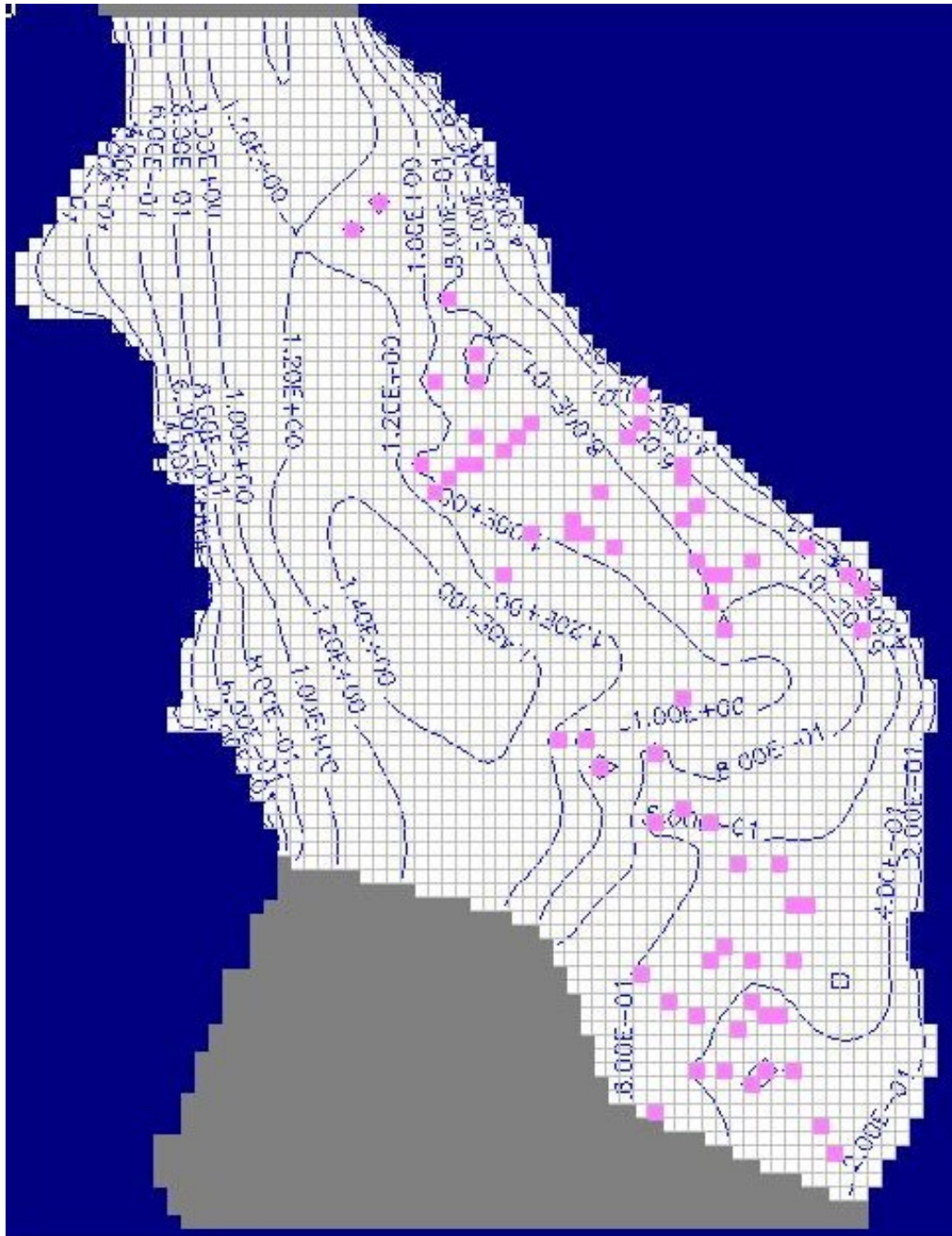
**Σχήμα Π15:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 20% και μείωσης της άντλησης κατά 20% της αρχικής.



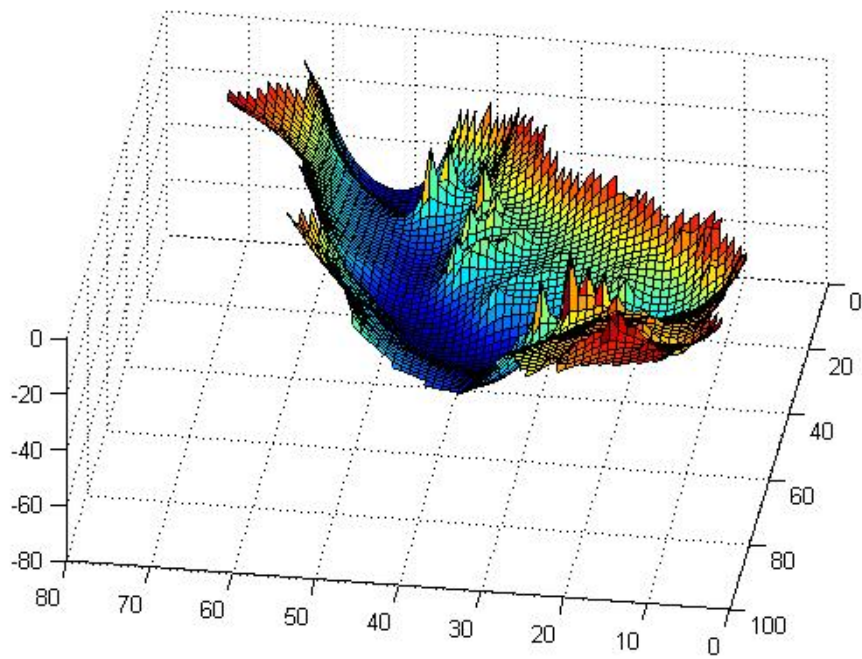
**Σχήμα Π16:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 20% της αρχικής.



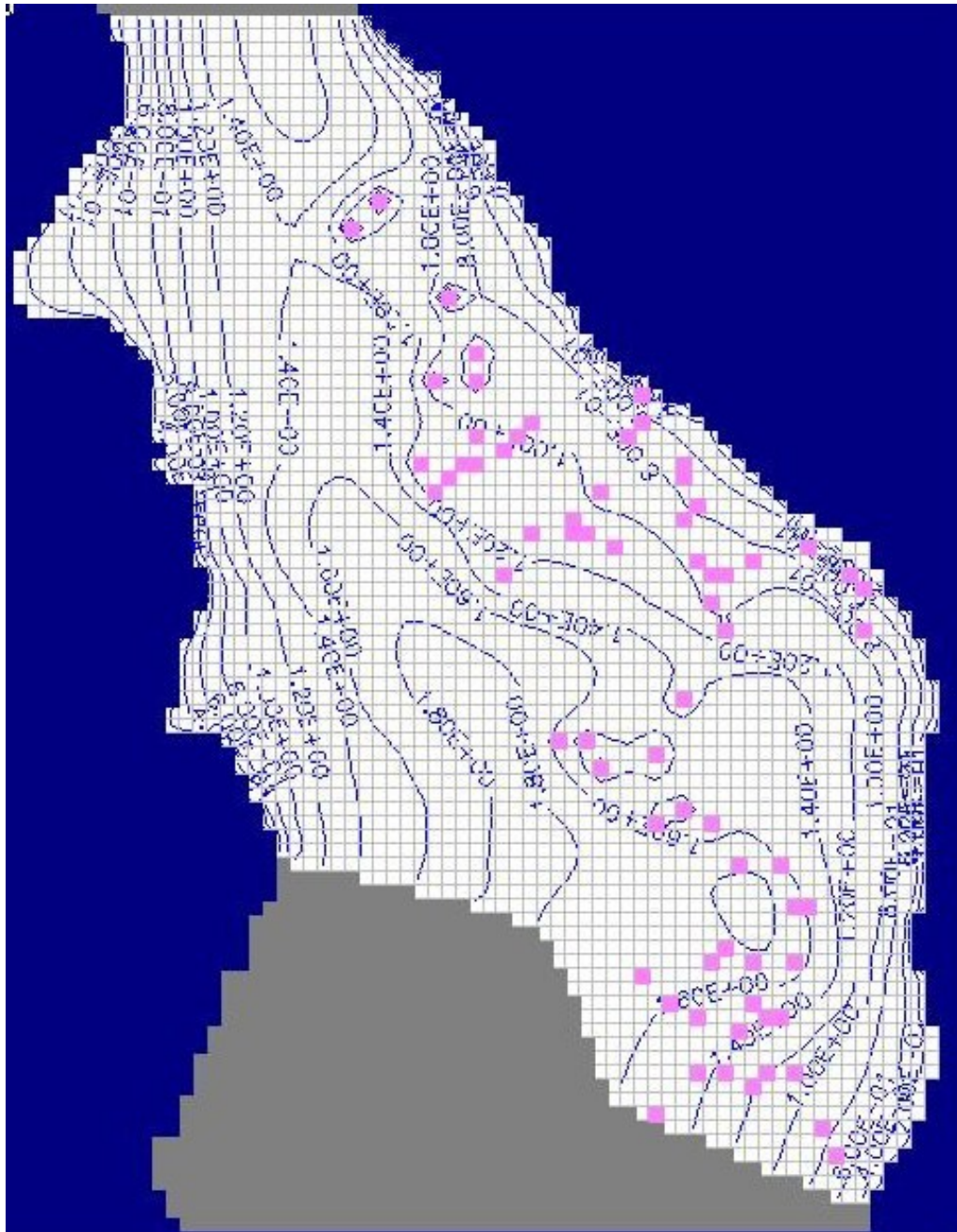
**Σχήμα Π17:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 20% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 29% της αρχικής.



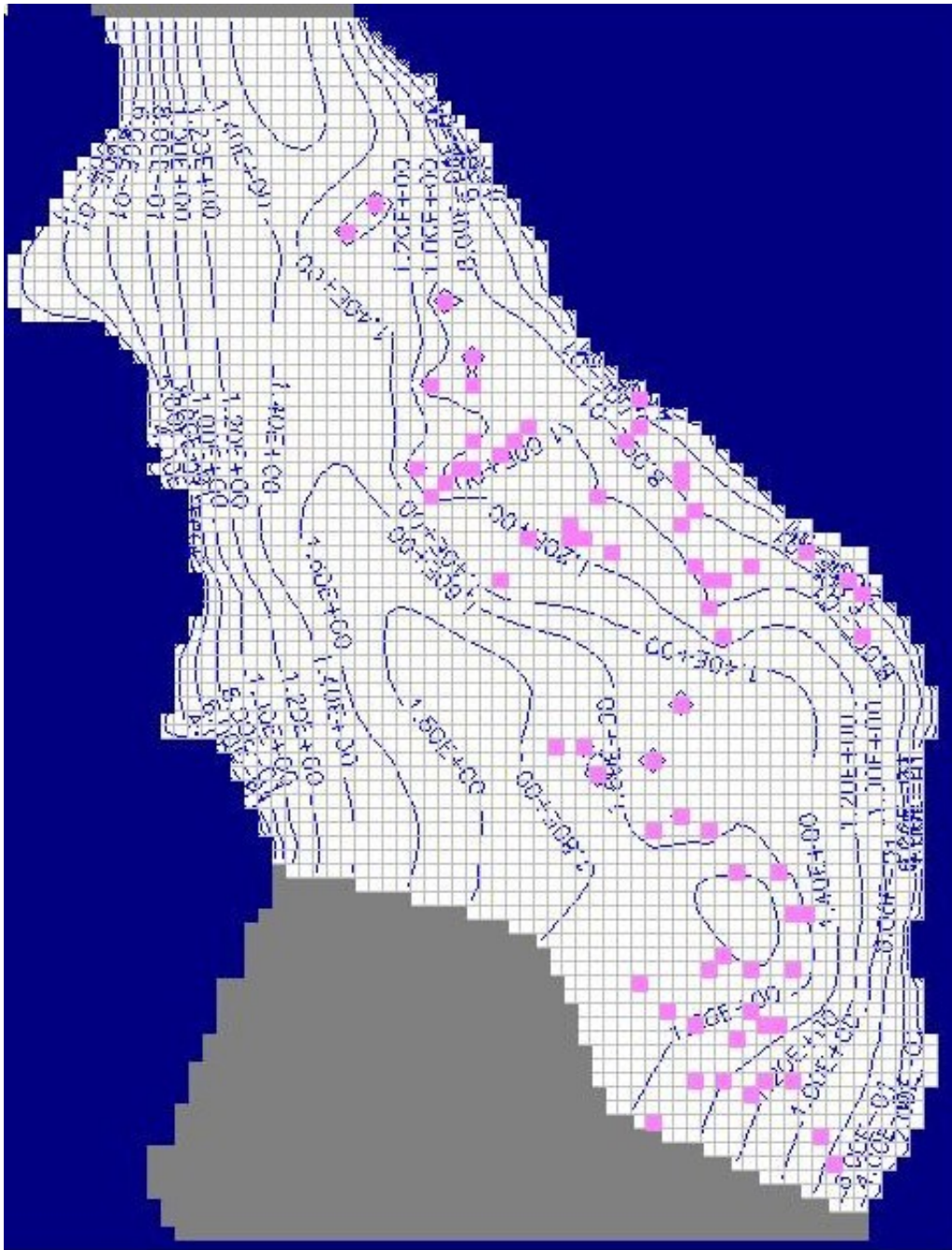
**Σχήμα Π18:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της τροφοδοσίας κατά 30% της αρχικής και μείωσης της άντληση κατά 30% της αρχικής.



**Σχήμα Π19:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της διεπιφάνειας του γλυκού-αλμυρού νερού για τον υδροφόρα της Σαντορίνης με μείωση της αρχικής τροφοδοσίας κατά 30% και μείωσης της άντλησης κατά 30% της αρχικής.



**Σχήμα Π20:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με τεχνητό εμπλουτισμό και αύξησης της άντλησης κατά 12%.



**Σχήμα Π21:** Απεικόνιση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στον υπόγειο υδροφόρα της Σαντορίνης με τεχνητό εμπλουτισμό και αύξησης της άντλησης κατά 8%.

Γιαννουλόπουλος Π., “Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο”, Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιολόγησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων, Αθήνα 2000.

Γιαννουλόπουλος Π., Μαντόγλου Α., “Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων και Πρόληψη Υφαλμύρωσης”, Πρακτικά Συμποσίου “Αιγαίο-Νερό-Βιώσιμη Ανάπτυξη”, Πάρος 2001.

Γιαννουλόπουλος Π., Μαντόγλου Α., “το Μαθηματικό Μοντέλο του Υδροφορέα της Μεσαριάς- Καρτεράδου στην νήσο Σαντορίνη”, Σαντορίνη 2003

Κουράκος Γ., “Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων με Περιβαλλοντικά και Οικονομικά Κριτήρια”, Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Νοέμβριος 2009.

Λατινόπουλος Π.Δ., “ Υδραυλική των Υπόγειων Ροών”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 1986.

Νάνου- Γιάνναρου Α., “Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά”, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999.

Παπαντωνίου Μ., “Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων – Βελτιστοποίηση Αντλήσεων”, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα 2003.

Τσακίρης Γ., “Υδάτινοι Πόροι: Τόμος Ι. Τεχνική Υδρολογία”, Τομέας Υδάτινων Πόρων, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995

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



A. Aharmouch, A. Larabi, "Numerical Modeling of Saltwater Interface Upconing in Coastal aquifers", First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers—Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, 2001.

Bear J., "Hydraulics of Groundwater", Mcgraw-Hill, New York 1979.

Cheng A.H.-D. and Ouazar D., "Analytical Solutions", in "Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods and Practices", J. Bear, et al. (eds), Kluwer Academic Publishers 1999.

Mantoglou A., "Pumping Management of Coastal Aquifers using Analytical Models of Saltwater Intrusion", Water Resources Research, Vol 37, pages 12,2004.

Mantoglou A., Papantoniou M. and Giannouloupoulos P., "Coastal Aquifer using Numerical Simulation and Nonlinear Optimization", submitted 2003.

McDonald M.G. and A.W. Harbaugh (1988), A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. Techniques of Water Resources Investigations 06-A1, USGS,576p.

Strack O.D.L., "A Single-Potential Solution for Regional Interface Problems in Coastal Aquifers", Water Resources Research, 12(6), p.p. 1165-1174, 1976.