ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

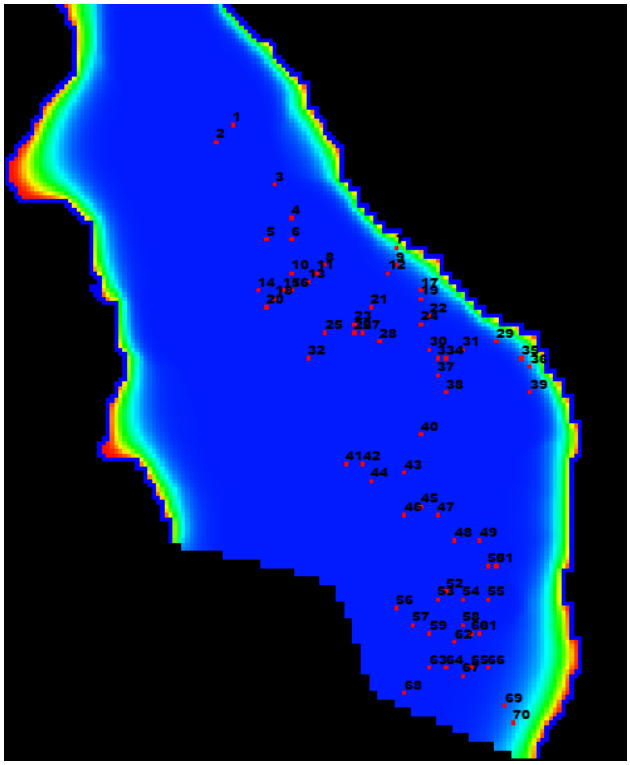
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Τομέας Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης

Εμβάθυνση Υδατικών Πόρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ ΜΕ ΤΟ SEAWAT»



Εκπόνηση: Καρρά Θεοδώρα

Επιβλέπων καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια της εμβάθυνσης «Διαχείριση Υδατικών Πόρων».

Την επίβλεψη της εργασίας είχε ο Καθηγητής ΕΜΠ, Αριστοτέλης Μαντόγλου. Θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε, την εμπιστοσύνη, την υπομονή και την καθοδήγηση του στα επιμέρους στάδια της εργασίας.

Θα ήθελα, ακόμη, να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, Γιώργο Κοψιαύτη, ο οποίος με βοήθησε καθοριστικά με την εξοικείωση με το χρησιμοποιηθέν λογισμικό πρόγραμμα και που με τις υποδείξεις, τις γνώσεις και τη διάθεση και την υπομονή του συνέβαλε ουσιαστικά στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ευχαριστίες αρμόζουν, επίσης, στον Δρ. Υδρογεωλόγο του Ι.Γ.Μ.Ε. Γιαννουλόπουλο Παναγιώτη, ο οποίος, τόσο με την παροχή στοιχείων της περιοχής μελέτης όσο και με τις εύστοχες παρατηρήσεις του, συνέβαλε στην αρτιότητα της εργασίας.

Επιπροσθέτως, θέλω να ευχαριστήσω τον Τεχνικό Προϊστάμενο Κ.Ε.Υ.Α. Οίας, Ιωάννη Λαμπράκη για την αμέριστη προθυμία και την βοήθειά του στην παροχή πληροφοριακού υλικού σχετικά με τις μονάδες αφαλάτωσης της Οίας. Ακόμη, ευχαριστίες αρμόζουν και στον Γενικό Διευθυντή Δ.Ε.Υ.Α. Θήρας, Νικόλαο Μάϊνα, ο οποίος συνέβαλε και αυτός με τις πληροφορίες που μου παρείχε στην περάτωση της εργασίας.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου και τους φίλους μου που ήταν πάντα στο πλευρό μου και με στήριξαν καθ' όλη την πορεία της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Γενικά 1
1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας 2
1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας 3

2. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ 6

2.1 Ιστορία 6
2.1.1 Αρχαιότητα 7
2.1.2 Ιστορικά Χρόνια 7
2.1.3 Βυζαντινά Χρόνια 7
2.1.4 Οθωμανική Κυριαρχία 8
2.1.5 Νεότερα Χρόνια 8
2.2 Μορφολογία - Γεωγραφία 11
2.3 Υδρολιθολογία 12
2.4 Υδροφόροι Σχηματισμοί 14
2.5 Κλίμα 15
2.6 Πληθυσμιακά Στοιχεία 16
2.7 Γενικά Οικονομικά Στοιχεία 18
2.8 Διαχείριση Υδάτων με Αφαλάτωση 22
2.8.1 Δήμος Θήρας 22
2.8.2 Κοινότητα Οίας 25

3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ 27

3.1 Εισαγωγή 27
3.2 Υπόγεια Νερά 28
3.3 Υδροφορείς 29
3.4 Παράμετροι Υπόγειων Υδροφορέων 32
3.5 Μαθηματικά Μοντέλα Κίνησης Υπογείων Νερών 35
3.5.1 Νόμος του Darcy 36
3.5.2 Εξίσωση Συνέχειας 37
3.5.3 Θεωρία Οριζόντιας Ροής 40
3.5.4 Δίκτυα Γραμμών Ροής και Δυναμικού 41
3.5.5 Αριθμητικά Μοντέλα Κίνησης Υπογείων Νερών 41

4. ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ 44

4.1 Γενικά 44
4.2 Διαδικασία Υφαλμύρωσης Παράκτιων Υδροφορέων 45
4.3 Η Πολυπλοκότητα του Προβλήματος Υφαλμύρωσης Παράκτιων Υδροφορέων 47
4.4 Αίτια Δημιουργίας της Υφαλμύρωσης 48
4.4.1 Μικρό Υδραυλικό Φορτίο και Διάχυση 49
4.4.2 Αύξηση του Παγκόσμιου Πληθυσμού 50
4.4.3 Άνοδος του Βιοτικού Επιπέδου 50
4.4.4 Μεταβολή του Κλίματος 51
4.5 Επιπτώσεις της Υφαλμύρωσης 51
4.6 Προβλήματα Υφαλμύρωσης στα Ελληνικά Νησιά 53
4.6.1 Κρήτη 53
4.6.2 Ευρύτερη Περιοχή Αιγαίου 56
4.7 Μοντέλα Προσομοίωσης Παράκτιων Υδροφορέων 62
4.7.1 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg 64
4.7.2 Προσεγγίσεις Muskat και Hubert 68

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ 70

5.1 Γενικά 70
5.2 Κώδικας SEAWAT 72
5.3 Μεθοδολογίες SEAWAT 76
5.3.1 Ρητή Μέθοδος Επίλυσης 76
5.3.2 Πεπλεγμένη Μέθοδος Επίλυσης 79
5.4 Το Μαθηματικό Μοντέλο του Κώδικα SEAWAT 80
5.5 Κώδικας MODFLOW 83
5.5.1 Διακριτοποίηση Υδροφορέα 84
5.5.2 Εξίσωση Ροής με την Μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών 87

6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕΛΕΤΗΣ 92

6.1 Εισαγωγή 92
6.2 Εισαγωγή Χάρτη στο Πρόγραμμα 92
6.3 Δημιουργία Καννάβου (Mesh Grid) 94
6.4 Οροφή και Βάση Μοντέλου (Model Top and Bottom Elevation) 98
6.5 Αρχικές Συνθήκες 100
6.5.1 Οριακές Συνθήκες 100
6.5.2 Καθορισμός Ζωνών Υδραυλικής Αγωγιμότητας (K) 102
6.5.3 Τροφοδοσία (Recharge) 104
6.5.4 Διασπορά (Dispersivity) 105
6.5.5 Πορώδες (Porosity) 105

6.5.6 Αποθηκευτικότητα (Storage) 105
6.6 Επιπρόσθετες Απαιτούμενες Ρυθμίσεις 105
6.6.1 Καθορισμός Φακέλου Αποθήκευσης Αρχείων 105
6.6.2 Ρυθμίσεις MODFLOW και MT3D 106
6.6.3 Καθορισμός Περιόδου 107
6.6.4 Ρυθμίσεις SEAWAT 108
6.7 Αποτελέσματα Προσομοίωσης σε Συνθήκες Ισορροπίας 111

7. ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ 115

7.1 Εισαγωγή 115
7.2 Ισοκατανεμημένες Αντλήσεις 116
7.2.1 Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 40% της Συνολικής Τροφοδοσίας από Βάθος 30m 116
7.2.2 Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 40% της Συνολικής Τροφοδοσίας από Βάθος 10m 122
7.2.3 Πενταπλασιασμός της Τροφοδοσίας και Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 60% της Συνολικής Τροφοδοσίας 126
7.3 Μη Άντληση από Εννιά Πηγάδια και Άντληση από Πηγάδια στο Εσωτερικό του Υδροφορέα του 39,43% της Συνολικής Τροφοδοσίας 130
7.4 Ανισοκατανεμημένες Αντλήσεις Τριών Ζωνών 134
7.4.1 Άντληση από Τρεις Ζώνες του 60% της Μέσης Φυσικής Τροφοδοσίας 135
7.4.2 Άντληση από Τρεις Ζώνες του 40% της Μέσης Φυσικής Τροφοδοσίας 141

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 144

8.1 Ανακεφαλαίωση 144
8.2 Συμπεράσματα 145
8.3 Μέτρα Προστασίας και Ανάκαμψης Υδροφορέα 148

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 153

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Γεωλογικός Χάρτης Ν. Θήρας 13
Σχήμα 3.1: Διαφορικός όγκος αναφοράς 37
Σχήμα 4.1: Ζώνη διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα 46
Σχήμα 4.2: Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα 47
Σχήμα 4.3: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg (α) τομή φρεάτιου υδροφορέα, (β) τομή περιορισμένου υδροφορέα (Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.) 65
Σχήμα 4.4: Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας 67
Σχήμα 4.5: Η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή ... 68
Σχήμα 5.1: Δύο πιεζόμετρα γεμάτα με γλυκό και αλμυρό νερό, τοποθετημένα στο ίδιο σημείο του υδροφορέα 71
Σχήμα 5.2 : Σχηματική απεικόνιση της ακολουθούμενης μεθοδολογίας με το πρόγραμμα SEAWAT σε περίπτωση ρητής επίλυσης 78
Σχήμα 5.3: Διακριτοποιημένος Υδροφορέας 85
Σχήμα 5.4: Διαφορά ανάμεσα σε σχηματισμό με κέντρο το κελί (block-centered formulation) και με κέντρο το σημείο (point-centered formulation) .. 87
Σχήμα 5.5: Κελί i, j, k με τα έξι γειτονικά του 88
Σχήμα 5.6: Ροή από κελί i, j-1, k στο κελί i, j, k 88
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα υδραυλικού φορτίου - χρόνου για το κελί i, j, k 89
Σχήμα 6.1: Ψηφιοποιημένος χάρτης Σαντορίνης, τμήμα του οποίου χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο στο GroundWater Vistas για το σχεδιασμό του μοντέλου 93
Σχήμα 6.2: Εικόνα κεντρικού τμήματος Σαντορίνης που χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο στο GV 94
Σχήμα 6.3: Παράθυρο δημιουργίας καννάβου του μοντέλου 97
Σχήμα 6.4: Παράθυρο καταχώρησης πραγματικών συντεταγμένων και πραγματικών διαστάσεων της εικόνας – υπόβαθρου 97
Σχήμα 6.5: Πίνακας τιμών οροφής μοντέλου του επιπέδου 1 99
Σχήμα 6.6: Πίνακας τιμών βάσης μοντέλου του επιπέδου 1 99
Σχήμα 6.7: Οριακές συνθήκες μοντέλου του επιπέδου 1 100
Σχήμα 6.8: Χάρτης-υπόβαθρο ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας (Ι.Γ.Μ.Ε.)103
Σχήμα 6.9: Παράθυρο καθορισμού ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας 103
Σχήμα 6.10: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας μοντέλου υδροφορέα Σαντορίνης 104
Σχήμα 6.11: Παράθυρο ορισμού φακέλου αποθήκευσης αρχείων 106
Σχήμα 6.12: Παράθυρο ορισμού ιδιοτήτων θαλασσινού νερού 107
Σχήμα 6.13:Παράθυρο εισαγωγής αρχείων για την προβολή των αποτελεσμάτων 111
Σχήμα 6.14:Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα χωρίς αντλήσεις στο επίπεδο 14 113

Σχήμα 6.15(α): Κατανομή συγκεντρώσεων στο επίπεδο 3 χωρίς αντλήσεις 113
Σχήμα 6.16(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 3 χωρίς αντλήσεις 113
Σχήμα 6.17: Τομή αλάτινης σφήνας υδροφορέα στη γραμμή 2 χωρίς αντλήσεις (Row number = 2)..... 114
Σχήμα 6.18: Ισοχλώριες καμπύλες του υδροφορέα στο επίπεδο 3 χωρίς την επίδραση αντλήσεων 114
Σχήμα 6.19: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη γραμμή 35 χωρίς αντλήσεις(Row number = 35)..... 114
Σχήμα 7.1: Παράθυρο εισαγωγής παροχών άντλησης 117
Σχήμα 7.2: Παράθυρο εισαγωγής αρχείων για την προβολή των αποτελεσμάτων..... 118
Σχήμα 7.3: Παράθυρο καθορισμού τρόπου αναπαράστασης αποτελεσμάτων..... 118
Σχήμα 7.4(α): Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 3 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 119
Σχήμα 7.4(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 3 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 119
Σχήμα 7.5: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 119
Σχήμα 7.6: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132) ... 120
Σχήμα 7.7(α): Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d 122
Σχήμα 7.7(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 122
Σχήμα 7.8: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d 123
Σχήμα 7.9: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132)..... 123
Σχήμα 7.10: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132)..... 123
Σχήμα 7.11: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με πενταπλάσια τροφοδοσία και παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d (Column number = 132)..... 126
Σχήμα 7.12: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162m^3..... 127
Σχήμα 7.13: Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d 127
Σχήμα 7.14: Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d 128

Σχήμα 7.15: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με πενταπλάσια τροφοδοσία και παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d (Column number = 132) 128
Σχήμα 7.16(α): Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d 131
Σχήμα 7.16(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d 131
Σχήμα 7.17: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d 132
Σχήμα 7.18: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d 132
Σχήμα 7.19: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d 132
Σχήμα 7.20: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 136
Σχήμα 7.21: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132) 136
Σχήμα 7.22(α): Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 137
Σχήμα 7.22(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 137
Σχήμα 7.23: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132) 137
Σχήμα 7.24: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132) 141
Σχήμα 7.25: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132) 141
Σχήμα 7.26: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 142
Σχήμα 7.27(α): Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 142
Σχήμα 7.27(β): Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 142

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Διακύμανση θερμοκρασίας στη Σαντορίνη κατά τη διάρκεια ενός έτους 15
Πίνακας 2.2: Πληθυσμιακή εξέλιξη της Σαντορίνης 16
Πίνακας 2.3: Στοιχεία τουρισμού των Δήμων της Νήσου (μέσος όρος ετών 1998 - 2003) 17
Πίνακας 2.4: Μόνιμοι Πληθυσμοί των Δήμων και Δ.Δ. της Νήσου Θήρας..... 17
Πίνακας 2.5: Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδων οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα στο Δήμο Θήρας Σαντορίνης 20
Πίνακας 2.6: Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδων οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα στην Κοινότητα Οίας Σαντορίνης 21
Πίνακας 2.7: Καταναλώσεις νερού σε m^3 από το 2006 έως και το 2009 στο Δήμο Θήρας 25
Πίνακας 4.1: Κυριότερες υφάλμυρες πηγές στην Κρήτη 56
Πίνακας 6.1: Υδραυλικό φορτίο παράκτιων πηγαδιών από την 4η έως την 7η επανάληψη στο επίπεδο 3 του υδροφορέα 109
Πίνακας 6.2: Υδραυλικό φορτίο και συγκεντρώσεις άλατος παράκτιων πηγαδιών του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας 111
Πίνακας 6.3: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας 112
Πίνακας 7.1: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 3 του υδροφορέα με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d 120
Πίνακας 7.2: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 3 του υδροφορέα με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 120
Πίνακας 7.3: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 124
Πίνακας 7.4: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d..... 124
Πίνακας 7.5: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d του υδροφορέα 128
Πίνακας 7.6: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d 130
Πίνακας 7.7: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από καθένα από τα 61 πηγάδια 24 m^3/d..... 133

Πίνακας 7.8: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών με παροχή άντλησης από καθένα από τα 61 πηγάδια 24 m^3/d στο επίπεδο 1 του υδροφορέα 133
Πίνακας 7.9: Θεωρήσεις σεναρίων άντλησης από τρεις ζώνες 135
Πίνακας 7.10: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών πηγαδιών της ζώνης 1 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 137
Πίνακας 7.11: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο της ζώνης 2 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 138
Πίνακας 7.12: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο της ζώνης 3 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 140
Πίνακας 7.13: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 50% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας 143

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο παράκτιος υδροφορέας στο κεντρικό τμήμα της νήσου Σαντορίνης Κυκλάδων με έκταση περίπου 33 km^2 αποτελεί μια από τις πηγές για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Οι ανάγκες για νερό στην περιοχή αυξάνονται συνεχώς λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού. Οι αντλήσεις των υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές, πολλές φορές πάνω από τα όρια βιωσιμότητας, με αποτέλεσμα την υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Επίσης, σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας η τροφοδοσία των υδροφορέων δεν επαρκεί για την επαναπλήρωσή τους.

Έτσι, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας γίνεται προσομοίωση του υδροφορέα της Σαντορίνης, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την υπάρχουσα κατάσταση και να προταθούν μέτρα για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των υδάτινων συστημάτων.

Συγκεκριμένα, αφού εξετάστηκε το γεωλογικό και υδρογεωλογικό πλαίσιο της περιοχής, πραγματοποιείται στο λογισμικό GROUNDWATER VISTAS η προσομοίωση της ροής του παράκτιου υδροφορέα και εφαρμόζονται διάφορα σενάρια, με ένα μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, που βασίζεται στην ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού και τη μεταφορά διαλυμένης μάζας σε πορώδες μέσο. Το μοντέλο αυτό είναι το SEAWAT που είναι ένας συνδυασμός του MODFLOW και του MT3DMS και επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφοράς διαλυμένης μάζας. Το SEAWAT βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια συνήθης μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρισορθογώνιο πλέγμα - κελιά.

Τέλος, βάσει των σεναρίων που εφαρμόζονται, δίνονται μερικές προτάσεις για την προστασία και την ανάκαμψη του υδροφορέα από την υφαλμύρωση.

ABSTRACT

The coastal aquifer, located in the central part of Santorini island, has an area roughly 33 km^2 and is one water supply sources for meeting the water demands of the region. Water demands increase continuously because of the improvement of the standard of living and population increase in the summer months due to tourism. Pumping of coastal aquifers is intensive in the summer months and it is often above the limits of sustainability, which results in seawater intrusion in coastal aquifers. Besides, recharge of ground the aquifer in periods of extended drought is not sufficient for its replenishment.

This diploma thesis develops a simulation model for groundwater flow and solute transport in Santorini aquifer. Based on this model, some useful conclusions are obtained for the present situation while proposals are given for future system sustainability.

More specifically, after the geological and hydro-geological framework of the region is presented, simulation of flow in the coastal ground water aquifer is investigated using software GROUNDWATER VISTAS and a variable density model, based on simultaneous solution of equations that describe groundwater flow and solute transport. This model, called SEAWAT, is a combination of MODFLOW and MT3DMS and solves simultaneously groundwater flow and solute transport. SEAWAT is based on the numerical solution of differential equations using finite differences. Finite differences are a common method for solving differential equations, based on a rectangular grid discretization.

Finally, based on the scenarios investigated, various proposals are presented for protection and restoration of the ground water aquifer from seawater intrusion.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

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

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των υπόγειων υδροφορέων αποτελείται από ένα σύνολο διαφορικών και αριθμητικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού καθώς και την μεταφορά διαλυμένης μάζας και που βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας και το νόμο του Darcy.

Με τη βοήθεια των αναλυτικών μοντέλων ή των αριθμητικών μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Για την ροή στους υπόγειους υδροφορείς χρησιμοποιούνται 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 μιας 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)

Για την διερεύνηση του παραπάνω προβλήματος εφαρμόστηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης υπόγειων νερών και ειδικότερα ένα μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, το SEAWAT, όπου μεταξύ του θαλασσινού και του γλυκού νερού υπάρχει μια ζώνη στην οποία η μεταβολή της πυκνότητας του νερού γίνεται σταδιακά.

1.2 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένας υπόγειος παράκτιος υδροφορέας που βρίσκεται στο κεντρικό μέρος της νήσου Σαντορίνης και καταλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή Μεσαριάς - Αεροδρομίου. Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι σύνθετη, διότι πρέπει απαραιτήτως κατά την εφαρμογή του μοντέλου να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη της θάλασσας, η οποία αποτελεί ταμιευτήρα αλμυρού νερού, που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος απ' ό, τι το γλυκό νερό του υδροφορέα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση του υπό μελέτη φρεάτιου παράκτιου υδροφορέα που έχει έκταση περίπου 33 km^2, καθώς και η μελέτη σεναρίων άντλησης 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 προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υδροφορέα υπό άντληση και την κίνηση του μετώπου θαλασσινού νερού.

Εξετάζονται διάφορα σενάρια άντλησης, από βάθος 10 και 30 m, καθώς και θεωρώντας πενταπλάσια τροφοδοσία. Η εξέταση των προβλημάτων αυτών έγκειται στον υπολογισμό της παροχής άντλησης νερού αποφεύγοντας την υφαλμύρωση 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. Κατόπιν μελέτης των σεναρίων αυτών, διατυπώνονται συμπεράσματα σχετικά με τις βέλτιστες ποσότητες άντλησης χωρίς να παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Για τη διεξοδική ανάλυση του θέματος της Διπλωματικής Εργασίας, η εργασία διαρθρώθηκε σε οκτώ κεφάλαια.

Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια γενική παρουσίαση του θέματος και των στόχων της Διπλωματικής Εργασίας και παρουσιάζεται η δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο που ακολουθεί, γίνεται περιγραφή της νήσου Σαντορίνης (ή Θήρας) όσον αφορά την ιστορία, την μορφολογία, τους υδροφόρους σχηματισμούς, το κλίμα, τον πληθυσμό και την διαχείριση των νερών της με μεθόδους αφαλάτωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, 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 πότε ένα μέσο είναι ισοτροπικό ή ανισότροπο και πότε 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 τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται εκτενώς το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στους παράκτιους υδροφορείς, που συνήθως εμφανίζεται λόγω των υπεραντλήσεων. Αναλύονται τα αίτια, οι επιπτώσεις και τα προβλήματα που δημιουργεί η υφαλμύρωση στα ελληνικά νησιά. Εν συνεχεία, αναφέρεται η προσέγγιση των Ghyben και Herzberg και παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις Muskat και Hubert.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται η έννοια της προσομοίωσης και περιγράφεται ο κώδικας στον οποίο βασίστηκε η προσομοίωση του υπό εξέταση υδροφορέα, το SEAWAT. Περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο του SEAWAT, καθώς και το αριθμητικό μοντέλο MODFLOW και συγκεκριμένα η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζεται από το MODFLOW για σύνθετους υδροφορείς.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βήματα δημιουργίας του μοντέλου προσομοίωσης, δηλαδή ο τρόπος εισαγωγής του χάρτη στο πρόγραμμα, η δημιουργία καννάβου, οι αρχικές συνθήκες, οι απαιτούμενες ρυθμίσεις στο MODFLOW, το MT3D και το SEAWAT, καθώς επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδροφορέα για περίοδο 240.000 ημερών χωρίς την επίδραση αντλήσεων.

Στο έβδομο κεφάλαιο, εφαρμόζονται διάφορα σενάρια άντλησης στον υδροφορέα μελέτης της Θήρας με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς του υδροφορέα σε διάφορες συνθήκες. Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ισοκατανεμημένων παροχών άντλησης στον υδροφορέα, δηλαδή γίνεται άντληση από όλα τα πηγάδια ίδιων παροχών, διαφορετικού μεγέθους κάθε φορά, έτσι ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά του υδροφορέα σε κάθε μεταβολή ισοκατανεμημένης άντλησης και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Επίσης, γίνεται η υπόθεση ανισοκατανεμημένων παροχών άντλησης στον υδροφορέα θεωρώντας δύο και τρεις ζώνες. Συγκεκριμένα, προς αποφυγή του φαινομένου της υφαλμύρωσης, θεωρείται μηδενική άντληση στα παράκτια πηγάδια, που εμφανίζουν είτε το μεγαλύτερο βαθμό υφαλμύρωσης είτε απόσταση από την ακτή μικρότερη του 1 km, και άντληση

μόνο από τα πηγάδια του εσωτερικού του υδροφορέα. Τέλος, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα κάποιων χαρακτηριστικών σεναρίων.

Στο όγδοο 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 Σαντορίνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗΣ

2.1. Ιστορία

Η Σαντορίνη ή Θήρα, μαζί με την Ανάφη, είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων. Απέχει 134 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά και 68 από το λιμάνι του Ηρακλείου Κρήτης. Η θέση της ως σταθμού στις θαλάσσιες επικοινωνίες ανάμεσα στην Κρήτη και την ηπειρωτική Ελλάδα και τα υπόλοιπα κυκλαδίτικα νησιά αλλά και η ηφαιστειακή της προέλευση του εδάφους της από την άλλη καθορίζουν την εξέλιξη του νησιού από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα. Το νησί ονομαζόταν Στρογγυλή λόγω του σχήματος του, αλλά μετά την τεράστια έκρηξη του ηφαιστείου, τον 17ο αιώνα π.Χ., το κεντρικό της τμήμα καταβυθίστηκε, δημιουργώντας την εντυπωσιακή καλντέρα.

2.1.1 Αρχαιότητα

Ο οικισμός του Ακρωτηρίου, ο οποίος ακμάζει κατά το πρώτο μισό της 2ης χιλιετίας π.Χ. αποτελεί την κυριότερη και πιο πλούσια πηγή πληροφοριών για τον πολιτισμό της προϊστορικής Θήρας. Η θέση κατοικείται από την Ύστερη Νεολιθική (5η χιλιετία π.Χ.) και την Πρώιμη εποχή του Χαλκού (3η χιλιετία π.Χ.). Κατά την Μεσοκυκλαδική περίοδο, αναπτύσσοντας στενές σχέσεις με την μινωική Κρήτη και την Ηπειρωτική Ελλάδα, ο οικισμός μετατρέπεται σε πολιτιστικό, οικονομικό, εμπορικό και καλλιτεχνικό κέντρο του Αιγαίου που φτάνει στο απόγειό του κατά την Υστεροκυκλαδική Ι περίοδο. Η τρομακτική έκρηξη του ηφαιστείου (περίπου 1650 π.Χ.) κατέστρεψε ολοσχερώς τον οικισμό, διατηρώντας κάτω από το παχύ στρώμα τέφρας τα κατάλοιπα του σημαντικού αυτού πολιτιστικού κέντρου. Μετά την εγκατάληψη 2-3 αιώνων, το νησί κατοικείται και πάλι κατά τη Μυκηναϊκή περίοδο (ύψωμα Μονόλιθος).

Φοίνικες εγκαθίστανται στο νησί το 13ο αιώνα π.Χ. και το ονομάζουν Καλλίστη, ενώ από τα τέλη του 12ου αιώνα π.Χ. το αποικίζουν Λακεδαιμόνιοι, με επικεφαλής τον Θήρα, από τον οποίο προέρχεται και το όνομα του νησιού.

2.1.2 Ιστορικά Χρόνια

Το κέντρο του νησιού στα ιστορικά χρόνια βρίσκεται στην ανατολική ακτή, στον βράχο του Μέσα Βουνού, όπου αναπτύχθηκε η πόλη της αρχαίας Θήρας με συνεχή κατοίκηση από τα Γεωμετρικά ως και τα Ύστερα Ρωμαϊκά χρόνια (9ος – 3ος αιώνας π.Χ.). Η Θήρα τον 6ο αιώνα π.Χ. κόβει δικό της νόμισμα και συνδέει την τύχη της με την πορεία της μητρόπολής της, της Σπάρτης, κατά τον Πελοποννησσιακό πόλεμο. Στα Ελληνιστικά χρόνια το νησί αναπτύσσεται και χρησιμοποιείται ως ναυτική και στρατιωτική βάση των Πτολεμαίων, ενώ κατά την Ρωμαϊκή περίοδο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δραστηριότητα.

2.1.3 Βυζαντινά Χρόνια

Οι μόνες σημαντικές πληροφορίες για την Πρώιμη Βυζαντινή περίοδο είναι ότι από τον 4ο αιώνα μ.Χ. όπου το νησί ασπάστηκε τον χριστιανισμό και συγκρότησε την επισκοπή Θήρας. Μετά τον 9ο αιώνα μ.Χ. η Θήρα εντάσσεται στο θέμα του Αιγαίου. Ο Αλέξιος Α΄ ο Κομνηνός (1081- 1118) ίδρυσε το ναό της Παναγίας Επισκοπής στη Γωνιά, στο κέντρο του νησιού.

Μετά την Άλωση της Κωνσταντινούπολης από τους Φράγκους (1204), η Θήρα γίνεται έδρα της μίας από τις τέσσερις λατινικές επισκοπές του δουκάτου του Αιγαίου και παραχωρείται μαζί με τη Θηρασία στο βαρώνο Ιάκωβο Βαρότση ως το 1335, οπότε τίθεται κάτω από την ηγεμονία του Νικολάου Σανούδου, δούκα της Νάξου, της πρωτεύουσας του λατινικού κρατιδίου. Οι Λατίνοι έδωσαν στο νησί το όνομα Σαντορίνη από την εκκλησία της Αγίας Ειρήνης (Santa Irene), την οποία πρωτοαντίκρισαν όταν το προσέγγιζαν. Τα επόμενα χρόνια και ως το 1487 το νησί αλλάζει κυρίους ανάμεσα στις φράγκικες οικογένειες των Σανούδων, των Κρίσπι και των Πιζάνι. Το 1487 προσαρτάται μαζί με το δουκάτο του Αιγαίου στη Βενετία. Σε όλη τη διάρκεια της κυριαρχίας των Φράγκων οι πειρατικές επιδρομές σφράγισαν αποφασιστικά την οικονομική, δημογραφική και κοινωνική ζωή του νησιού. Επιπλέον, κατά την περίοδο αυτή μέρος των κατοίκων ασπάστηκε το καθολικό δόγμα.

2.1.4 Οθωμανική Κυριαρχία

Το 1537 η Σαντορίνη λεηλατήθηκε από τον Χαϊρεντίν Μπαρμπαρόσα και το 1566 πέρασε οριστικά στα χέρια των Οθωμανών. Οι τελευταίοι παραχώρησαν προνόμια στους κατοίκους της, με συνέπεια την άνοδο του εμπορίου, της ναυτιλίας και τη μετατροπή του νησιού σε ισχυρό κέντρο με δυναμικό στόλο και σχέσεις με τα μεγάλα λιμάνια της εποχής (Αλεξάνδρεια, Κωνσταντινούπολη). Το εμπόριο και η ναυτιλία αποτέλεσαν τους βασικούς τομείς ανάπτυξης και μετά την ίδρυση του νεοελληνικού κράτους, στο οποίο εντάχθηκε το 1830, αναδεικνύοντας την οικονομική ανεξαρτησία του νησιού και των κατοίκων του.

2.1.5 Νεότερα Χρόνια

Μετά την ίδρυση του Ελληνικού Κράτους ξεκινά σταδιακά ο μετασχηματισμός της ελληνικής κοινωνίας ενώ η εκβιομηχάνιση βραδυπορεί. Η χώρα εξειδικεύεται σταδιακά στην εξαγωγή αγροτικών προϊόντων και μέσα σε αυτό το πλαίσιο, ελληνικό και ευρωπαϊκό, και η ναυτιλία αποτέλεσε μοχλό για τον εκσυγχρονισμό του αγροτικού τομέα κι ευρύτερα της οικονομίας. Την εποχή της δημιουργίας εθνικών κρατών στη Μεσόγειο, τμήμα της Οθωμανικής Αυτοκρατορίας αφυπνίζεται και διεκδικεί οντότητα.

Καθώς η αυτοκρατορία αποδιαρθρώνεται προκύπτουν ανακατατάξεις στο χώρο. Το νεοσυσταθέν Ελληνικό κράτος επιχειρεί να οργανώσει το δικό του χώρο κι αυτό περνάει μέσα από τη σχέση πρωτεύουσας και λοιπής χώρας. Για πολλές δεκαετίες οι περιοχές εκτός πρωτεύουσας παραμένουν σε ένα καθεστώς που συνεχίζει την δομή της τοπικής αυτοδιοίκησης, τουλάχιστον άτυπα. Η διασύνδεση των κατοικημένων σημείων, άτακτη και αποσπασματική, δεν είχε οργανωμένο και σταθερό αποτύπωμα στο χώρο. Η κατάσταση αυτή όμως ήταν ένας ακόμη παράγοντας που ευνόησε την ανάγκη για αυτάρκεια τόσο στην ηπειρωτική όσο και στη νησιωτική Ελλάδα.

Η βελτίωση και ανάπτυξη των λιμανιών γίνεται στήριγμα του θαλάσσιου δικτύου. Η οργάνωση της λιμενικής υποδομής σε εθνικό επίπεδο εκφράζει μια

τάση ανάπτυξης εμπορική, οικονομική σε τοπικό και ευρύτερο κρατικό επίπεδο. Είναι βεβαίως μεγάλη η διαφοροποίηση μεταξύ των λιμανιών και των νησιών, σε αυτό έχει καθοριστική επίδραση το φυσικό περιβάλλον.

Μετά το ρωσοτουρκικό πόλεμο του 1768 – 1774, διευρύνεται το πεδίο δράσης των ελληνικών πλοίων. Το άνοιγμα της Μαύρης Θάλασσας επιτρέπει στους νησιώτες να επεκτείνουν το εμπόριό τους στη μεταφορά των ρωσικών δημητριακών. Η ιστιοφόρος ναυτιλία αντέχει γερά ως τη δεκαετία του 1880, παρά τις δυσκολίες και τις επιζήμιες επιπτώσεις του Κριμαϊκού πολέμου (1854-1855). Από κει και πέρα τα ιστιοφόρα υποχωρούν μπροστά στα ατμόπλοια, που κερδίζουν γρήγορα έδαφος από το 1875.

Το σημαντικότερο αγροτικό προϊόν που εισήγαγε η Ελλάδα είναι τα δημητριακά, ειδικότερα το σιτάρι. Οι εισαγωγές δημητριακών παρουσιάζουν άνοδο μέχρι το 1887 και παραμένουν σταθερές μέχρι το 1904. Η σιτοπαραγωγής Θεσσαλία προσαρτήθηκε στο Ελληνικό κράτος από το 1881 αλλά παρ' όλα αυτά δεν μειώθηκαν οι εισαγωγές σιτηρών από το εξωτερικό.

Ο νησιωτικός πληθυσμός των Κυκλάδων το 19ο αιώνα, στο μεγαλύτερο βαθμό, βρίσκεται ακινητοποιημένος και περιχαρακωμένος σε μικρές νησίδες γης με σημαντική ανεπάρκεια εγχώριων πόρων. Οι επαφές με το «εξωτερικό» όμως, η εμπορική δραστηριότητα που αναπτύσσουν εξασφαλίζουν ζωτικές προμήθειες και σε κάποιες περιπτώσεις αποτελούν πηγή πλουτισμού για τους τόπους αυτούς. Οι Κυκλάδες ανταλλάσσουν το κρασί τους και τα κουκούλια μεταξιού ή μετάξι ή προϊόντα του υπεδάφους τους με ζάχαρη και καφέ, κατεργασμένα προϊόντα, κυρίως υφάσματα, δέρματα και ξυλεία.

Το 1852 η Σαντορίνη (με έκταση 75χλμ² και πληθυσμό 7.222 κατοίκους) καταφέρνει να παρουσιάσει μια εμπορική κίνηση που υπερβαίνει κατά πολύ, σε όγκο, την αντίστοιχη των άλλων Κυκλάδων με εξαίρεση τη Σύρο. Η ναυτική περιφέρεια της Σαντορίνης περιλαμβάνει τα νησιά Αμοργός, Ίος, Ανάφη. Εμπορεύεται απ' ευθείας με τη Ρωσία όπου διοχετεύεται το σύνολο του παραγόμενου κρασιού. Από εκεί τα μεγάλα σαντορινιά πλοία μεταφέρουν δημητριακά και αφού ξεφορτώσουν μέρος αυτών στο νησί, συνεχίζουν για τη

Γαλλία, την Ιταλία και την Αγγλία. Επίσης η Σαντορίνη εξάγει θηραϊκή γη (5%) στην Αυστρία και σε ελληνικά λιμάνια. Τα προϊόντα που φέρνουν προς τη Σαντορίνη τα πλοία είναι κυρίως υφάσματα (βαμβακερά και μεταξωτά), είδη κιγκαλερίας, αρώματα, αποικιακά είδη. Για τη διεξαγωγή εμπορίου με δικά τους καράβια, οι έμποροι και πλοιοκτήτες της Σαντορίνης διαθέτουν πλοία μεγάλης χωρητικότητας. Ο στόλος της ναυτικής αποτελείται από 200 πλοία συνολικής χωρητικότητας 14.755 τόνων, ενώ τα 31 υπερβαίνουν τους 200 τόνους.

Στον τομέα της ναυτιλιακής και εμπορικής δραστηριότητας η Σαντορίνη διαθέτει το 40% του συνολικού αριθμού των πλοίων των Κυκλάδων. Η Άνδρος, όπως και η Σαντορίνη, έχει έναν στόλο που επίσης περιλαμβάνει μεγάλης χωρητικότητας πλοία και εμπορεύεται απ' ευθείας με λιμάνια του εξωτερικού χωρίς να περνούν τα πλοία της απαραίτητα από τη Σύρο ή τον Πειραιά αργότερα.

Η Μεσόγειος γενικότερα διέθετε μεγάλα ιστιοφόρα χωρητικότητας 600 έως 1.000 ακόμα και 1.300 τόνους ήδη πριν το 16ο αιώνα. Από το 1870 όμως και εξής η επέκταση της χρήσης του ατμού, συνέπεια της ταχείας ευρωπαϊκής οικονομικής ανάπτυξης, επέφερε σημαντικές αλλαγές. Οι αλλαγές εντατικοποιούνται και σταδιακά θέτουν εκτός μάχης τα ελληνικά ιστιοφόρα. Στο μεταξύ έχει δρομολογηθεί η τακτική ατμοπλοϊκή επικοινωνία μεταξύ Σύρου και Πειραιά. Με νόμο της 22ας Απριλίου 1855 «Περί συστάσεως συγκοινωνίας μεταξύ των νήσων και των παραλίων μερών της Ελλάδος», η Κυβέρνηση προσπαθεί να εισαγάγει στις θαλάσσιες συγκοινωνίες και μεταφορές που συνδέουν τα ελληνικά παράλια τη χρήση του ατμού. Διαμορφώνεται ένα δίκτυο άγονων και μη αποδοτικών γραμμών.

Η οικονομική ζωή της Σαντορίνης πριν από το 1960, όταν άρχισε σταδιακά η κίνηση ξένων επισκεπτών στο νησί για τουριστικούς λόγους, βασιζόταν στις καλλιέργειες και στο εμπόριο. Η σπουδαιότητα του εμπορίου κάθε νησιού δεν είναι συνάρτηση του μεγέθους του αλλά των ιδιομορφιών της νησιωτικής οικονομίας και, ειδικότερα, της σημασίας που αποκτά στις εξωτερικές αγορές το κυριότερο εξαγωγικό του προϊόν, όπως εν προκειμένω στη Σαντορίνη

συμβαίνει με το κρασί (85%). Σε αρκετά υψηλό ποσοστό βρίσκεται η εξαγωγή του κρασιού και στην Πάρο, στην οποία επίσης αποτελεί το κύριο προϊόν εξαγωγής (60%). Οι μελέτες για την ελληνική ναυτιλία του 19ου αιώνα εστιάζουν περισσότερο στο ρόλο των ελληνικών πλοίων στην επανάσταση του 1821 και λιγότερο στις εμπορικές δραστηριότητες .

Ως τα μέσα του 19ου αιώνα ο κυκλαδίτικος πληθυσμός αποτελεί εν μέρει το υπόβαθρο της εμπορικής ανάπτυξης της Σύρου. Η άνοδος της Ερμούπολης θεωρήθηκε ότι οδήγησε στη μετανάστευση νησιωτών προς τη Σύρο και έτσι σταδιακά ο νησιωτικός χώρος έχασε την ενότητά του και την αλλοτινή του ιδιαιτερότητα. Η εξέλιξη αυτή όμως έφερε στο φως και αρκετές περιφερειακές ανισότητες, που είχε δημιουργήσει, κατά τα προηγούμενα χρόνια, η απομόνωση.

Το 1941 η Σαντορίνη αρχικά εντάχθηκε στην ιταλική διοίκηση, στα πλαίσια της κατοχής των ελληνικών εδαφών από τις Δυνάμεις του Άξονα. Μετά την συνθηκολόγηση της Ιταλίας το 1943 το νησί γνώρισε τη γερμανική κατοχή ως την απελευθέρωσή του. Σημαντικό γεγονός της νεότερης ιστορίας είναι η έκρηξη του ηφαιστείου το 1956, η εγκατάλειψη του νησιού από μεγάλο μέρος του πληθυσμού, υπογραμμίζοντας το διαχρονικό ρόλο των φυσικών δυνάμεων στη Σαντορίνη.

2.2 Μορφολογία - Γεωγραφία

Η Σαντορίνη είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων. Το έδαφος του νησιού είναι ηφαιστειογενές και από την πλευρά του ηφαιστείου το νησί είναι βραχώδες. Το νησί καταλαμβάνει έκταση 79,194 τ.χλμ. και το μήκος της ακτογραμμής ανέρχεται σε 67 χιλιόμετρα.

Το σημερινό έδαφος είναι αρκετά πεδινό και άνυδρο με ψηλότερη κορυφή τον Προφήτη Ηλία (567m). Οι ακτές, ιδιαίτερα στην ανατολική πλευρά, είναι εξαιρετικά ομαλές, χωρίς έντονο διαμελισμό, σχηματίζοντας όμορφες παραλίες. Το τοπίο της Θήρας, μαζί με τους αρχαιολογικούς χώρους και την

προσαρμοσμένη στη μορφολογία του εδάφους αρχιτεκτονική των οικισμών της, αποτελεί μοναδικό γεωλογικό και περιβαλλοντικό φαινόμενο, στο οποίο στηρίζεται μεγάλο μέρος της σημερινής τουριστικής αξιοποίησης του νησιού, μετατρέποντάς το σε έναν από τους πιο δημοφιλείς προορισμούς σε παγκόσμια κλίμακα.

Το νησί αποτελείται κυρίως από τέφρα και από προηφαιστειακό υπόβαθρο (σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι του Άνω Μεσοζωικού).

Ακολουθούν οι λάβες οι οποίες κατατάσσονται στις λάβες:

• Της Νέας Καμένης (1570 – 1950)
• Της Παλαιάς Καμένης (46 – 726 μ.Χ.)
• Της Σκάρου (67 – 54 ka)
• Του Ακρωτηρίου (645 – 586 ka)
• Περιστερίου και ΝΔ κέντρων Θήρας (528 – 344 ka)
• Του Σημαντηρίου (172 ka)

Τέλος στην περιοχή της Οίας παρουσιάζονται ανδεσίτες (40 -30 ka) και στην Βόρεια Θήρα και στο Κολούμπο κώνοι τόφφων και δακτύλιοι τόφφων αντίστοιχα και σύμπλεγμα τόφφων στην περιοχή Σκάρου – Θηρασιάς (30 – 20 ka).

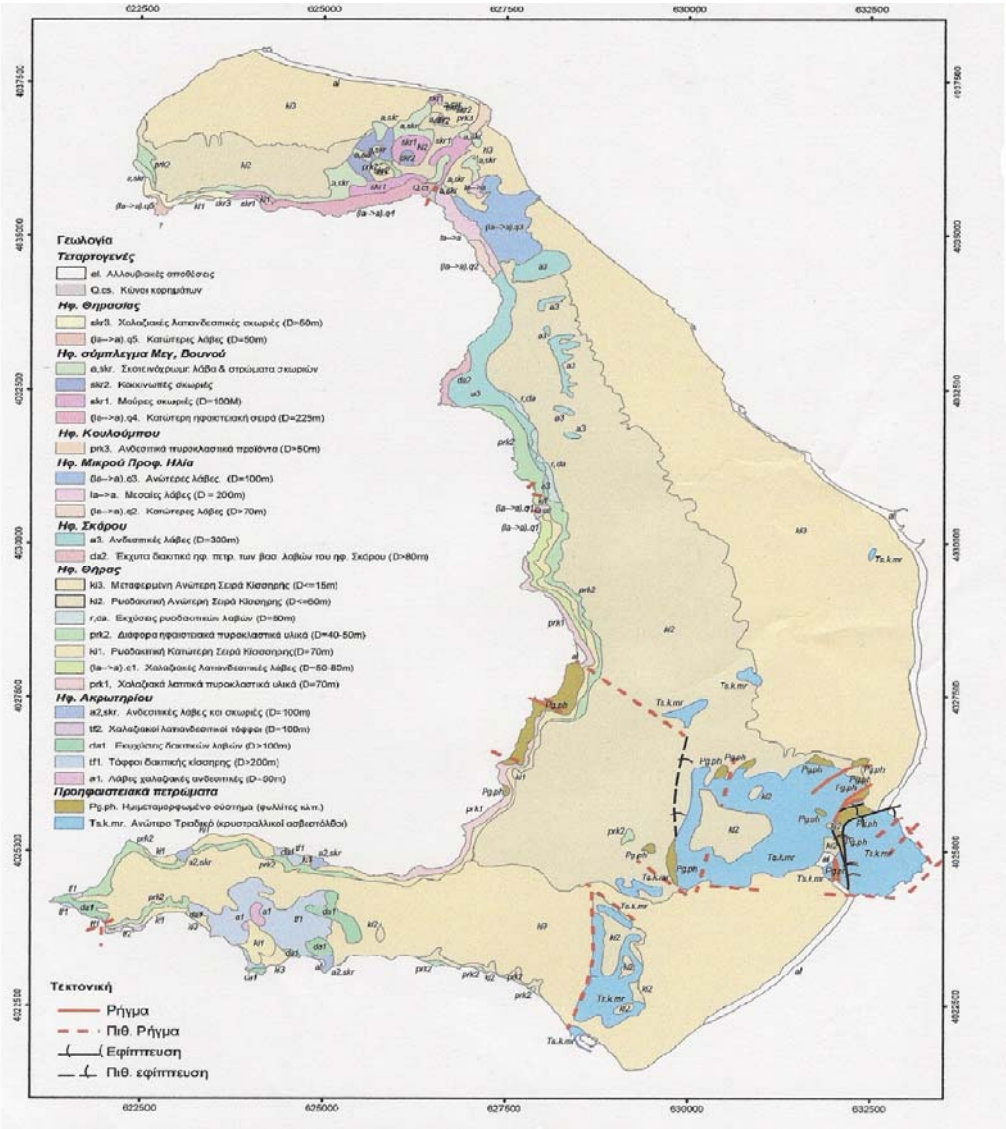
2.3 Υδρολιθολογία

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 2.1) 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 2.1: Γεωλογικός Χάρτης Ν. Θήρας (Pichler et. al., 1980)

2.4 Υδροφόροι Σχηματισμοί

Οι διάφοροι λιθολογικοί σχηματισμοί που παρουσιάζονται στο γεωλογικό χάρτη ταξινομούνται σε διαφορετικές υδρολιθολογικές ενότητες, οι οποίες είναι οι κρυσταλλικοι ασβεστόπλιθοι, τα ηφαιστειακά πετρώματα, οι φυλλιτικοί σχηματισμοί και οι αλλουβιακές αποθέσεις. Οι φυλλιτικοί 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.

Η περιοχή προσομοίωσης περιορίζεται στον υδροφόρο σχηματισμό της ευρύτερης περιοχής Μεσσαριάς – αεροδρομίου. Στην περιοχή αυτή με βάση τα μέχρι τώρα διαθέσιμα στοιχεία εκτιμάται ότι αναπτύσσεται ο σημαντικότερος υδροφόρος σχηματισμός που φιλοξενείται μέσα σε ηφαιστειογενή πετρώματα και εν μέρει, ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα σε κρυσταλλικούς ασβεστολίθους. Η περιοχή προσομοίωσης καλύπτει μια έκταση περίπου 7.000x9.000 m^2 και διακριτοποιείται σε κάναβο πεπερασμένων διαφορών ομοιόμορφου μεγέθους κελιών διαστάσεων 50x50 m^2.

2.5 Κλίμα

Το κλίμα του νησιού είναι δροσερό λόγω των βορειοανατολικών ανέμων και ο χειμώνας είναι γλυκός και ήπιος με μέση θερμοκρασία 10^oC. Οι βροχές είναι συχνές το χειμώνα και σχεδόν ανύπαρκτες το καλοκαίρι. Το έδαφος είναι εύφορο και ευνοεί την καλλιέργεια των αμπελιών και της ντομάτας. Το νησί είναι σχεδόν άνυδρο με ελάχιστα πηγαία νερά.

Τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο και Μάιο ο καιρός χαρακτηρίζεται από ζεστές μέρες με σύνηθες απρόβλεπτες αλλαγές της θερμοκρασίας. Οι μήνες Ιούνιος

και Σεπτέμβριος, χαρακτηρίζονται κυρίως από ηλιόλουστες μέρες με μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες.

Οι καλοκαιρινές μήνες Ιούλιος και Αύγουστος είναι οι θερμότεροι μήνες του έτους με ξηρό κλίμα και συχνά ψυχρό αέρα τα βράδια. Σε αυτούς τους μήνες παρουσιάζονται και τα γνωστά μελτέμια του Αιγαίου Πελάγους, τα οποία ξεκινούν απότομα και μπορεί να διαρκέσουν πολλές μέρες. Τέλος, οι μήνες Οκτώβριος και Φεβρουάριος χαρακτηρίζονται από χαμηλές θερμοκρασίες με λογικές ποσότητες βροχόπτωσης.

Πίνακας 2.1: Διακύμανση θερμοκρασίας στη Σαντορίνη κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Μήνες	**Διακύμανση Θερμοκρασίας (˚C)**
Δεκέμβριος-Ιανουάριος-Φεβρουάριος-Μάρτιος	8-15
Νοέμβριος-Απρίλιος-Μάιος	16-22
Ιούνιος-Ιούλιος-Αύγουστος	23-30

Πηγή: Ε.Μ.Υ.

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

- Υπάρχει πολύ δροσιά κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι τις πρωινές κυρίως ώρες
- Υπάρχει ομίχλη το βράδυ
- Το έδαφος είναι λευκού χρώματος και ως εκ τούτου έχει αφενός αυξημένη ακτινοβολία και αφετέρου περιορισμένη απορρόφηση ηλιακής θερμότητας
- Υπάρχει υψηλή μέση σχετική υγρασία
- Η ένταση των ανέμων – σε σύγκριση με τα άλλα Κυκλαδονήσια – είναι

μεγαλύτερη

- Η μέση ετήσια θερμοκρασία του νησιού είναι μικρότερη των υπολοίπων νησιών των Κυκλάδων.
- Οι βροχοπτώσεις είναι περιορισμένες

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

2.6 Πληθυσμιακά Στοιχεία

Την δεκαετία 1961-1971 στο νησί παρουσιάστηκε σημαντική πληθυσμιακή μείωση. Εκείνη την εποχή επικρατούσαν αντίξοες κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες, επίσης είχε προηγηθεί και ο μεγάλος σεισμός το 1956 που προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε οικισμούς και θανάτους ανθρώπων με αποτέλεσμα να παρουσιαστεί μετανάστευση πληθυσμού (Δανέζης, 1971, Ρούσσος, 1972). Από το 1971 όμως κι έπειτα ο πληθυσμός του νησιού συνεχώς αυξάνεται, μάλιστα την τελευταία δεκαετία (1991-2001) παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αύξηση (41,8%, περίπου 3.669 άτομα). Ο πληθυσμός της Σαντορίνης παρουσίασε άνοδο κατά την τελευταία δεκαετία με βάση τα στοιχεία της Ε.Σ.Υ.Ε. της τάξης του 29%.

Πίνακας 2.2: Πληθυσμιακή εξέλιξη της Σαντορίνης.

Απογραφή	Σαντορίνη	Μεταβολή (%)
1961	7.751	
1971	6.196	- 20 %
1981	7.083	+ 14,3 %
1991	8.771	+ 23,8 %
2001	12.440	+ 41,8 %

Πηγή: Ε.Σ.Υ.Ε.

Πίνακας 2.3: Στοιχεία τουρισμού των Δήμων της Νήσου (μέσος όρος ετών 1998-2003).

ΔΗΜΟΣ ΘΗΡΑΣ								
	Απρίλιος	**Μάϊος**	**Ιούνιος**	**Ιούλιος**	**Αύγουστος**	**Σεπτέμβριος**	**Οκτώβριος**	**Σύνολο**
Αριθμός Κλινών	1.187	1.207	1.134	1.314	1.224	0	7.344	13.411
Διανυκτε -ρεύσεις	4.850	31.951	68.712	231.838	496.624	88.475	1.936	894.462
ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΙΑΣ								
1999	**Απρίλιος**	**Μάϊος**	**Ιούνιος**	**Ιούλιος**	**Αύγουστος**	**Σεπτέμβριος**	**Οκτώβριος**	**Σύνολο**
Αριθμός Κλινών	0	42	42	67	88	50	0	322
Διανυκτε -ρεύσεις	173	1.196	1.928	6.693	12.860	4.592	173	173

Πηγή: Ε.Σ.Υ.Ε.

Πίνακας 2.4: Μόνιμοι Πληθυσμοί των Δήμων και Δ.Δ. της Νήσου Θήρας.

Δ. Θήρας	**Πληθυσμός 2009**
Θήρας	2.649
Ακρωτηρίου	520
Βόθωνος	776
Βουρβούλου	549
Εμπορείου	2.851
Έξω Γωνιάς	434
Επισκοπής Γωνιάς	1.654
Ημεροβιγλίου	582
Καρτεράδου	1.281
Πύργου Καλλίστης	846
Μεσαριάς	1.711
Μεγαλοχωρίου	532
ΣΥΝΟΛΟ	**14.386**

Πηγή: Ε.Σ.Υ.Ε.

Ο μόνιμος πληθυσμός καθώς και τα στοιχεία που απεικονίζουν την τουριστική κίνηση δίδονται στους πίνακες 2.3 και 2.4.

Ο αριθμός των κλινών του πίνακα 2.3 αναφέρεται σε ξενοδοχειακές μονάδες και επιπλωμένα δωμάτια. Στο δήμο Θήρας υπάρχουν και 11.000 κλίνες μη κύριων τουριστικών καταλυμάτων και στην κοινότητα Οίας 905 (αρχείο δευτερευόντων καταλυμάτων ΕΣΥΕ) που «ανήχθησαν» σε διανυκτερεύσεις

και προσαυξήθηκαν κατά 80%, ώστε να προσεγγισθούν οι διανυκτερεύσεις που δεν καταγράφονται από τον ΕΟΤ και την ΕΣΥΕ (Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, 2006).

Ο τουρισμός της Σαντορίνης δεν προβλέπεται να παρουσιάσει κάμψη, αλλά αναμένεται συνεχής αύξηση του μόνιμου και του συνολικού πληθυσμού (ΝΑΜΑ κ.α., 1998). Συγκεκριμένα, το 1996 ο μόνιμος πληθυσμός της Θήρας ήταν 10.680 άτομα, ο εποχιακός πληθυσμός 47.220 και ο συνολικός (μόνιμος & εποχιακός) 57.900 άτομα. Το 1998, ο μόνιμος πληθυσμός της Θήρας ήταν 11.200 άτομα, ο εποχιακός πληθυσμός 49.806 και ο συνολικός 61.006 άτομα. Δηλαδή την περίοδο 15 έως 25 Αυγούστου, όπου και παρατηρείται ο πληθυσμός αιχμής, η Σαντορίνη φιλοξενεί περίπου 4,5 φορές τον πληθυσμό της σε τουρίστες (Δρόσου, 2004).

2.7 Γενικά Οικονομικά Στοιχεία

Η ανάπτυξη της βιομηχανίας τοματοπολτού σε συνδυασμό με την ανοδική τάση του τουρισμού στη Σαντορίνη, από τη δεκαετία του 1970 και έπειτα, προκάλεσε τη μείωση της μετανάστευσης και τη συγκράτηση του πληθυσμού στο νησί. Σταδιακά οι γεωργικές δραστηριότητες μειώθηκαν, χαρακτηριστικό είναι ότι από τα 8 εργοστάσια τοματοπολτού που λειτουργούσαν στο νησί, σήμερα το μοναδικό εργοστάσιο που λειτουργεί κινδυνεύει να κλείσει (Δρόσου, 2004). Αυτό όμως δεν είχε αρνητική επίπτωση στον πληθυσμό αφού ένα μεγάλο τμήμα του, στράφηκε στον τουρισμό ο οποίος ήταν πιο επικερδής. Οι τομείς των κατασκευών και των ξενοδοχείων απασχολούν το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων, για αυτό ιδιαίτερα μεγάλες αυξήσεις του μόνιμου πληθυσμού τους εμφανίζουν οι τουριστικά ανεπτυγμένοι και αναπτυσσόμενοι οικισμοί, όπως Περίσσα, Καμάρι, Μεσαριά (Δρόσου, 2005).

Γενικά, η οικονομία του νησιού στηρίζεται στους παρακάτω τομείς:

- Γεωργία - Αλιεία
- Μεταποίηση
- Υπηρεσίες
- Υποδομή – Κατασκευές

Όλοι οι παραπάνω τομείς, όμως, λειτουργούν για να εξυπηρετήσουν τον βασικό οικονομικό τομέα του νησιού, τον τουρισμό.
Με βάση στοιχεία του 2004, η άμεση απασχόληση σε σχετικές με τον τουρισμό δραστηριότητες υπολογιζόταν σε 1.400 άτομα κατά τη θερινή περίοδο, συν 1.800 άτομα που απασχολούνται σε παρεμφερείς δραστηριότητες, με σύνολο 3.200 επί συνολικής απασχόλησης 5.200 ατόμων, το οποίο είναι πάνω από το 60% του οικονομικά ενεργού πληθυσμού. Αναφορικά με τις επιχειρήσεις το 83% των επιχειρήσεων του νησιού, δηλαδή περίπου 3.300 επιχειρήσεις, είναι άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένες με τον τουρισμό.

Την δεκαετία του 1991 ο πληθυσμός ασχολιόταν κατά κύριο λόγο με τον κλάδο των κατασκευών. Η ενίσχυση του κλάδου οφειλόταν στην αύξηση της τουριστικής δραστηριότητας του νησιού, που απαιτούσε περισσότερα ξενοδοχεία και γενικώς κτίρια σχετικά με τον τουρισμό. Όμως αυτό ήταν προσωρινό. Καθώς τα τουριστικά συγκροτήματα και τα άλλα παρεμφερή οικοδομήματα άρχιζαν να πληθαίνουν, η ανέγερση νέων οικοδομών μειώθηκε με αποτέλεσμα η απορρόφηση εργατικού δυναμικού στον κλάδο να μην είναι τόσο μεγάλη το 2001.

Το έτος 2001 πρώτος εμφανίζεται ο κλάδος υπηρεσιών, συγκεκριμένα η απασχόληση σε ξενοδοχεία και εστιατόρια. Ο κλάδος αυτός εξακολουθεί να απασχολεί μεγάλο ποσοστό του ενεργού πληθυσμού, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες όπου παρατηρείται ραγδαία προσέλευση τουριστών. Θετική ήταν επίσης η επίδραση του τουρισμού στον κλάδο του εμπορίου λόγω της αύξησης της ζήτησης των αγαθών.

Αντίθετα, ο γεωργικός πληθυσμός του νησιού μειώθηκε από 7,5% του συνολικού πραγματικού πληθυσμού το 1991 στο 5% το 2001.

Αναλυτικά, από τα στοιχεία που δίνονται από την Ε.Σ.Υ.Ε., οι κύριοι παραγωγικοί κλάδοι απασχολούν τα παρακάτω νούμερα του πληθυσμού:

Πίνακας 2.5: Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδων οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα στο Δήμο Θήρας Σαντορίνης.

Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδωνοικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα									
ΔΗΜΟΣ ΘΗΡΑΣ (ΝΟΜΟΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ)									
Κλάδος οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα	**1991 Πραγματικός πληθυσμός**			**2001 Πραγματικός πληθυσμός**			**2001 Μόνιμος πληθυσμός**		
	Σύνολο	**Αρρενες**	**Θήλεις**	**Σύνολο**	**Αρρενες**	**Θήλεις**	**Σύνολο**	**Αρρενες**	**Θήλεις**
Σύνολο	**3.295**	**2.651**	**644**	**5.550**	**3.770**	**1.780**	**5.564**	**3.787**	**1.777**
Γεωργία κτηνοτροφία θήρα και δασοκομία, αλιεία	248	238	10	276	169	107	282	170	112
Ορυχεία και λατομεία	17	16	1	13	12	1	13	12	1
Μεταποιητικές βιομηχανίες	179	162	17	262	228	34	259	222	37
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος φυσικού αερίου και νερού	53	51	2	73	70	3	72	69	3
Κατασκευές	868	863	5	979	967	12	988	976	12
Χονδρικό και λιανικό εμπόριο επισκευή αυτοκινήτων οχημάτων μοτοσυκλετών και ειδών προσωπικής και οικιακής χρήσης	401	288	113	836	529	307	848	538	310
Ξενοδοχεία και εστιατόρια	386	241	145	1.024	487	537	1.048	506	542
Μεταφορές αποθήκευση και επικοινωνίες	279	237	42	459	337	122	482	361	121
Ενδιάμεσοι χρηματοπιστωτικοί οργανισμοί, διαχείρηση ακίνητης περιουσίας	124	74	50	286	165	121	287	161	126
Δημόσια διοίκηση και άμυνα. Υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση	203	167	36	298	229	69	290	224	66
Εκπαίδευση	110	49	61	203	77	126	199	77	122
Υγεία και κοινωνική μέριμνα	33	12	21	59	34	25	56	33	23
Λοιπές υπηρεσίες	121	77	44	325	177	148	305	165	140
Νέοι, Μη δυνάμενοι να καταταγούν κατά κλάδο	273	176	97	457	289	168	435	273	162

Πηγή : Ε.Σ.Υ.Ε.

Πίνακας 2.6: Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδων οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα στην Κοινότητα Οίας Σαντορίνης.

Οικονομικώς ενεργός πληθυσμός κατά φύλο ομάδες κλάδωνοικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα									
ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΙΑΣ (ΝΟΜΟΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ)									
Κλάδος οικονομικής δραστηριότητας και θέση στο επάγγελμα	**1991 Πραγματικός πληθυσμός**			**2001 Πραγματικός πληθυσμός**			**2001 Μόνιμος πληθυσμός**		
	Σύνολο	**Αρρενες**	**Θήλεις**	**Σύνολο**	**Αρρενες**	**Θήλεις**	**Σύνολο**	**Αρρενες**	**Θήλεις**
Σύνολο	262	194	68	519	346	173	537	359	178
Γεωργία κτηνοτροφία θήρα και δασοκομία, αλιεία	32	24	8	25	18	7	25	18	7
Ορυχεία και λατομεία	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Μεταποιητικές βιομηχανίες	14	9	5	32	22	10	30	21	9
Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος φυσικού αερίου και νερού	1	1	0	5	5	0	5	5	0
Κατασκευές	56	56	0	77	76	1	78	77	1
Χονδρικό και λιανικό εμπόριο επισκευή αυτοκινήτων οχημάτων μοτοσυκλετών και ειδών προσωπικής και οικιακής χρήσης	31	20	11	49	27	22	54	30	24
Ξενοδοχεία και εστιατόρια	37	20	17	143	73	70	149	78	71
Μεταφορές αποθήκευση και επικοινωνίες	41	37	4	37	34	3	41	36	5
Ενδιάμεσοι χρηματοπιστωτικοί οργανισμοί, διαχείρηση ακίνητης περιουσίας	8	4	4	18	10	8	18	9	9
Δημόσια διοίκηση και άμυνα. Υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση	9	4	5	14	8	6	14	9	5
Εκπαίδευση	5	2	3	20	10	10	18	10	8
Υγεία και κοινωνική μέριμνα	6	1	5	7	3	4	9	3	6
Λοιπές υπηρεσίες	12	9	3	23	17	6	28	20	8
Νέοι, Μη δυνάμενοι να καταταγούν κατά κλάδο	10	7	3	69	43	26	68	43	25

Πηγή : Ε.Σ.Υ.Ε.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του ενεργού οικονομικά πληθυσμού ασχολείται καθαρά με τον τουρισμό. Έτσι, για το 2001 το μεγαλύτερο ποσοστό της τάξης του 18% από τον δήμο Θήρας απασχολείται αμιγώς με τουρισμό (ξενοδοχεία και εστιατόρια) και αντίστοιχα το μεγαλύτερο ποσοστό της τάξης του 29% από την Κοινότητα της Οίας απασχολείται αμιγώς με τον τουρισμό.

2.8 Διαχείριση Υδάτων με Αφαλάτωση

2.8.1 Δήμος Θήρας

Στη παρούσα φάση, η Δ.Ε.Υ.Α. Θήρας λειτουργεί μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης υφάλμυρου νερού δυναμικότητας 1.200 κυβικών νερού ημερησίως η οποία είναι εγκατεστημένη στην περιοχή Κατοικίες του Δημοτικού Διαμερίσματος Φηρών. Η μονάδα παραχωρήθηκε προς λειτουργία στην ΔΕΥΑ Θήρας μετά από διαδικασία προμήθειας που εκτέλεσε ο Δήμος Θήρας. Κατασκευάστηκε το 2008 από την εταιρεία «ΤΕΜΑΚ». Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την λειτουργία της παρέχεται από το δίκτυο της Δ.Ε.Η., ενώ το κόστος του νερού ανέρχεται σε 2,7€/m^3.

Η εν λόγω μονάδα αφαλάτωσης τροφοδοτείται από υπάρχουσες υδρογεωτρήσεις που λειτουργούσαν στην ευρύτερη περιοχή και καλύπτει τις ανάγκες ύδρευσης της πρωτεύουσας του Δήμου, τα Φηρά νήσου Θήρας.

Για τις ανάγκες των υπολοίπων Δημοτικών Διαμερισμάτων προβλέπεται η κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Συγκεκριμένα έχουν χωροθετηθεί τρείς μονάδες αφαλάτωσης για τις ανάγκες του Δήμου Θήρας με την ακόλουθη γεωγραφική διαμερισματοποίηση :

- Μία μονάδα στην περιοχή «Έξω Γυαλός Φηρών», για τις ανάγκες των Δημοτικών Διαμερισμάτων Φηρών, Ημεροβιγλίου, Βουρβούλου και Καρτεράδου.

- Μια μονάδα στην περιοχή «Μπίρικας – Πλατειές Έξω Γωνιάς», για τις ανάγκες των Δημοτικών Διαμερισμάτων Επισκοπής Γωνιάς, Έξω Γωνιάς, Μεσαριάς, Βόθωνα και Πύργου.

- Μια μονάδα στην περιοχή «Κάμπος Εμπορείου - Λειβαδάρηδες Αγίου Γεωργίου», για τις ανάγκες των Δημοτικών Διαμερισμάτων Εμπορείου, Ακρωτηρίου και Μεγαλοχωρίου.

Σχετικά με τις περιβαλλοντικές αδειοδοτήσεις, δυστυχώς, αν και η ανάγκη άμεσης λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης για τις ανάγκες του νησιού είναι επιτακτική, η ισχύουσα νομοθεσία έως σήμερα απαγορεύει την κατασκευή έργων αφαλάτωσης.

Συγκεκριμένα, η ΚΥΑ 13727/724/2003 ορίζει τις αφαλατώσεις ως βιοτεχνικές εγκαταστάσεις, οι οποίες διακρίνονται σε χαμηλής όχλησης για παραγωγή έως 100m^3/day και σε μέσης όχλησης για μεγαλύτερη παραγωγή νερού. Ενώ σύμφωνα με το Π.Δ. 16-2/90 με το οποίο καθορίζονται οι Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου της Νήσου Θήρας επιτρέπονται μόνο στη Ζώνη ΙΙΙ μη οχλούσες βιοτεχνικές εγκαταστάσεις.

Ο Δήμος Θήρας το έτος 2007, στα πλαίσια της αντιμετώπισης του προβλήματος της λειψυδρίας, διεκδίκησε και πέτυχε χρηματοδότηση ύψους 2.500.000 ευρώ από το Υπουργείο Εσωτερικών Δημόσιας Διοίκησης και Αποκέντρωσης για την εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί άμεσα η χρηματοδότηση η υπηρεσία του Δήμου προέβη σε διαγωνισμό για την ανάθεση του έργου με τίτλο : «Εγκατάσταση Μονάδας Αφαλάτωσης Δ.Δ. Φηρών» αλλά ταυτόχρονα και στις απαραίτητες ενέργειες για την Περιβαλλοντική αδειοδότηση του.

Η διαδικασία του διαγωνισμού ολοκληρώθηκε επιτυχώς και μάλιστα εγκρίθηκε ο προσυμβατικός έλεγχος του έργου με πράξη του Ε΄ Κλιμακίου του Ελεγκτικού Συνεδρίου.

Παράλληλα, με στόχο την Περιβαλλοντική αδειοδότηση του έργου εξασφαλίστηκε η θετική γνωμοδότηση της ΚΑ Εφορίας Προϊστορικών – Κλασικών Αρχαιοτήτων, της 2^{ης} Εφορίας Βυζαντινών Αρχαιοτήτων, η Πράξη χαρακτηρισμού και η τελεσιδικία αυτής για το προβλεπόμενο χώρο κατασκευής του έργου, η έγκριση καθορισμού αποδέκτη τελικής διάθεσης της απορριπτόμενης άλμης της εγκατάστασης αφαλάτωσης με απόφαση Νομάρχη και η έγκριση της μελέτης διάθεσης λυμάτων της μονάδος αφαλάτωσης από το Τμήμα Δημόσιας Υγιεινής και Υγειονομικού Ελέγχου της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Κυκλάδων.

Όμως αν και το έργο είναι υπό εκτέλεση δυστυχώς έως σήμερα δεν έχει τροποποιηθεί το Π.Δ/γμα 16-2/90 (ΖΟΕ νήσου Θήρας) για την Περιβαλλοντική αδειοδότησή του.

Το συγκεκριμένο έργο αφορά την εγκατάσταση δύο μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού παραγωγής 1.000 κυβικών πόσιμου νερού ημερησίως η καθεμία. Προβλέπεται η εγκατάσταση των μονάδων στην περιοχή «Έξω Γυαλός Φηρών» και αποδέκτης των υπολειμμάτων (άλμη) της επεξεργασίας του θαλασσινού νερού θα είναι η θαλάσσια περιοχή πλησίον της θέσης του έργου.

Στον πίνακα 2.7 παρουσιάζονται στοιχεία καταναλώσεων για τα έτη 2006 έως 2009 για κάθε Δημοτικό Διαμέρισμα ξεχωριστά. Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα, με την λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης του Δ.Δ. Φηρών, το 25,8% του συνολικά παρεχόμενου νερού από την ΔΕΥΑΘ στους καταναλωτές είναι πλέον αφαλατωμένο και σύμφωνο με τα οριζόμενα στην Κοινή Υπουργική Απόφαση Υ2/2600/2001 - ΦΕΚ-892 Β'/11-07-2001 : "Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης", σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης της 3ης Νοεμβρίου 1998 όπως ισχύει σήμερα. Μάλιστα από το έτος 2008 στο έτος 2009 με την παροχή αφαλατωμένου νερού στην περιοχή του Δ.Δ. Φηρών παρουσιάστηκε ετήσια αύξηση στις καταναλώσεις της τάξης του 13%, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι οι καταναλωτές αναμένουν και επιζητούν την υδροδότηση τους με νερό υψηλής ποιότητας.

Πίνακας 2.7: Καταναλώσεις νερού σε m^3 από το 2006 έως και το 2009 στο Δήμο Θήρας.

Δημοτικά Διαμερίσματα	2006	2007	2008	2009	% αναλογία έτους 2009
Επισκοπή Γωνιάς	283.176	305.338	298.789	288.256	36,2
Φηρά	174.270	189.061	181.555	205.597	25,8
Καρτεράδος	68.316	74.093	81.015	85.802	10,8
Μεσσαριά	65.332	72.632	71.782	74.072	9,3
Εμπορείο	38.647	36.766	40.733	41.531	5,2
Βόθωνας	29.156	32.475	32.193	35.868	4,5
Βούρβουλος	23.232	22.942	26.602	24.976	3,1
Έξω Γωνιά	17.396	17.463	19.549	18.443	2,3
Ακρωτήρι	10.255	10.740	11.436	12.838	1,6
Μεγαλοχώρι	7.745	8.602	9.625	9.354	1,2
Σύνολο :	**717.525**	**770.112**	**773.279**	**796.737**	**100 %**

Πηγή: Δ.Ε.Υ.Α. Θήρας

2.8.2 Κοινότητα Οίας

Η Κ.Ε.Υ.Α. Οίας λειτουργεί τέσσερις μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης θαλασσινού νερού. Το έργο βρίσκεται σε οικόπεδο 11.253 m^2, ιδιοκτησίας της Κοινότητας Οίας στην τοποθεσία Άγιος Βασίλειος (εκτός οικισμού Οίας) σε πάροδο της επαρχιακής οδού Φηρών-Οίας 100 μέτρα νότια της διασταύρωσης στο ύψος του νεκροταφείου Οίας. Το οικόπεδο συνορεύει βόρεια με κοινοτικό και αγροτικό δρόμο έναντι οικοπέδου εκτός οικισμού Οίας και οικοπέδου ιδιοκτησίας κληρονόμων Σπύρου Νομικού αντίστοιχα. Νότια καταλήγει στα κρεμνά. Ανατολικά συνορεύει με το οικόπεδο ιδιοκτησίας Συρίγου και δυτικά με τον οικισμό Οίας και τον ναό του Αγ. Βασιλείου.

Η πρώτη μονάδα αφαλάτωσης κατασκευάστηκε το 1994 και ήταν προσφορά της οικογένειας Αλαφούζου. Οι δύο από τις τέσσερις μονάδες προμηθεύτηκαν από την εταιρεία «MATRIX», ενώ οι άλλες από την εταιρεία «KALIKAN». Κάθε μία από τις μονάδες παράγουν 380, 160, 300 και 200 m^3 πόσιμου νερού/ημέρα, δηλαδή συνολικά 1.020 m^3 πόσιμου νερού/ημέρα που αποθηκεύεται πριν την κατανάλωση σε δεξαμενές, καλύπτοντας έτσι πλήρως τις ανάγκες της κοινότητας σε νερό.

Η ενέργεια του νερού παρέχεται από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. και οι μονάδες τροφοδοτούνται με θαλασσινό νερό πάνω από 1.000 m^3 την ημέρα με

αντλιοστάσιο που βρίσκεται στην ακτή. Η τροφοδοτούμενη άλμη, δηλαδή το θαλασσινό νερό μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε άλατα, οδηγείται πίσω στην θάλασσα με αγωγό, ενώ το κόστος του νερού ανέρχεται περίπου στα 3€/ m^3.

Τα χημικά που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή του νερού αποτελούν φυσικά συστατικά του νερού, η συγκέντρωση δε των οποίων ελαττώνεται λόγω της κατεργασίας τους στις μεμβράνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις, για ύδρευση πόλεων και χωριών, για άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών και για τη βιομηχανία, βρίσκεται σε δύο μορφές: σαν επιφανειακό και σαν υπόγειο νερό. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών, ενώ υπόγειο νερό είναι αυτό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών που για το λόγο αυτό λέγονται και υδροφορείς.

Το νερό είναι ένα από τα μεγαλύτερα αγαθά που προσφέρει η φύση και είναι απαραίτητο στοιχείο ζωής στον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά. Από μια πρώτη εκτίμηση, η συνολική ποσότητα νερού ίση με 1.370×10^{15} m^3 που υπάρχει στη γη φαίνεται ότι είναι υπεραρκετή και ουσιαστικά ανεξάντλητη.

Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα εκμετάλλευσης των υδατικών αυτών πόρων, η εικόνα γίνεται τελείως διαφορετική. Αυτό συμβαίνει γιατί το 97,3% της συνολικής αυτής ποσότητας είναι αλμυρό νερό, δηλαδή ακατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, βιομηχανική και αγροτική χρήση. Επίσης, το 2,1% αφορά χιόνια και πάγους, και αφαιρώντας ένα πολύ μικρό ποσοστό νερού που υπάρχει με μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καταλήγει κανείς σε ένα τελικό ποσό $8,2\times10^{15}$ m^3, περίπου 0,6% του συνόλου, που αποτελεί τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση. Από το νερό αυτό, το 98% είναι υπόγειο νερό. Δυστυχώς, σχεδόν η μισή ποσότητα από το υπόγειο αυτό νερό είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης (>800m), όπου η ποσότητα των περιεχόμενων αλάτων είναι πολύ μεγάλη και από όπου η άντλησή του είναι υπερβολικά δαπανηρή. Γίνεται, λοιπόν, φανερό, από τα παραπάνω ότι το διαθέσιμο για εκμετάλλευση νερό είναι πράγματι ένα πολύτιμο αγαθό, ιδιαίτερα εξαιτίας της άνισης

κατανομής του τόσο χωρικά, σε διάφορες δηλαδή περιοχές της γης, όσο και χρονικά, εννοώντας βέβαια τις εποχικές διακυμάνσεις.

Στα παραπάνω έρχεται να προστεθεί ότι στην Ελλάδα παρουσιάζεται σημαντική μείωση των βροχοπτώσεων με την πάροδο των ετών. Οι παλιές μέθοδοι ανάκτησης νερού από ποτάμια και λίμνες φυσικές ή τεχνητές αποτυγχάνουν να λύσουν το πρόβλημα. Ιδιαίτερα πλήττονται κάποια από τα Ελληνικά νησιά, των οποίων οι κάτοικοι εφοδιάζονται με νερό χαμηλής ποιότητας που μεταφέρεται με δεξαμενόπλοια.

Οι Κυκλάδες, για παράδειγμα, χρειάζονται δώδεκα εκατομμύρια κυβικά μέτρα πόσιμου νερού τη μέρα, την ώρα που η ποσότητα αυτή καλύπτεται μέχρι σήμερα στο 60 με 65%. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο οι ανάγκες για νερό αυξάνονται εξαιτίας του τουρισμού. Μέχρι το 2030 η ζήτηση θα έχει διπλασιαστεί.

Από όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η έλλειψη νερού αναγνωρίζεται ως παρούσα απειλή στην ανθρώπινη δραστηριότητα και κατά συνέπεια επιβάλλεται επιτακτική η ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων και ιδιαίτερα των υπόγειων νερών που ποσοτικά υπερτερούν έναντι των επιφανειακών.

3.2 Υπόγεια Νερά

Τα υπόγεια νερά αποτελούν τμήμα μιας τεράστιας ποσότητας νερού σε διάφορες καταστάσεις, η οποία, όμως, δεν παραμένει στάσιμη, αλλά βρίσκεται σε μια διαρκή μετατροπή και κυκλοφορία περιοδικού χαρακτήρα, γνωστή σαν υδρολογικός κύκλος (Λατινόπουλος, 2006). 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 μέσα στους υδροφορείς ή υδροφόρα στρώματα.

Όλο το νερό κάτω από το έδαφος δεν μπορεί να θεωρηθεί υπόγειο νερό. Το πραγματικό υπόγειο νερό έχει το χαρακτηριστικό ότι ρέει λόγω πίεσης ή βαρύτητας, γι' αυτό και μπορεί να συλλεχτεί με κάποιο τεχνικό τρόπο. Συνεπώς η πίεσή του είναι μεγαλύτερη ή ίση με την ατμοσφαιρική. Εναλλακτικά, σαν υπόγειο νερό μπορεί να ορισθεί το νερό στο έδαφος ή σε διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς που είναι πλήρως κορεσμένοι.

Μερικές φορές με τον όρο "υπόγειο νερό" εννοείται όλο το νερό που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και πληροί τους εδαφικούς πόρους εν όλο ή εν μέρει. Είναι προφανές ότι ο ορισμός αυτός είναι ευρύτερος και συνήθως δεν χρησιμοποιείται από υδραυλικούς μηχανικούς.

3.3 Υδροφορείς

Υδροφορείς είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι, όχι μόνο είναι δυνατό να περιέχουν νερό σχηματίζοντας έτσι υπόγειες δεξαμενές, αλλά και επιτρέπουν την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού μέσα σε αυτούς κάτω από κανονικές γενικά συνθήκες.

Ο υδροφορέας είναι ένα σύστημα που λειτουργεί σαν ενιαίο σύνολο με σκοπό την επίτευξη διαφόρων στόχων. Συνοπτικά επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Πηγή νερού, συνήθως ανανεώσιμη από το νερό των βροχοπτώσεων, γειτονικών ποταμών και λιμνών, πλημμυρών κ.λπ., ανάλογα με την τοπογραφία, τη γεωλογία και την υδρολογία της περιοχής.

- Ταμιευτήρας αποθήκευσης νερού. Ενδεικτικά σε ένα υδροφορέα διαστάσεων 10 km x 10 km και με αποθηκευτικότητα 15%, μπορούν να αποθηκευτούν 15 x 10^6 m^3 νερού, ανεβάζοντας την ελεύθερη επιφάνεια μόνο κατά 1 m. Προφανώς, απαιτείται προσοχή για την ορθή διαχείριση του υδροφορέα, ώστε να μην υπάρξουν απώλειες της ποσότητας λόγω διαρροών στα όρια.

- Αγωγός νερού. Με διάφορες τεχνικές νερό μπορεί να τροφοδοτηθεί σε κάποιο σημείο του υδροφορέα και να αντληθεί από ένα ή περισσότερα άλλα σημεία.

- Φίλτρο για τον καθαρισμό του νερού. Στην περίπτωση επανατροφοδότησης νερού σε έναν υδροφορέα το έδαφος μπορεί να συντελέσει στην κατακράτηση των αιωρούμενων στερεών και στην απαλλαγή του νερού από κάποιο οργανικό φορτίο. Περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας του τροφοδοτούμενου νερού επέρχεται λόγω υδροδυναμικής διασποράς κατά την ανάμιξή του με τα υπόγεια νερά της περιοχής. Είναι προφανές ότι έχει ιδιαίτερη σημασία το είδος της εδαφικής στρώσης και οι συνθήκες υπόγειας ροής.

- Δυνατότητα ελέγχου της ροής πηγών – ποταμών.

Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι ελεύθερης επιφάνειας νερού οι υδροφορείς ταξινομούνται σε :

- περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς (confined ή pressure aquifers). Οι περιορισμένοι υδροφορείς περιορίζονται προς τα άνω και προς τα κάτω από αδιαπέρατους σχηματισμούς και δεν παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια. Η ροή σε έναν περιορισμένο υδροφορέα είναι ανάλογη της ροής σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση. Η στάθμη του νερού σε ένα φρέαρ παρατήρησης που διανοίγεται σε έναν τέτοιας μορφής υδροφορέα είναι ψηλότερα από το επάνω όριο της στρώσης και απεικονίζει το πιεζομετρικό ύψος στο συγκεκριμένο σημείο. Πρέπει να τονισθεί ότι για να δείχνει ένα φρέαρ παρατήρησης σωστά το πιεζομετρικό ύψος σε ένα σημείο, πρέπει να επηρεάζεται από μια μικρή - όχι τόσο μικρή όσο το μέγεθος των πόρων - περιοχή συμμετρική περί το σημείο μέτρησης. Μόνο για την περίπτωση οριζόντιας ροής, δεν έχει σημασία το πάχος και η θέση του φρέατος. Εάν το πιεζομετρικό ύψος είναι ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους, τότε ο υπό πίεση υδροφορέας ονομάζεται αρτεσιανός. Φρέαρ ανοιγόμενο σε έναν τέτοιον υδροφορέα παρουσιάζει ελεύθερη ροή

νερού χωρίς να χρειάζεται άντληση. Η τροφοδότηση ενός περιορισμένου υδροφορέα γίνεται από κάποια περιοχή συνήθως κοντά στα όρια, η οποία παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια και δέχεται τα νερά της βροχής ή υπερκειμένων στρώσεων και ονομάζεται περιοχή επανατροφοδότησης.

- φρεάτιους ή μη περιορισμένους υδροφορείς (phreatic ή unconfined ή water table aquifers). Οι φρεάτιοι υδροφορείς περιορίζονται προς τα κάτω από αδιαπέρατη στρώση και προς τα άνω τα υπόγεια νερά έχουν ελεύθερη επιφάνεια. Η τροφοδότηση τέτοιων υδροφορέων γίνεται απ' ευθείας από την επιφάνεια του εδάφους μέσω του φρεατίου ορίζοντα, εκτός εάν υπάρχει από πάνω άλλη αδιαπέρατη στρώση.

Οι υδροφορείς, περιορισμένοι ή φρεάτιοι, είναι δυνατόν να αποβάλλουν ή να τροφοδοτούνται με νερό δια μέσου των γειτονικών προς αυτούς στρωμάτων. Αν και οι εδαφικές αυτές στρώσεις είναι ημιδιαπερατές και παρουσιάζουν μεγάλη σχετικά αντίσταση στη ροή του νερού, τελικά για μεγάλες οριζόντιες επιφάνειες επιτρέπουν τη ροή σημαντικών ποσοτήτων νερού. Η ποσότητα και η διεύθυνση της διαρροής νερού εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από τη διαφορά στο πιεζομετρικό ύψος που υφίσταται κατά μήκος της ημιδιαπερατής στρώσης.

Ο φρεάτιος υδροφορέας ο οποίος εδράζεται σε μια ημιδιαπερατή στρώση ονομάζεται φρεάτιος υδροφορέας με διαρροή (leaky aquifer). Κατ' αναλογία ορίζεται ο περιορισμένος υδροφορέας με διαρροή.

Ειδική κατηγορία φρεάτιου υδροφορέα είναι ο υδροφορέας τύπου φωλιάς (perched aquifer), ο οποίος δημιουργείται όταν μικρής έκτασης αδιαπέρατη ή ημιδιαπερατή στρώση παρεμβληθεί μεταξύ του φρεάτιου ορίζοντα ενός υδροφορέα και της επιφάνειας του εδάφους.

Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (Η) για τους φρεάτιους και της πιεζομετρικής για τους περιορισμένους υδροφορείς καθορίζεται από το

υδραυλικό φορτίο, το οποίο ισούται με το άθροισμα του φορτίου πίεσης (h_p) και το υψόμετρο (z) :

$$H = h_p + z = \frac{p}{\gamma} + z \tag{3.1}$$

Στους φρεάτιους υδροφορείς το υδραυλικό φορτίο καθορίζει τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας, ενώ στους περιορισμένους υδροφορείς προσδιορίζει την πίεση του νερού σε κάθε σημείο του υδροφορέα και ονομάζεται πιεζομετρικό φορτίο φ.

Τα προβλήματα ροής του νερού στους υδροφορείς ανάγονται σε προβλήματα ροής μέσα από πορώδη μέσα, όπου το εδαφικό σώμα θεωρείται σαν ένα συνεχές μέσο αποτελούμενο από πολλά πολλαπλά συνδεδεμένα σωληνίδια, μέσα στα οποία πραγματοποιείται η ροή ρευστού. Το όλο εδαφικό σώμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συντίθεται από το σύστημα των πολλαπλά συνδεδεμένων σωληνιδίων που έχουν σαν όρια και σχηματίζονται από τα στερεά του εδάφους (αδιαπέρατη ύλη). Έτσι, το εδαφικό σώμα διακρίνεται στον εδαφικό σκελετό, που αποτελείται από στερεά ύλη, και τα διάκενα (σωληνίδια) ή πόροι, μέσα από τα οποία πραγματοποιείται η ροή. Γενικά οι πόροι του εδάφους μπορούν να περιέχουν εν μέρει κάποια υγρή φάση (π.χ. νερό) και εν μέρει κάποια αέρια φάση (π.χ. υδρατμοί).

3.4 Παράμετροι Υπόγειων Υδροφορέων

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

Α) 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).

Β) Μεταφορικότητα ή Διοχετευτικότητα (L^2T^{-1})

Εκφράζεται ως το γινόμενο του πάχους Β ενός ομογενούς και ισότροπου περιορισμένου υδροφορέα επί την υδραυλική αγωγιμότητα Κ και συμβολίζεται ως ακολούθως:

$$T=K\cdot B \qquad (3.2)$$

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 Β.

Γ) 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).

Δ) Αποθηκευτικότητα (L^{-1})

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

i. 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 Δφ. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και περιγράφεται από τη σχέση :

$$S_o = \frac{\Delta V_T}{V_T \cdot \Delta_\phi} \tag{3.3}$$

- *Αποθηκευτικότητα υδροφορέα (S_c)*: ισούται με τον όγκο νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου Δφ. Είναι μικρότερη από την φρεάτια αποθηκευτικότητα και χρησιμοποιείται στη δισδιάστατη ροή. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και περιγράφεται από τη σχέση :

$$S_s = \frac{\Delta V_T}{\mathrm{A} \cdot \Delta_\phi} \tag{3.4}$$

ii. Αποθηκευτικότητα φρεάτιου υδροφορέα ή φρεάτια αποθηκευτικότητα (S):

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. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και περιγράφεται από τη σχέση :

$$S = \frac{\Delta V_W}{\mathrm{A} \cdot \Delta h} \tag{3.5}$$

3.5 Μαθηματικά Μοντέλα Κίνησης Υπόγειων Νερών

Μοντέλο ή ομοίωμα πραγματικού συστήματος καλείται κάθε σύστημα που μπορεί να αναπαράγει τη συμπεριφορά και απόκριση ενός υπόγειου υδροφορέα. Η διαδικασία λειτουργίας του μοντέλου και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων λέγεται προσομοίωση του φυσικού συστήματος.

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μοντέλων, όπως τα φυσικά μοντέλα, τα αναλογικά μοντέλα και τα μαθηματικά μοντέλα (αναλυτικά και αριθμητικά). Τα φυσικά μοντέλα είναι εργαστηριακά μοντέλα, όπως τα κουτιά άμμου, Helleshaw (κίνηση γλυκερίνης μεταξύ δύο παράλληλων πλακών) και μερικά από τα αναλογικά μοντέλα είναι : ανάλυση δικτύων αντιστάσεων, μεταφορά θερμότητας κλπ.

Τα μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιούν την εξίσωση Darcy, διαφορικές εξισώσεις ροής και αρχικές - οριακές συνθήκες. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Αναλυτικά μοντέλα (π.χ. μονοδιάστατη ροή, υδραυλική πηγαδιών – κυκλική συμμετρία)
- Αριθμητικά μοντέλα (π.χ. μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων)

Τα μαθηματικά μοντέλα βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας (διατήρησης μάζας) και στις εξισώσεις κίνησης ρευστών σε πορώδη μέσα.

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

3.5.1 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:

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot J \tag{3.6}$$

όπου q: 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 :

$$J = \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} = \frac{\Delta\phi}{L} \tag{3.7}$$

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

$$\begin{aligned} q_x &= K \cdot J_x = -K \cdot \frac{\partial\phi}{\partial x} = n \cdot V_x \\ q_y &= K \cdot J_y = -K \cdot \frac{\partial\phi}{\partial y} = n \cdot V_y \\ q_z &= K \cdot J_z = -K \cdot \frac{\partial\phi}{\partial z} = n \cdot V_z \end{aligned} \tag{3.8}$$

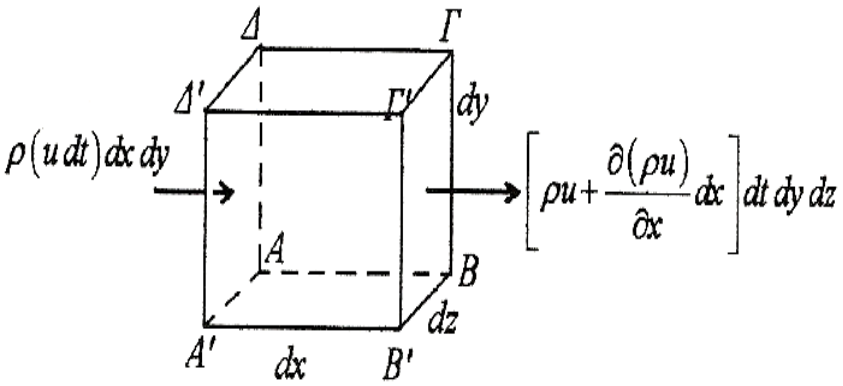
όπου n: το πορώδες,

V : η ταχύτητα και

φ: το πιεζομετρικό φορτίο

3.5.2 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 3.1: Διαφορικός όγκος αναφοράς

Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} = -\frac{\partial(\rho \cdot n)}{\partial t} \tag{3.9}$$

όπου q_x, q_y, q_z: η ειδική παροχή στους τρεις άξονες

ρ: η πυκνότητα του ρευστού

n: το πορώδες εδάφους

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή αποθηκευτικότητας S_o για τον περιορισμένο υδροφορέα έχουμε:

$$\frac{\partial(\rho \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot q_z)}{\partial z} = -\rho \cdot S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.10}$$

Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται στον χώρο. Επομένως η (3.10) γίνεται:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.11}$$

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

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + W \tag{3.12}$$

Για τις διάφορες περιπτώσεις υδροφορέα και τρισδιάστατη ροή είναι:

- ✓ **Μη Μόνιμη Ροή**

- Μη ομογενής ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.13}$$

- Μη ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.14}$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$K_x \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + K_y \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + K_z \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.15}$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{S_O}{K} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{3.16}$$

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:

$$\frac{\partial^2 \phi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial z^2} = 0 \qquad (3.17)$$

Για δισδιάστατη ροή οι παραπάνω εξισώσεις τροποποιούνται ως εξής:

- ✓ **Περιορισμένος Υδροφορέας και Μη Μόνιμη Ροή**

- Μη ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \qquad (3.18)$$

Όπου S: η αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα

T_x, T_y : η μεταφορικότητα κατά την διεύθυνση x και y αντίστοιχα (L^3T^{-1})

Q: η συνολική παροχή άντλησης ή τροφοδοσίας (L^3T^{-1})

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

- Μη ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x}(T \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \qquad (3.19)$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$T_x \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + T_y \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad (3.20)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$T \cdot (\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}) = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad (3.21)$$

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

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \qquad (3.22)$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται εξίσωση Laplace.

- ✓ **Φρεάτιος Υδροφορέας**

Αντικαθιστούμε το πιεζομετρικό φορτίο φ με το βάθος ροής h. Επίσης στους φρεάτιους υδροφορείς ισχύει ότι T= K·h. Επομένως έχουμε:

- Μη ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + Q \qquad (3.23)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$K \cdot \frac{\partial}{\partial x}(h \cdot \frac{\partial h_x}{\partial x}) + K \cdot \frac{\partial}{\partial y}(h \cdot \frac{\partial h_y}{\partial y}) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + Q \qquad (3.24)$$

Οι εξισώσεις (3.23) και (3.24) δεν είναι γραμμικές. Ύστερα από γραμμικοποίηση τους η (3.24) γίνεται:

$$K \cdot h(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}) = S_O \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + Q \qquad (3.25)$$

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 (3.24).

3.5.3 Θεωρία Οριζόντιας Ροής

Η θεωρίας της οριζόντιας ροής ισχύει όταν το πάχος του υδροφορέα είναι σημαντικά μικρότερο, συγκρινόμενο με τις οριζόντιες διαστάσεις αυτού. Σύμφωνα με τη θεωρία 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:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mathrm{T}\cdot\frac{\partial\phi}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mathrm{T}\cdot\frac{\partial\phi}{\partial y})=S\cdot\frac{\partial\phi}{\partial t} \tag{3.26}$$

όπου S: η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και

T: η μεταφορικότητα και ισούται με $\mathrm{T}=\mathrm{K}\cdot b$,

όπου K: η υδραυλική αγωγιμότητα.

3.5.4 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 της, το διάνυσμα της 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 της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα. Οι γραμμές ροής και οι γραμμές δυναμικού στα σημεία που διασταυρώνονται, διασταυρώνονται υποχρεωτικά κάθετα.

3.5.5 Αριθμητικά Μοντέλα Κίνησης Υπόγειων Νερών

Η επίλυση προβλημάτων ροής σε πορώδη μέσα έχει επιτευχθεί και επιτυγχάνεται ακόμη και σήμερα με τρεις βασικές μεθοδολογίες. Η πρώτη βασίζεται στην ανάπτυξη φυσικών μοντέλων, η δεύτερη στην ανάπτυξη αναλογικών μοντέλων και η τρίτη στην ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων. Η επίλυση των μαθηματικών μοντέλων επιτυγχάνεται είτε με την εφαρμογή αναλογικών λύσεων είτε αριθμητικών προσεγγίσεων των αντίστοιχων

αναλυτικών εξισώσεων. Οι αναλυτικές λύσεις εφαρμόζονται συνήθως σε απλά προβλήματα ροής ενώ, αντίθετα, σύνθετα πεδία ροής απαιτούν την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων επίλυσης.

Μοντέλο είναι μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος η οποία προσεγγιστικά προσομοιώνει τη συμπεριφορά του τελευταίου σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή "τάσεις" (Bear και Verruijt, 1987). Σύμφωνα με τα μοντέρνα ASTM πρότυπα (ASTM, D5880-95) μοντέλο, θεωρείται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών σε μορφή μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν κάποιο φυσικό σύστημα.

Μαθηματικό μοντέλο, κατά την ευρεία έννοια, είναι μια σχέση ή εξίσωση η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος ή διαδικασίας με μαθηματική μορφή. Σε γενικές γραμμές μπορεί να περιγραφεί με μια συναρτησιακή σχέση της μορφής:

Εξαρτημένη μεταβλητή = f (ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου)

Η εξαρτημένη μεταβλητή, περιγράφει την κατάσταση του συστήματος (π.χ. υδραυλικό φορτίο, συγκέντρωση κλπ.), οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως διαστάσεις χώρου και χρόνου, οι παράμετροι περιγράφουν τις ιδιότητες και τη σύσταση του συστήματος, ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου (forcing functions) περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις (stresses).

Στην περίπτωση των υπόγειων νερών, το μαθηματικό μοντέλο, αποτελείται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη λειτουργία του αντίστοιχου φυσικού συστήματος (του υδροφόρου σχηματισμού) θεωρώντας διάφορες παραδοχές απλοποίησής του (ASTM, D5447-93). Ως μοντέλο ροής υπόγειων νερών θεωρείται η εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου σε συγκεκριμένα προβλήματα υπόγειων νερών (ASTM, D5880-95).

Οι αριθμητικές μέθοδοι στα μοντέλα ροής υπόγειων νερών χρησιμοποιούνται στην επίλυση των εξισώσεων μαθηματικών μοντέλων, στις οποίες οι μερικές

διαφορικές εξισώσεις αντικαθίστανται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν σε διακριτοποιημένη μορφή τη μεταβλητή κατάστασης (state variable) σε συγκεκριμένα (διακριτά) σημεία στο χώρο και στο χρόνο. Μερικές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος αριθμητικό μοντέλο αντί της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του αντίστοιχου μαθηματικού μοντέλου. Αυτό συμβαίνει γιατί στο αριθμητικό μοντέλο εισάγεται ένα σύνολο υποθέσεων και παραδοχών επιπλέον αυτών που εισήχθησαν στο αντίστοιχο μαθηματικό, με αποτέλεσμα το πρώτο να αποτελεί ένα μοντέλο με δική του ξεχωριστή ταυτότητα και οντότητα. Το αριθμητικό μοντέλο, λοιπόν, είναι ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το υπό μελέτη πρόβλημα.

Η ανάγκη χρήσης των αριθμητικών μεθόδων προέκυψε από τις αδυναμίες των αναλυτικών λύσεων σε πρακτικά προβλήματα εφαρμογής. Οι διαφορικές εξισώσεις της ροής επομένως, επιλύονται συνήθως με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων.

Συνήθεις τύποι αριθμητικών μοντέλων είναι οι εξής :

- Μοντέλα ενός κυττάρου
- Μοντέλα πολλών κυττάρων
- Πεπερασμένες διαφορές
- Πεπερασμένα στοιχεία

Στην παρούσα μελέτη, στα πλαίσια της διπλωματικής, μέσω του λογισμικού GROUNDWATER VISTAS εφαρμόζεται ο κώδικας SEAWAT, ο οποίος χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και αναλύεται εκτενώς στο κεφάλαιο 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΦΑΛΜΥΡΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

4.1 Γενικά

Οι ανάγκες για νερό στις παράκτιες περιοχές αυξάνονται συνεχώς λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού. Ειδικότερα, στις νησιωτικές περιοχές, οι οποίες στερούνται σημαντικών επιφανειακών νερών, όπως λίμνες και ποτάμια, οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν το μοναδικό φυσικό αποθηκευτικό μέσο για πόσιμο νερό και κατ' επέκταση μια από τις κύριες πηγές πόσιμου νερού.

Οι αντλήσεις των υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές, πολλές φορές πάνω από τα όρια βιωσιμότητας, με αποτέλεσμα την υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Επίσης η τροφοδοσία των υδροφορέων μεταβάλλεται ανάλογα με τις βροχοπτώσεις και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας δεν επαρκεί για την επαναπλήρωση τους (Α. Μαντόγλου – Π. Γιαννουλόπουλος).

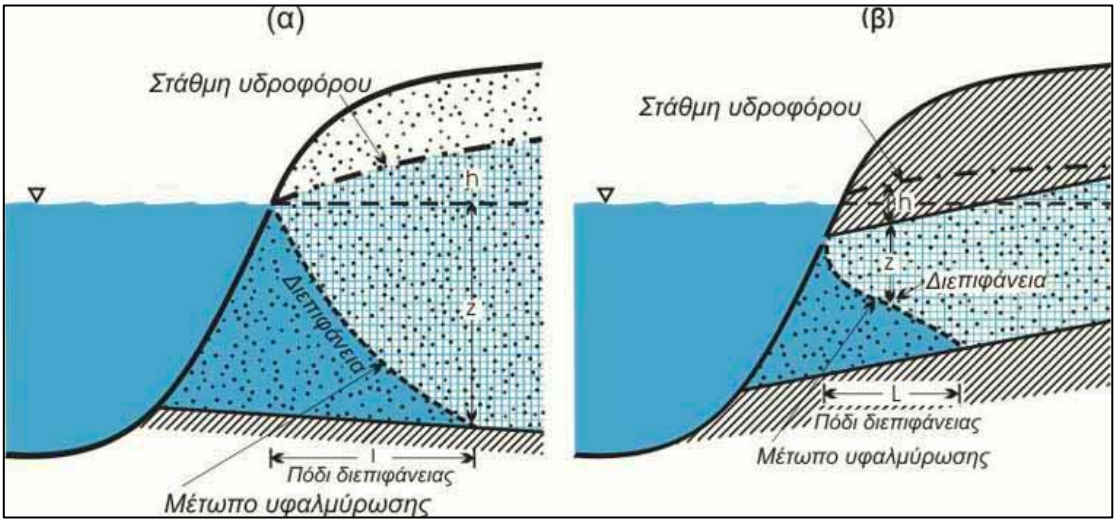
Λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων υδατικών πόρων στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά, οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι είναι πολύτιμοι και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό καλύτερα ώστε να προστατευτούν και να συνεχίσουν να καλύπτουν και στο μέλλον τις ανάγκες με βιώσιμο τρόπο. Η χρήση και αποκατάσταση παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού ή της παράκτιας περιοχής, η οποία περιλαμβάνει τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά, εξετάζει τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτινων πόρων, θεωρώντας τις υπάρχουσες αλλά και τις μελλοντικές ανάγκες καθώς και τη μεταβλητότητα και διαρκή αύξηση των αναγκών ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Αυτού του είδους η διαχείριση απαιτεί επιστημονική έρευνα, ανάλυση, μελέτες και σχεδιασμό, κατάλληλη νομοθεσία και διατάξεις, καθώς και καλή πληροφόρηση και συνεργασία φορέων και πληθυσμού. (Α. Μαντόγλου – Π. Γιαννουλόπουλος).

Μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία στη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων, αποσκοπεί στον καθορισμό των βέλτιστων ποσοτήτων που μπορούν να αντληθούν από τον υδροφορέα, ιδιαίτερα σε περιόδους ξηρασίας, όπου η επαναπλήρωση των ποσοτήτων που αντλούνται δεν είναι εφικτή. Σε συνάρτηση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων του υδροφορέα καθώς και της κατείσδυσης, σκοπός είναι να υπολογισθεί η μέγιστη βιώσιμη άντληση σαν ποσοστό της τροφοδοσίας του υδροφορέα. Ωστόσο κάτι τέτοιο απαιτεί άριστη γνώση της λειτουργίας του φυσικού συστήματος. Διάφορα μαθηματικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για να παρέχουν τη γνώση εκείνη που απαιτείται για τη μεθοδική διαχείριση των υδατικών πόρων. Τα μοντέλα αυτά στην ουσία προσομοιώνουν το φυσικό σύστημα του υδροφορέα χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του, ωστόσο οι διαδικασίες που στην πραγματικότητα πραγματοποιούνται είναι πολύ δύσκολο να κατανοηθούν και να περιγραφούν με απλές μαθηματικές σχέσεις. Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να παρέχουν απλά μια σχετική εικόνα για το τι πραγματικά συμβαίνει στον υδροφορέα.

4.2 Διαδικασία Υφαλμύρωσης Παράκτιων Υδροφορέων

Στους παράκτιους υδροφορείς, το γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό, το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα εξαιτίας των ιόντων χλωρίου που περιέχει. Έτσι, το θαλασσινό νερό, έχει την τάση να διεισδύει κάτω από το γλυκό νερό σχηματίζοντας μια σφήνα. Εξαιτίας της εν λόγω διαφοράς πυκνότητας του γλυκού νερού (1.000 cm^3/gr) με το αλμυρό (1.025 cm^3/gr), δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας γνώστη 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 ορίζεται το σημείο τομής της διεπιφάνειας με την επιφάνεια τους θάλασσας.

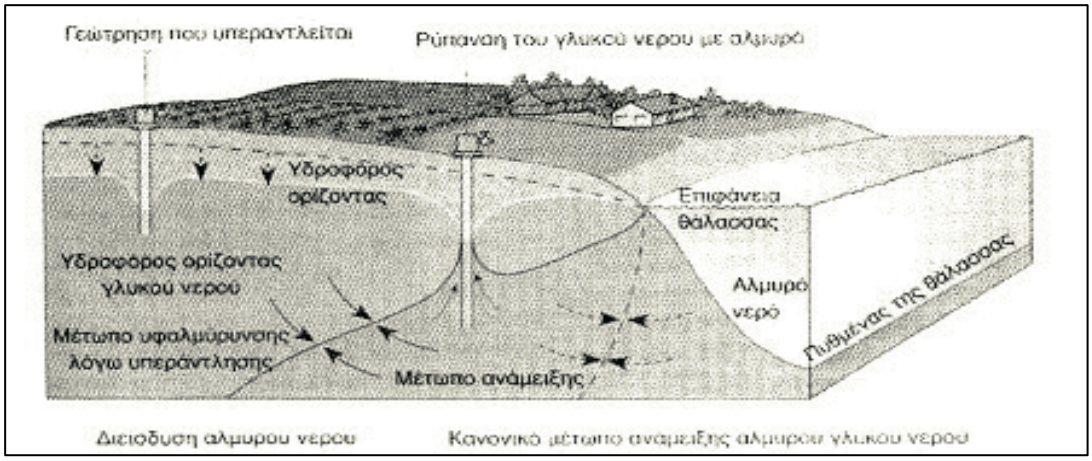
Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας (απουσία άντλησης) η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Στην περίπτωση αυξημένης άντλησης, όπου η φυσική επαναπλήρωση δεν οδηγεί στην αποκατάσταση του υδροφορέα, παρατηρείται πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και κίνηση της διεπιφάνειας στο εσωτερικό μέχρι την επίτευξη της κατάστασης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



Σχήμα 4.1: Ζώνη διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Γ. Καλλέργης, 2001)

Η ύπαρξη όχι μόνο γλυκού αλλά και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς αυτούς καλείται «υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων» και μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς παράγοντες (π.χ. κλιματικές αλλαγές, άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας) όσο και σε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (υπεραντλήσεις) και συνηθέστερα στο συνδυασμό τους. Ωστόσο, οι αυξημένες ανάγκες σε πόσιμο νερό είναι η κύρια αιτία υπεράντλησης των παράκτιων υδροφορέων, με αποτέλεσμα ο ρυθμός άντλησης να υπερβαίνει το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα και κατ' επέκταση να παρατηρείται περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού.

Η συνεχής διείσδυση έχει ως αποτέλεσμα η ποιότητα του γλυκού νερού να υποβαθμίζεται και το νερό να καθίσταται ακατάλληλο για χρήση. Πρέπει να τονισθεί ότι το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο. Έτσι, στις περισσότερες παράκτιες περιοχές έχει γίνει επιτακτική η ανάγκη για σωστή πρόβλεψη της διαχείρισης των αποθεμάτων των παράκτιων υδροφορέων.



Σχήμα 4.2: Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα

4.3 Η Πολυπλοκότητα του Προβλήματος Υφαλμύρωσης Παράκτιων Υδροφορέων

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

Προβλήματα υφαλμύρωσης παρατηρούνται σε μεγάλη-περιφερειακή ή μικρή-τοπική κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως από εγγειοβελτιωτικά έργα. Λέγοντας μικρής κλίμακας προβλήματα, εννοείται η επίδραση που παρατηρείται στην διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού στην περιοχή γύρω και κάτω από ένα φρέαρ άντλησης (upconing).

Τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα σύνθετα και δεν είναι απλός ο τρόπος προσέγγισής τους. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων οφείλεται σε παράγοντες όπως οι ακόλουθοι:

- Ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών καθώς και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης (ζώνη υφαλμύρωσης) μεταξύ των δύο υγρών φάσεων

- Η κίνηση καθώς και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στην ζώνη υφαλμύρωσης η οποία μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χώρου και χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Αυτή η αλληλεξάρτηση κάνει τις αντίστοιχες εξισώσεις μη γραμμικές και είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους αφού απαιτούνται διαδοχικές προσεγγίσεις και επαναλήψεις.

- Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται ακόμα περισσότερο λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Ιδιαίτερα σε καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι εντελώς διαφορετικής φύσης από αυτήν σε ομοιογενείς και ισοτροπικούς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε καρστικούς υδροφορείς συχνά δεν ακολουθεί το νόμο του Darcy, αφού γίνεται σε κοιλότητες και σε ανοίγματα που είναι συχνά είναι μεγάλων διαστάσεων, με αποτέλεσμα να είναι πολύπλοκη και να μην μπορεί να περιγραφεί με γενικές διαφορικές εξισώσεις ροής αφού κάθε ιδιαίτερο σύστημα έχει τη δική του ιδιότυπη συμπεριφορά.

4.4 Αίτια Δημιουργίας της Υφαλμύρωσης

Τα αίτια της υφαλμύρωσης των υδροφόρων οριζόντων είναι πολλά. Τα σημαντικότερα απ’ αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Μικρό υδραυλικό φορτίο (μικρή πιεζομετρία) και διάχυση

- Η αύξηση του πληθυσμού της Γης
- Η άνοδος του βιοτικού επιπέδου
- Οι κλιματικές μεταβολές
- Οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας

4.4.1 Μικρό Υδραυλικό Φορτίο και Διάχυση

Κύρια αιτία για την υφαλμύρωση των υπόγειων νερών, όπου στις περισσότερες περιπτώσεις παράκτιων υδροφορέων είναι δεδομένη από τη φύση, αποτελεί η ύπαρξη χαμηλής πιεζομετρίας, δηλαδή η ανάπτυξη πολύ μικρού υδραυλικού φορτίου που αποτελεί την κινητήρια δύναμη των υπόγειων νερών προς τη θάλασσα.

Με αυτό το δεδομένο, η όποια φυσική ή και ανθρωπογενής δράση που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση του υδραυλικού φορτίου, αποτελεί αφορμή για ανύψωση της διεπιφάνειας γλυκού - αλμυρού νερού, δηλαδή αφορμή προσέγγισης της υφάλμυρης ζώνης στην επιφάνεια του εδάφους.

Κύριες φυσικές δράσεις που αποτελούν αφορμές ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών είναι η μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Αμφότερες αυτές οι δράσεις έχουν να κάνουν με κλιματικές αλλαγές και είναι ελάχιστα ή καθόλου επηρεαζόμενες από τον άνθρωπο. Βεβαίως, αλλαγές στη στάθμη της θάλασσας μπορεί να προκληθούν και από γεωλογικές μεταβολές.

Οι ανθρώπινες δράσεις που προκαλούν αφορμές προς την ίδια αρνητική κατεύθυνση, δηλαδή ελάττωση των υδραυλικών φορτίων, είναι κατά κύριο λόγο οι υπεραντλήσεις υπόγειων νερών, καθώς και όλα τα είδη τεχνικών έργων που λειτουργούν αποστραγγιστικό (π.χ. αποστραγγιστικό δίκτυα σε δέλτα ποταμών και σε παραθαλάσσιες πεδινές ζώνες). Χαρακτηριστικά

παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν τα αποστραγγιστικά και αντιπλημμυρικά έργα στο Δέλτα του Νέστου.

Εξίσου αρνητικό αποτέλεσμα έχουν τα οποιασδήποτε μορφής ανθρώπινα έργα που προκαλούν ελάττωση της κατείσδυσης από την επιφάνεια του εδάφους και της διήθησης από τις κοίτες των ποταμών και χειμάρρων.

Αρνητικό, τέλος, ρόλο μπορούν να διαδραματίσουν και τεχνικά έργα που προκαλούν ανάσχεση της υπόγειας ροής (υπόγεια διαφράγματα, βαθιές θεμελιώσεις, υπόγεια τεχνικά έργα κ.α.).

4.4.2 Αύξηση του Παγκόσμιου Πληθυσμού

Είναι γνωστό ότι ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται κατά 8 εκατομμύρια το μήνα περίπου, που αντιστοιχεί σε 96 εκατομμύρια το χρόνο. Με βάση τα δεδομένα αυτά, έχουν διαμορφωθεί τρεις εναλλακτικές προοπτικές, τα γνωστά και ως σενάρια σχετικά με την μελλοντική αύξηση του πληθυσμού της Γης.

Σύμφωνα, λοιπόν, με την πιθανότερη προοπτική, το 2050 ο πληθυσμός της γης θα φθάσει τα 10 δισεκατομμύρια, ενώ σύμφωνα με την πλέον απαισιόδοξη προοπτική θα φθάσει τα 12,5 δισεκατομμύρια. Οι αριθμοί αυτοί παίρνουν άλλες διαστάσεις όταν ληφθεί υπόψη ότι το 1930 ο πληθυσμός της Γης δεν ξεπερνούσε τα 2 δισεκατομμύρια και το 1975 τα 4 δισεκατομμύρια.

Εάν στους προηγούμενους αριθμούς λάβουμε υπόψη και το φαινόμενο της αστυφιλίας, τότε γίνεται αντιληπτό ότι οι απαιτήσεις σε νερό θα είναι πολύ μεγαλύτερες με τις ανάλογες επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές.

4.4.3 Άνοδος του Βιοτικού Επιπέδου

Είναι γνωστό ότι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που δέχεται η Γη ανέρχονται σε 525.000 km^3 ετησίως. Από τις τεράστιες αυτές ποσότητες, αν αφαιρέσουμε αυτές που πέφτουν στη θάλασσα, αυτές που εξατμίζονται κλπ

υπολογίζεται ότι μόνον 9.000 km^3 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν από τον άνθρωπο.

Με την παραδοχή ότι μετά από μερικές δεκαετίες η μέση κατανάλωση ύδατος των κατοίκων της Γης θα είναι ανάλογη με εκείνη του μέσου Καναδού πολίτη, έχει υπολογιστεί ότι η ανθρωπότητα θα χρειάζεται πολύ περισσότερο κατάλληλο νερό από αυτό που διαθέτει συνολικά η φύση.

4.4.4 Μεταβολή του Κλίματος

Είναι γνωστό ότι το κλίμα μεταβάλλεται, ενώ τα αποτελέσματα των ερευνών των τελευταίων 10ετιών απέδειξαν τα ακόλουθα πολύ σημαντικά:

- το κλίμα μεταβάλλεται περιοδικά

- πέραν των γνωστών μεγάλων κλιματικών περιόδων υπάρχουν και μικρότερες περίοδοι, όπως περίοδοι των 500 ετών και άλλες των 90-120 ετών. Η τελευταία, σύμφωνα με τους JINJYN JI., et al. (1993), χαρακτηρίζεται ως ψευδοκύκλος.

4.5 Επιπτώσεις της Υφαλμύρωσης

Γενικά το υφάλμυρο νερό χαρακτηρίζεται ακατάλληλο τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση, ενώ αρνητικές είναι και οι επιπτώσεις του στην υγεία των καταναλωτών.

Από υδρευτικής άποψης, για τις περιοχές που είναι τουριστικές, με μεγάλο αριθμό εποχικών επισκεπτών και αυξημένες υδρευτικές απαιτήσεις, που καλύπτονται από τα υπόγεια νερά, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφορέων καθιστά προβληματική και ελλειμματική την ύδρευση. Η έλλειψη αυτή οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω των δαπανηρών λύσεων (εμφιαλωμένο νερό, έργα υδροδότησης κ.α.) ή στην υποβάθμιση του

βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Αύξηση του κόστους ζωής, αλλά και των εγγενών δυσκολιών παρατηρείται και για τους τουρίστες με αποτέλεσμα τη μείωση της δυναμικής οικονομικής εκμετάλλευσης της περιοχής, μείωση της εισροής νέων επενδυτικών κεφαλαίων και του αριθμού των τουριστών, αφού καθίσταται λιγότερο ανταγωνιστική συγκρινόμενη με άλλες τουριστικές περιοχές.

Από αρδευτικής άποψης, τα προβλήματα που προκαλούνται είναι πολλαπλά, διότι παρουσιάζεται έλλειψη επαρκούς ποσότητας νερού, λόγω της έλλειψης έργων υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης, όπως τα έργα εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδατικών πόρων, γεγονός που οδηγεί στην ποσοτικά ελλειμματική άρδευση και στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο ή ακάθαρτο νερό, με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την πτώση της αξίας της γης, την αύξηση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων, τη μείωση της ανταγωνιστικότητάς τους, τη μείωση του αριθμού των πωλήσεων, τη μείωση των εισοδημάτων των αγροτών και την υποβάθμιση του βιοτικού τους επιπέδου.

Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών αναγκάζει τους καλλιεργητές, είτε να αντισταθμίζουν ποσοτικά (χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό) την ποιοτική υποβάθμιση του νερού, είτε να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα και δραστικότερα βελτιωτικά λιπάσματα. Το γεγονός της αύξησης των εξόδων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του εισοδήματός τους ή στην προσπάθεια αποκατάστασης των εσόδων τους, την αύξηση της τιμής των προϊόντων που μειώνει την ανταγωνιστικότητά τους. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να οδηγήσει τους κατοίκους να επιλέξουν ως απασχόλησή τους την τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους, η οποία είναι και άμεσα αποδοτική, παρά τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν και όχι την παραδοσιακή γεωργική ανάπτυξη, η οποία είναι επισφαλής αλλά και απαιτεί μεγάλης κλίμακας έργα για την εξασφάλιση ικανών ποσοτήτων αρδευτικού νερού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης (περίπου 15% την τελευταία δεκαετία) και την επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης.

Τέλος, στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο, λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας, προκαλεί σημαντικά προβλήματα στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως αύξηση των ρυθμών εμφάνισης βλαβών με επακόλουθη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, μείωση της παροχετευτικής ικανότητας των αγωγών, αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητάς του.

4.6 Προβλήματα Υφαλμύρωσης στα Ελληνικά Νησιά

4.6.1 Κρήτη

Η Κρήτη αποτελεί στο σύνολό της μια αυτόνομη υδρογεωλογική και υδρολογική ενότητα με πλούσιο υδατικό δυναμικό. Εξετάζοντας τις εν γένει υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, βλέπει κανείς ότι αποτελούν ένα σύνολο από επί μέρους ενότητες και λεκάνες, όπου κάθε μία απ' αυτές έχει τα δικά της χαρακτηριστικά (λειτουργικά και ποσοτικά).

Το υδατικό δυναμικό της Κρήτης οφείλεται κατ' αρχήν στο υψηλό μέσο ετήσιο ύψος βροχής (περίπου 940 mm) και αναφέρεται σε επιφανειακά νερά και σε υπόγεια νερά. Στα επιφανειακά νερά είναι αυτά της επιφανειακής απορροής, η οποία λόγω των κλιματικών συνθηκών περιορίζεται μόνο την χειμερινή περίοδο, δηλαδή εξαρτάται άμεσα από την διάρκεια και το ύψος των βροχοπτώσεων. Οι υπόγειες υδροφορίες στο σύνολό τους είναι πλούσιες, εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι αυτές που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα, δηλαδή οι καρστικές υδροφορίες όπως αναφέρονται παρακάτω.

Την δυναμικότητα των καρστικών υδροφοριών της Κρήτης προσδιορίζει καταρχήν το γεγονός ότι ένα ποσοστό 45 - 50 % της επιφάνειας του νησιού καλύπτεται από ανθρακικά εν γένει πετρώματα. Επιπλέον, υπάρχουν και έτερα θετικά στοιχεία, όπως αυτό ότι οι πλείστοι ορεινοί όγκοι οι οποίοι δέχονται αυξημένες βροχοπτώσεις λόγω του υψομέτρου δομούνται από ανθρακικά πετρώματα. Έχουμε, δηλαδή, μεγάλες επιφάνειες όπου

κατεισδύουν τα νερά της βροχής και των χιονιών, ως και μεγάλους όγκους από αυτά τα πετρώματα εντός των οποίων αναπτύσσονται οι αντίστοιχες υπόγειες υδροφορίες.

Αρνητικό στοιχείο των καρστικών υδροφοριών της Κρήτης είναι η ανάπτυξη υφάλμυρων μετώπων που έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα την υφαλμύρωση αντίστοιχα των υπόγειων νερών.

Τα αίτια της ανάπτυξης των υφάλμυρων μετώπων οφείλονται στις γεωλογικές συνθήκες της Κρήτης και σε τεκτονικούς παράγοντες (σε ρήγματα, κινήσεις της θάλασσας κ.ά.), όπως επίσης και στην μορφολογία γενικά της Κρήτης (μικρό πλάτος, γειτνίαση και επαφή των ανθρακικών πετρωμάτων με την θάλασσα).

Πρόκειται, επομένως, για μία διαμορφωμένη κατάσταση στην οποία δεν έχει παρέμβει δυσμενώς ο άνθρωπος. Στην Κρήτη, όπου οι ανάγκες και οι απαιτήσεις σε νερό αυξάνουν χρόνο με τον χρόνο, το κεφάλαιο αυτό είναι σημαντικό και άκρως ενδιαφέρον, καθότι μειώνει αισθητά τις ποσότητες του άμεσα χρησιμοποιούμενου νερού από την άποψη της καλής ποιότητας.

Σε όλα τα παράλια της Κρήτης αναβλύζουν υφάλμυρες πηγές, η περιεκτικότητα των οποίων σε χλωριόντα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Πιο αξιόλογες είναι αυτές, ασφαλώς, οι πηγές που συνδέονται υδρογεωλογικά με τους μεγάλους ορεινούς όγκους. Είναι αυτές που παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο θεωρητικό και επιστημονικό και πρακτικό ενδιαφέρον. Ενδεικτικά, παρακάτω αναφέρονται μερικές γνωστές υφάλμυρες πηγές της Κρήτης (Πίνακας 4.1).

Εκτιμάται ότι από τις υφάλμυρες πηγές εκρέει μία ποσότητα νερού της τάξης $1{,}10^9$ m^3 ετησίως προς την θάλασσα. Αν αυτή η ποσότητα του νερού μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, το όφελος για την Κρήτη θα ήταν πολύ μεγάλο.

Οι ανάγκες, λοιπόν, της Κρήτης όπως και η διορατικότητα ορισμένων ανθρώπων για το μέλλον έδωσαν την αρχή της λύσης του προβληματισμού για την δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των «άχρηστων νερών». Κάθε πηγή έχει δικό της μηχανισμό λειτουργίας, άρα απαιτείται και η ανάλογη αντιμετώπιση της προκειμένου να διερευνηθούν κατ' αρχάς, αν υπάρχουν οι δυνατότητες αξιοποίησης. Για την αξιοποίηση, λοιπόν, αυτών των υπόγειων νερών, δηλαδή για την εξασφάλιση καλής ποιότητας νερού, τηρούνται γενικά ορισμένες προσεγγίσεις όπως:

- γεωτρήσεις στον κοντινό χώρο των εκροών
- γεωτρήσεις στον ευρύτερο χώρο των μετώπου
- διάνοιξη υδρομαστευτικών στοών
- δημιουργία αυξημένου υδραυλικού φορτίου με την κατασκευή φράγματος, όπως π.χ. στον Αλμυρό Ηρακλείου.

Επίσης, ανάλογα με την ανάβλυση της πηγής είναι η αντίστοιχη κατ' αρχάς αντιμετώπιση, αν δηλαδή υπάρχει ένα μέτωπο εκροών ή ένα σημείο εκροής με σπηλαιώδεις ή μη μορφές.

- Ο Αλμυρός π.χ. του Αγ.Νικολάου έχει ένα μέτωπο εκροών σε υψόμετρα περίπου 0,5m~1m ενώ ο Αλμυρός Ηρακλείου εκρέει από μία σπηλαιώδη μορφή με υψόμετρο περίπου 10m.
- Ο Σίφουνα του Μπαλί εκ ρέει επίσης από σπηλαιώδη μορφή σε βάθος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Το ζητούμενο, λοιπόν, είναι η εξασφάλιση από αυτά τα συστήματα νερού καλής ποιότητας (πριν αυτό υφαλμυρωθεί) και με αυτή την λογική έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες σε τρία συστήματα της Κρήτης:

- Στην πηγή Αλμυρού του Ηρακλείου (η οποία συνδέεται με το καρστικό υδροσύστημα του Ψηλορείτη).

- Στην πηγή Αλμυρού Αγ.Νικολάου ο οποίος συνδέεται με το καρστικό υδροσύστημα της Δίκτης.
- Στην πηγή Μαλάβρας η οποία συνδέεται με το καρστικό υδροσύστημα της Θρύπτης.

Πίνακας 4.1: Κυριότερες υφάλμυρες πηγές στην Κρήτη.

Α/Α	Πηγή	Καρστικό Σύστημα	Μέση Παροχή (m^3/sec)	Περιεκτικότητα Χλωριώντων
1	Πλάτανου Κισσάμου	~	Q=0,5	~
2	Αλμυρός Γεωργιούπολης	Λευκά Όρη	Q=2-3	Cl=1000 PPM
3	Περαστικό Γεωργιούπολης	Λευκά Όρη	Q=5	Cl=4000 PPM
4	Αγ. Κυριακή Γεωργιούπολης		Q=1-2	Cl=10000 PPM
5	Βλυχάδα	Λευκά Όρη	~	Cl=2500 PPM
6	Πηγές Νότιας Ακτής Λευκά Όρη	Λευκά Όρη	~	~
7	Πηγές Μπαλί	Ψηλορείτης-Ταλέα Όρη	~	~
8	Αλμυρός Ηρακλείου	Ψηλορείτης	Q=6	Cl=100 PPM
9	Αλμυρός Αγ. Νικολάου	Δικτή	Q=2	Cl=3000 PPM
10	Μαλίων	Δικτή	Q=0,5	Cl=2000 PPM
11	Ελούντα	~	Q=0,2-0,5	Cl=2000 PPM
12	Μάλαβρα Λασιθίου	Θρύπτη	Q=1-1,5	Cl=600 PPM

4.6.2 Ευρύτερη Περιοχή Αιγαίου

Σε παράκτιες ζώνες λεκανών νησιών του Νοτίου και ΝΑ Αιγαίου (Καλύμνου, Πάρου κλπ.), αναπτύσσονται υπόγειοι υδροφόροι, τα νερά των οποίων χρησιμοποιούνται συστηματικά εδώ και δεκαετίες (30 περίπου χρόνια) για τη κάλυψη κυρίως υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. Μέσα στις ζώνες αυτές κατοικεί μόνιμα το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού των νησιών αυτών, ενώ

παράλληλα αναπτύσσονται οι περισσότερες δραστηριότητες (και τουριστικές) των κατοίκων της.

Οι ανθρακικοί σχηματισμοί των λεκανών αυτών, έχουν τύχει εντατικής εκμετάλλευσης, από τη στιγμή που ανορύχθηκαν υδρογεωτρήσεις για την απόληψη των υπόγειων νερών. Η παντελής έλλειψη ορθολογικής εκμετάλλευσης των υπόγειων υδροφόρων των λεκανών, έχει προκαλέσει σε λίγα χρόνια (10 - 15) εκτεταμένη θαλάσσια διείσδυση (εισβολή) στους περισσότερους εκ των παρακτίων αυτών υδροφόρων, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των νερών τους.

Εκτιμάται σήμερα ότι αυτή η διείσδυση καλύπτει, στις περισσότερες των περιπτώσεων, μερικά τετραγωνικά χιλιόμετρα επιφανειών, μέσα στις οποίες τα υπόγεια νερά έχουν περιεκτικότητα σε α μεγαλύτερη και από 1500 mg/l. Το γεγονός αυτό έχει δημιουργήσει πολλά προβλήματα στα δίκτυα ύδρευσης, σε οικιακές συσκευές, αλλά το κυριότερο είναι ότι η χρήση αυτού του νερού, γίνεται σχεδόν απαγορευτική για τους περισσότερους τομείς, για τους οποίους προορίζεται (Πόθεια, Νάουσα, Ερμής).

Η ριζική και άμεση αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, εντοπίζεται αφενός στη δρομολόγηση υδροληπτικών έργων, που θα εξασφαλίσουν τις ανάγκες σε νερό καλής ποιότητας και αφετέρου θα στηρίζονται στην ολοκληρωμένη γνώση της υδροδυναμικότητας των υδρολογικών συστημάτων, απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή διαχείρισή τους.

Στο γενικό πλαίσιο του σχεδίου ανάπτυξης του κοινοτικού χώρου, ένα από τα στρατηγικά ζητήματα είναι η δυνατότητα υδροδότησης, που επιτρέπει με επαρκείς εγγυήσεις τις ανθρώπινες δραστηριότητες, δηλαδή, την ισορροπημένη ανάπτυξη των διαφόρων περιφερειών. Η λύση αυτού του προβλήματος γίνεται όλο και πιο δύσκολη σε περιοχές επιρρεπείς στην ξηρασία (όπως π.χ. τα νησιά του Νοτίου – ΝΑ Αιγαίου), φυσικό φαινόμενο με αυξανόμενη συχνότητα εμφάνισης, μια και αυξάνεται η κατανάλωση νερού. Η ζήτηση νερού συνεχίζει να αυξάνεται και χαρακτηρίζεται, επίσης, σε πολλές

περιπτώσεις από το γεγονός, ότι δεν συνδέεται απαραίτητα με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στις περιοχές αυτές. Έτσι, λοιπόν, και σύμφωνα με τα παραπάνω, δημιουργούνται έντονες πιέσεις για την υδροδότηση των διαφόρων χρήσεων, από την ύδρευση που είναι χρήση προτεραιότητας, μέχρι τις διάφορες άλλες χρήσεις (ποτιστικές καλλιέργειες, τουριστική δραστηριότητα κλπ.), χωρίς φυσικά να παραμελούνται οι ανάγκες του ίδιου του φυσικού περιβάλλοντος, που αποτελούν όλο και περισσότερο κοινωνική απαίτηση (Jean Lopez Martos, 1998).

Τα νησιά του Νοτίου - ΝΑ Αιγαίου, είναι μια από τις πλέον χαρακτηριστικές περιοχές της Μεσογείου με ελάχιστες βροχοπτώσεις και παρατεταμένη ξηρασία σε μεγάλες περιόδους κατά έτος, όπου τα προβλήματα έλλειψης νερού και υφαλμύρωσης είναι εμφανή και έντονα. Η δημιουργούμενη κατάσταση είναι σοβαρή και θα συνεχίσει να είναι σοβαρή και μελλοντικά, δεδομένου ότι προβλέπεται αύξηση της ζήτησης του νερού για τα επόμενα χρόνια (συνεχής τουριστική ανάπτυξη, μεγάλα ξενοδοχειακά συγκροτήματα, μαρίνες κλπ., υδροβόρες δραστηριότητες).

Μέσω των ερευνών που κάνει το ΙΓΜΕ, που εδώ και μερικά χρόνια (1984) πραγματοποιεί υδρογεωλογική έρευνα στα νησιά αυτά, εκπονεί μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα με ομάδα επιστημόνων του, για να δώσει απαντήσεις στο κρίσιμο θέμα της αξιοποίησης - διαχείρισης του υδατικού δυναμικού τους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία για συγκεκριμένες υδρολογικές λεκάνες σε διάφορα νησιά του Αιγαίου:

- ✓ **Υδρογεωλογική Λεκάνη Ερμούπολης Σύρου**

Η λεκάνη αυτή έχει έκταση 4,5 km^2. Για τις γεωργικές δραστηριότητες από κατοίκους της περιοχής γίνεται απόληψη νερού από τις ιδιωτικές υδρογεωτρήσεις. Παράλληλα, γίνεται απόληψη νερού από τις δύο υδρογεωτρήσεις του Δήμου, προς ενίσχυση του δικτύου ύδρευσης, ενώ η απόσταση από τη θάλασσα των δύο υδρογεωτρήσεων είναι 1450 m.

Παρατηρήθηκε, λοιπόν, εκτεταμένη θαλάσσια διείσδυση, η οποία εισέβαλε περίπου 1,5 km μέσα στη λεκάνη με άμεσο αποτέλεσμα την ποιοτική καταστροφή του υδρολογικού συστήματος, εξαιτίας του ότι διαταράχθηκε η υδροδυναμική ισορροπία από τις υπεραντλήσεις, κυρίως στις δημοτικές υδρογεωτρήσεις (παροχή μεγαλύτερη των 15 m^3/h αντί των 5 m^3/h). Όμως, μετά τη διακοπή των εντατικών αντλήσεων και την αντικατάστασή τους με πρόγραμμα άντλησης ήπιων ρυθμών, παρατηρήθηκε θεαματική βελτίωση της ποιότητας του νερού και αποκατάσταση ως ένα βαθμό του διαταραχθέντος καθεστώτος γλυκού - αλμυρού νερού, σε σχετικά μικρό διάστημα.

- ✓ **Υδρογεωλογική Λεκάνη Νάουσας Πάρου**

Ο χείμαρρος Ξηροπόταμος είναι αυτός που αποστραγγίζει τη λεκάνη μονής Θάψανης και Μαραθίου και καταλήγει στο Βόρειο μέρος του νησιού, τη Νάουσα. Ο χείμαρρος αυτός συγκεντρώνει τον χειμώνα αξιόλογες ποσότητες νερού από τις ορεινές περιοχές (Άγιοι Πάντες), όπου οι βροχοπτώσεις είναι υψηλότερες απ' ό, τι στα πεδινά. Από τις ποσότητες αυτές, τροφοδοτούνται τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα της κοιλάδας Καντινελιάς που καταλήγει στη Νάουσα. Το σπουδαιότερο υδροφόρο σύστημα στην Πάρο, είναι αυτό της πηγής Νάουσας, που προεκτείνεται στη χαμηλή περιοχή Μαραθίου - Κώστου - Ιστερνίου. Στη περιοχή αυτή υπάρχει ένα ενιαίο καρστικό υδροφόρο στρώμα, του οποίου η στάθμη της επιφάνειας βρίσκεται ελάχιστα μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο υδροφόρος αυτός ορίζοντας, είναι ο ορίζοντας της Νάουσας. Η λεκάνη τροφοδοσίας έχει έκταση 20 km^2 περίπου.

Οι γεωργικές δραστηριότητες από τους κατοίκους, αλλά παράλληλα και οι τουριστικές δραστηριότητες, είναι ιδιαίτερα υδροβόρες, εξαιτίας της κατασκευής και λειτουργίας μεγάλου αριθμού ξενοδοχείων και ενοικιαζομένων διαμερισμάτων. Απαριθμείται μεγάλος αριθμός πηγαδιών στα πεδινά (κατασκευασμένα εντός του προσχωματικού τμήματος της λεκάνης) και παράλληλα υπάρχουν και υδρογεωτρήσεις ιδιωτικές και δημοτικές εντός του καρστικού συστήματος.

Οι ανάγκες σε νερό κατά τη διάρκεια της τουριστικής αιχμής φτάνουν τα 1500 m^3, αλλά η κατανάλωση κατά την περίοδο αυτή ξεπερνά τα 3.000 m^3 το 24ωρο, με συνέπεια την επέλαση του θαλασσινού νερού στους υδροφόρους ορίζοντες. Η διείσδυση αυτή βρίσκεται πέραν του 1 km από την κυματογή, με αποτέλεσμα το νερό της πηγής, αφενός να έχει επικίνδυνα υποβαθμιστεί (ιόντα Na^+, Cl^-, SO_4^{-2} διπλασιάστηκαν τα τελευταία 2 χρόνια), τα δε νερά των δημοτικών υδρογεωτρήσεων έχουν υποστεί ανάλογη βλάβη, με αποτέλεσμα να βρίσκονται εκτός ορίων ποσιμότητας.

Η πηγή της Νάουσας εμφανίζεται 150 m νότια της ακτής. Το νερό της πηγής μέχρι πρότινος ήταν ελαφρώς υφάλμυρο (600 mg/l χλωριόντων) και χρησιμοποιούνταν για άρδευση από τους καλλιεργητές. Τα τελευταία δύο χρόνια η αλατότητα αυξήθηκε επικίνδυνα, εξαιτίας των υπεραντλήσεων των ιδιωτικών αλλά και των δημοτικών υδρογεωτρήσεων μέσης παροχής 10 έως και 40 m^3/h αντίστοιχα.

- ✓ **Λεκάνη Πόθειας Καλύμνου**

Η έκταση της Λεκάνης είναι περίπου 15 km^2. Στην παράκτια ζώνη της λεκάνης Πόθειας, αναπτύσσονται υπόγειοι υδροφορείς, τα νερά των οποίων χρησιμοποιούνται συστηματικά εδώ και δεκαετίες για την κάλυψη κυρίως υδρευτικών αναγκών και αναγκών οικιακής χρήσεως. Στη ζώνη αυτή (αστική περιοχή) κατοικεί μόνιμα το 70% του πληθυσμού της νήσου Καλύμνου και παράλληλα αναπτύσσονται οι περισσότερες δραστηριότητες των κατοίκων της. Οι ανάγκες σε νερό είναι της τάξης των 4000 m^3/ 24ωρο. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί, οι οποίοι είναι μεσοζωϊκά πετρώματα δύο τεκτονικών ενοτήτων, έτυχαν εντατικής εκμετάλλευσης από την στιγμή που ανορύχθηκαν υδρογεωτρήσεις (10 Δημοτικές, για την απόληψη των υπόγειων νερών). Το αποτέλεσμα ήταν να παρατηρηθεί εκτεταμένη θαλάσσια διείσδυση, η οποία εισβάλλει τουλάχιστον 2 km εντός της λεκάνης και η οποία καλύπτει σημαντική επιφάνειά της. Αυτό συνέβη λόγω της παντελούς έλλειψης ορθολογικής εκμετάλλευσης των υδροφόρων ανθρακικών στρωμάτων, μέσω

των υδρογεωτρήσεων (αλόγιστη απόληψη νερού από τα μέσα της 10ετίας του 1980).

Η πρώτη κατηγορία του υδρογεωλογικού συστήματος (κοκκώδες σύστημα), έχει υποστεί ολική καταστροφή, ποιοτική και ποσοτική, εξαιτίας του ότι παραμορφώθηκε η υδροδυναμική ισορροπία με τη θάλασσα για δύο λόγους:

- Υπεραντλήσεις
- μείωση του συντελεστή κατείσδυσης (αδύνατη σχεδόν η επανατροφοδοσία τους, εξαιτίας της οικιστικής κάλυψης και της τσιμεντοποίησης των υδρορευμάτων).

Ο πρώτος λόγος, επιδέχεται επέμβασης, αλλά ο δεύτερος λόγος δεν μπορεί να αναστραφεί εξαιτίας του αντικειμένου.

Η δεύτερη κατηγορία του υδρογεωλογικού συστήματος, δηλ οι ανθρακικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από τα εξής:

- άμεση (εύκολη) κατείσδυση μεγάλων ποσοτήτων νερού, αλλά και ταχύτατη εκροή στη θάλασσα (στις παράκτιες περιοχές αποδέκτης της εκροής, είναι η θάλασσα). Το γεγονός αυτό είναι το αρνητικό τους στοιχείο, συσχετίζοντάς το με την αποθηκευτική τους ικανότητα.
- Όλες οι δημοτικές υδρογεωτρήσεις ανορύχθηκαν στους προαναφερόμενους ανθρακικούς σχηματισμούς (από τα μέσα της δεκαετίας του 1960).
- Η δημοτική υδρογεώτρηση Ρότσου, η οποία βρίσκεται υπό συνεχή παρατήρηση και είναι κατασκευασμένη εντός της μολυσμένης ζώνης, από τη στιγμή που άρχισε να αντλείται με ήπιους ρυθμούς (δηλαδή με μικρή ωριαία παροχή και με διακοπές μεταξύ δύο διαδοχικών αντλήσεων) είχε μία θεαματική βελτίωση στην περιεκτικότητα κατιόντων - ανιόντων, δηλαδή μια εμφανή αποκατάσταση του

διαταραχθέντος καθεστώτος, γλυκού - αλμυρού νερού. Η περιεκτικότητα σε Na^+ και Cl^- είναι αντίστοιχα της τάξης των 30 και 60 mg/l, η δε αγωγιμότητα στους 250 C της τάξης των 500 μS/cm, η δε ολική σκληρότητα της τάξης των 180 mg/l, ενώ όταν η γεώτρηση βρισκόταν κάτω από καθεστώς υπεράντλησης όλες οι παραπάνω τιμές ήταν της τάξης χιλιάδων mg/l και οι τιμές τους δεν διέφεραν από τις σημερινές τιμές που παρουσιάζουν σήμερα οι υπόλοιπες υπεραντλούμενες δημοτικές υδρογεωτρήσεις.

- ✓ **Λεκάνη Βαθέος Καλύμνου**

Η λεκάνη του Βαθέος είναι ένα βύθισμα που δημιουργήθηκε από την επίδραση ρηγμάτων ΒΔ - ΝΔ διεύθυνσης. Η έκταση της λεκάνης είναι περίπου 21 km^2. Τα ανθρακικά πετρώματα καταλαμβάνουν έκταση 16,5 km^2 (78,5%), ενώ τα μη ανθρακικά καταλαμβάνουν έκταση 4,5 km^2 (21,5%). Στην έξοδο της λεκάνης εκδηλώνεται η καρστική υφάλμυρη πηγή της Ρήνας (50 m από την ακτή) με μέση τιμή παροχής 17,5 l/sec (1500 m^3/ 24ωρο). Η πηγή της Ρήνας αποτελεί το σπουδαιότερο υδροφόρο σύστημα της Καλύμνου (Φ. Χαρμανίδης).

4.7 Μοντέλα Προσομοίωσης Παράκτιων Υδροφορέων

Μία τεχνική η οποία ακολουθείται για την προσέγγιση των προβλημάτων υφαλμύρωσης είναι η εφαρμογή μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης κατά τη διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων.

Για την αντιμετώπιση, λοιπόν, των προβλημάτων ροής των υπόγειων νερών, απαιτούνται αφενός εξειδικευμένες γνώσεις ενός ιδιαίτερα δυσχερούς φαινομένου, όπως είναι η υφαλμύρωση, και αφετέρου δυνατότητα χρήσης μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων και προσαρμογής των τεχνικών αυτών στις απαιτήσεις του υπό εξέταση προβλήματος.

Η μαθηματική προσομοίωση αποτελεί για τον μελετητή ένα δυναμικό εργαλείο που διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ορθή διαχείριση υπόγειων υδροφορέων και επιτρέπει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους για διάφορες υποθετικές καταστάσεις (σενάρια). Οι εφαρμοσμένες αυτές μαθηματικές προσομοιώσεις είναι χρήσιμες επίσης στις αναγνωριστικές έρευνες, σε φάσεις προκαταρκτικής μελέτης ή προμελέτης ενός έργου, για την ερμηνεία της συμπεριφοράς υδροφορέα μετά από μετρήσεις πεδίου.

Βασική προϋπόθεση, όμως, για τα ανωτέρω είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μαθηματική προσομοίωση και την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου υπολογιστικού προγράμματος πρέπει να είναι “σωστά”, δηλαδή να αντιπροσωπεύουν πράγματι τον υπό μελέτη υδροφορέα. Η εκπόνηση, συνεπώς, αξιόπιστων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων είναι αναγκαία.

Ιδιαίτερη σημασία στις εφαρμοσμένες μαθηματικές προσομοιώσεις έχουν οι μετρήσεις πεδίου, οι οποίες έχουν διπλό ρόλο, επιτρέπουν την βαθμονόμηση του μοντέλου και χρησιμεύουν για την επαλήθευσή του και συνεπώς την αύξηση της αξιοπιστίας του. Σε συνδυασμό με την οικονομική δαπάνη που συνεπάγεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου, είναι αντιληπτή η σημασία που έχει ο σωστός σχεδιασμός τους.

Η ορθή εφαρμογή μοντέλων ροής, όπως ο κώδικας MODFLOW, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης και στην καλύτερη εφαρμογή των μεθόδων παρεμπόδισης παρέχοντας πληροφορίες οι οποίες θα ήταν αδύνατο να ληφθούν με τις κλασσικές έρευνες. Τα προηγούμενα μοντέλα μπορούν να συνδυαστούν με μοντέλα βελτιστοποίησης για να βοηθήσουν στην ανάπτυξη στρατηγικών άντλησης που θα εμποδίσουν ή θα αναστρέψουν τη διείσδυση της θάλασσας, ενώ παράλληλα θα συνεχίσει να ικανοποιείται η ζήτηση σε γλυκό νερό.

Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη προσέγγιση θεωρείται η διεπιφάνεια αλμυρού και

γλυκού νερού ως πεπερασμένου πάχους λόγω υδροδυναμικής διασποράς. Τα μοντέλα που βασίζονται σε αυτή τη θεώρηση λέγονται μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας και επιλύουν ταυτόχρονα τις εξισώσεις κίνησης του νερού και μεταφοράς ρύπων. Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, που χρησιμοποιείται όταν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σύγκριση με εκείνο του υδροφορέα. Τα μοντέλα της δεύτερης περίπτωσης ονομάζονται μοντέλα απότομης διεπιφάνειας.

Στην πρώτη περίπτωση, όπου θεωρείται η διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους, η διείσδυση του αλμυρού νερού αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης (Α. Νάνου – Γιάνναρου). Λόγω της ανάμιξης δύο υγρών επιλύεται πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς, με τη βοήθεια των εξισώσεων κίνησης του Darcy, διατήρησης μάζας και υδροδυναμικής διασποράς.

Στη δεύτερη περίπτωση, όπου θεωρείται απότομη διεπιφάνεια, το πρόβλημα έχει δύο διαστάσεις που εξαρτώνται από τις συνθήκες ροής. Σε αδιατάρακτες συνθήκες, η ροή θεωρείται μόνιμη, ενώ σε περίπτωση μη μόνιμης ροής λόγω άντλησης, γίνεται η παραδοχή της οριζόντιας κίνησης των υδάτων. Και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζονται οι εξισώσεις συνέχειας και Darcy. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, όμως, γίνεται η παραδοχή πως το μέτωπο του αλμυρού νερού έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί και δεν μετακινείται. Η προσέγγιση αυτή ισχύει σε συνθήκες που προσεγγίζουν συνθήκες μόνιμης ροής ή μετά από μεγάλους χρόνους από την έναρξη μιας μεταβολής. Σε τέτοιες συνθήκες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση των Ghyben – Herzberg η οποία περιγράφεται παρακάτω.

4.7.1 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901), ξεχωριστά, ανακάλυψαν ότι η στάθμη του θαλασσινού νερού που υπάρχει υπογείως στο έδαφος, δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας (0 μέτρα) όπως αναμενόταν, αλλά κάτω

από αυτό, σε βάθος περίπου 40 φορές μεγαλύτερο από το φορτίο του γλυκού νερού που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

Η προσέγγιση των Ghyben-Herzberg αποτελεί μία απλή αναλυτική λύση εντοπισμού της θέσης της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού. Αν και έχει αποδειχθεί πάνω από έναν αιώνα πριν, παραμένει ακόμα γενικώς παραδεκτή και τα αποτελέσματά της θεωρούνται μία έγκυρη προσέγγιση του φαινομένου. Η σχέση αυτή, που είναι ευρέως διαδεδομένη με το όνομα Ghyben-Herzberg, αποτελεί την πρώτη εξίσωση που περιγράφει την αλληλεπίδραση αλμυρού – γλυκού νερού και διατυπώνεται ως εξής:

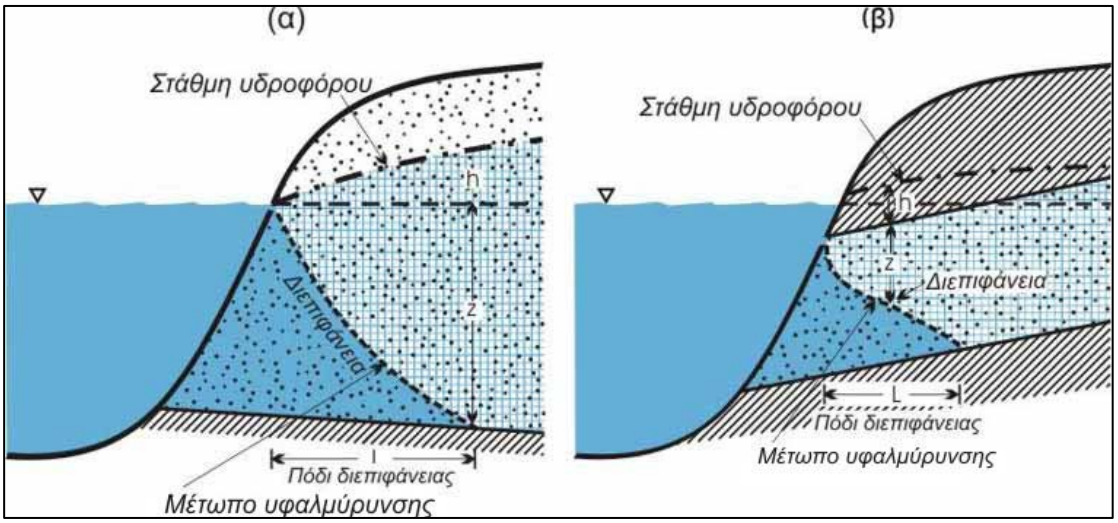
$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h \tag{4.1}$$

όπου ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού

ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού

ξ : η κάθετη απόσταση από την διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υγρών από την μέση στάθμη θάλασσας (μσθ) και

h : το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο ίδιο σημείο (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Προσέγγιση Ghyben – Herzberg (α) τομή φρεάτιου υδροφορέα, (β) τομή περιορισμένου υδροφορέα (Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.)

Η σχέση 4.1 προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η διεπιφάνεια θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit. Ακόμη, γίνεται η εσφαλμένη θεώρηση ότι το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού είναι μηδέν στο σημείο εκροής. Στην πράξη το γλυκό νερό διαφεύγει προς τη θάλασσα, οπότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κάποια πεπερασμένη επιφάνεια εκροής.

Η χρήση της εξίσωσης Ghyben - Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού ως εξής:

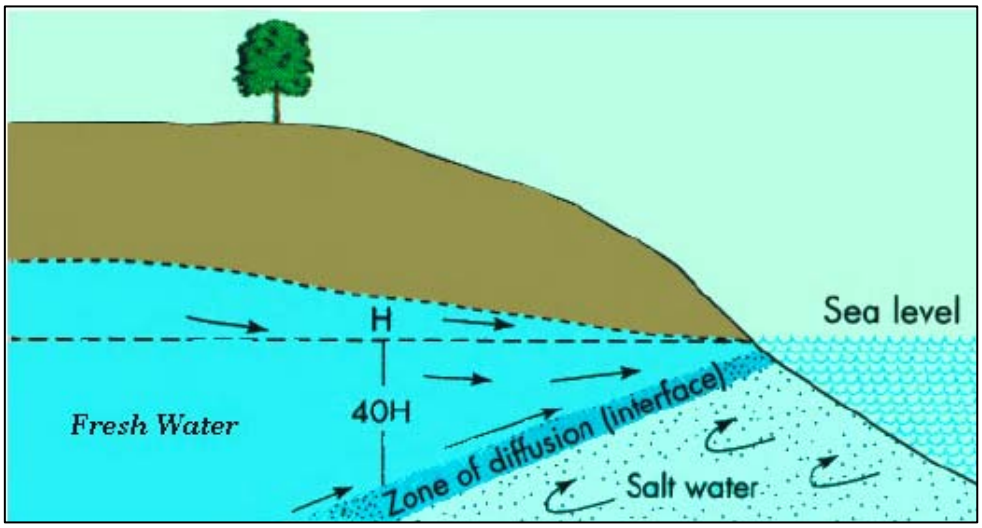
- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό.
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την προαναφερθείσα εξίσωση, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή.
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα.
- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί το πόδι της αλάτινης σφήνας.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί για περιοσμένους και φρεάτιους υδροφορείς.

Η πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας, ωστόσο, είναι διαφορετική από αυτή που παρουσιάζεται στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg, αφού:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.

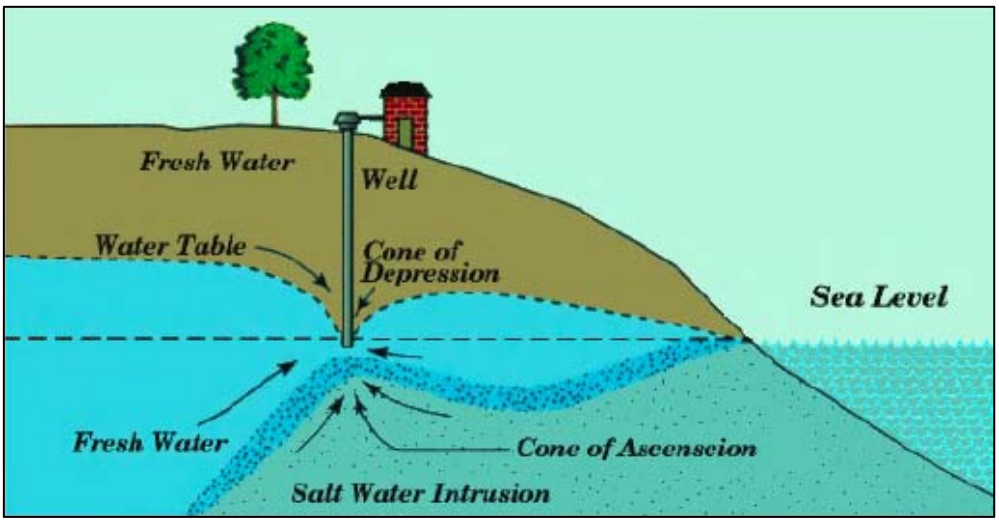
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν μπορεί να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων την επιφάνεια διήθησης (Νάνου – Γιάνναρου, 2006).

Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 φαίνεται η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας και η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή λόγω διείσδυσης της θάλασσας στους παράκτιους υπόγειους υδροφορείς, αντίστοιχα, σύμφωνα με το νόμο των Ghyben-Herzberg.



Σχήμα 4.4: Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας

Με τον τρόπο αυτό γίνεται κατανοητό πως εάν υπάρξει μία πτώση στάθμης μέχρι το επίπεδο της θάλασσας, τότε η τιμή του h θα είναι μηδενική και κατ' επέκταση το βάθος z του γλυκού νερού θα είναι και αυτό μηδενικό, δηλαδή θα υπάρχει μόνο θαλασσινό νερό.



Σχήμα 4.5: Η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή

4.7.2 Προσεγγίσεις Muskat και Hubert

Στα τέλη της δεκαετίας του 1930 οι εργασίες των Muskat (1937) και Hubert (1940) συνεισέφεραν σημαντικά στην κατανόηση της δυναμικής της διεπιφάνειας. Συγκεκριμένα απέδειξαν ότι η πίεση θα πρέπει να είναι συνεχής, χωρίς απότομες μεταβολές, στο πεδίο ροής κατά μήκος της διεπιφάνειας. Έτσι, η διεπιφάνεια μπορεί να θεωρείται ως οριακή συνθήκη μεταξύ δύο διαφορετικών πεδίων ροής. Τα πιεζομετρικά φορτία στις ζώνες αλμυρού και γλυκού νερού h_s και h_f αντίστοιχα, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z \tag{4.2}$$

$$h_f = \frac{p}{\rho_f g} + z \tag{4.3}$$

όπου z είναι το υψόμετρο του σημείου στο οποίο μετράται η πίεση σε σχέση με ορισμένο επίπεδο αναφοράς, p είναι η πίεση των πόρων, h_s και h_f είναι η πυκνότητα αλμυρού και γλυκού νερού αντιστοίχως και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Οι εξισώσεις 4.2 και 4.3 μπορούν να διατυπωθούν για ένα τυχαίο σημείο της διεπιφάνειας. Με απαλοιφή της πίεσης από τις δύο εξισώσεις προκύπτει:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_f - \rho_s} h_f - \frac{\rho_s}{\rho_f - \rho_s} h_s \tag{4.4}$$

Η εξίσωση 4.4 ορίζει την θέση της διεπιφάνειας σε συνθήκες ισορροπίας. Αν και η εξίσωση αυτή είναι απλή, αποτελεί σημαντική πρόοδο σε σχέση με την αρχή Ghyben – Herzberg (εξίσωση 4.1). Στη δεύτερη περίπτωση η εξίσωση συνδέει το ύψος του υδραυλικού φορτίου σε σχέση με τη θέση της διεπιφάνειας, ενώ στην πρώτη περίπτωση η εξίσωση συνδέει το ύψος του υδραυλικού φορτίου του γλυκού και αλμυρού νερού στη διεπιφάνεια σε σχέση με τη θέση της.

Η διαμόρφωση των παραπάνω εξισώσεων βοήθησε σημαντικά στην κατανόηση της φυσικής του προβλήματος, τις αλληλοεπιδράσεις των δύο υγρών αλλά κυρίως τερμάτισε την εσφαλμένη εφαρμογή της αρχής Ghyben – Herzberg χρησιμοποιώντας μόνο μετρήσεις του υδραυλικού φορτίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΚΩΔΙΚΑ SEAWAT

5.1 Γενικά

Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι μια σύνθετη υπόθεση και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού. Υπάρχουν μοντέλα που ειδικεύονται στις προσομοιώσεις παράκτιων υδροφορέων, όπως το SEAWAT.

Τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας βασίζονται στην ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας και τη μεταφορά διαλυμένης μάζας σε πορώδες μέσο. Η θεωρία της κίνησης του νερού μεταβλητής πυκνότητας συνήθως παρουσιάζεται με όρους υδραυλικής πίεσης και πυκνότητας του υγρού. Σε αυτήν την παράγραφο, ωστόσο, η κίνηση του νερού μεταβλητής πυκνότητας εξετάζεται με όρους του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου και πυκνότητας του υγρού.

Η επίλυση βασίζεται στην αρχή του υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού ή του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου σε περιβάλλον υφάλμυρου υπόγειου νερού. Η κατανόηση αυτής της αρχής είναι απαιτούμενη τόσο για τη δημιουργία των εξισώσεων μεταβλητής πυκνότητας της κίνησης του υπόγειου νερού που χρησιμοποιούνται κατά την επίλυση όσο και για την κατανόηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα που βοηθάει στην κατανόηση αυτής της αρχής.

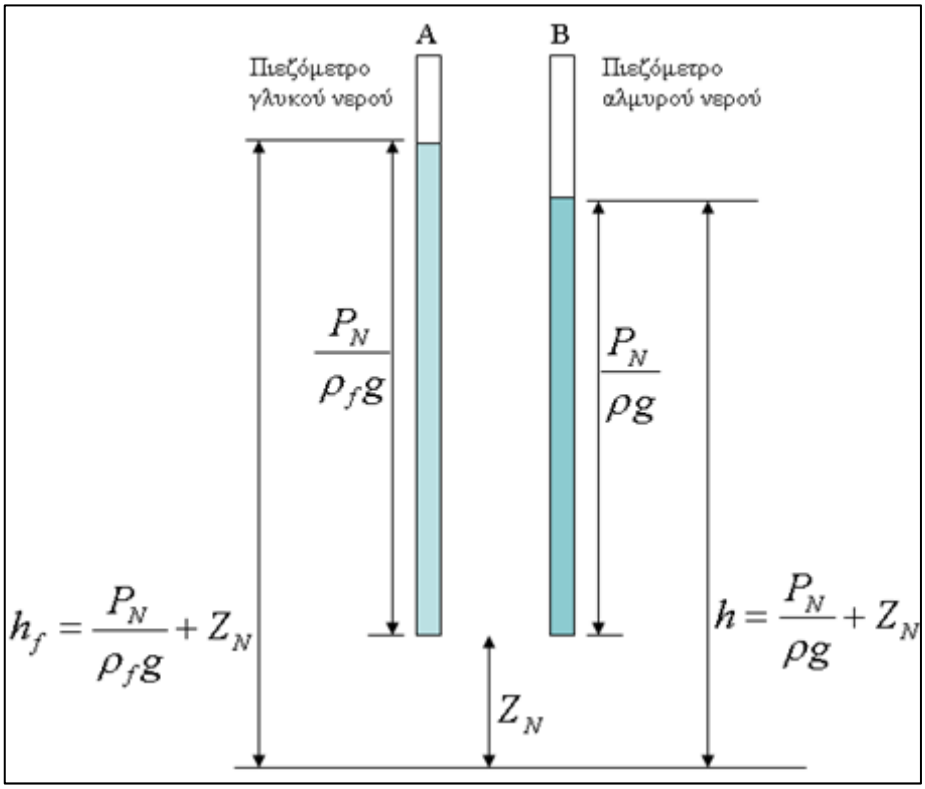
Στο σχήμα 5.1 φαίνονται δύο πιεζόμετρα σε κάποιο σημείο Ν του υπόγειου υδροφορέα με υφάλμυρο νερό. Το πιεζόμετρο Α περιέχει γλυκό νερό και είναι εξοπλισμένο με μηχανισμό που δεν επιτρέπει το αλμυρό νερό του υδροφορέα να αναμειχθεί με το γλυκό νερό του πιεζόμετρου, ενώ επιτρέπει στο πιεζόμετρο να ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην πίεση στο σημείο Ν. Το πιεζόμετρο Β περιέχει υφάλμυρο νερό, ίδιο με του υδροφορέα στο σημείο

Ν. Το ύψος της στήλης του νερού στο πιεζόμετρο Α είναι $P_N/(p_f \cdot g)$. Επομένως, το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στο σημείο Ν ισούται με το ύψος της στήλης του νερού συν την απόσταση από το επίπεδο αναφοράς.

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f \cdot g} + Z_N \tag{5.1}$$

Το ύψος της στήλης του νερού στο πιεζόμετρο Β πάνω από το σημείο Ν είναι $P_N/(p \cdot g)$. Το υδραυλικό φορτίο στο σημείο αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho \cdot g} + Z_N \tag{5.2}$$



Σχήμα 5.1: Δύο πιεζόμετρα γεμάτα με γλυκό και αλμυρό νερό, τοποθετημένα στο ίδιο σημείο του υδροφορέα

Το υδραυλικό φορτίο δεν είναι συνάρτηση μόνο της πίεσης και του υψομέτρου, αλλά και της πυκνότητας. Έτσι, σε δύο σημεία με ίδια πίεση και υψόμετρο, αλλά διαφορετική πυκνότητα θα καταγραφεί διαφορετικό υδραυλικό φορτίο. Η εξίσωση της κίνησης της υπόγειας ροής μπορεί να

σχηματιστεί με βάση το φορτίο h, αλλά το αποτέλεσμα είναι πολύπλοκες εκφράσεις που περιλαμβάνουν την πυκνότητα και τις παραγώγους της. Αντίθετα, ο σχηματισμός των εξισώσεων με όρους ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού απλοποιεί το πρόβλημα και επιτρέπει την χρησιμοποίηση λογισμικών, όπως το MODFLOW με μικρές τροποποιήσεις.

Οι τιμές που υπολογίζονται κατά την προσομοίωση μοντέλων μεταβλητής πυκνότητας είναι τιμές ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου, όπως αντιστοιχούν στο πιεζόμετρο Α. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την εξίσωση Darcy τροποποιημένη για προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας για τον υπολογισμό της ροής σε υπόγειο υδροφορέα. Ωστόσο, οι τιμές των υδραυλικών φορτίων που προκύπτουν από την προσομοίωση δε θα συμπίπτουν με τις αρχικές τιμές που θα κατέγραφε ένα πιεζόμετρο που θα μετρούσε το φορτίο σε σημεία όπου το υπόγειο νερό θα ήταν υφάλμυρο. Έτσι, είναι απαραίτητο να γίνεται μετατροπή των μετρήσεων υδραυλικού φορτίου σε ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο γλυκού νερού και το αντίστροφο όταν χρειάζεται.

5.2 Κώδικας SEAWAT

Το πρόγραμμα SEAWAT έχει αναπτυχθεί στη βάση του MODFLOW και του MT3DMS και επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης του υπόγειου νερού και της μεταφοράς διαλυμένης μάζας. Κάποια μέρη του MODFLOW τροποποιήθηκαν για να συμπεριλάβουν τους επιπλέον όρους που απαιτούνται και τους όρους με τους οποίους ποσοτικοποιείται η αναλογία μεταβολής της μάζας, εξαιτίας των μεταβολών στη συγκέντρωση. Ο συνδυασμός του υπολογισμού της ροής και της μεταφοράς επιτυγχάνεται μέσω μιας ταυτόχρονης σταδιακής προσέγγισης, κατά την οποία πραγματοποιείται εναλλάξ υπολογισμός της εξίσωσης της ροής με το πρόγραμμα MODFLOW και υπολογισμός της εξίσωσης μεταφοράς διαλυμένης μάζας με το πρόγραμμα MT3DMS.

Το SEAWAT περιλαμβάνει δύο μεθοδολογίες επίλυσης (ρητή και πεπλεγμένη) για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με την ρητή επίλυση, χρησιμοποιείται μια υστέρηση (lag) στον καθορισμό των πυκνοτήτων στην εξίσωση ροής. Αυτό σημαίνει ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς του προηγούμενου χρονικού βήματος. Έπειτα, υπολογίζεται η κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά με βάση την λύση της εξίσωσης της ροής στο τρέχον χρονικό βήμα και η λύση χρησιμοποιείται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας.

Σύμφωνα με την πεπλεγμένη μέθοδο, η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού και κίνησης της μάζας επαναλαμβάνεται, ενώ οι συγκεντρώσεις και οι πυκνότητες ενημερώνονται σε κάθε χρονικό βήμα, ωσότου η μέγιστη διαφορά πυκνότητας στα κελιά, για διαδοχικές επαναλήψεις γίνει μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή.

Ο τρόπος χρονικής διακριτοποίησης που εφαρμόζεται στο SEAWAT είναι συνδυασμός των αντίστοιχων τρόπων που εφαρμόζονται στα προγράμματα MODFLOW και MT3DMS. Στο MODFLOW, η συνολική περίοδος προσομοίωσης διαιρείται σε μια ή και περισσότερες περιόδους. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, οι παροχές και οι οριακές συνθήκες διατηρούνται σταθερές. Επιπλέον, κάθε περίοδος χωρίζεται σε ένα ή και περισσότερα χρονικά βήματα, ώστε τα αποτελέσματα να είναι είτε πιο ακριβή είτε να επιτρέπουν την εξαγωγή αποτελεσμάτων τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος, το MODFLOW επιλύει την εξίσωση ροής για την περίοδο t_n έως t_{n+1}.

Το πρόγραμμα MT3DMS αρχικά σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συνεργάζεται με το MODFLOW. Σε μια συμβατική εφαρμογή που συνδυάζει το MODFLOW με το MT3DMS οι χωρικές και χρονικές μεταβολές του πεδίου πυκνοτήτων υποτίθεται ότι είναι τόσο μικρές, ώστε δεν επηρεάζουν την κίνηση του νερού. Έτσι, αναπτύχθηκε μια πρακτική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία πρώτα εκτελείται η προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων νερών και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης διάφορες πληροφορίες σχετικές με την κίνηση

των υπόγειων νερών που απαιτούνται από το MT3DMS αποθηκεύονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο. Στη συνέχεια, με βάση αυτό το αρχείο το πρόγραμμα MT3DMS εκτελεί την προσομοίωση της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Στο MT3DMS, κάθε χρονικό βήμα του MODFLOW χωρίζεται επιπλέον σε πιο μικρά χρονικά τμήματα που ονομάζονται βήματα μεταφοράς. Ο όρος βήματα μεταφοράς εισήχθη για να αποφευχθεί η σύγχυση με τα χρονικά βήματα στα οποία χωρίζεται μια περίοδος στο MODFLOW. Ωστόσο, το βήμα μεταφοράς δεν είναι τίποτα άλλο από ένα χρονικό βήμα, σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η μεταφορά μάζας. Αυτός ο επιπλέον διαχωρισμός γίνεται κυρίως για λόγους σταθερότητας της λύσης που δίνει το MT3DMS. Οι Zheng and Wang (1998) όρισαν κάποιους περιορισμούς, ώστε η λύση που δίνεται από το πρόγραμμα να είναι σταθερή και ακριβής. Έτσι, στην περίπτωση κίνησης διαλυμένης μάζας από μεταφορά ισχύει:

$$\Delta t \leq \frac{0,5}{\frac{Vx}{\Delta x} + \frac{Vy}{\Delta y} + \frac{Vz}{\Delta z}} \tag{5.3}$$

όπου Vx, Vy και Vz: οι ταχύτητες ροής.

Στην περίπτωση κίνησης της διαλυμένης μάζας από διασπορά ισχύει:

$$\Delta t \leq \frac{0,5}{\frac{Dx}{\Delta x^2} + \frac{Dy}{\Delta y^2} + \frac{Dz}{\Delta z^2}} \tag{5.4}$$

Στην περίπτωση εισροής από εξωτερικές πηγές ή εκροής σε καταβόθρες διαλυμένης μάζας έχουμε:

$$\Delta t \leq \frac{\theta}{|q_{ss}|} \tag{5.5}$$

όπου Δt είναι το χρονικό βήμα μεταφοράς και Δx, Δy, Δz είναι οι διαστάσεις του κελιού.

Το MT3DMS χρησιμοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς για να υπολογίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό βήμα μεταφοράς, το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα και κατ' επέκταση όχι από το χρήστη. Στην περίπτωση της πρώτης εξίσωσης, ο υπολογισμός απαιτεί να είναι γνωστό το πεδίο των ταχυτήτων. Έτσι για ένα χρονικό βήμα του MODFLOW από t_n σε t_n+1, το MT3DMS χρησιμοποιεί το πεδίο ταχυτήτων που έχει υπολογισθεί για το τέλος του βήματος μεταφοράς, δηλαδή την στιγμή t_n+1, για να υπολογίσει την διάρκεια και τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς πέρα από το διάστημα t_n στο t_n+1.

Επιπρόσθετα, το MT3DMS έχει διαδικασίες σύμφωνα με τις οποίες ο χρήστης καθορίζει το βήμα μεταφοράς, το οποίο από την μια μπορεί να μειώσει τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς που απαιτούνται σε μια προσομοίωση, αλλά ταυτόχρονα τίθενται θέματα σύγκλισης και ακρίβειας εάν το βήμα μεταφοράς είναι πολύ μεγάλο.

Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων και του πεδίου ταχυτήτων πριν ξεκινήσει ο υπολογισμός της εξίσωσης μεταφοράς και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πρόγραμμα μεταβλητής πυκνότητας, λόγω της αλληλεξάρτησης μεταξύ των εξισώσεων ροής και μεταφοράς. Στο πρόγραμμα SEAWAT, η κάθε περίοδος χωρίζεται σε χρονικά βήματα. Αν για την εξίσωση κίνησης της διαλυμένης μάζας χρησιμοποιηθεί ρητή επίλυση τότε το χρονικό βήμα υπολογίζεται από το SEAWAT κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των εξισώσεων 1 έως 3 και κατά συνέπεια, ο αριθμός των χρονικών βημάτων δεν είναι γνωστός πριν από την εκτέλεση του προγράμματος. Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύονται και οι δύο εξισώσεις της ροής και μεταφοράς διαλυμένης μάζας.

5.3 Μεθοδολογίες SEAWAT

Για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο παραπάνω εξισώσεων, το SEAWAT έχει διαθέσιμες δύο μεθοδολογίες: τη ρητή και τη πεπλεγμένη. Η ρητή επίλυση απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, αλλά μπορεί η λύση να μην είναι τόσο ακριβής όσο με την πεπλεγμένη επίλυση. Επιπλέον, μπορεί να απαιτούνται μικρότερα χρονικά βήματα στην ρητή μέθοδο από αυτά που απαιτούνται στην πεπλεγμένη επίλυση.

5.3.1 Ρητή Μέθοδος Επίλυσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ρητή επίλυση απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, αλλά μπορεί η λύση να μην είναι τόσο ακριβής όσο με την πεπλεγμένη επίλυση. Χρησιμοποιείται μια υστέρηση (lag) στον καθορισμό των πυκνοτήτων στην εξίσωση ροής. Αυτό σημαίνει ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς του προηγούμενου χρονικού βήματος. Έπειτα, υπολογίζεται η κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά με βάση την λύση της εξίσωσης ροής στο τρέχον χρονικό βήμα και η λύση χρησιμοποιείται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας.

Συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούνται όταν ο χρήστης επιλέξει ρητή επίλυση είναι τα εξής:

1) Η εξίσωση της ροής επιλύεται επαναληπτικά με το διαμορφωμένο σε προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας πρόγραμμα MODFLOW για να υπολογιστούν τα ισοδύναμα υδραυλικά φορτία την χρονική στιγμή t_1,το οποίο αναπαριστά και το τέλος του πρώτου χρονικού βήματος. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία λύσης χρησιμοποιεί ως πεδίο πυκνοτήτων τις τιμές της προηγούμενης περιόδου ή τιμές που υπολογίζονται με βάση την αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας, εάν η περίοδος είναι η πρώτη. Το μήκος του αρχικού χρονικού βήματος Δt_1 είτε καθορίζεται από τον χρήστη μέσω της μεταβλητής INITIALDT είτε χρησιμοποιείται

μια προκαθορισμένη από το πρόγραμμα τιμή ίση με 0.01 μονάδες χρόνου, π.χ. 0.01 ημέρες εάν έχει επιλεγεί ως μονάδα χρόνου η ημέρα.

2) Οι τιμές ειδικής απορροής υπολογίζονται για την χρονική στιγμή t_1 με βάση το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της κίνησης και χρησιμοποιούνται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας για να αντιπροσωπεύσουν το πεδίο ροής σε όλο το διάστημα Δt_1.

3) Με βάση την εξίσωση μεταφοράς για το διάστημα Δt_1 υπολογίζεται η συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας την χρονική στιγμή t_1.

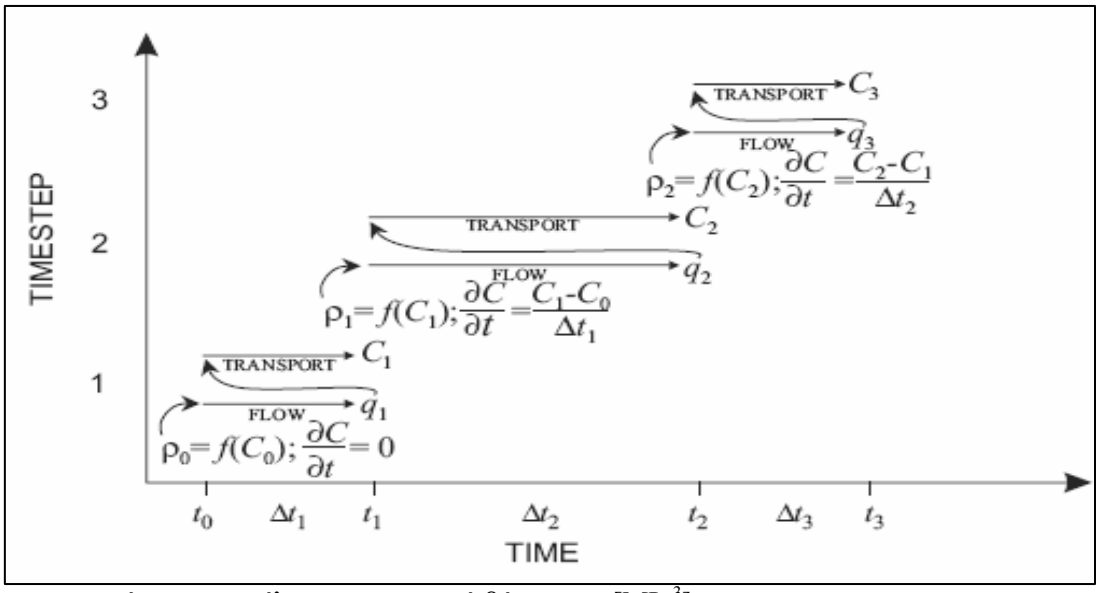
4) Το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_1, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πεδίου ροής στο δεύτερο χρονικό βήμα, υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις της χρονικής στιγμής t_1.

5) Το μήκος του χρονικού βήματος Δt_2 υπολογίζεται με βάση τους περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες που έχουν υπολογισθεί την χρονική στιγμή t_1.Το χρονικό βήμα Δt_2 θα πρέπει πάντοτε να είναι μεγαλύτερο από το βήμα Δt_1.Εαν η τιμή του Δt_2 είναι μικρότερη από την τιμή του Δt_1 αυτό σημαίνει ότι το πεδίο των συγκεντρώσεων κατά συνέπεια και των πυκνοτήτων μεταβάλλεται αλματωδώς. Αν το Δt_1 είναι μεγαλύτερο από το Δt_2, τότε το SEAWAT προτρέπει τον χρήστη να πάει στο βήμα 1, να ελαττώσει την τιμή INITIALDT και να ξεκινήσει εκ νέου το πρόγραμμα.

6) Η εξίσωση της κίνησης της ροής επιλύεται για να υπολογιστούν τα υδραυλικά φορτία και το πεδίο ροής την χρονική στιγμή t_2 χρησιμοποιώντας το πεδίο των πυκνοτήτων του πρώτου χρονικού βήματος.

7) Το πεδίο συγκεντρώσεων την χρονική στιγμή t_2 προσδιορίζεται από την επίλυση της εξίσωσης της κίνησης διαλυμένης μάζας για το χρονικό βήμα Δt_2. Με βάση τις υπολογισμένες συγκεντρώσεις υπολογίζεται το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_2.

8) Με βάση τους περιορισμούς σταθερότητας και ακρίβειας υπολογίζεται το μήκος το χρονικού βήματος Δt_3 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



ρ_n : η πυκνότητα στο τέλος του χρονικού βήματος n $[ML^{-3}]$

c_n : η συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας στο τέλος του χρονικού βήματος nμ$[ML^{-3}]$

q_n : το πεδίο της ειδικής απορροής στο τέλος του χρονικού βήματος n $[LT^{-1}]$

Σχήμα 5.2 : Σχηματική απεικόνιση της ακολουθούμενης μεθοδολογίας με το πρόγραμμα SEAWAT σε περίπτωση ρητής επίλυσης

Όταν η επίλυση που ακολουθείται στο SEAWAT είναι ρητή, λαμβάνονται υπ' όψιν τα εξής τρία κριτήρια:

1) Προβλήματα αστάθειας της λύσης που μπορεί να προκύψουν στην εξίσωση ροής, εξαιτίας του ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από τις συγκεντρώσεις του προηγούμενου χρονικού βήματος.

2) Το μήκος του χρονικού βήματος, το οποίο υπολογίζεται για να ικανοποιήσει τους περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας στην εξίσωση κίνησης της διαλυμένης μάζας, βασίζεται στις ταχύτητες που υπολογίζονται στο τέλος του χρονικού βήματος.

3) Με βάση τα δύο παραπάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια υστέρηση ενός χρονικού βήματος στην εφαρμογή των περιορισμών. Έτσι οι περιορισμοί που θα έπρεπε να εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα n, στην πραγματικότητα εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα n+1.

Εξαιτίας των ανωτέρω προτείνεται η εκτέλεση της προσομοίωσης και με μειωμένα χρονικά βήματα ώστε να επαληθεύεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

5.3.2 Πεπλεγμένη Μέθοδος Επίλυσης

Η πεπλεγμένη μέθοδος επίλυσης περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφοράς διαλυμένης μάζας επαναληπτικά για κάθε χρονικό βήμα, ωσότου οι διαφορές στο πεδίο πυκνοτήτων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων είναι μικρότερες από μια τιμή καθορισμένη από το χρήστη. Έτσι τα βήματα 2, 3 και 4 επαναλαμβάνονται στο ίδιο χρονικό βήμα, μέχρι η μέγιστη διαφορά στο πεδίο πυκνοτήτων, στα κελιά, να είναι μικρότερη από μια τιμή που καθορίζει ο χρήστης. Με αυτή τη διαδικασία, τα υδραυλικά φορτία οι συγκεντρώσεις οι πυκνότητες και οι ταχύτητες σχετίζονται με το τέλος του.

Τέλος, το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας θεωρείται ότι προσομοιώνει καλύτερα το πραγματικό σύστημα των παράκτιων υδροφορέων, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ζώνη διασποράς και υπολογίζοντας την συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου μέσα από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς ρύπων. Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να προσομοιώσει σύστημα μη μόνιμης ροής. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι ότι απαιτεί

διακριτοποίηση ως προς την κατακόρυφη διάσταση σε επίπεδα. Έτσι ο αριθμός αγνώστων μεγαλώνει εκθετικά καθώς επίσης και ο χρόνος επίλυσης. Σε πραγματικές συνθήκες με σχετικά πυκνό σύστημα κελιών ο χρόνος είναι σχεδόν απαγορευτικός για ενσωμάτωση του μοντέλου σε προβλήματα βελτιστοποίησης (Γ. Κουράκος 2009).

5.4 Το Μαθηματικό Μοντέλο του Κώδικα SEAWAT

Σε ό, τι αφορά σε παράκτια υδρογεωλογικά περιβάλλοντα, και τη ροή νερού και μεταφορά διαλυτών ουσιών μεταβαλλόμενης πυκνότητας, αξίζει να σημειωθεί ότι από την USGS έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες τροποποιημένες παραλλαγές του μοντέλου MODFLOW που δύνανται να προσομοιώσουν την παρουσία υφάλμυρου νερού. Μια από αυτές τις παραλλαγές αποτελεί το μοντέλο SEAWAT. Συγκεκριμένα, το μοντέλο SEAWAT είναι αναπτυγμένο στη βάση του κλασικού μοντέλου MODFLOW, αλλά αποτελεί τελείως διαφορετικό μοντέλο δεδομένου ότι οι σχετικές μαθηματικές εξισώσεις που επιλύονται αριθμητικά τροποποιούνται ριζικά. Η ροή του υπόγειου νερού στο SEAWAT, περιγράφεται από την εξίσωση 5.6 και στηρίζεται στην μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας.

$$-\nabla \cdot (\rho \vec{q}) + \overline{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial P}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} \qquad (5.6)$$

όπου ρ: η πυκνότητα του υφάλμυρου υπόγειου νερού

$\vec{q}$: το άνυσμα της ειδικής παροχής (specific discharge vector)

$\overline{\rho}$: η πυκνότητα του νερού που εισρέει στο σύστημα ή εκρέει από αυτό σε διάφορες πηγές / καταβόθρες (π.χ. γεωτρήσεις κατακόρυφη φυσική τροφοδοσία, εστίες ρύπανσης, τεχνητός εμπλουτισμός κλπ.)

q_s: η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας που αφορά τις πηγές / καταβόθρες.

n: το ενεργό πορώδες

c: συγκέντρωση διαλυμένης μάζας

t: ο χρόνος

Η γενική εξίσωση της κίνησης της υπόγειας ροής σε περιβάλλον μεταβλητής πυκνότητας περιλαμβάνει έναν όρο για την ειδική παροχή, η οποία υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy. Ως εκ τούτου, η γενικευμένη εξίσωση που περιγράφει την κίνηση υγρού μεταβλητής πυκνότητας σε έναν υδροφορέα βασίζεται στην εξίσωση 5.6 και το νόμο του Darcy και είναι:

$$\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(\rho K_{f\alpha}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\alpha}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\alpha}\right]\right)+\frac{\partial}{\partial\beta}\left(\rho K_{f\beta}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\beta}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\beta}\right]\right)$$
$$+\frac{\partial}{\partial\gamma}\left(\rho K_{f\gamma}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\gamma}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\gamma}\right]\right)=\rho S_f\frac{\partial h_f}{\partial t}+n\frac{\partial\rho}{\partial c}\frac{\partial c}{\partial t}-\overline{\rho}\,q_s \qquad (5.7)$$

Σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας η πυκνότητα ενός υγρού επηρεάζεται κυρίως από την συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας και την πίεση. Μια εμπειρική σχέση ανάμεσα στη συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας και την πυκνότητα του υφάλμυρου νερού αναπτύχθηκε από τους Baxter και Wallance.

$$\rho = \rho_f + Ec \qquad (5.8)$$

όπου E: μια αδιάστατη σταθερά, η οποία έχει μια προσεγγιστική τιμή ίση με 0,7143 για συνήθεις τιμές συγκέντρωσης μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού,

c: η συγκέντρωση των αλάτων (ML^{-3})

Η παράγωγος της εξίσωσης 5.8 ως προς την συγκέντρωση είναι:

$$\frac{\partial\rho}{\partial c}=E \qquad (5.9)$$

Η μεταφορά διαλυτών ουσιών και συγκεκριμένα η μεταφορά αλάτων στα υπόγεια νερά από την ανάμιξη νερών διαφορετικής πυκνότητας υπολογίζεται από το πλέον σύγχρονο μαθηματικό μοντέλο που είναι γνωστό ως MT3DMS (Zheng and Wang, 1998). Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό SEAWAT αποτελεί έναν ενιαίο κώδικα ο οποίος συμπεριλαμβάνει και τροποποιημένη έκδοση του MT3DMS.

Η τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς – διασποράς του λογισμικού MT3DMS που επιλύεται από το SEAWAT είναι η εξίσωση (5.10), η οποία προκύπτει αντικαθιστώντας την εξίσωση 5.9 στην εξίσωση 5.7.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial\alpha}\left(\rho K_{f\alpha}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\alpha}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\alpha}\right]\right)+\frac{\partial}{\partial\beta}\left(\rho K_{f\beta}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\beta}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\beta}\right]\right)\\&+\frac{\partial}{\partial\gamma}\left(\rho K_{f\gamma}\left[\frac{\partial h_f}{\partial\gamma}+\frac{\rho-\rho_f}{\rho_f}\frac{\partial Z}{\partial\gamma}\right]\right)=\rho S_f\frac{\partial h_f}{\partial t}+nE\frac{\partial c}{\partial t}-\overline{\rho}\,q_s\end{aligned}\qquad(5.10)$$

όπου: α, β: οι κύριες κατευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας (παράλληλα με τη στρώση)

γ: η κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των α και β (δηλ. κάθετη στη στρώση)

ρ και ρ_f : οι πυκνότητες του υφάλμυρου και του γλυκού νερού αντίστοιχα.

Z: το υψόμετρο του κελιού,

h και h_f *:* το υδραυλικό φορτίο και το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού αντίστοιχα.

K_f *:* η υδραυλική αγωγιμότητα για το γλυκό νερό

S_f *:* η ειδική αποθηκευτικότητα για το γλυκό νερό [L^{-1}] .

E *:* μια αδιάστατη σταθερά, η οποία έχει μια προσεγγιστική τιμή ίση με 0,7143 για συνήθεις τιμές συγκέντρωσης μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού και ισούται με την παράγωγο της (5.5) ως προς την συγκέντρωση ($\frac{\vartheta p}{\vartheta c}$)

Οι εξισώσεις (5.7) και (5.8) εφαρμόζονται μόνο σε ενδεικτικές περιπτώσεις θαλασσινού νερού, όπου η σχέση μεταξύ της πυκνότητας του νερού και της συγκέντρωσης είναι γραμμική συνάρτηση. Αν το υγρό έχει διαφορετική σύνθεση από αυτήν ενός ενδεικτικού θαλασσινού νερού, ή η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του συνήθους θαλασσινού νερού, τότε αυτές οι εξισώσεις δεν ισχύουν και θα πρέπει να αναπτυχθούν διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις μεταξύ συγκέντρωσης και πυκνότητας.

5.5 Κώδικας MODFLOW

Το λογισμικό ή κώδικας MODFLOW επιλύει την εξίσωση της συνέχειας στα υπόγεια νερά σε τρεις διαστάσεις με βάση το νόμο του Darcy σε συνθήκες τόσο σταθερής όσο και ασταθούς ροής, είναι αρκετά λειτουργικό αφού έχει δυνατότητα προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών περιβαλλόντων και οριακών συνθηκών, προσομοιώνει δισδιάστατη οριζόντια ή κατακόρυφη ροή, ημι-τρισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή, σε συνθήκες σταθερής ή ασταθούς ροής, σε ανισότροπους, ετερογενείς και επάλληλους (layered) υδροφόρους. Οι τύποι των υδροφόρων σχηματισμών που μπορούν να προσομοιωθούν είναι οι υπό πίεση, οι ελεύθεροι, οι μερικώς υπό πίεση και μεταβατικές συνθήκες υπό πίεση – μερικώς υπό πίεση – ελεύθερων υδροφόρων.

Είναι, μέχρι σήμερα, το πιο ευρέως διαδεδομένο αριθμητικό μοντέλο ροής υπόγειων νερών και έχει εφαρμοστεί σε παγκόσμια κλίμακα σε πολυάριθμες μελέτες και προβλήματα ροής υπόγειων νερών (Wurbs, 1995). Τέλος, σε ότι αφορά στις λειτουργικές του δυνατότητες, έχει τύχει διεθνώς ευρείας αποδοχής, ενώ έχουν αναπτυχθεί από διάφορους φορείς και ερευνητικά ιδρύματα ενδιαφέροντα λογισμικά προ-επεξεργασίας και προετοιμασίας των δεδομένων εισόδου (preprocessors) καθώς και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων του (postprocessors) με αποτέλεσμα να γίνεται φιλικότερο προς το χρήστη. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί και άλλα συναφή αριθμητικά μοντέλα τα οποία τροφοδοτούνται π.χ. με τις συνιστώσες ροής (fluxes) που υπολογίζονται από αυτό (αφού πρώτα υποστεί την ανάλογη ρύθμιση) και στη

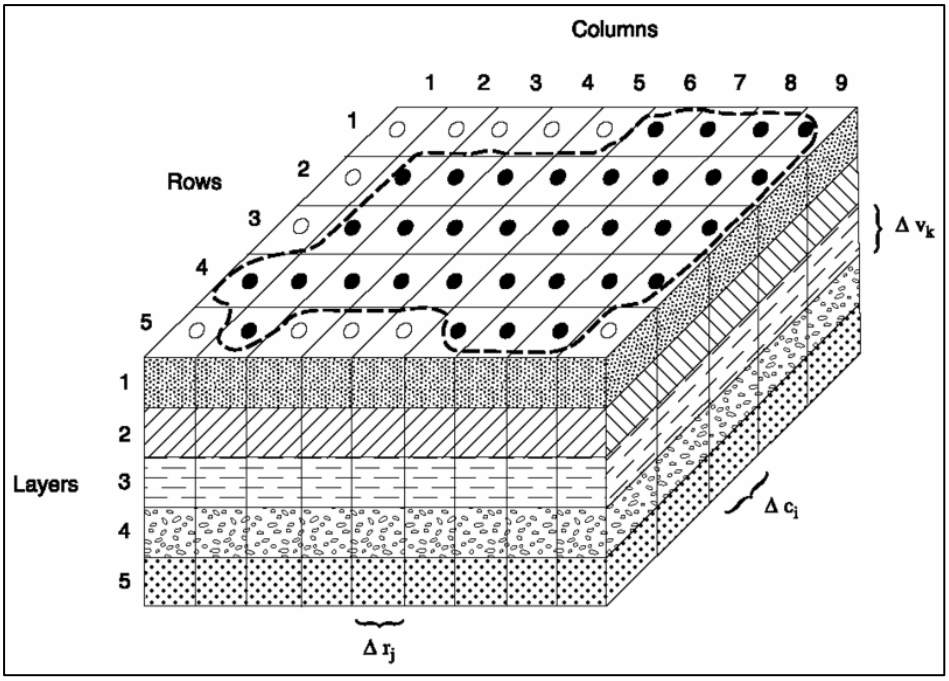
συνέχεια επιλύουν άλλα προβλήματα όπως π.χ. κίνησης διαλυτών ουσιών στα υπόγεια νερά, διαχείρισης υπόγειων νερών κλπ.

Οι σχετικές μαθηματικές του εξισώσεις αφορούν αποκλειστικά στην προσομοίωση της ροής των υπόγειων νερών (περιορισμένης αλατότητας) κάτω από διάφορες φυσικές και ανθρωπογενείς δυναμικές συνθήκες και πιέσεις, ενώ δεν προσομοιώνουν τις σχετικές ισορροπίες γλυκού και αλμυρού νερού σε παράκτια ή νησιωτικά υδρογεωλογικά περιβάλλοντα και τη μεταφορά διαλυτών ουσιών σε αυτά. Επίσης, πέραν της αδυναμίας προσομοίωσης της μεταφοράς διαλυτών ουσιών, ο κώδικας MODFLOW από μόνος του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση και προσομοίωση των μεταβολών της αλατότητας σε ένα περιβάλλον ανάμιξης δύο τύπων νερού διαφορετικής πυκνότητας (γλυκού και αλμυρού νερού) και γενικότερα το φαινόμενο της υφαλμύρωσης.

5.5.1 Διακριτοποίηση Υδροφορέα

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).

Το σχήμα 5.3 που ακολουθεί, απεικονίζει έναν χωρικά διακριτοποιημένο υδροφορέα.



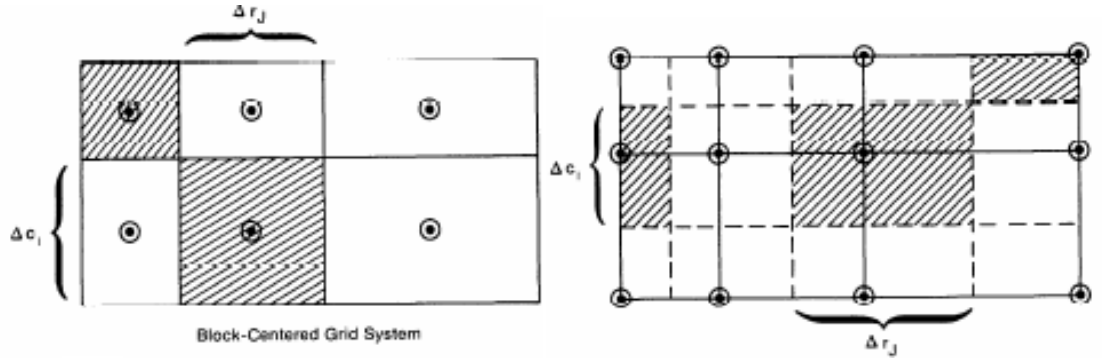
Σχήμα 5.3: Διακριτοποιημένος Υδροφορέας (McDonald and Harbaugh, 1988)

Ο υδροφορέας αποτελείται από ένα σύνολο φατνίων (κελιών) που σχηματίζουν έναν τρισδιάστατο κάνναβο. 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 Δc_i, το πλάτος αυτού στον άξονα των x, δηλαδή σε μια συγκεκριμένη στήλη y, είναι Δr_i και το πάχος του στο άξονα των z, δηλαδή σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο k, είναι Δv_k. Από το σχήμα 5.3 διακρίνεται ότι η αρίθμηση στον άξονα του z ξεκινά από την κορυφή του υδροφορέα και αυξάνει προς τα κάτω, σε αντιπαραβολή 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 αντίστοιχα στο σχήμα 5.4.

Και τα δύο συστήματα ξεκινούν με το διαχωρισμό του υδροφορέα με δύο ορθογώνιες διατάξεις παράλληλων ευθειών. Στο σχηματισμό των κεντραρισμένων όγκων, οι όγκοι που σχηματίζονται από τις διατάξεις των παράλληλων γραμμών αποτελούν τα κελιά, ενώ οι κόμβοι βρίσκονται στα κέντρα των κελιών. Στο σχηματισμό των κεντραρισμένων σημείων, οι κόμβοι βρίσκονται στα σημεία τομής των διατάξεων των παράλληλων ευθειών, ενώ τα κελιά σχηματίζονται γύρω από τους κόμβους και διαχωρίζονται από τη μεσοκάθετο της ευθείας μεταξύ δύο κόμβων. Και στις δύο περιπτώσεις, η διάταξη των κόμβων πρέπει να επιλέγεται τέτοια ώστε οι υδραυλικές ιδιότητες του συστήματος να είναι σε γενικές γραμμές ομοιόμορφες σε όλη την έκταση του κελιού. Ο σχηματισμός ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο είναι αυτός των κεντραρισμένων όγκων, παρά το γεγονός ότι η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών που αναπτύχθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ισχύει και για τους δύο σχηματισμούς.



: οι κόμβοι,

: οι γραμμές του δικτύου,

: τα όρια των κελιών του σχηματισμού των κεντραρισμένων σημείων,

: τα κελιά που σχετίζονται με τους επιλεγμένους κόμβους

Σχήμα 5.4: Διαφορά ανάμεσα σε σχηματισμό με κέντρο το κελί (block-centered formulation) και με κέντρο το σημείο (point-centered formulation) (McDonald and Harbaugh, 1988)

5.5.2 Εξίσωση Ροής με την Μέθοδο Πεπερασμένων Διαφορών

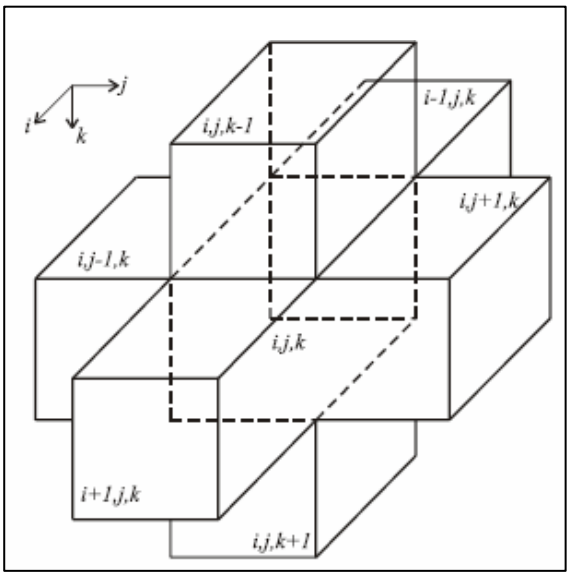
Σε συνθήκες μεταβλητής πυκνότητας η κίνηση του νερού και η κίνηση της διαλυμένης μάζας είναι διαδικασίες αλληλένδετες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς. Στα περισσότερα προβλήματα είναι πολύ δύσκολο αν όχι αδύνατο να επιτευχθούν αναλυτικές λύσεις και για αυτό εφαρμόζονται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι.

Παρακάτω περιγράφεται η προσέγγιση του προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, γιατί το μοντέλο προσομοίωσης που επιλέχθηκε για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της ροής και μεταφοράς μάζας στις διάφορες εφαρμογές είναι το SEAWAT το οποίο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια συνήθης μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται

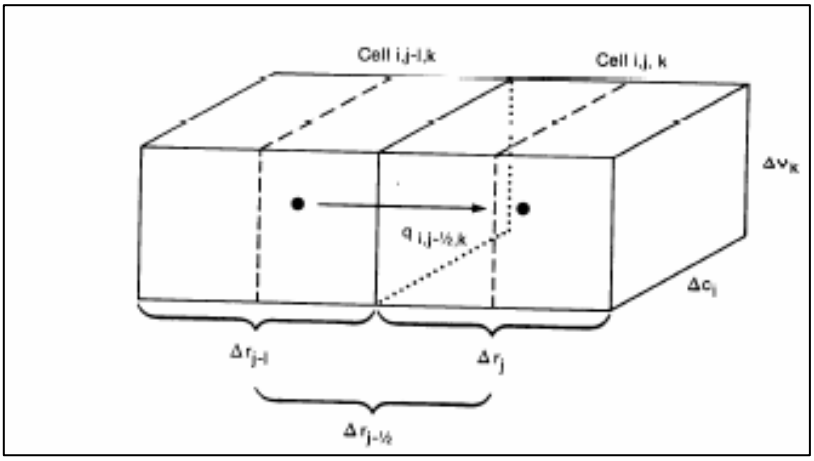
από ένα τρισορθογώνιο πλέγμα χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελιά. Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές επομένως εφαρμόζεται στον διακριτοποιημένο χώρο με βάση την υπόθεση ότι κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς.

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 5.4 που ακολουθεί.



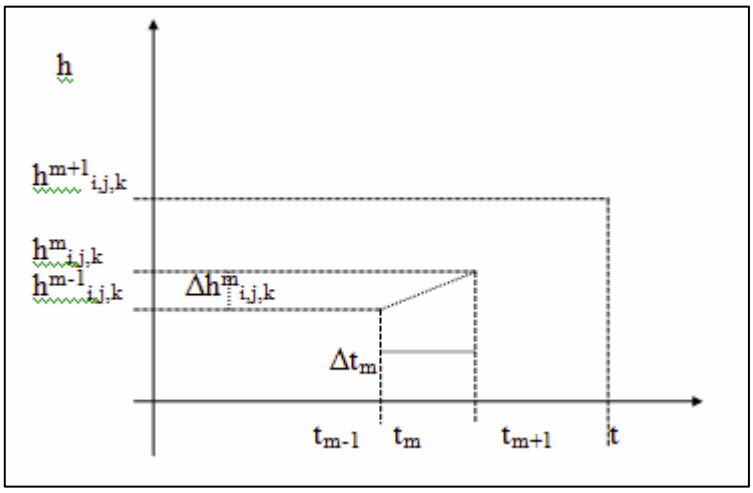
Σχήμα 5.5: Κελί i, j, k με τα έξι γειτονικά του (McDonald and Harbaugh, 1988)

Αντίστοιχες εκφράσεις μπορούν, επίσης, να γραφούν και μεταξύ των υπολοίπων πέντε γειτονικών κελιών του i, j, k (σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6: Ροή από κελί i, j-1, k στο κελί i, j, k (McDonald and Harbaugh, 1988)

Στο σχήμα 5.7 δίνεται ένα διάγραμμα του υδραυλικού φορτίου για το κελί i, j, k. Οι δύο χρονικές τιμές στον οριζόντιο άξονα του χρόνου παριστάνουν, η μεν πρώτη, το χρόνο κατά τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός του υδραυλικού φορτίου, η δε δεύτερη το χρόνο ένα χρονικό βήμα πίσω από την t_m.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα υδραυλικού φορτίου - χρόνου για το κελί i, j, k

όπου:

t_m: ο χρόνος στο τέλος του χρονικού βήματος m

$h^m{}_{i,j,k}$: το υδραυλικό φορτίο στον κόμβο i,j,k κατά τη χρονική στιγμή t_m

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (5.10) υπολογίζουν την διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής της μάζας ανά μονάδα όγκου διαμέσου των πλευρών του στοιχείου διακριτοποίησης του υδροφορέα (π.χ. ένα κελί). Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας του υγρού ανά μονάδα όγκου εξαιτίας των μεταβολών στην πίεση του συστήματος. Ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα εξαιτίας των μεταβολών της συγκέντρωσης. Ο δεύτερος όρος υπολογίζεται από τη συγκέντρωση που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Καθώς οι συγκεντρώσεις φτάνουν σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας αυτός ο όρος γίνεται αμελητέος. Επομένως, το πεδίο ροής σταθεροποιείται όταν οι συγκεντρώσεις δεν μεταβάλλονται στο χρόνο. Ο τρίτος όρος του δεξιού μέρους της ίδιας εξίσωσης αντιπροσωπεύει

την εισροή από εξωτερικές πηγές και εκροή σε καταβόθρες. Χρησιμοποιώντας το σχήμα των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών στο χώρο και των οπισθοδρομικών πεπερασμένων διαφορών στον χρόνο η προσέγγιση της εξίσωσης της κίνησης των υπογείων νερών έχει ως εξής:

$$
\begin{aligned}
&\hat{\rho}_{i+1/2,j,k}\frac{K_{\alpha,i+1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i+1/2,j,k}}A_{j,k}\left[h_{f,i+1,j,k}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i+1/2,j,k}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i+1,j,k}-Z_{i,j,k})\right]\\
&-\hat{\rho}_{i-1/2,j,k}\frac{K_{\alpha,i-1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i-1/2,j,k}}A_{j,k}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i-1,j,k}+\frac{\rho_{i-1/2,j,k}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i,j,k}-Z_{i-1,j,k})\right]\\
&+\hat{\rho}_{i,j+1/2,k}\frac{K_{\beta,i,j+1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j+1/2,k}}A_{i,k}\left[h_{f,i,j+1,k}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i,j+1/2,k}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i,j+1,k}-Z_{i,j,k})\right]\\
&-\hat{\rho}_{i,j-1/2,k}\frac{K_{\beta,i,j-1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j-1/2,k}}A_{i,k}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i,j-1,k}+\frac{\rho_{i,j-1/2,k}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i,j,k}-Z_{i,j-1,k})\right]\\
&+\hat{\rho}_{i,j,k+1/2}\frac{K_{\gamma,i,j,k+1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k+1/2}}A_{i,j}\left[h_{f,i,j,k+1}-h_{f,i,j,k}+\frac{\rho_{i,j,k+1/2}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i,j,k+1}-Z_{i,j,k})\right]\\
&-\hat{\rho}_{i,j,k-1/2}\frac{K_{\gamma,i,j,k-1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k-1/2}}A_{i,j}\left[h_{f,i,j,k}-h_{f,i,j,k-1}+\frac{\rho_{i,j,k-1/2}-\rho_f}{\rho_f}(Z_{i,j,k}-Z_{i,j,k-1})\right]\\
&=\left(\rho_{i,j,k}S_{f,i,j,k}\frac{h^{n+1}_{f,i,j,k}-h^{n}_{f,i,j,k}}{t_{n+1}-t_n}+\theta E\frac{\partial C}{\partial t}\right)V_{i,j,k}-(\bar{\rho}Q_s)_{i,j,k},
\end{aligned}
\tag{5.11}
$$

όπου

i,j,k : οι δείκτες που καθορίζουν την σειρά, τη στήλη και επίπεδο αντίστοιχα

$A_{j,k}$: το εμβαδόν της πλευράς του κελιού των πεπερασμένων διαφορών κάθετης στον άξονα α [L2] έτσι ώστε $A_{j,k}=\Delta\beta_j*\Delta\gamma_\kappa$ και παρόμοια για τις άλλες διευθύνσεις

$z_{i,j,k}$: το υψόμετρο του κελιού [L]

n : το χρονικό βήμα με το οποίο προσεγγίζεται η παράγωγος ως προς τον χρόνο

$V_{i,j,k}$: ο όγκος του κελιού [L3] έτσι ώστε $V_{i,j,k}= \Delta\alpha_i*\Delta\beta j*\Delta\gamma_\kappa$

Οι δείκτες i+1/2,i-1/2,j+1/2,j-1/2,k+1/2,k-1/2 αναφέρονται στην τιμή μιας ιδιότητας ή μεταβλητής μεταξύ δύο γειτονικών κελιών (π.χ. ο αρμονικός μέσος της υδραυλικής αγωγιμότητας).

Οι τιμές των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων στο αριστερό μέρος της εξίσωσης 5.11 αναφέρονται στη χρονική στιγμή n+1. Γενικά σε αυτό το

κεφάλαιο όπου δεν υποδεικνύεται η χρονική στιγμή του υπολογισμού των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων αυτή θα θεωρείται η χρονική στιγμή n+1. Στην παραπάνω εξίσωση συναντώνται δύο διαφορετικοί συμβολισμοί της πυκνότητας. Η διαφορετικότητα έχει να κάνει με τον τρόπο υπολογισμού της πυκνότητας στο μεσοδιάστημα δύο κελιών όπου η τιμή του $\hat{p}$ εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής. Έτσι, αν υποτεθεί ότι η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί i,j,k στο i,j,k+1, τότε ο όρος $p_{i,j,k+1/2} = p_{i,j,k}$ ενώ αν η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί i,j,k+1 στο κελί i,j,k τότε $p_{i,j,k+1/2} = p_{i,j,k+1}$. Αντίθετα, η πυκνότητα, που συμβολίζεται με ρ, υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμητικό μέσο όρο των γειτονικών κελιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕΛΕΤΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Το στάδιο της σχεδίασης του μοντέλου περιλαμβάνει την διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου, τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών και την εισαγωγή των φυσικών και ανθρωπογενών πιέσεων και μεταβολών, όπως η φυσική τροφοδοσία και οι εκάστοτε αντλήσεις.

Η περιοχή προσομοίωσης περιορίζεται στον υδροφόρο σχηματισμό του κεντρικού τμήματος της Σαντορίνης και περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή Μεσσαριάς - Αεροδρομίου. Στην περιοχή αυτή, με βάση τα μέχρι τώρα διαθέσιμα στοιχεία, εκτιμάται ότι αναπτύσσεται ο σημαντικότερος υδροφόρος σχηματισμός που φιλοξενείται μέσα σε ηφαιστειογενή πετρώματα και εν μέρει, ιδιαίτερα στο νότιο τμήμα σε κρυσταλλικούς ασβεστολίθους. Ο υδροφορέας μελέτης καλύπτει μια έκταση 33×10^6 m^2, όπως υπολογίζεται προσεγγιστικά παρακάτω.

Ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται ότι είναι φρεάτιος (εντολή Model → MODFLOW → Package Options… → Block Centered Flow Tab → Unconfined) και ότι η οροφή του ταυτίζεται με την επιφάνεια του εδάφους.

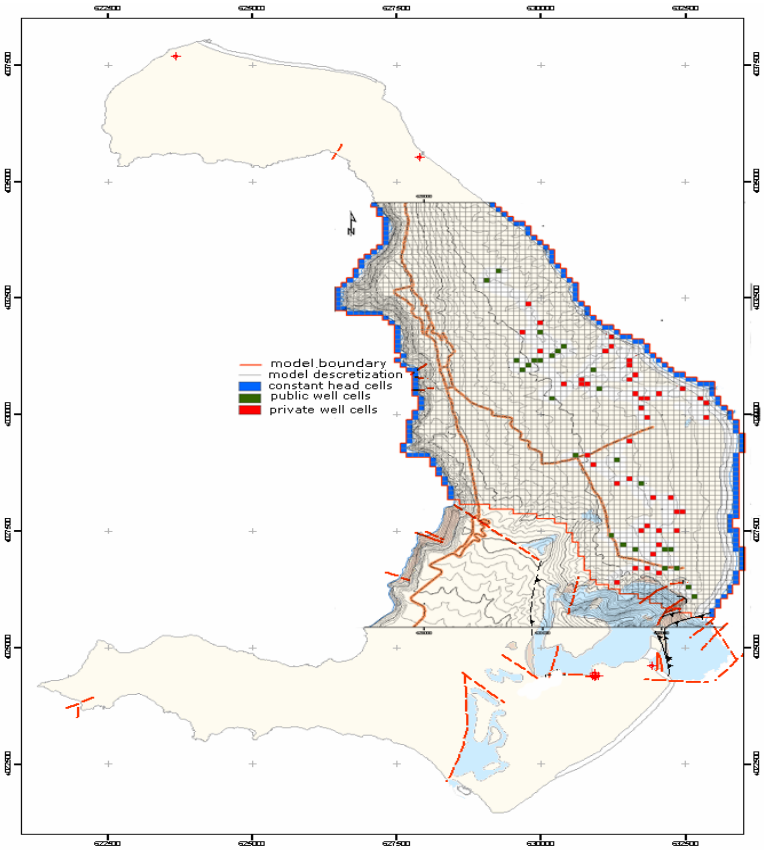
6.2 Εισαγωγή Χάρτη στο Πρόγραμμα

Το GroundWater Vistas (GV) έχει την ικανότητα να εκθέτει ένα ψηφιοποιημένο χάρτη ως υπόβαθρο. Ο χάρτης αυτός παρέχει ένα πλαίσιο αναφοράς καθώς σχεδιάζεται το επιδιωκόμενο μοντέλο. Οι ψηφιοποιημένοι χάρτες μπορεί να είναι σε μία από τις ακόλουθες έξι μορφές:

- GV
- ModelCad
- DXF
- SURFER BLN (blanking file)

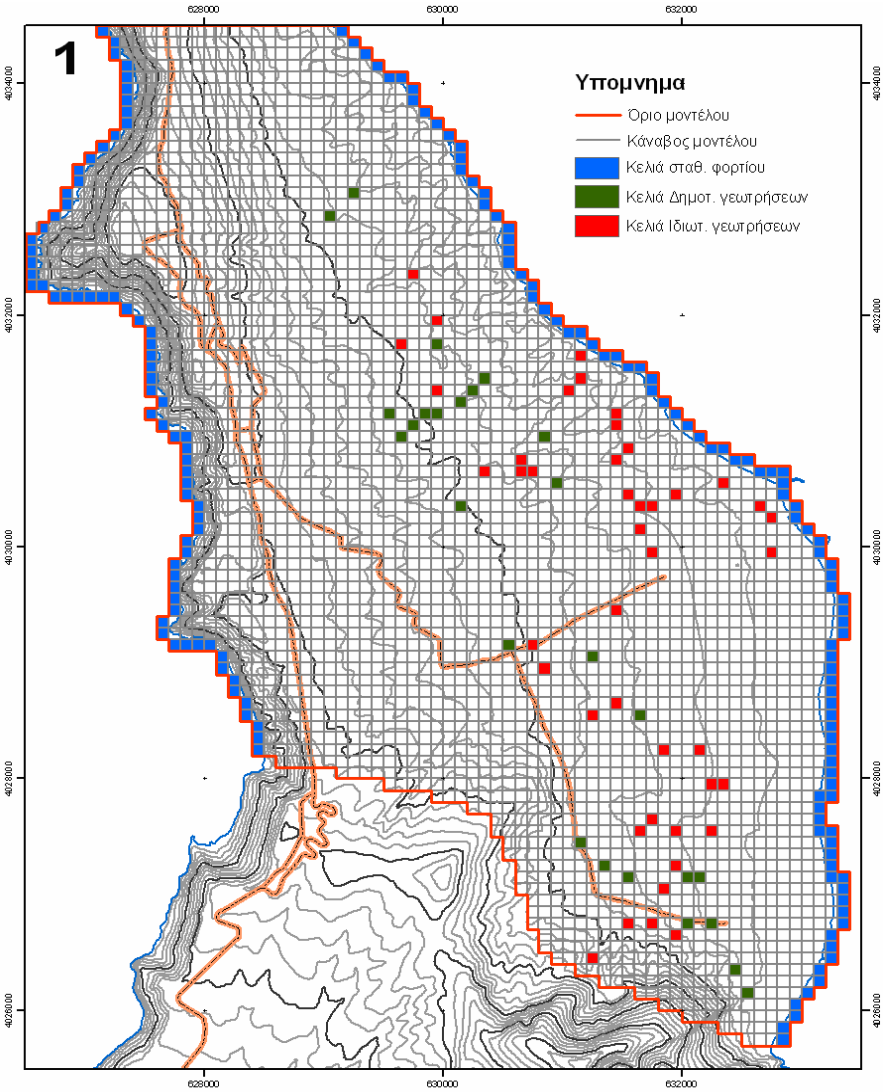
- ArcView Shapefile
- Windows bitmap (*.bmp)

Δεδομένου ότι ο διαθέσιμος χάρτης της Σαντορίνης ήταν της μορφής .tiff, χρειάστηκε να γίνει μετατροπή του σε bitmap, έτσι ώστε να αναγνωρίζεται από το πρόγραμμα. Η μετατροπή αυτή έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος “Image Converter Plus”. Στον εν λόγω χάρτη φαίνεται ο υδροφορέας και η τοπογραφία των γεωτρήσεων του νησιού σε κάνναβο συντεταγμένων ΕΓΣΑ ’87 (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Ψηφιοποιημένος χάρτης Σαντορίνης, τμήμα του οποίου χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο στο GroundWater Vistas για το σχεδιασμό του μοντέλου

Ο παραπάνω χάρτης δεν εισήχθηκε με την συγκεκριμένη μορφή στο GV, αλλά κόπηκε κατάλληλα και χρησιμοποιήθηκε μόνο το κεντρικό τμήμα της Σαντορίνης, όπου αποτυπώνεται ο υδροφορέας μελέτης. Η εικόνα που προέκυψε φαίνεται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Εικόνα κεντρικού τμήματος Σαντορίνης που χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο στο GV

6.3 Δημιουργία Καννάβου (Mesh Grid)

Η δημιουργία του καννάβου είναι η πρωταρχική ενέργεια κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή. Ο κάνναβος σχηματίζεται από δύο ζεύγη παραλλήλων γραμμών κάθετων μεταξύ τους, σχηματίζοντας τα αντίστοιχα κελιά. Οι στήλες του καννάβου αντιστοιχούν στον άξονα των τετμημένων X, οι γραμμές, στον άξονα των τεταγμένων Y, ώστε ο κάνναβος του Groundwater Vistas να σχετίζεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες, ενώ τα επίπεδα του καννάβου αντιστοιχούν στον άξονα των υψομέτρων Z, θεωρώντας θετική φορά από πάνω προς τα κάτω.

Ο κάνναβος μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφος (uniform), όταν όλα τα κελιά που τον αποτελούν έχουν τις ίδιες διαστάσεις, είτε ανομοιόμορφος (custom), όταν το μέγεθος των κελιών ποικίλλει.

Ο ομοιόμορφος κάνναβος, ο οποίος άλλωστε προτιμάται και από μαθηματικής σκοπιάς ως προς την αρτιότητα του μοντέλου, αποτελεί καλή επιλογή όταν :

- ✓ τα δεδομένα του συστήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και
- ✓ το σύστημα αντιμετωπίζεται συνολικά και δεν εστιάζει τοπικά, δηλαδή δεν υπάρχει περισσότερο ενδιαφέρον σε κάποιες θέσεις σε σχέση με άλλες.

Σε αντίθεση, ανομοιόμορφος κάνναβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα, ενώ για άλλα μέρη της περιοχής τα αντίστοιχα δεδομένα απουσιάζουν παντελώς, αλλά κυρίως όταν υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για κάποιες συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής (όπως συμβαίνει συνήθως σε προβλήματα μεταφοράς ρύπων). Πρέπει, τέλος, να τονισθεί ότι στην περίπτωση εφαρμογής ανομοιόμορφου καννάβου, υπάρχει ένας σημαντικός κανόνας που πρέπει πάντα να ακολουθείται για τη σωστή μαθηματική επίλυση από το μοντέλο: το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις (κολώνα, γραμμή, επίπεδο) δεν μπορεί να διαφέρει (να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο) πάνω από 1,5 του μεγέθους των γειτονικών κελιών.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα της νήσου Σαντορίνης, εφαρμόζεται ομοιόμορφος κάνναβος, διότι τα δεδομένα εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανεμημένα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο τοπικό ενδιαφέρον.

Με τη βοήθεια του προγράμματος “LView Pro 2006” μετρήθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των βασικών συντεταγμένων αναφοράς του παραπάνω καννάβου που είναι σταθερή και ίση με 5,85 cm. Επίσης, μετρήθηκε η απόσταση της κάτω αριστερής γωνίας της εικόνας από την πρώτη συντεταγμένη αναφοράς κατά τον άξονα y (4.026.000 m), που είναι 1,45 cm και η απόσταση της κάτω αριστερής γωνίας της εικόνας από την πρώτη

συντεταγμένη αναφοράς κατά τον άξονα x (628.000 m), που είναι 4,4 cm. Μετά την εφαρμογή της μεθόδου των τριών, προέκυψαν οι συντεταγμένες της κάτω αριστερής γωνίας της εικόνας ή αλλιώς οι συντεταγμένες της αφετηρίας της εικόνας.

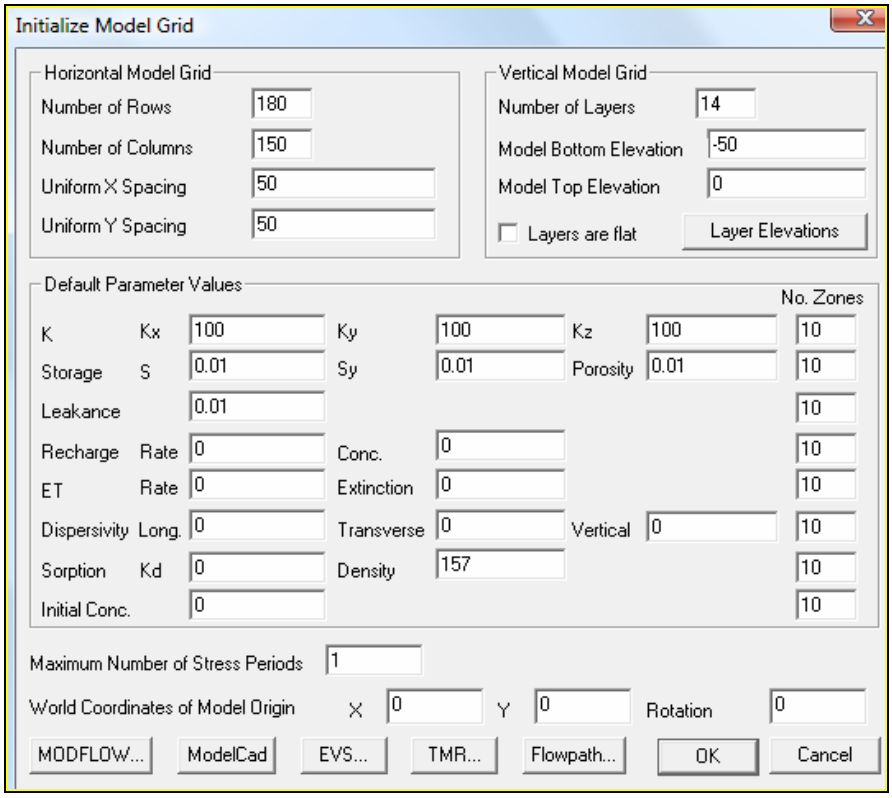
Συγκεκριμένα, $X_{\text{αφετηρίας εικόνας}}$ = 626.496 m και $Y_{\text{αφετηρίας εικόνας}}$ = 4.025.504 m.

Ακόμη, μετρήθηκαν η απόσταση της πάνω αριστερής γωνίας της εικόνας από την τελευταία συντεταγμένη αναφοράς κατά y (4.034.000 m) και η απόσταση της κάτω δεξιάς γωνίας της από την τελευταία συντεταγμένη αναφοράς κατά x (632.000 m), οι οποίες βρέθηκαν 1,45 cm και 4,4 cm αντίστοιχα.

Κατόπιν εφαρμογής της μεθόδου των τριών, υπολογίστηκαν οι πραγματικές διαστάσεις της εικόνας - υποβάθρου (πλάτος x ύψος). Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι ο υδροφορέας περικλείεται από μια περιοχή πραγματικών διαστάσεων 7,5km x 9 km ή αλλιώς 7.500m x 9.000 m. Δεδομένου, λοιπόν, ότι τα κελιά έχουν διαστάσεις 50x50m, τελικά το πλήθος των στηλών του καννάβου θα είναι 150 και το πλήθος των γραμμών θα είναι 180.

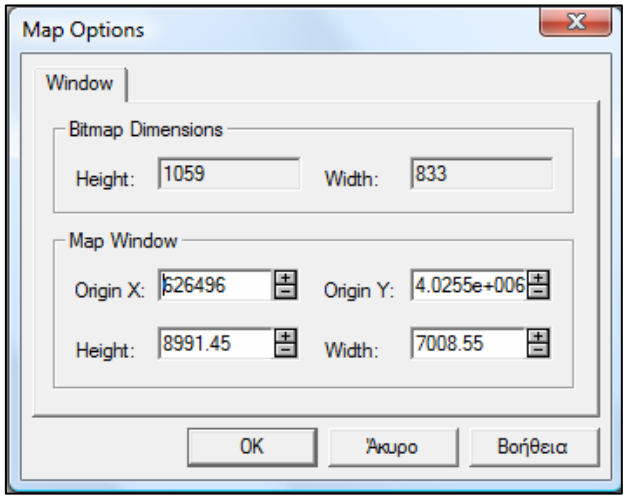
Έχοντας πραγματοποιήσει όλες τις παραπάνω ενέργειες, έγινε η εισαγωγή της εικόνας στο GroundWater Vistas ως εξής:

Αρχικά, επιλέχθηκε από το μενού του προγράμματος η εντολή File → New και εμφανίστηκε το παράθυρο δημιουργίας του καννάβου του μοντέλου (Initialize Model Grid) που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στο παράθυρο αυτό (Σχήμα 6.3), εισήχθησαν σε πρώτη φάση στοιχεία σχετικά με τον αριθμό των γραμμών, των στηλών και των επιπέδων, το μέγεθος των κελιών, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω καθώς επίσης με την οροφή και τη βάση του μοντέλου, όπως αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 6.3: Παράθυρο δημιουργίας καννάβου του μοντέλου

Μετά την εισαγωγή των στοιχείων στο παράθυρο δημιουργίας του καννάβου, επιλέχθηκε η εντολή File → Map → Bitmap και αφού επιλέχθηκε η εικόνα – υπόβαθρο εμφανίστηκε το ακόλουθο παράθυρο:



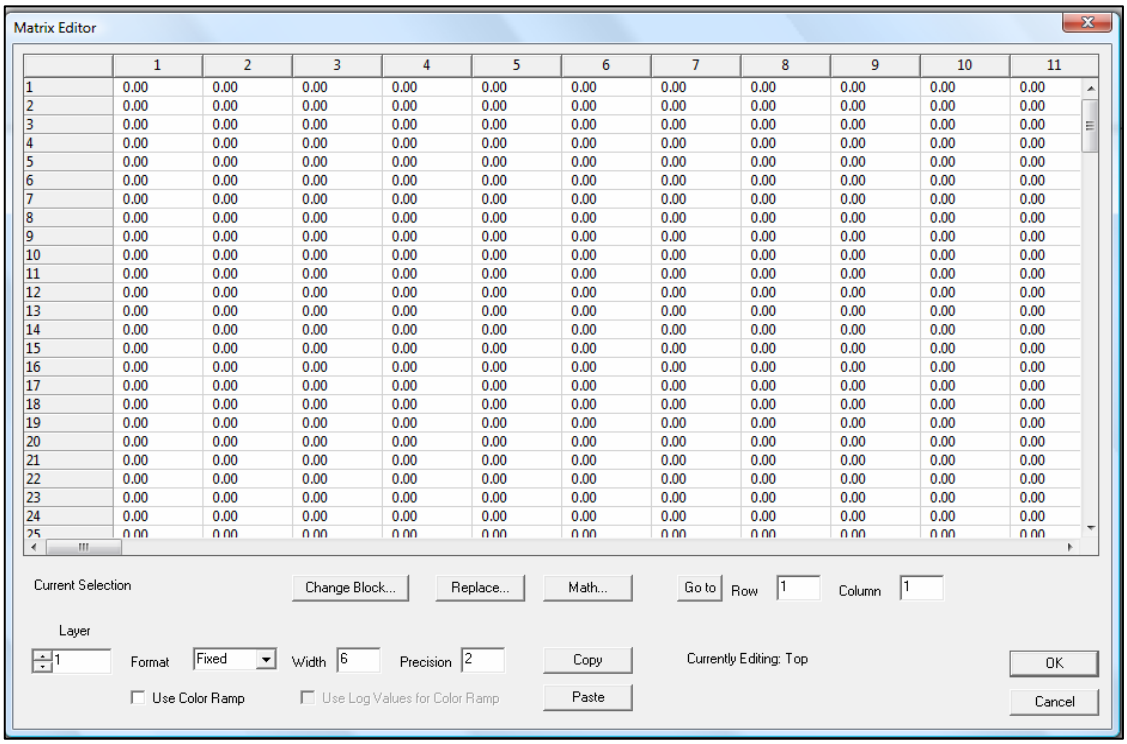
Σχήμα 6.4: Παράθυρο καταχώρησης πραγματικών συντεταγμένων και πραγματικών διαστάσεων της εικόνας – υπόβαθρου

Στο παράθυρο αυτό, το GV αρχικά εμφανίζει τον αριθμό των εικονοστοιχείων (pixel) που αντιστοιχούν στο ύψος και το πλάτος της εισακτέας εικόνας - υποβάθρου. Πιο κάτω, εισήχθησαν οι πραγματικές συντεταγμένες της κάτω αριστερής γωνίας του χάρτη (αφετηρία X, αφετηρία Y), οι οποίες υπολογίστηκαν παραπάνω με τη βοήθεια του υπάρχοντος καννάβου συντεταγμένων στο ΕΓΣΑ και των μετρήσεων αποστάσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα “LView Pro 2006”. Τέλος, εισήχθησαν το πραγματικό ύψος και πλάτος της εικόνας σε μέτρα, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω.

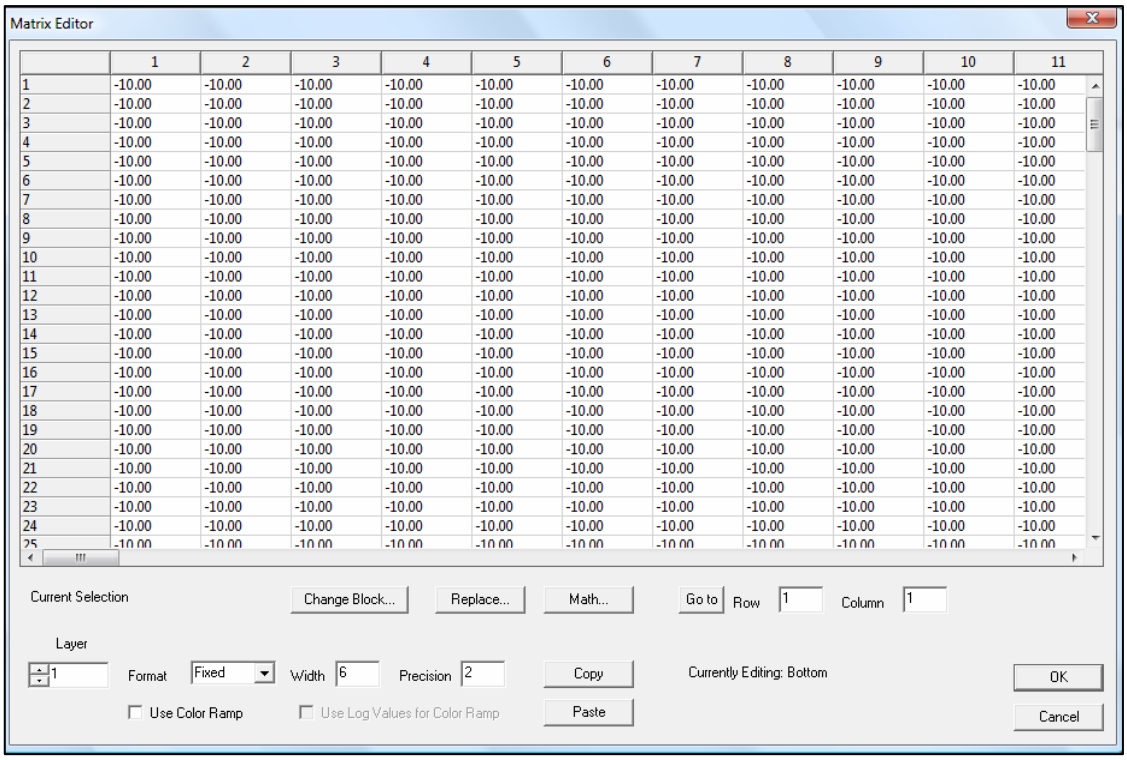
6.4 Οροφή και Βάση Μοντέλου (Model Top and Bottom Elevation)

Δεδομένου ότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα επίπεδα του καννάβου αντιστοιχούν στον άξονα των υψομέτρων Z και ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για το βάθος και τη μορφολογία του υπόβαθρου του υδροφόρου σχηματισμού, ο υδροφορέας μελέτης προσομοιώθηκε με 14 επίπεδα (layers) πάχους 10m το καθένα, όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.5. Στη Σαντορίνη γενικά δεν έχει βρεθεί αδιαπέρατο υπόβαθρο στον υδροφορέα, οπότε πιθαναλογείται ότι βρίσκεται σε βάθη μεγαλύτερα από 100m. Ακόμη, θεωρήθηκε ότι η βάση ενός επιπέδου αντιπροσωπεύει την κορυφή του υποκείμενου επιπέδου, διαφορετικά δημιουργούνται αριθμητικά προβλήματα και το μοντέλο δεν μπορεί να τρέξει. Έτσι, ως οροφή του επιπέδου 1 τέθηκε η τιμή 0 και ως βάση του επιπέδου 14 τέθηκε η τιμή -130.

Από το μενού του προγράμματος και την εντολή Props → Top elevation (ή Bottom elevation) και την εντολή Props → Property values → Matrix editor μπορούμε να παρατηρήσουμε τις τιμές των υψομέτρων για κάθε ένα από τα 5 επίπεδα. Στα σχήματα 6.5 και 6.6 φαίνεται για το επίπεδο 1 ότι παντού τίθεται model top elevation 0 και model bottom elevation -10.



Σχήμα 6.5: Πίνακας τιμών οροφής μοντέλου του επιπέδου 1



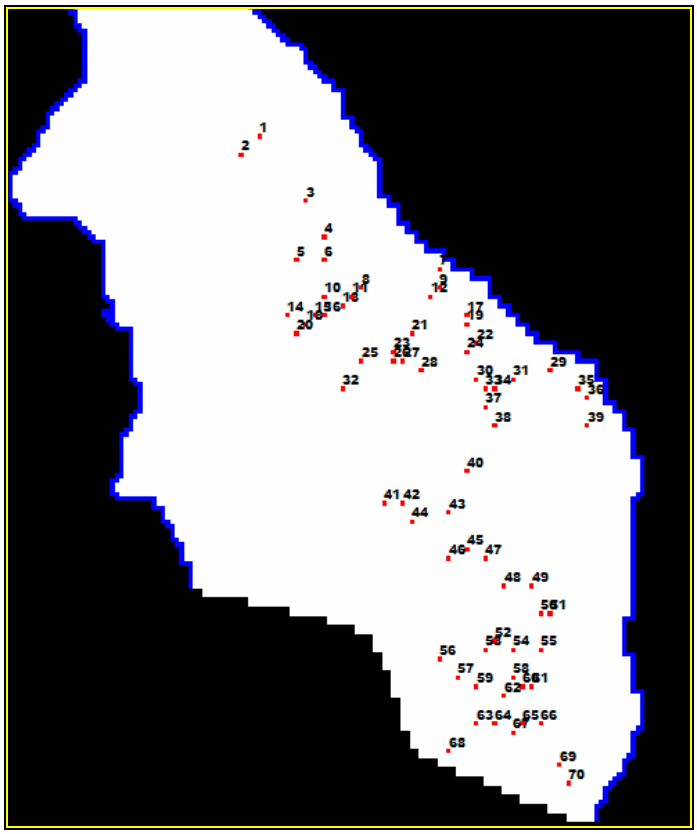
Σχήμα 6.6: Πίνακας τιμών βάσης μοντέλου του επιπέδου 1

6.5 Αρχικές Συνθήκες

6.5.1 Οριακές Συνθήκες

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατάστρωση των μαθηματικών μοντέλων ροών σε υπόγειους υδροφορείς είναι ο καθορισμός των ορίων και των αντίστοιχων συνθηκών που ισχύουν κατά μήκος του (Λατινόπουλος, 1986).

Ο υπό εξέταση υδροφορέας οριοθετείται βόρεια και νότια από αδιαπέρατα πλευρικά όρια, ενώ δυτικά και ανατολικά από θάλασσα. Στο Groundwater Vistas για την περιγραφή των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν κελιά σταθερού υδραυλικού φορτίου, ενεργά και ανενεργά κελιά.



Κελιά σταθερού φορτίου

Θέσεις γεωτρήσεων

Ανενεργά κελιά

Σχήμα 6.7: Οριακές συνθήκες μοντέλου του επιπέδου 1

Τα κελιά σταθερού φορτίου χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα όρια του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία (h), όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας έρχεται σε επαφή με υδάτινες επιφάνειες. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου στα κελιά αυτά ορίζεται από την αρχή στο μοντέλο και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, τα κελιά σταθερού φορτίου παίρνουν την τιμή -1 στο IBOUND του προγράμματος. Στον υδροφορέα που εξετάζουμε ως κελιά σταθερού υδραυλικού φορτίου, λαμβάνονται αυτά που βρίσκονται στα σύνορα του υδροφορέα με τη θάλασσα και διακρίνονται με μπλε χρώμα στο σχήμα 6.7. Για τον καθορισμό τους στο layer 1 επιλέχθηκαν από το μενού του προγράμματος οι εντολές BCs → Constant Head/Conc. καθώς και BCs → Insert → Digitize Polygon ή Window. Κατόπιν, αντιγράφηκαν με την εντολή BCs → Copy σε όλα τα υπόλοιπα layers.

Ανενεργά θεωρούνται εκείνα τα κελιά στα οποία η ροή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι μηδενική και παίρνουν την τιμή 0 στο IBOUND του προγράμματος. Τέτοια κελιά αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς, καθώς επίσης και στη θάλασσα που δεν συνορεύει άμεσα με τον υδροφορέα μελέτης, γεγονός που οφείλεται στο ότι με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο αριθμός των κελιών που συμμετέχουν στην υπολογιστική διαδικασία. Η εν λόγω αντιστοίχηση πραγματοποιήθηκε στο layer 1 επιλέγοντας τις εντολές του προγράμματος BCs → No flow καθώς και BCs → Insert → Digitize Polylgon ή Window και τα ανενεργά κελιά διακρίνονται με μαύρο χρώμα σχήμα 6.7. Κατόπιν, χρησιμοποιήθηκε η εντολή BCs → Copy για να αντιγραφούν και στα υπόλοιπα 13 layers.

Τα ενεργά κελιά είναι τα κελιά που το υδραυλικό τους φορτίο υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως, ως ενεργά λαμβάνονται τα κελιά εκείνα του καννάβου εντός του περιγράμματος του υδροφορέα τα οποία διακρίνονται με λευκό χρώμα στο σχήμα 6.7.

Όταν ορίζεται ένα κελί οριακών συνθηκών στο GV, υπάρχει η επιλογή καθορισμού του σε συνθήκες μόνιμης ή μη μόνιμης ροής. Στο συγκεκριμένο

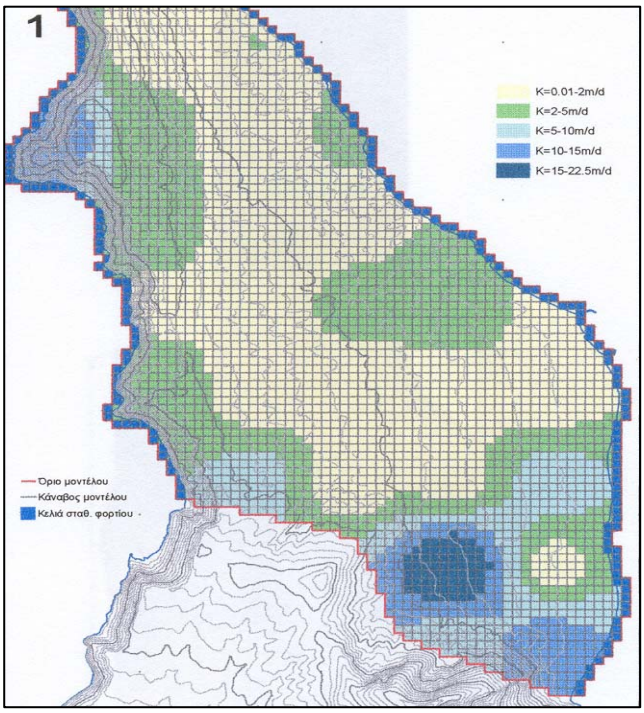
μοντέλο, θεωρήθηκαν οριακές συνθήκες μόνιμης ροής (steady state), οι οποίες είναι ενεργές καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Ως αρχικές συνθήκες εννοούνται τιμές υδραυλικών φορτίων, για κάθε ενεργό κελί και για κάθε κελί σταθερού φορτίου, οι οποίες καθορίζονται για κάποια ορισμένη χρονική στιγμή – αφετηρία. Έτσι, λοιπόν, δόθηκε ως αρχική συνθήκη, υδραυλικό φορτίο μηδέν (h=0) σε όλα τα κελιά σταθερού φορτίου της θάλασσας, αλλά και στα ενεργά κελιά του υδροφορέα. Επίσης, όπως αναφέρεται και στη παράγραφο 6.6.2, καθορίστηκε ως μέγιστη συγκέντρωση της άλμης η τιμή 35 kg/m^3.

Τέλος, εισήχθησαν οι γεωτρήσεις του υδροφορέα μελέτης στα 3 πρώτα layers μέσω της εντολής BCs → Well καθώς και BCs → Insert → Single Cell, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 6.7 με κόκκινο χρώμα.

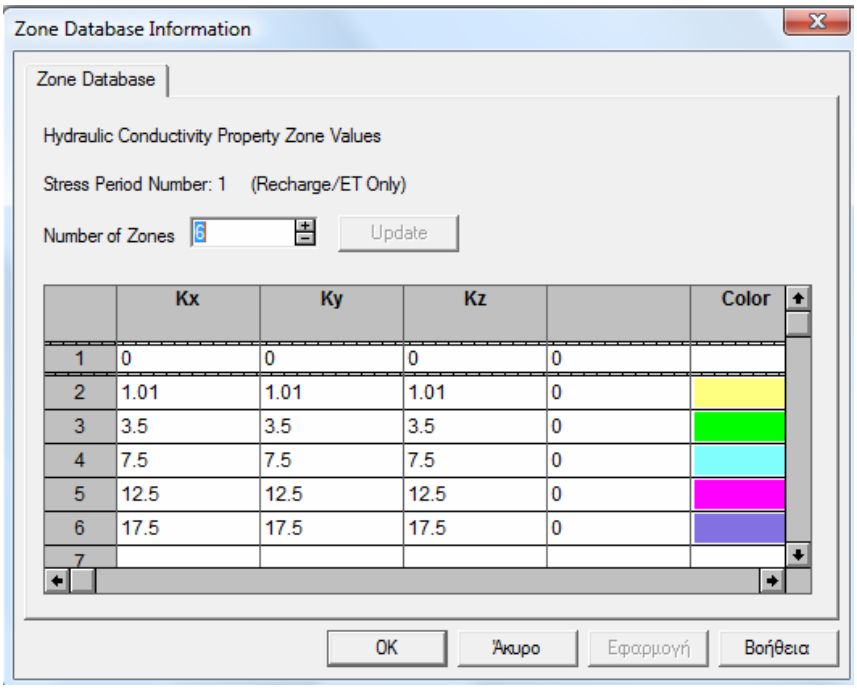
6.5.2 Καθορισμός Ζωνών Υδραυλικής Αγωγιμότητας (K)

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους και του ρευστού μέσου και αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο για το μοντέλο. Στον υδροφορέα μελέτης δεν υπάρχει μια ενιαία τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά κάποιες ζώνες με διαφορετικές τιμές. Ο καθορισμός των ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας έγιναν με βάση έναν χάρτη - υπόβαθρο του Ι.Γ.Μ.Ε. (σχήμα 6.8) στον οποίο οριοθετούνται έξι ζώνες αυτές και δίνονται οι τιμές τους.



Σχήμα 6.8: Χάρτης-υπόβαθρο ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας (Ι.Γ.Μ.Ε.)

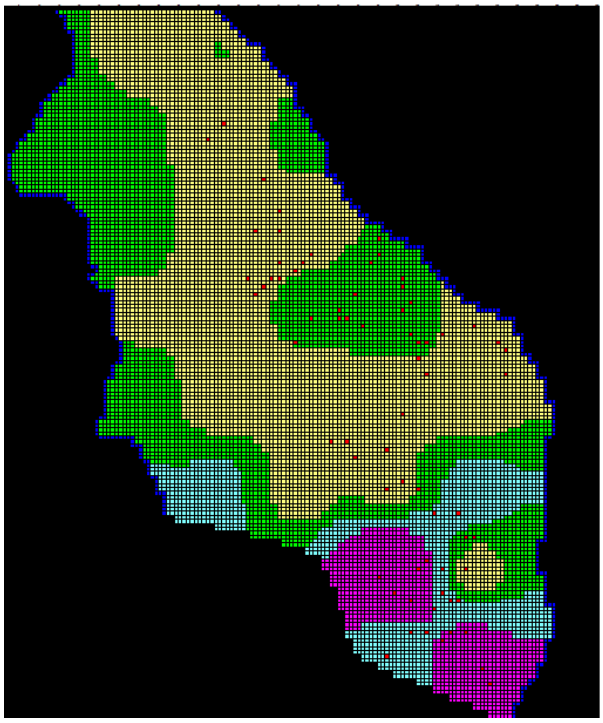
Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για να καθοριστούν για κάθε ζώνη η τιμή και το χρώμα της είναι Props → Property Values → Database… και Props → Property Values → Edit Zone Colors…(σχήμα 6.9)



	Kx	Ky	Kz		Color
1	0	0	0	0	
2	1.01	1.01	1.01	0	
3	3.5	3.5	3.5	0	
4	7.5	7.5	7.5	0	
5	12.5	12.5	12.5	0	
6	17.5	17.5	17.5	0	
7					

Σχήμα 6.9: Παράθυρο καθορισμού ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας

Τα όρια κάθε ζώνης σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του διαθέσιμου χάρτη – υποβάθρου του σχήματος 6.8 και μέσω των εντολών Props → Set Value or Zone → Digitize Polygon. Οι εν λόγω ζώνες φαίνονται στο σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας μοντέλου υδροφορέα Σαντορίνης

6.5.3 Τροφοδοσία (Recharge)

Σύμφωνα με μελέτη των Μαντόγλου - Γιαννουλόπουλου, η μέση ετήσια φυσική τροφοδοσία στην επιφάνεια του μοντέλου είναι 1.355.100 m^3/y ή 3.712,60 m^3/d. Στην παράγραφο 6.3, θεωρήθηκε ότι τα κελιά του καννάβου του υδροφορέα έχουν διαστάσεις 50x50 m^2. Επίσης, μέσω της εντολής Model → Model Information…, βρέθηκε ότι ο αριθμός των ενεργών κελιών όλων των layers (active cells) είναι 186.634 και κατ' επέκταση ο αριθμός των ενεργών κελιών κάθε επιπέδου είναι 13.331. Συνεπώς, προκύπτει ότι το εμβαδόν του υδροφορέα είναι 50x50×13.331 = 33.327.500 m^2 ≈ 33 × 10^6 m^2 και κατ' επέκταση η τιμή της τροφοδοσίας που εισήχθη στο μοντέλο υπολογίσθηκε στα 3.712,60 / 33.327.500 = 0,00011 m/d ή 0,040 m/y.

6.5.4 Διασπορά (Dispersivity)

Ένας από τους κύριους μηχανισμούς κίνησης ρύπων στα υπόγεια νερά είναι η διασπορά και οφείλεται στην ετερογένεια του πορώδους και στη μεταβλητότητα των μικροσκοπικών, καθώς και των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο πορώδες μέσο σε όλες τις δυνατές κλίμακες. Η τιμή που ορίστηκε για τη διασπορά επιλέχτηκε σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές, καθώς είναι πολύ δύσκολος έως αδύνατος ο προσδιορισμός της, αφού δεν υπάρχουν στοιχεία συγκέντρωσης και παρουσιάζει πολλές ασάφειες και ανομοιογένειες. Συγκεκριμένα, Dispersivity Longitudinal=5m, Dispersivity Transverse=0,5 m και Dispersivity Vertical=0 m.

6.5.5 Πορώδες (Porosity)

Βάσει της επικρατούσας κοκκομετρίας των υλικών του υδροφορέα, ως μέση τιμή του πορώδους επιλέχθηκε η τιμή P=0,3.

6.5.6 Αποθηκευτικότητα (Storage)

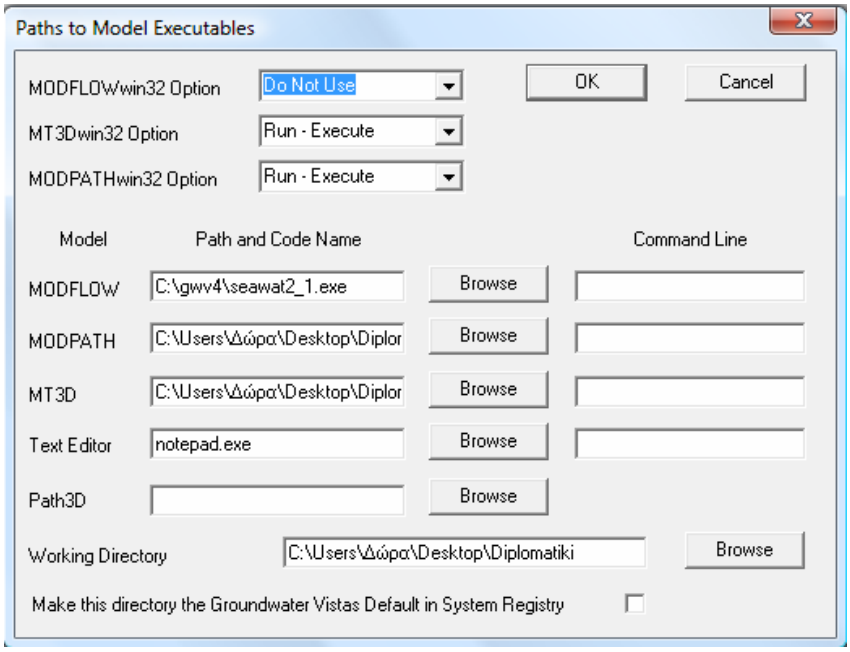
Η αποθηκευτικότητα (S) του υδροφορέα, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, ισούται με τον όγκο νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου Δφ. Σύμφωνα με στοιχεία από τη Διδακτορική Διατριβή του Γεώργιου Κουράκου (Φεβρουάριος 2010) δόθηκε S= 0,01 και S_y = 0,01.

6.6 Επιπρόσθετες Απαιτούμενες Ρυθμίσεις

6.6.1 Καθορισμός Φακέλου Αποθήκευσης Αρχείων

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων με το GroundWater Vistas λαμβάνει χώρα μετά τον σχεδιασμό του μοντέλου και τις κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων του. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η εντολή Model → Paths to

Models και εμφανίστηκε το ακόλουθο παράθυρο (Σχήμα 6.11), όπου καταχωρήθηκε η τοποθεσία των χρησιμοποιούμενων μοντέλων (MODFLOW, MODPATH, MT3D) στον σκληρό δίσκο του υπολογιστή. Στο κάτω μέρος του παραθύρου υπάρχει ένα πεδίο που ονομάζεται “Working Directory”. Το “Working Directory” αποτελεί έναν φάκελο όπου αποθηκεύονται τα αρχεία με τα δεδομένα.



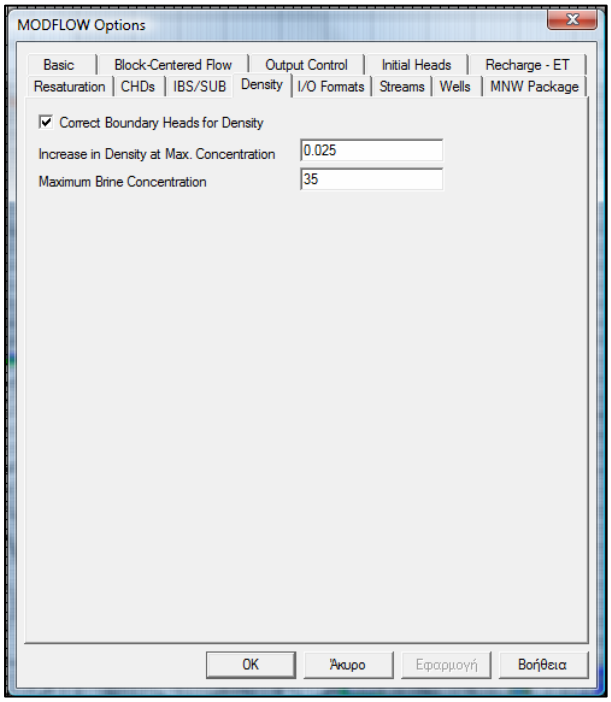
Σχήμα 6.11: Παράθυρο ορισμού φακέλου αποθήκευσης αρχείων

6.6.2 Ρυθμίσεις MODFLOW και MT3D

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, οι μονάδες του χρόνου (time units) μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Basic tab επιλέγονται σε ημέρες (days) και οι μονάδες του μήκους (length units) σε m, έτσι ώστε όλες οι παράμετροι στο μοντέλο να αναφέρονται σε μονάδες μέτρα ανά ημέρα (m/d) και οι μονάδες μάζας σε χιλιόγραμμα (kg).

Σε οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το θαλασσινό νερό, καθορίστηκε ως μέγιστη συγκέντρωση της άλμης η τιμή 35 kg/m^3 μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Density tab. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η σχετική αύξηση πυκνότητας μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού (λόγος συγκεντρώσεων θαλασσινού και γλυκού νερού), η οποία

θεωρήθηκε 0,025, που σημαίνει ότι το θαλασσινό νερό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το γλυκό κατά 2,5% (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6.12: Παράθυρο ορισμού ιδιοτήτων θαλασσινού νερού

Επίσης, ορίστηκαν για το MT3D οι μονάδες χρόνου σε ημέρες (days), οι μονάδες μήκους σε μέτρα (m) και μάζας σε κιλά (kg) με την εντολή Model → MT3D → General Options – Basic Transport tab.

Τέλος, ορίστηκε ως μέγιστο βήμα μεταφοράς η τιμή 1000 και ως μέγιστο χρονικό βήμα η τιμή 50, μέσω της εντολής Model → MT3D → General Options – Time Stepping tab.

6.6.3 Καθορισμός Περιόδου

Στο MODFLOW, όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.1, η συνολική περίοδος προσομοίωσης διαιρείται σε μια ή και περισσότερες περιόδους. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, οι παροχές και οι οριακές συνθήκες διατηρούνται σταθερές. Επιπλέον, κάθε περίοδος χωρίζεται σε ένα ή και περισσότερα χρονικά βήματα, ώστε τα αποτελέσματα να είναι είτε πιο ακριβή είτε να επιτρέπουν την εξαγωγή αποτελεσμάτων τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Το μέγεθος κάθε περιόδου ήταν 40.000 ημέρες, διότι είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στο πρόγραμμα, και καθορίστηκε επιλέγοντας Model → MODFLOW → Stress Period Setup.

6.6.4 Ρυθμίσεις SEAWAT

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το SEAWAT, ρυθμίστηκε ως τύπος εκτέλεσής του το MODFLOW/MT3DMS. Επιπλέον, υπάρχουν κάποιες επιπρόσθετες επιλογές που έπρεπε να διαμορφωθούν. Συγκεκριμένα:

- Επιλέχθηκε η εντολή Model → MODFLOW → Packages και μετατράπηκε η επιλογή MODFLOW σε SEAWAT.

- Επιλέχθηκε η εντολή Model → Paths to Models και αλλάχθηκε η επιλογή MODFLOWwin32 από "run - execute" σε "do not use", καθώς επίσης και ο τύπος του MODFLOW σε seawat2_1.exe. (Σχήμα 6.11)

- Επιλέχθηκε η εντολή Model → SEAWAT → Create Datasets για τη δημιουργία των εισαγόμενων αρχείων.

- Επιλέχθηκε η εντολή Model → SEAWAT → Run SEAWAT για να τρέξει το πρόγραμμα. Η δημιουργία των δεδομένων στοιχείων και η εκτέλεση του SEAWAT έγινε από το μενού του SEAWAT.

Στη συνέχεια, για να υπολογιστούν οι πραγματικές τιμές των υδραυλικών φορτίων και της συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών (άλατος), έπρεπε να πραγματοποιηθούν επαναλήψεις τόσων ημερών, μέχρι το γλυκό και το θαλασσινό νερό να φτάσουν σε ισορροπία, δηλαδή μέχρι η διείσδυση της θάλασσας προς το εσωτερικό του υδροφορέα να λαμβάνει χώρα έως ένα σημείο, το οποίο καθορίζεται από το ίδιο το φυσικό σύστημα.

Δεδομένου ότι οι 40.000 ημέρες, είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στο πρόγραμμα, χρειάστηκε να τρέξει μια φορά το μοντέλο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και κατόπιν τα τελικά αποτελέσματα αυτού του προβλήματος να

χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές συνθήκες για τη νέα εκτέλεση. Στο παρόν μοντέλο, η όλη διαδικασία των αρχικών - τελικών συνθηκών έπρεπε να επαναληφθεί 6 φορές, μέχρις ότου αποκαταστάθηκε μια σχετική ισορροπία στο σύστημα (240.000 ημέρες), γεγονός που αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα του πίνακα 6.1. Ειδικότερα, παρατηρείται σχετική σταθεροποίηση των τιμών υδραυλικού φορτίου μεταξύ της 6^{ης} και 7^{ης} επανάληψης.

Πίνακας 6.1: Υδραυλικό φορτίο παράκτιων πηγαδιών από την 4η έως την 7η επανάληψη στο επίπεδο 3 του υδροφορέα.

Αριθμός Πηγαδιού	**Πηγάδι [R,C]**	**Υδραυλικό φορτίο (m)**			
Αριθμός επανάληψης		**4^{η}**	**5^{η}**	**6^{η}**	**7^{η}**
7	**[59,95]**	0,91	0,90	0,89	0,88
9	**[63,95]**	1,28	1,27	1,26	1,25
17	**[69,101]**	1,36	1,35	1,33	1,32
29	**[81,119]**	1,27	1,24	1,22	1,21
35	**[85,125]**	1,18	1,15	1,13	1,11
36	**[87,127]**	1,12	1,09	1,07	1,05
69	**[167,121]**	1,16	1,13	1,10	1,09
70	**[171,123]**	1,01	0,98	0,96	0,95

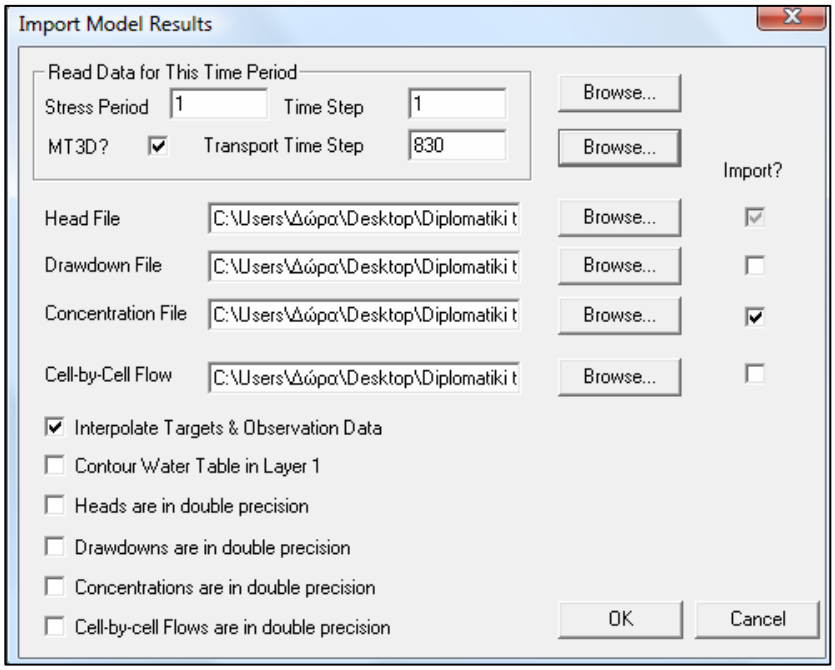
R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Όσον αφορά τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πραγμάτωση των επαναλήψεων, κάθε επανάληψη χωριζόταν σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Initial Heads tab επιλέχθηκε στο Initial Head Location η επιλογή Read Heads Directly from binary head - save file. Κατόπιν, από την εντολή Model → MT3D → General Options – Initial Concentrations tab καθορίστηκε ως χρονικό βήμα η τιμή 830, όπως προέκυψε από την πρώτη εκτέλεση του μοντέλου και επιλέχθηκε η επιλογή Set Initial Concentrations from Binary File. Εν συνεχεία, επιλέχθηκε η εντολή Model → SEAWAT → Create Datasets για τη δημιουργία των εισαγόμενων αρχείων και η εντολή Model → SEAWAT → Run SEAWAT για να τρέξει το μοντέλο.

Στη δεύτερη φάση και μετά την εκτέλεση του μοντέλου, μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Initial Heads tab επιλέχθηκε στο Initial Head Location αυτή τη φορά η επιλογή Use Initial Heads Property Data και μετά η εντολή Model → SEAWAT → Create Datasets για τη δημιουργία των εισαγόμενων αρχείων και η εντολή Model → SEAWAT → Run SEAWAT για να εκτελεστεί το μοντέλο.

Οι δύο παραπάνω φάσεις επαναλήφθηκαν έξι φορές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά τα δημιουργημένα αρχεία των υδραυλικών φορτίων και των συγκεντρώσεων της προηγούμενης επανάληψης, όπου επήλθε μια σχετική ισορροπία στο σύστημα, όσον αφορά την διείσδυση του θαλασσινού νερού κάτω από το γλυκό νερό, δηλαδή σταθεροποιήθηκε η διεπιφάνεια γλυκού και αλμυρού νερού του υδροφορέα.

Στο τέλος κάθε φάσης, εμφανιζόταν το παράθυρο Import Model Results (Σχήμα 6.13), όπου οριζόταν χρονικό βήμα μεταφοράς 830, το οποίο προέκυπτε από την εκτέλεση του μοντέλου για περίοδο 40.000 ημερών και εισάγονταν τα αρχεία με τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της εκάστοτε επανάληψης.



Σχήμα 6.13: Παράθυρο εισαγωγής αρχείων για την προβολή των αποτελεσμάτων

6.7 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Σε Συνθήκες Ισορροπίας

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε συνθήκες ισορροπίας (της 6^{ης} επανάληψης), χωρίς την επίδραση αντλήσεων, συμπτύσσονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 6.2) και απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα:

Πίνακας 6.2: Υδραυλικό φορτίο και συγκεντρώσεις άλατος παράκτιων πηγαδιών του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Υδραυλικό φορτίο επιπέδου 3 (m)	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 3 (kg/m^3)	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)
7	**[59,95]**	0,89	8,85	1,02
9	**[63,95]**	1,26	1,30	0,01
17	**[69,101]**	1,33	0,69	0,00
29	**[81,119]**	1,22	1,31	0,00
35	**[85,125]**	1,13	2,23	0,00
36	**[87,127]**	1,07	3,39	0,02
69	**[167,121]**	1,10	2,02	0,00
70	**[171,123]**	0,96	4,79	0,07

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

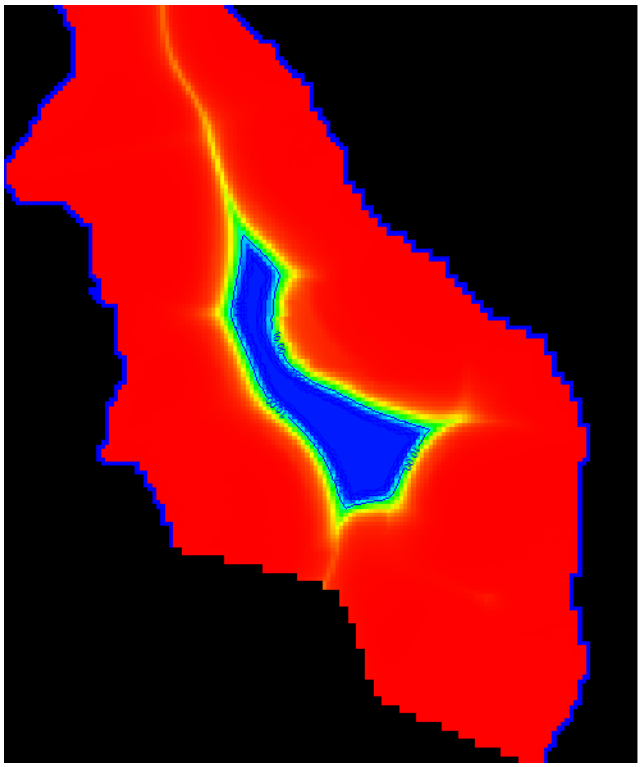
Πίνακας 6.3: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 3 (kg/m^3)	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)
1	**[30,56]**	0,00	0,00
2	**[34,52]**	0,00	0,00
3	**[44,66]**	0,00	0,00
8	**[63,78]**	0,00	0,00
12	**[65,93]**	0,19	0,00
19	**[71,101]**	0,24	0,00
22	**[75,103]**	0,05	0,00
24	**[77,101]**	0,00	0,00
30	**[83,103]**	0,00	0,00

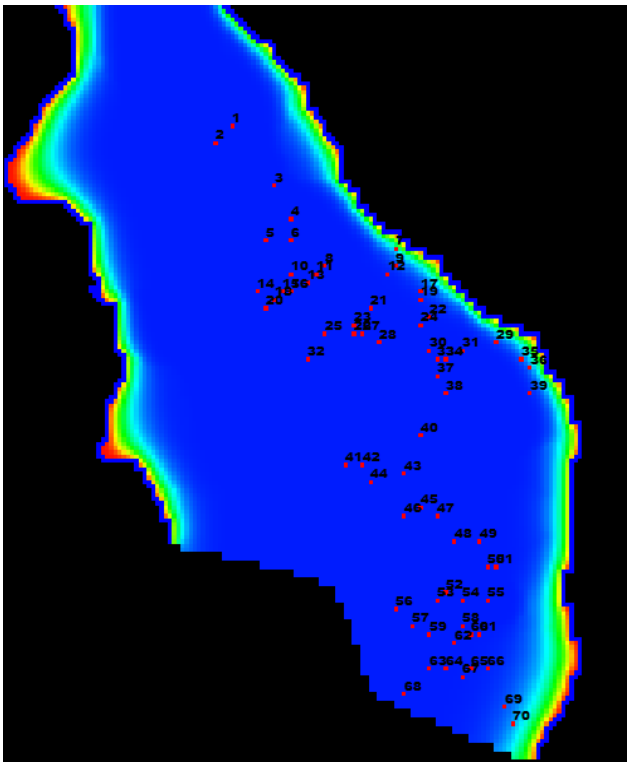
31	**[83,111]**	0,00	0,00
33	**[85,105]**	0,00	0,00
34	**[85,107]**	0,00	0,00
37	**[89,105]**	0,00	0,00
45	**[120,101]**	0,00	0,00
47	**[122,105]**	0,00	0,00
49	**[128,115]**	0,00	0,00
50	**[134,117]**	0,00	0,00
51	**[134,119]**	0,00	0,00
54	**[142,111]**	0,00	0,00
55	**[142,117]**	0,00	0,00
58	**[148,111]**	0,00	0,00
60	**[150,113]**	0,01	0,00
61	**[150,115]**	0,02	0,00
62	**[152,109]**	0,00	0,00
63	**[158,103]**	0,00	0,00
64	**[158,107]**	0,00	0,00
65	**[158,113]**	0,09	0,00
66	**[158,117]**	0,31	0,00
67	**[160,111]**	0,06	0,00

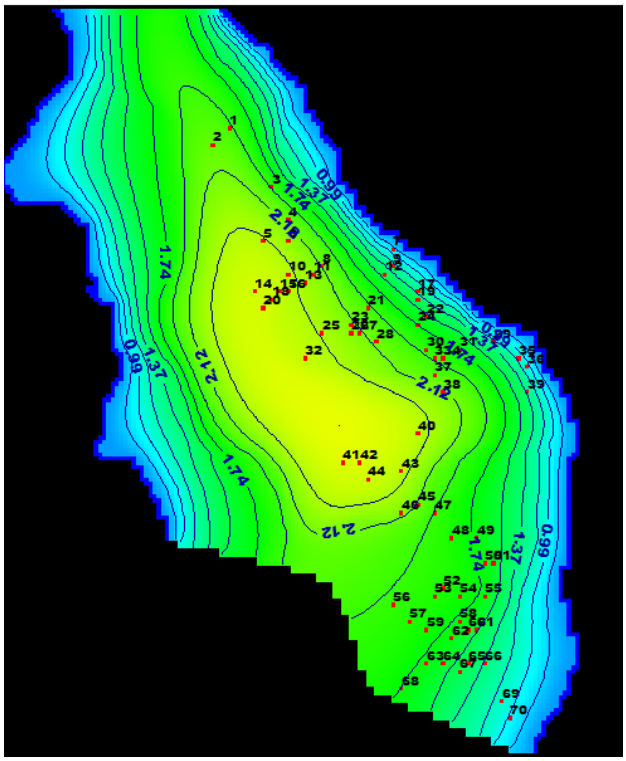
R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Στο επίπεδο 1 φαίνεται ότι από τα πηγάδια του υδροφορέα σε συνθήκες ισορροπίας, υφαλμυρώνεται μόνο το πηγάδι με αριθμό 7 που βρίσκεται πολύ κοντά στην ακτή, αφού η τιμή της συγκέντρωσης άλατος είναι μεγαλύτερη από την οριακή τιμή 0,5 kg/m^3. Αντιθέτως, στο επίπεδο 3 υφαλμυρώνονται όλα τα παράκτια πηγάδια του υδροφορέα. Τέλος, παρατηρείται ότι οι τιμές των υδραυλικών φορτίων είναι όλες θετικές ακόμη και στα παράκτια πηγάδια.



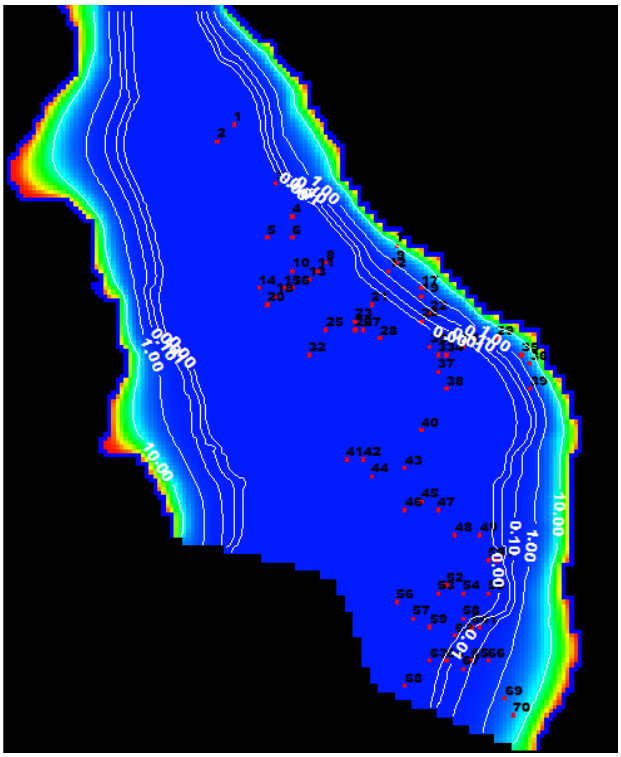
Σχήμα 6.14: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα χωρίς αντλήσεις στο επίπεδο 14



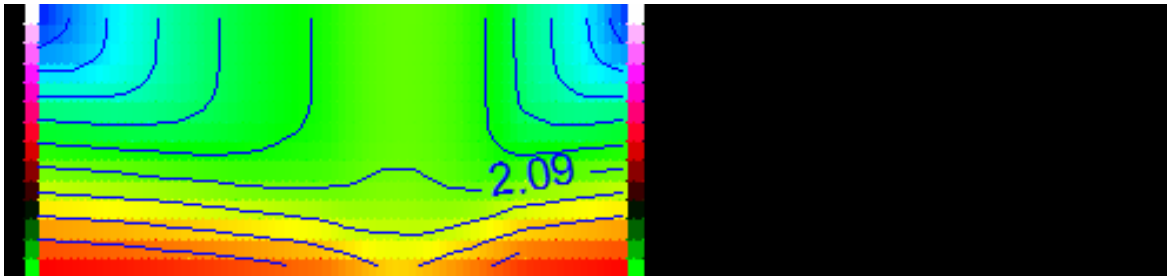


Σχήμα 6.15(α): Κατανομή συγκεντρώσεων **Σχήμα 6.16(β):** Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 3 χωρίς αντλήσεις

Σχήμα 6.17: Τομή αλάτινης σφήνας υδροφορέα στη γραμμή 2 χωρίς αντλήσεις (Row number = 2)



Σχήμα 6.18: Ισοχλώριες καμπύλες υδροφορέα στο επίπεδο 3 χωρίς αντλήσεις



Σχήμα 6.19: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη γραμμή 35 χωρίς αντλήσεις (Row number = 35)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά του υδροφορέα, διερευνούνται διάφορα σενάρια. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από την σύγκριση των εν λόγω σεναρίων μεταξύ τους.

Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ισοκατανεμημένων παροχών άντλησης στον υδροφορέα, δηλαδή γίνεται άντληση από όλα τα πηγάδια ίδιων παροχών, διαφορετικού μεγέθους κάθε φορά και με διαφορετική τροφοδοσία, έτσι ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά του υδροφορέα σε κάθε μεταβολή ισοκατανεμημένης άντλησης και τροφοδοσίας και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Εν συνεχεία, γίνεται η υπόθεση ανισοκατανεμημένων παροχών άντλησης στον υδροφορέα, θεωρώντας δύο και τρεις ζώνες άντλησης. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας ότι το πάχος του φακού του γλυκού νερού στις γεωτρήσεις κοντά στην ακτή είναι μικρότερο από αυτό των γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα και προς αποφυγή του φαινομένου της υφαλμύρωσης, θεωρείται μηδενική άντληση στα παράκτια πηγάδια και άντληση μόνο από τα πηγάδια του εσωτερικού του υδροφορέα.

Σκοπός των διάφορων αυτών σεναρίων είναι η εύρεση κάθε φορά της βέλτιστης τιμής άντλησης σε σχέση με την συνολική τροφοδοσία, έτσι ώστε να αποφευχθεί στον καλύτερο βαθμό η υφαλμύρωση των γεωτρήσεων. Τα παραπάνω σενάρια εφαρμόστηκαν και σχεδιάστηκαν με το μοντέλο SEAWAT στο λογισμικό GROUNDWATER VISTAS (GWVistas).

7.2 Ισοκατανεμημένες Αντλήσεις

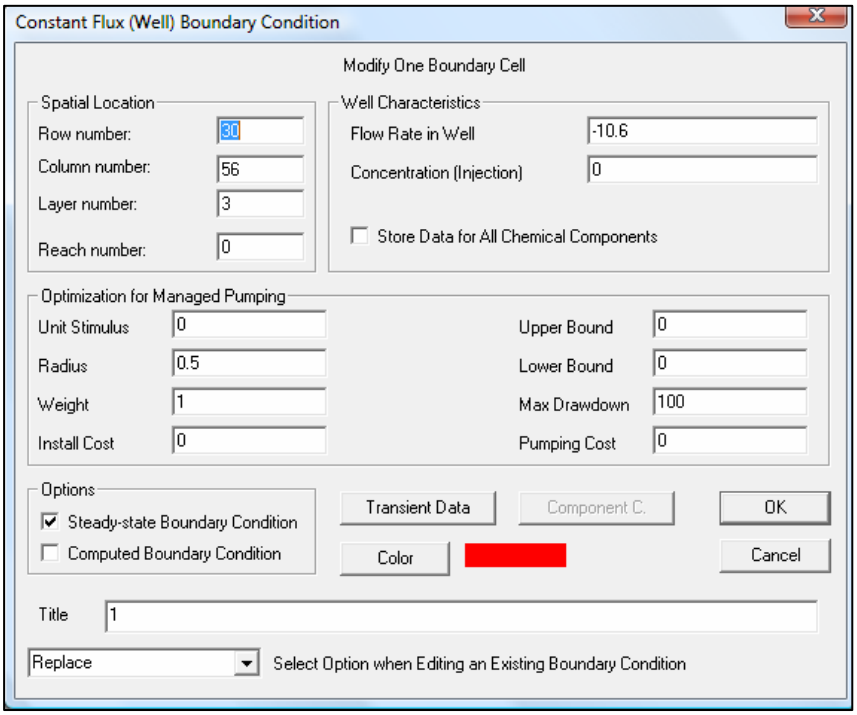
7.2.1 Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 40% της Συνολικής Τροφοδοσίας από Βάθος 30m

Όπως έχει υπολογιστεί σε μελέτη των Π. Γιαννουλόπουλου και Α. Μαντόγλου, η μέση ετήσια φυσική τροφοδοσία στην επιφάνεια του μοντέλου είναι 1.355.100 m^3/έτος ή 3.712,60 m^3/d. Επίσης, είναι γνωστό ότι τα πηγάδια του υδροφορέα είναι συνολικά 70 και θεωρείται ότι καταλαμβάνουν τα τρία πρώτα επίπεδα, δηλαδή ότι φτάνουν το βάθος των 30m. Ακόμη, βάσει του σεναρίου αυτού, σε κάθε ένα από τα πηγάδια κάθε επιπέδου αντιστοιχεί παροχή άντλησης με τιμή 7,07 m^3/d ή αθροιστικά σε κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d, τιμές που αντιστοιχούν στο 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας, αφού παροχές άντλησης που αντιστοιχούν πάνω από το 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας, διαπιστώθηκε ότι δίνουν πολύ μεγάλες τιμές υφαλμύρωσης στα πηγάδια.

Η καταχώρηση των εν λόγω αντλήσεων έγινε μέσω της εντολής του προγράμματος BCs → Well και κατόπιν επιλέγοντας το κελί κάθε πηγαδιού και αντιστοιχίζοντας με αρνητικό πρόσημο την τιμή 21,21 m^3/d, αφού το ποσό αυτό αφαιρείται από το υδατικό απόθεμα του υδροφορέα (Σχήμα 7.1).

Εν συνεχεία, εκτελέστηκε η προσομοίωση για περίοδο (stress period) 10.000 ημερών, δηλαδή για 27 περίπου χρόνια. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση έγινε σε δύο φάσεις, όπως περιγράφτηκε και στην παράγραφο 6.5.4. Στην πρώτη φάση, μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Initial Heads tab επιλέχθηκε στο Initial Head Location η επιλογή Read Heads Directly from binary head-save file. Κατόπιν, από την εντολή Model → MT3D → General Options – Initial Concentrations tab καθορίστηκε ως χρονικό βήμα η τιμή 830, όπως προέκυψε από την πρώτη εκτέλεση του μοντέλου και επιλέχθηκε η επιλογή Set Initial Concentrations from Binary File. Εν συνεχεία, επιλέχθηκε η εντολή Model → SEAWAT → Create Datasets για

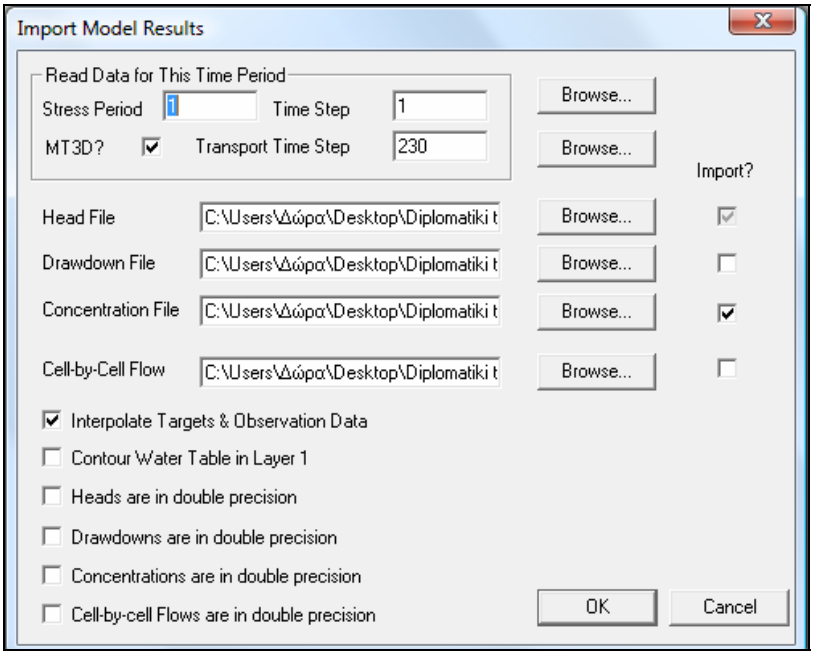
τη δημιουργία των εισαγόμενων αρχείων και η εντολή Model → SEAWAT → Run SEAWAT για να εκτελεστεί το μοντέλο.



Σχήμα 7.1: Παράθυρο εισαγωγής παροχών άντλησης

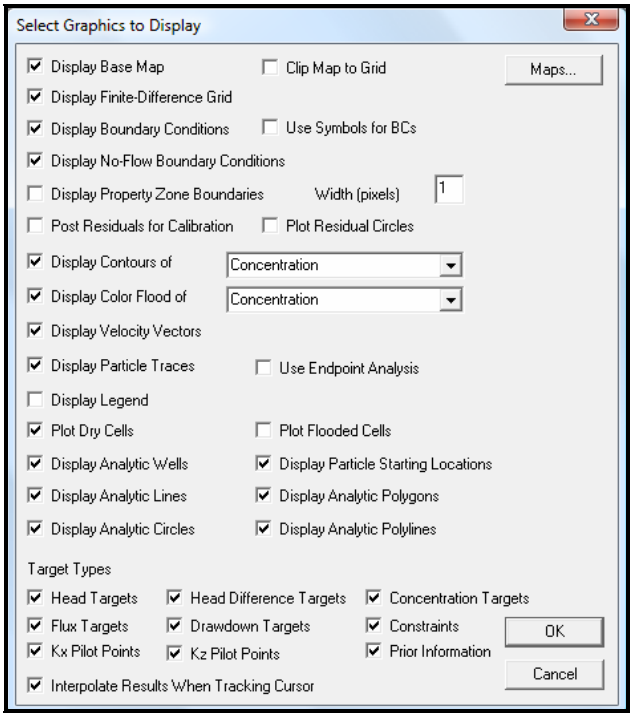
Στη δεύτερη φάση της προσομοίωσης, μέσω της εντολής Model → MODFLOW → Package Options – Initial Heads tab επιλέχθηκε στο Initial Head Location αυτή τη φορά η επιλογή Use Initial Heads Property Data και μετά η εντολή Model → SEAWAT → Create Datasets για τη δημιουργία των εισαγόμενων αρχείων και η εντολή Model → SEAWAT → Run SEAWAT για να εκτελεστεί το μοντέλο.

Μόλις ολοκληρώθηκε η προσομοίωση του μοντέλου, εμφανίστηκε το παράθυρο Import Model Results (Σχήμα 7.2), όπου ορίσθηκε χρονικό βήμα μεταφοράς 230, το οποίο προέκυψε από την εκτέλεση του μοντέλου για περίοδο 10.000 ημερών και εισήχθησαν τα αρχεία με τα αποτελέσματα της εκτέλεσης.

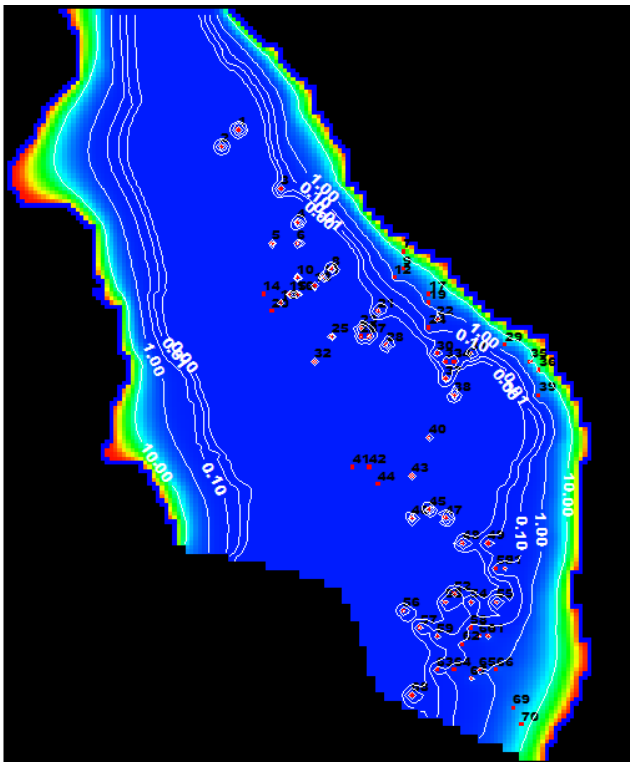


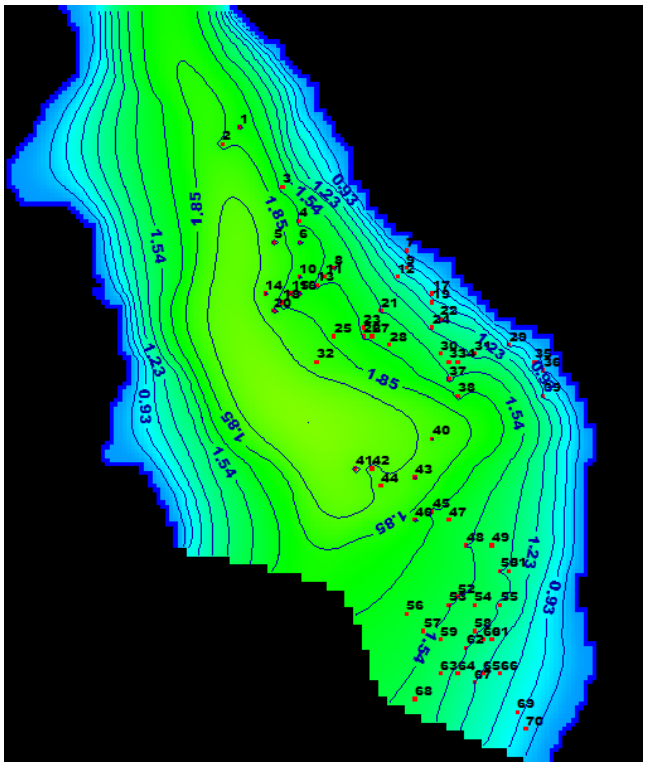
Σχήμα 7.2: Παράθυρο εισαγωγής αρχείων για την προβολή των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d καθορίστηκαν από το μενού του προγράμματος Plot → What to Display… (Σχήμα 7.3) και φαίνονται στα Σχήματα 7.4 έως 7.6.

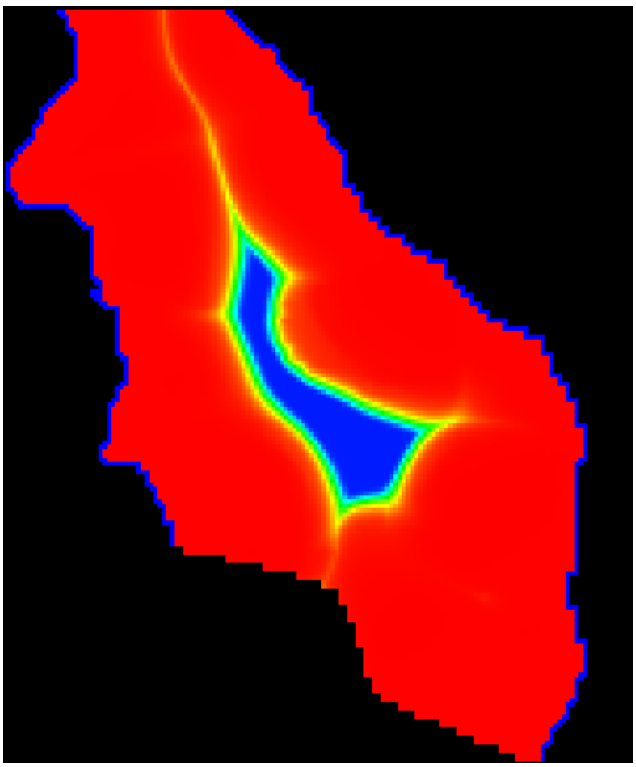


Σχήμα 7.3: Παράθυρο καθορισμού τρόπου αναπαράστασης αποτελεσμάτων

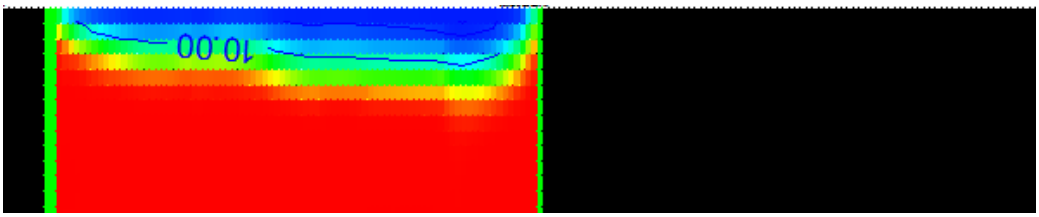




Σχήμα 7.4(α): Ισοχλώριες καμπύλες **Σχήμα 7.4(β):** Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 3 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d



Σχήμα 7.5: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d



Σχήμα 7.6: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132)

Πίνακας 7.1: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 3 του υδροφορέα με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Υδραυλικό φορτίο (m)	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)
7	**[59,95]**	0,71	15,88
9	**[63,95]**	0,96	5,47
17	**[69,101]**	1,01	4,66
29	**[81,119]**	0,86	8,34
35	**[85,125]**	0,76	11,83
36	**[87,127]**	0,72	14,09
39	**[93,127]**	1,00	5,84
69	**[167,121]**	0,95	4,91
70	**[171,123]**	0,84	8,52

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.2: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 3 του υδροφορέα με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών επιπέδου 3 (kg/m^3)
1	**[30,56]**	0,69
2	**[34,52]**	0,53
3	**[44,66]**	0,62
8	**[63,78]**	0,35

12	**[65,93]**	2,09
19	**[71,101]**	2,82
22	**[75,103]**	1,78
24	**[77,101]**	0,82
30	**[83,103]**	0,46
31	**[83,111]**	1,59
33	**[85,105]**	0,54
34	**[85,107]**	0,68
37	**[89,105]**	0,42
45	**[120,101]**	0,35
47	**[122,105]**	0,43
49	**[128,115]**	0,43
50	**[134,117]**	0,87
51	**[134,119]**	1,43
54	**[142,111]**	0,38
55	**[142,117]**	1,84
58	**[148,111]**	0,55
60	**[150,113]**	1,06
61	**[150,115]**	1,53
62	**[152,109]**	0,55
63	**[158,103]**	0,46
64	**[158,107]**	0,79
65	**[158,113]**	1,50
66	**[158,117]**	2,16
67	**[160,111]**	1,26

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

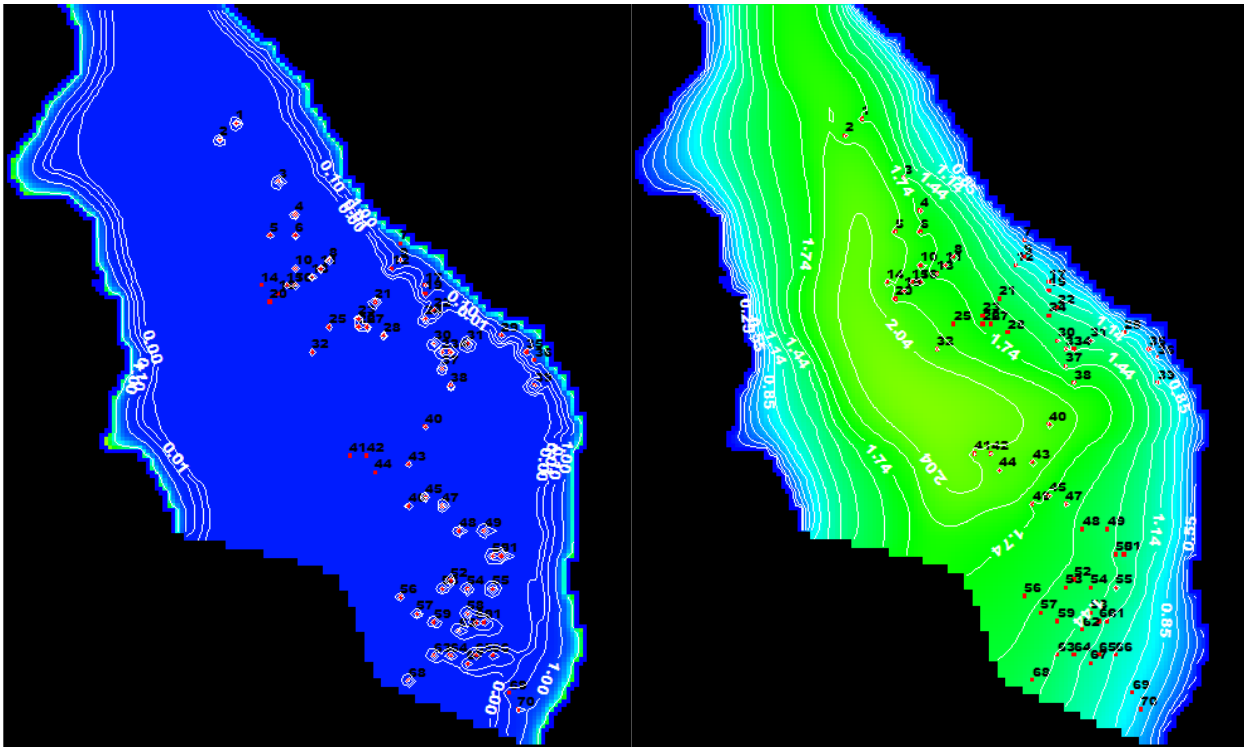
Παρατηρείται ότι στο βάθος των 30m (επίπεδο 3) η πλειοψηφία των πηγαδιών υφαλμυρώνεται, γι' αυτό συνίστανται αντλήσεις από βάθη μικρότερα των 30m.

7.2.2 Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 40% της Συνολικής Τροφοδοσίας από Βάθος 10m

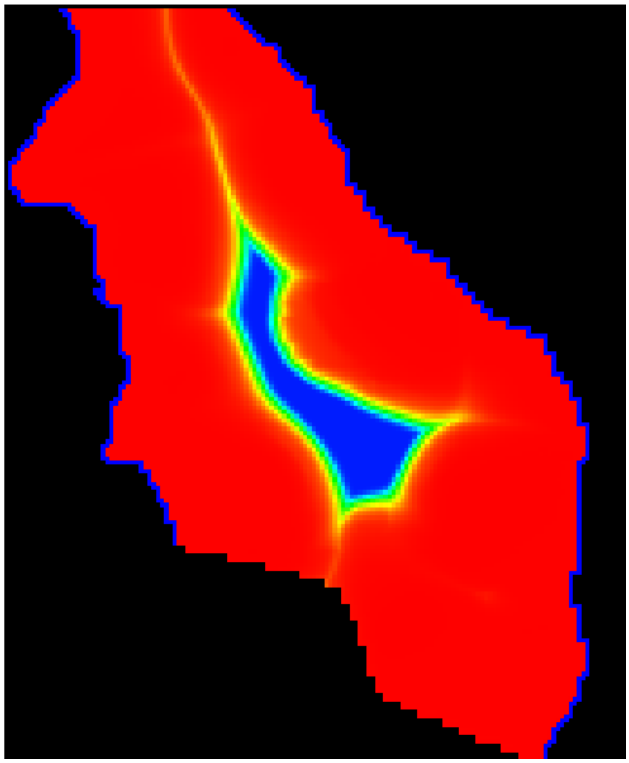
Στο σενάριο αυτό, έγινε η υπόθεση ότι αντλείται περίπου το 40% της εν λόγω τροφοδοσίας, η οποία αντιστοιχεί σε 2.226,82 m^3/d ή 812.788,38 m^3/y, καθώς σε μεγαλύτερα ποσοστά άντλησης παρατηρείται μεγάλος βαθμός υφαλμύρωσης. Τα πηγάδια του υδροφορέα θεωρήθηκε ότι καταλαμβάνουν το πρώτο επίπεδο, δηλαδή φτάνουν μέχρι το βάθος των 10m και κατ' επέκταση από κάθε πηγάδι αντλείται παροχή άντλησης με τιμή 21,21 m^3/d.

Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, όπως αυτές του πρώτου σεναρίου. Ακόμη, η καταχώρηση των αντλήσεων, η προσομοίωση του σεναρίου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2.1.

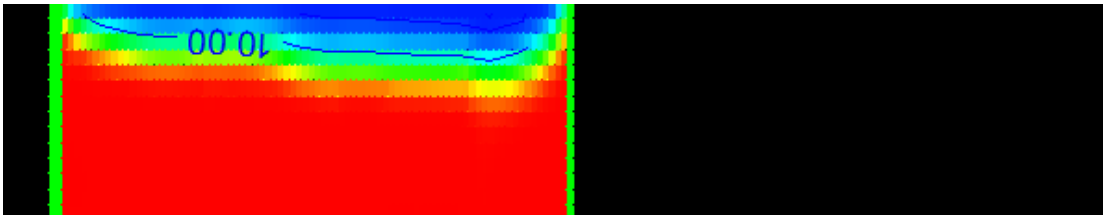
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αθροιστική παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d στο επίπεδο 1 φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



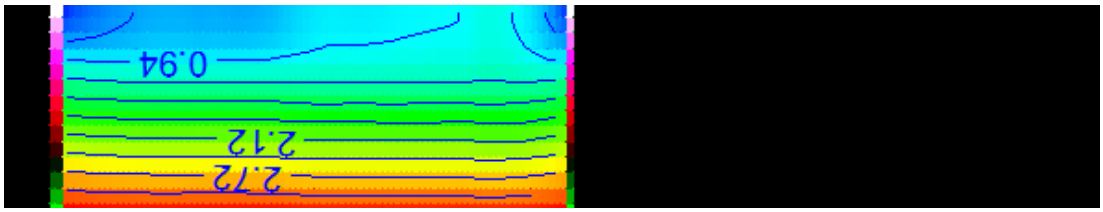
Σχήμα 7.7(α): Ισοχλώριες καμπύλες **Σχήμα 7.7(β):** Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d



Σχήμα 7.8: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d



Σχήμα 7.9: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132)



Σχήμα 7.10: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d (Column number = 132)

Πίνακας 7.3: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Υδραυλικό φορτίο (m)	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)
7	**[59,95]**	0,56	5,22
9	**[63,95]**	0,91	1,82
17	**[69,101]**	0,96	1,66
29	**[81,119]**	0,74	3,23
35	**[85,125]**	0,61	4,67
36	**[87,127]**	0,54	5,73
39	**[93,127]**	0,89	2,22
69	**[167,121]**	0,91	0,97
70	**[171,123]**	0,78	1,74

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.4: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 21,21 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών επιπέδου 3 (kg/m^3)
1	**[30,56]**	0,27
2	**[34,52]**	0,21
3	**[44,66]**	0,24
8	**[63,78]**	0,13
12	**[65,93]**	0,69
19	**[71,101]**	0,92
22	**[75,103]**	0,62
24	**[77,101]**	0,29
30	**[83,103]**	0,17
31	**[83,111]**	0,62

33	**[85,105]**	0,20
34	**[85,107]**	0,26
37	**[89,105]**	0,15
45	**[120,101]**	0,13
47	**[122,105]**	0,17
49	**[128,115]**	0,14
50	**[134,117]**	0,30
51	**[134,119]**	0,53
54	**[142,111]**	0,13
55	**[142,117]**	0,71
58	**[148,111]**	0,17
60	**[150,113]**	0,33
61	**[150,115]**	0,53
62	**[152,109]**	0,16
63	**[158,103]**	0,15
64	**[158,107]**	0,24
65	**[158,113]**	0,40
66	**[158,117]**	0,53
67	**[160,111]**	0,33

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

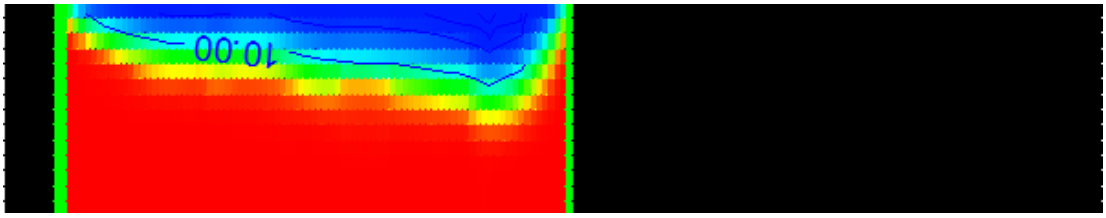
Παρατηρώντας τα παραπάνω αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι τα παράκτια πηγάδια του υδροφορέα στο επίπεδο 1, δηλαδή σε βάθος 10 m, υφίστανται το μεγαλύτερο βαθμό υφαλμύρωσης, αφού η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών είναι αρκετά μεγαλύτερη από την οριακή που θεωρείται η τιμή 0,5 kg/m^3. Βέβαια, ο βαθμός υφαλμύρωσης είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με σενάρια, όπου χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες παροχές αντλήσεων και που οι αντλήσεις γίνονται από μεγαλύτερα βάθη. Ακόμη, οκτώ πηγάδια που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή μετά τα παράκτια πηγάδια υφίστανται υφαλμύρωση.

7.2.3 Πενταπλασιασμός της Τροφοδοσίας και Άντληση από Κάθε Πηγάδι του 60% της Συνολικής Τροφοδοσίας

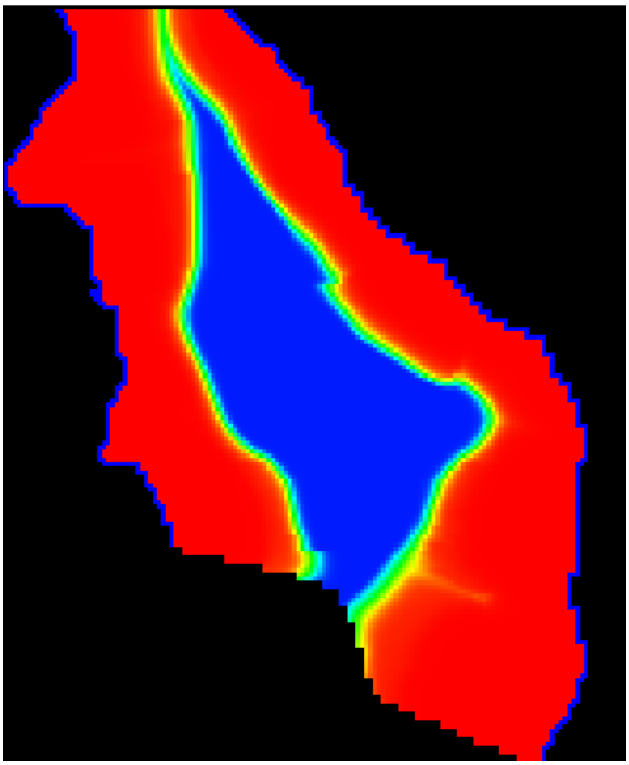
Στο σενάριο αυτό, έγινε η υπόθεση ότι η συνολική φυσική τροφοδοσία νερού που εισρέει στον υδροφορέα είναι 18.905,38 m^3/d ή 6.900.464 m^3 ετησίως, δηλαδή είναι πενταπλάσια της αρχικής και ότι σε περιόδους υψηλής ζήτησης νερού, όπως είναι οι καλοκαιρινοί μήνες, αντλείται περίπου το 60% του συνολικού υδατικού αποθέματος που εισρέει στον υδροφορέα, που αντιστοιχεί σε 11.339,45 m^3/d ή 4.138.898,13 m^3 ετησίως. Βέβαια, τους χειμερινούς μήνες το ποσοστό άντλησης είναι αρκετά κάτω από το 60%.

Επίσης, βάσει του παρόντος σεναρίου, θεωρείται ότι σε κάθε ένα από τα 70 πηγάδια του επιπέδου 1 αντιστοιχεί παροχή άντλησης με τιμή 162 m^3/d και ότι η περίοδος προσομοίωσης είναι 10.000 ημέρες. Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, όπως αυτές του πρώτου σεναρίου. Ακόμη, η καταχώρηση των αντλήσεων, η προσομοίωση του σεναρίου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2.1.

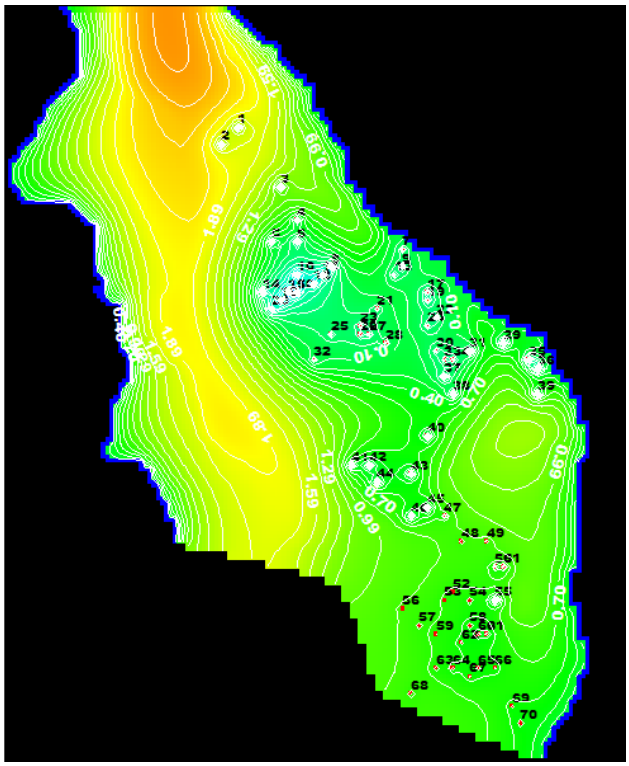
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



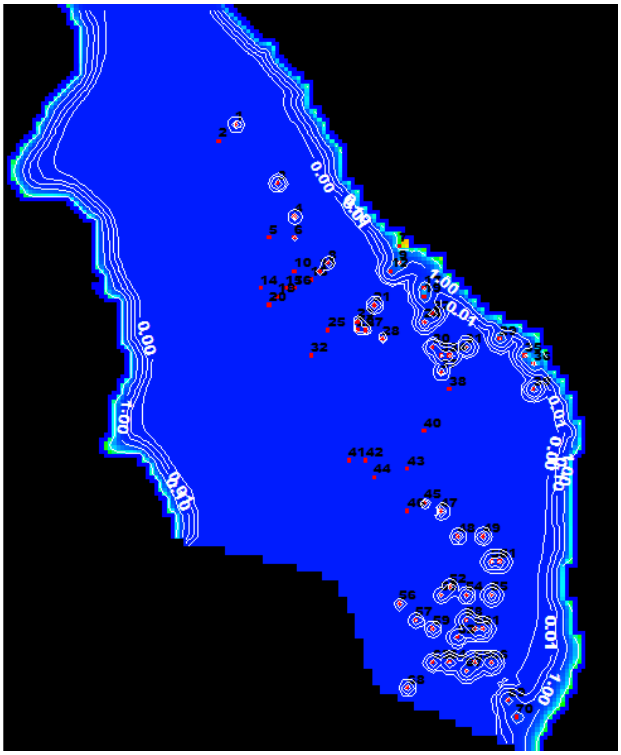
Σχήμα 7.11: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με πενταπλάσια τροφοδοσία και παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d (Column number = 132)



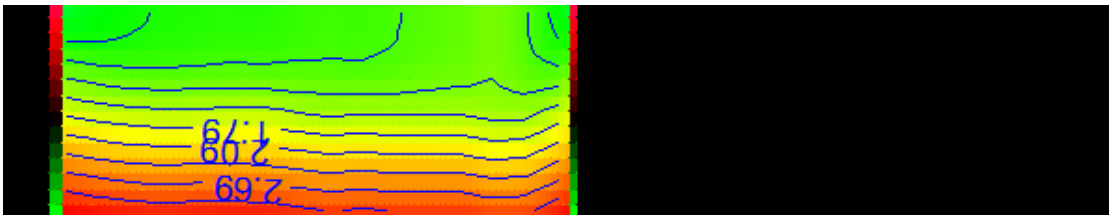
Σχήμα 7.12: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162m^3



Σχήμα 7.13: Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d



Σχήμα 7.14: Ισοχλώριες καμπύλες στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d



Σχήμα 7.15: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με πενταπλάσια τροφοδοσία και παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d (Column number = 132)

Πίνακας 7.5: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών στο επίπεδο 1 με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d του υδροφορέα.

Αριθμός Πηγαδιού	**Πηγάδι [R,C]**	**Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)**
1	**[30,56]**	0,23
2	**[34,52]**	0,00
3	**[44,66]**	0,68
8	**[63,78]**	0,10

12	**[65,93]**	6,43
19	**[71,101]**	9,34
22	**[75,103]**	5,27
24	**[77,101]**	2,64
30	**[83,103]**	0,88
31	**[83,111]**	1,89
33	**[85,105]**	1,34
34	**[85,107]**	1,27
37	**[89,105]**	0,29
39	**[93,127]**	5,34
45	**[120,101]**	0,05
47	**[122,105]**	0,25
49	**[128,115]**	0,40
50	**[134,117]**	1,23
51	**[134,119]**	1,55
54	**[142,111]**	0,42
55	**[142,117]**	1,70
58	**[148,111]**	1,04
60	**[150,113]**	2,19
61	**[150,115]**	2,15
62	**[152,109]**	0,88
63	**[158,103]**	0,54
64	**[158,107]**	1,21
65	**[158,113]**	2,41
66	**[158,117]**	2,26
67	**[160,111]**	1,70

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.6: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με πενταπλάσια τροφοδοσία και με παροχή άντλησης από κάθε πηγάδι 162 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Υδραυλικό φορτίο (m)	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)
7	**[59,95]**	-0,52	25,65
9	**[63,95]**	-0,67	14,27
17	**[69,101]**	-0,74	12,35
29	**[81,119]**	-1,49	10,70
35	**[85,125]**	-1,65	14,02
36	**[87,127]**	-1,68	16,80
39	**[93,127]**	-1,03	5,34
69	**[167,121]**	0,37	4,19
70	**[171,123]**	0,29	6,53

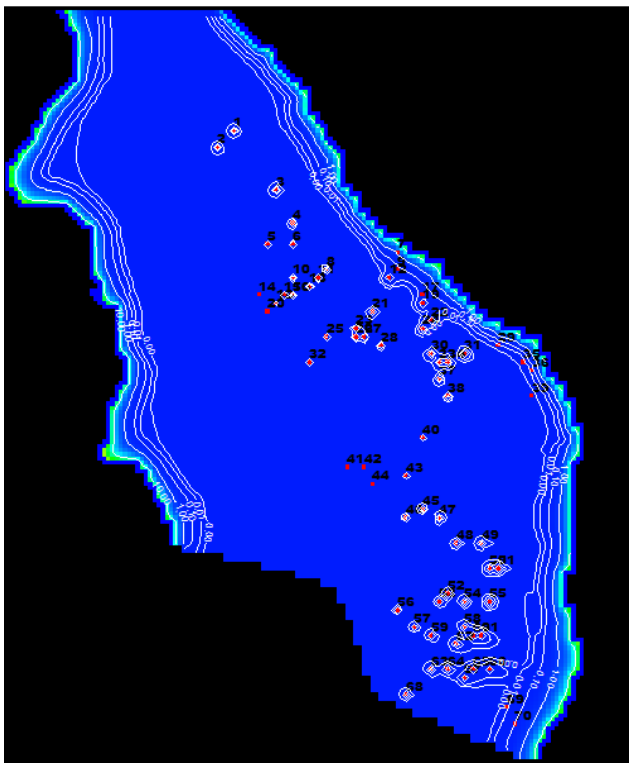
R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

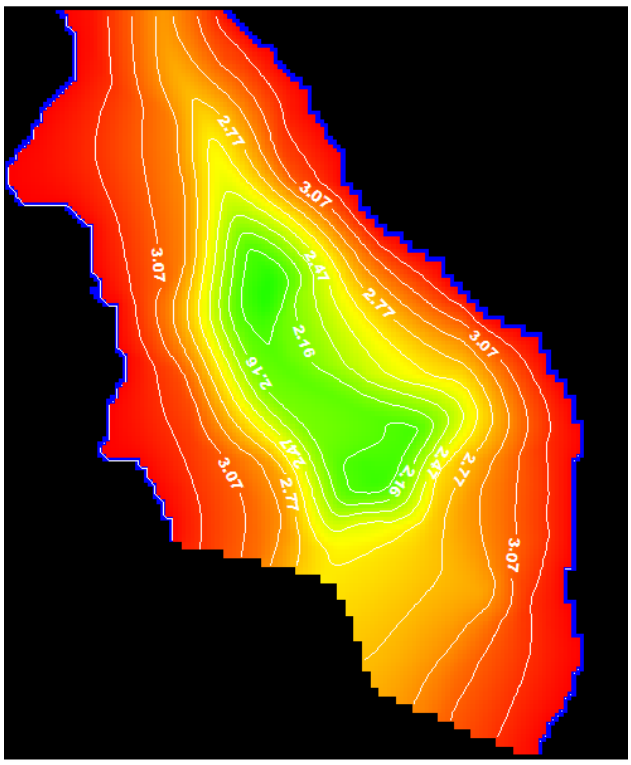
Παρατηρείται ότι σε σχέση με το σενάριο 7.2.1 που χρησιμοποιήθηκε υποπενταπλάσια τροφοδοσία, στο επίπεδο 1 τα παράκτια πηγάδια υφαλμυρώνονται πολύ περισσότερο, και το υδραυλικό φορτίο παίρνει αρνητικές τιμές, λόγω της μεγάλης αύξησης του βαθμού των αντλήσεων στον υδροφορέα. Ωστόσο, σε ορισμένα πηγάδια στο εσωτερικό του υδροφορέα, υφάλμυρα και μη, οι τιμές συγκέντρωσης άλατος μειώθηκαν, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη τροφοδοσία.

7.3 Μη Άντληση από Εννιά Πηγάδια και Άντληση από Πηγάδια στο Εσωτερικό του Υδροφορέα του 39,43% της Συνολικής Τροφοδοσίας

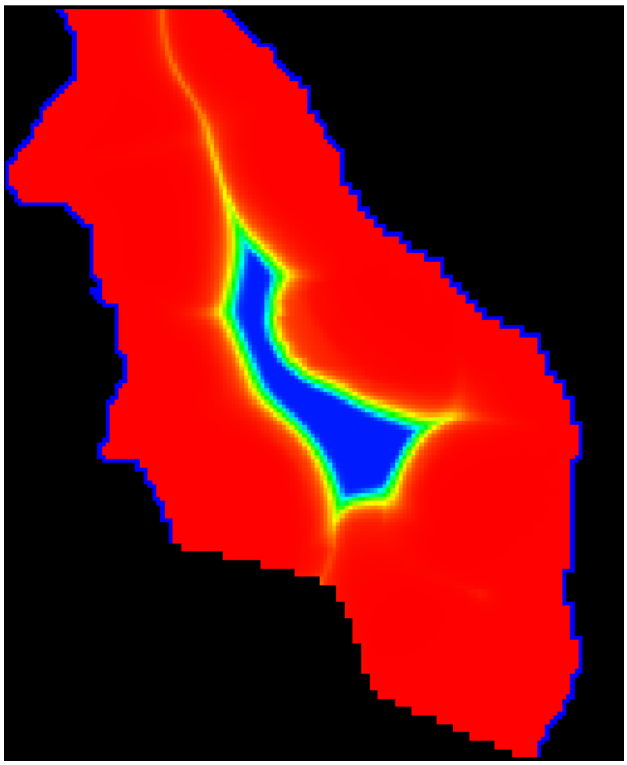
Στο σενάριο αυτό, γίνεται η υπόθεση μηδενικών παροχών αντλήσεων από τα παράκτια πηγάδια του Πίνακα 7.3 με τις μεγαλύτερες τιμές υφαλμύρωσης και παροχών αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα που αντιστοιχούν στο 39,43% της συνολικής τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα, σε

καθένα από τα εννιά παράκτια πηγάδια με αριθμούς 7, 9, 17, 29, 35, 36, 39, 69 και 70 αντιστοιχίζεται άντληση 0 m^3/d και σε καθένα από τα 61 πηγάδια στο εσωτερικό του υδροφορέα, βάσει των στοιχείων της παραγράφου 7.2.1, πραγματοποιείται άντληση 24 m^3/d για περίοδο προσομοίωσης 10.000 ημέρες. Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, όπως αυτές του πρώτου σεναρίου. Ακόμη, η καταχώρηση των αντλήσεων, η προσομοίωση του σεναρίου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με παροχή άντλησης από καθένα από τα 61 πηγάδια 24 m^3/d φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:

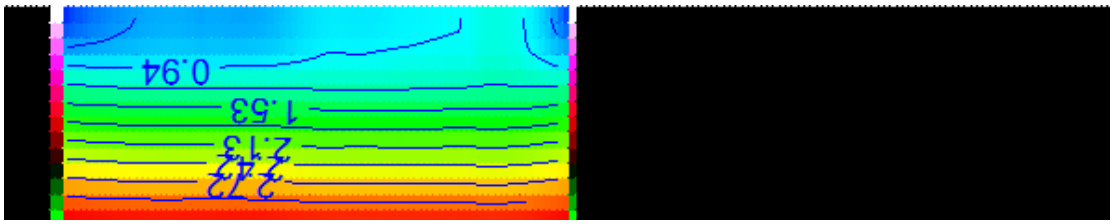




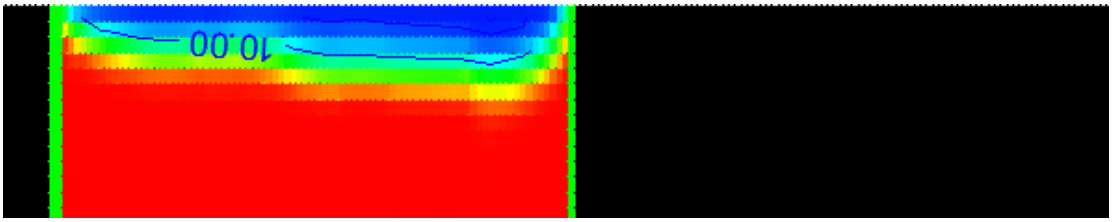
Σχήμα 7.16(α): Ισοχλώριες καμπύλες **Σχήμα 7.16(β):** Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d



Σχήμα 7.17: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d



Σχήμα 7.18: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d (Column number = 132)



Σχήμα 7.19: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με παροχή άντλησης από καθένα από τα 40 πηγάδια 24 m^3/d (Column number = 132)

Πίνακας 7.7: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών παράκτιων πηγαδιών στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με παροχή άντλησης από καθένα από τα 61 πηγάδια 24 m^3/d.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Υδραυλικό φορτίο (m)	Συγκεντρώσεις διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)
7	**[59,95]**	0,69	1,32
9	**[63,95]**	1,02	0,06
17	**[69,101]**	1,06	0,04
29	**[81,119]**	1,09	0,00
35	**[85,125]**	1,04	0,00
36	**[87,127]**	0,99	0,02
39	**[93,127]**	1,25	0,00
69	**[167,121]**	0,96	0,01
70	**[171,123]**	0,83	0,11

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.8: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών με παροχή άντλησης από καθένα από τα 61 πηγάδια 24 m^3/d στο επίπεδο 1 του υδροφορέα.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών (kg/m^3)
1	**[30,56]**	0,32
2	**[34,52]**	0,25
3	**[44,66]**	0,29
8	**[63,78]**	0,17
12	**[65,93]**	0,76
19	**[71,101]**	0,98
22	**[75,103]**	0,73
24	**[77,101]**	0,35
30	**[83,103]**	0,21
31	**[83,111]**	0,73
33	**[85,105]**	0,26
34	**[85,107]**	0,32

37	**[89,105]**	0,18
45	**[120,101]**	0,17
47	**[122,105]**	0,21
49	**[128,115]**	0,17
50	**[134,117]**	0,37
51	**[134,119]**	0,63
54	**[142,111]**	0,15
55	**[142,117]**	0,84
58	**[148,111]**	0,22
60	**[150,113]**	0,41
61	**[150,115]**	0,64
62	**[152,109]**	0,20
63	**[158,103]**	0,18
64	**[158,107]**	0,30
65	**[158,113]**	0,49
66	**[158,117]**	0,62
67	**[160,111]**	0,40

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι ο βαθμός υφαλμύρωσης στα παράκτια πηγάδια μειώνεται δραστικά συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα των ισοκατανεμημένων αντλήσεων. Ωστόσο, υπάρχουν οκτώ πηγάδια με αριθμούς 12, 19, 22, 31, 51, 55, 61 και 66 που παραμένουν υφάλμυρα, αφού ξεπερνούν την οριακή τιμή 0,5 kg/m^3.

7.4 Ανισοκατανεμημένες Αντλήσεις Τριών Ζωνών

Στα ακόλουθα σενάρια γίνεται η θεώρηση ύπαρξης τριών ζωνών. Στην πρώτη ζώνη ανήκουν 19 πηγάδια με αριθμούς 3, 4, 7, 9, 12, 17, 19, 22, 24, 29, 31, 35, 36, 39, 50, 51, 55, 69 και 70, τα οποία έχουν χιλιομετρική απόσταση από την ακτή μικρότερη του 1 km και δεν γίνονται καθόλου αντλήσεις από αυτά.

Στην δεύτερη ζώνη ανήκουν 39 πηγάδια με αριθμούς 1, 2, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 21, 23, 26, 27, 28, 30, 33, 34, 37, 38, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 54,

57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 και 67, που έχουν απόσταση από την ακτή μεγαλύτερη του 1 km και μικρότερη των 2 km και οι αντλήσεις που γίνονται αντιστοιχούν στο 35% των συνολικών που γίνονται στον υδροφορέα.

Τέλος, στην τρίτη ζώνη ανήκουν συνολικά 12 πηγάδια με αριθμούς 14, 15, 16, 18, 20, 25, 32, 41, 42, 44, 56 και 68, τα οποία απέχουν από την ακτή περισσότερο από 2 km και οι αντλήσεις σε αυτά αντιστοιχούν στο 65% των συνολικών αντλήσεων. Οι θεωρήσεις αυτές φαίνονται στον πίνακα 7.9.

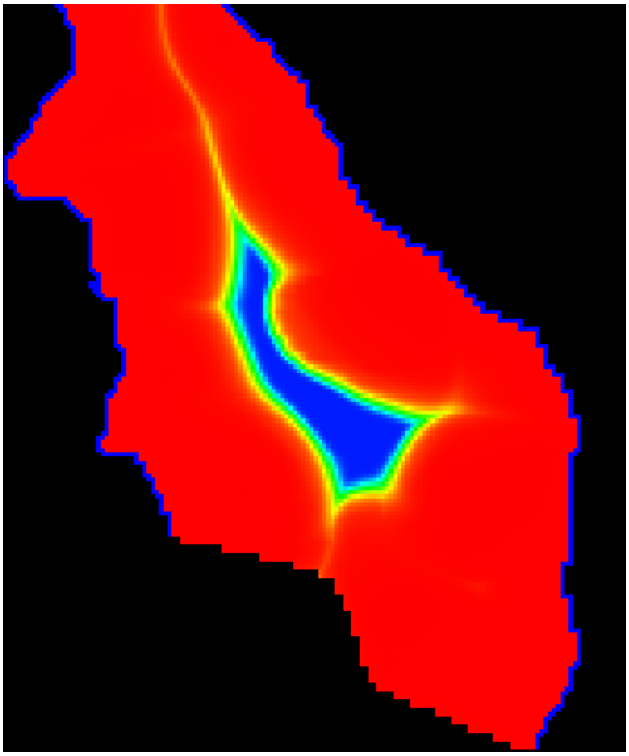
Πίνακας 7.9 : Θεωρήσεις σεναρίων άντλησης από τρεις ζώνες.

Αριθμός ζώνης	Αριθμοί Πηγαδιών	Απόσταση από την ακτή (km)	Αντλήσεις (% των συνολικών αντλήσεων)
1	3, 4, 7, 9, 12, 17, 19, 22, 24, 29, 31, 35, 36, 39, 50, 51, 55, 69 και 70	< 1	0
2	1, 2, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 21, 23, 26, 27, 28, 30, 33, 34, 37, 38, 40, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 54, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 και 67	> 1 και < 2	35
3	14, 15, 16, 18, 20, 25, 32, 41, 42, 44, 56 και 68	> 2	65

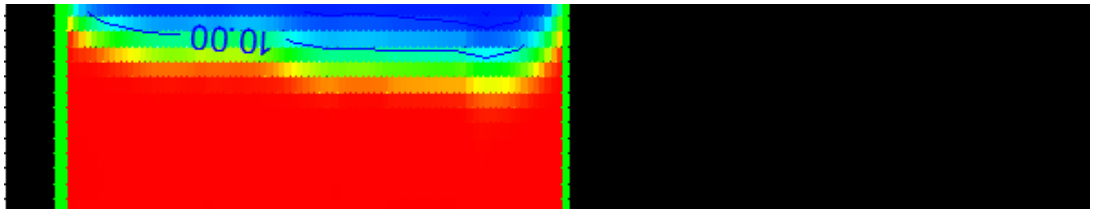
7.4.1 Άντληση από Τρεις Ζώνες του 60% της Μέσης Φυσικής Τροφοδοσίας

Στο σενάριο αυτό, γίνεται η υπόθεση μηδενικών παροχών αντλήσεων από τα πηγάδια της ζώνης 1, παροχών αντλήσεων στα πηγάδια της ζώνης 2 του υδροφορέα που αντιστοιχούν στο 35% των συνολικών αντλήσεων με τιμή άντλησης από καθένα από τα 39 πηγάδια 19,99 m^3/d, και παροχών αντλήσεων στα πηγάδια της ζώνης 3 του υδροφορέα που αντιστοιχούν στο 65% των συνολικών αντλήσεων με τιμή άντλησης από καθένα από τα 12

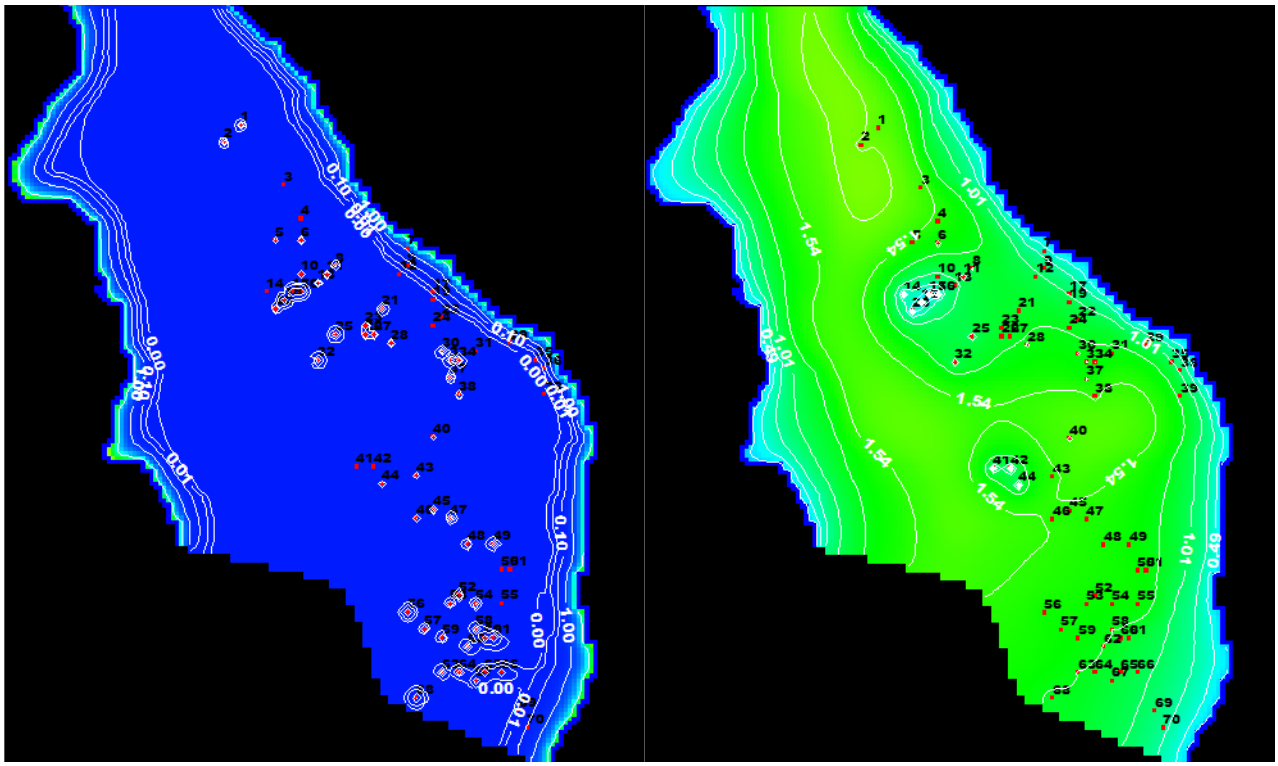
πηγάδια 120,66 m^3/d. Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, όπως αυτές του πρώτου σεναρίου. Η καταχώρηση των αντλήσεων, η προσομοίωση του σεναρίου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



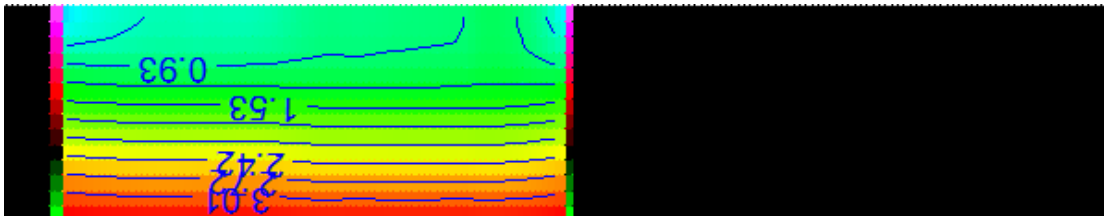
Σχήμα 7.20: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας



Σχήμα 7.21: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132)



Σχήμα 7.22(α): Ισοχλώριες καμπύλες **Σχήμα 7.22(β):** Ισοδυναμικές καμπύλες στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας



Σχήμα 7.23: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132)

Πίνακας 7.10: Υδραυλικό φορτίο και τιμές συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών πηγαδιών της ζώνης 1 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)	Υδραυλικό φορτίο επιπέδου 1 (m)
3	**[44,66]**	0,00	1,60
4	**[52,70]**	0,00	1,49
7	**[59,95]**	**1,44**	0,62

9	**[63,95]**	0,03	0,92
12	**[65,93]**	0,00	1,06
17	**[69,101]**	0,00	1,00
19	**[71,101]**	0,00	1,08
22	**[75,103]**	0,00	1,18
24	**[77,101]**	0,00	1,25
29	**[81,119]**	0,01	1,07
31	**[83,111]**	0,00	1,33
35	**[85,125]**	0,00	1,02
36	**[87,127]**	0,02	0,97
39	**[93,127]**	0,00	1,23
50	**[134,117]**	0,00	1,38
51	**[134,119]**	0,00	1,34
55	**[142,117]**	0,00	1,36
69	**[167,121]**	0,01	0,91
70	**[171,123]**	0,12	0,79

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.11: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο της ζώνης 2 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας.

Αριθμός Πηγαδιού	**Πηγάδι [R,C]**	**Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)**	**Υδραυλικό φορτίο επιπέδου 1 (m)**
1	**[30,56]**	0,25	1,54
2	**[34,52]**	0,19	1,62
5	**[57,64]**	0,00	1,29
6	**[57,70]**	0,04	1,17
8	**[63,78]**	0,13	0,98
10	**[65,70]**	0,01	0,77
11	**[65,76]**	0,07	0,91
13	**[67,74]**	0,03	0,82
21	**[73,89]**	0,15	1,15

23	**[77,85]**	0,08	1,14
26	**[79,85]**	0,07	1,15
27	**[79,87]**	0,05	1,18
28	**[81,91]**	0,05	1,25
30	**[83,103]**	0,19	1,26
33	**[85,105]**	0,22	1,27
34	**[85,107]**	0,23	1,27
37	**[89,105]**	0,15	1,25
38	**[93,107]**	0,10	1,37
40	**[103,101]**	0,00	1,46
43	**[112,97]**	0,00	1,33
45	**[120,101]**	0,15	1,32
46	**[122,97]**	0,11	1,33
47	**[122,105]**	0,17	1,42
48	**[128,109]**	0,10	1,41
49	**[128,115]**	0,14	1,36
52	**[140,107]**	0,07	1,39
53	**[142,105]**	0,07	1,39
54	**[142,111]**	0,12	1,35
57	**[148,99]**	0,08	1,38
58	**[148,111]**	0,18	1,27
59	**[150,103]**	0,09	1,34
60	**[150,113]**	0,34	1,20
61	**[150,115]**	**0,52**	1,16
62	**[152,109]**	0,18	1,25
63	**[158,103]**	0,18	1,26
64	**[158,107]**	0,27	1,20
65	**[158,113]**	0,43	1,11
66	**[158,117]**	**0,54**	1,05
67	**[160,111]**	0,36	1,12

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Πίνακας 7.12: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο της ζώνης 3 στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας.

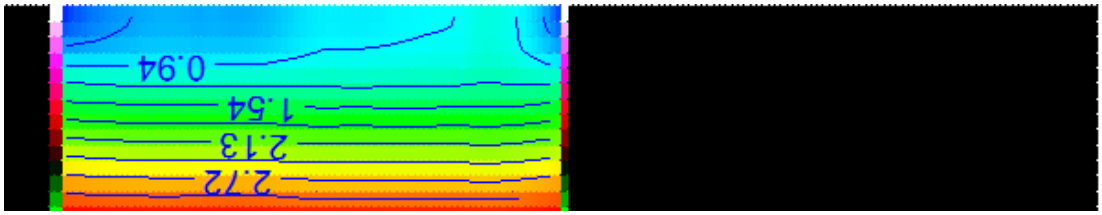
Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)	Υδραυλικό φορτίο επιπέδου 1 (m)
14	**[69,62]**	0,00	**-0,28**
15	**[69,68]**	**0,73**	**-0,63**
16	**[69,70]**	0,48	**-0,47**
18	**[71,66]**	0,32	**-0,58**
20	**[73,64]**	0,05	**-0,39**
25	**[79,78]**	0,26	0,77
32	**[85,74]**	0,21	0,78
41	**[110,83]**	0,00	0,08
42	**[110,87]**	0,00	0,00
44	**[114,89]**	0,01	0,09
56	**[144,95]**	0,41	1,32
68	**[164,97]**	**1,02**	1,07

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

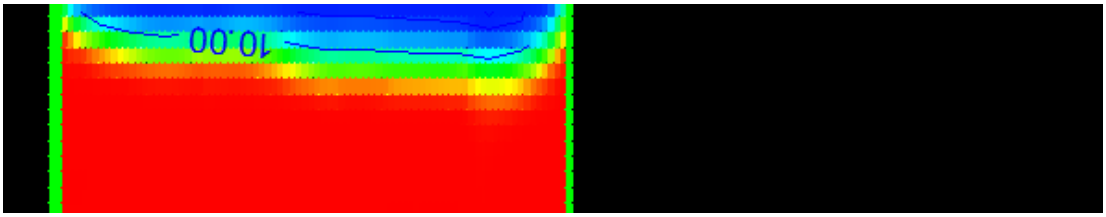
Παρατηρώντας τους πίνακες προκύπτει ότι στο επίπεδο 1 η πλειοψηφία των πηγαδιών δεν υφαλμυρώνεται, αφού οι τιμές της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών είναι μικρότερες από την οριακή τιμή 0,5 kg/m^3. Μόνο τα πηγάδια με αριθμούς 7, 15, 61, 66 και 68 έχουν συγκέντρωση μεγαλύτερη από 0,5 kg/m^3 και τα πηγάδια με αριθμούς 14, 15, 16, 18 και 20 έχουν αρνητικές τιμές υδραυλικού φορτίου. Επομένως, δεν ενδείκνυνται παροχές άντλησης από τις τρεις ζώνες του υδροφορέα που να αντιστοιχούν στο 60% της συνολικής τροφοδοσίας.

7.4.2 Άντληση από Τρεις Ζώνες του 40% της Μέσης Φυσικής Τροφοδοσίας

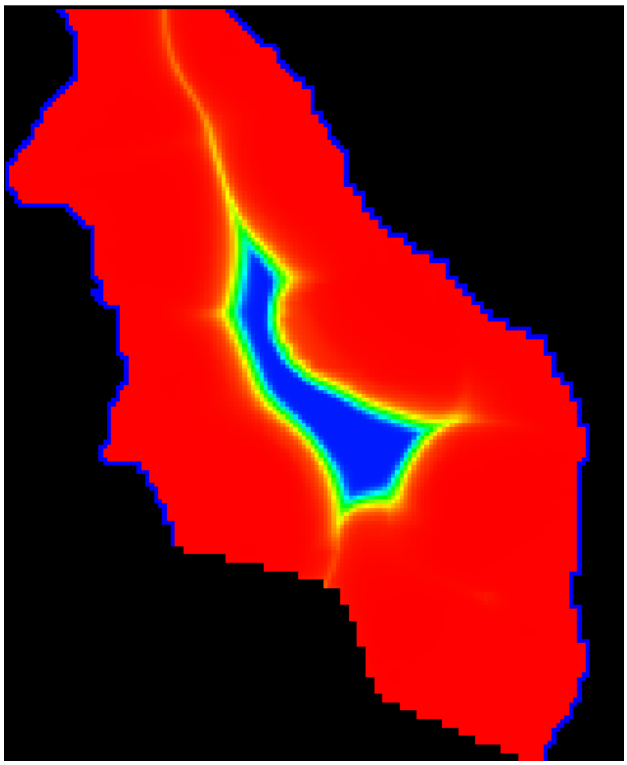
Στο σενάριο αυτό, γίνεται η υπόθεση μηδενικών παροχών αντλήσεων από τα πηγάδια της ζώνης 1, παροχών αντλήσεων στα πηγάδια της ζώνης 2 του υδροφορέα που αντιστοιχούν στο 35% των συνολικών αντλήσεων με τιμή άντλησης από καθένα από τα 39 πηγάδια 13,33 m^3/d, και παροχών αντλήσεων στα πηγάδια της ζώνης 3 του υδροφορέα που αντιστοιχούν στο 65% των συνολικών αντλήσεων με τιμή άντλησης από καθένα από τα 12 πηγάδια 80,44 m^3/d. Η υδραυλική αγωγιμότητα, οι αρχικές και οριακές συνθήκες και οι υπόλοιπες υδραυλικές παράμετροι παραμένουν οι ίδιες, όπως αυτές του πρώτου σεναρίου. Η καταχώρηση των αντλήσεων, η προσομοίωση του σεναρίου και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων γίνεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 7.2.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



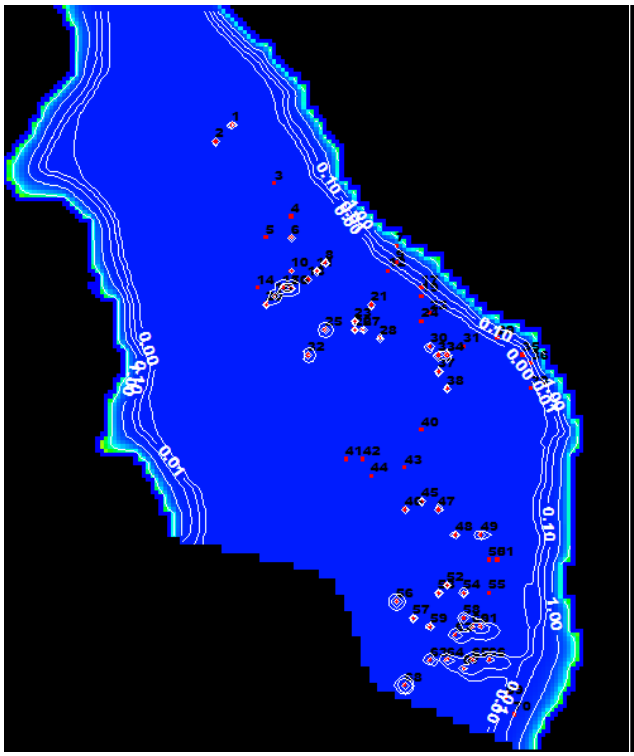
Σχήμα 7.24: Τομή υδραυλικού φορτίου υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132)



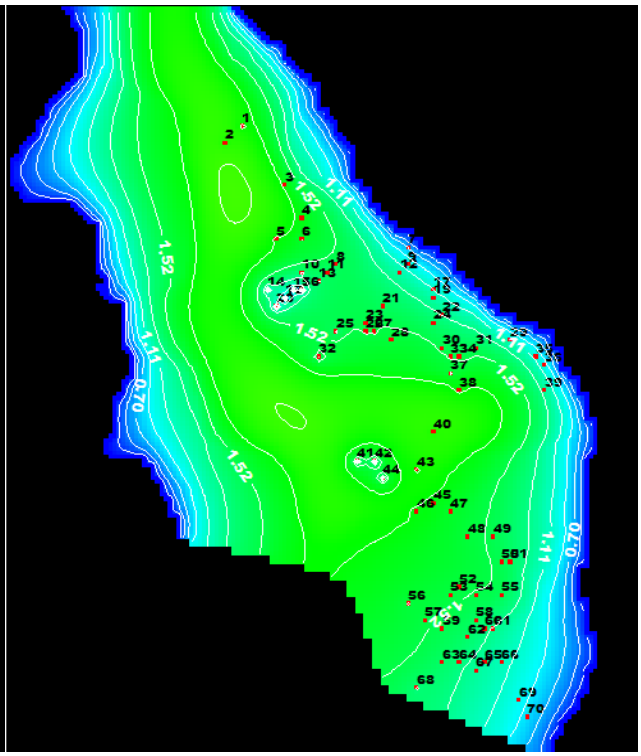
Σχήμα 7.25: Τομή συγκεντρώσεων υδροφορέα στη στήλη 132 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (Column number = 132)



Σχήμα 7.26: Κατανομή συγκεντρώσεων και θέσεις αλάτινης σφήνας του υδροφορέα στο επίπεδο 14 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας



Σχήμα 7.27(α): Ισοχλώριες καμπύλες



Σχήμα 7.27(β): Ισοδυναμικές καμπύλες

στο επίπεδο 1 με άντληση από 3 ζώνες του 40% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας

Πίνακας 7.13: Συγκεντρώσεις άλατος πηγαδιών και υδραυλικό φορτίο στο επίπεδο 1 του υδροφορέα με άντληση από 3 ζώνες του 50% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας.

Αριθμός Πηγαδιού	Πηγάδι [R,C]	Συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών επιπέδου 1 (kg/m^3)	Υδραυλικό φορτίο επιπέδου 1 (m)
7	**[59,95]**	**1,29**	0,69
14	**[69,62]**	0,00	0,64
15	**[69,68]**	0,32	0,40
16	**[69,70]**	0,24	0,49
18	**[71,66]**	0,12	0,44
20	**[73,64]**	0,02	0,56
61	**[150,115]**	0,26	1,29
66	**[158,117]**	0,28	1,15
68	**[164,97]**	**0,61**	1,29

R: Γραμμή (Row), C: Στήλη (Column)

Στο παρόν σενάριο, μόνο τα πηγάδια με αριθμούς 7 και 68 υφαλμυρώνονται, αφού οι τιμές της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών ξεπερνούν την οριακή τιμή 0,5 kg/m^3 και οι τιμές του υδραυλικού φορτίου σε όλο τον υδροφορέα είναι θετικές. Το πηγάδι 7 υφαλμυρώνονταν ακόμη και σε συνθήκες ισορροπίας (τιμή συγκέντρωσης: 1,02 kg/m^3 - Πίνακας 6.2) και έτσι ουσιαστικά το μόνο πηγάδι του υδροφορέα που υφαλμυρώνεται είναι το πηγάδι με αριθμό 68 με τιμή συγκέντρωσης άλατος 0,61 kg/m^3, η οποία υποδεικνύει σχετικά μικρό βαθμό υφαλμύρωσης, που μπορεί να αντιμετωπισθεί με απλές μεθόδους αφαλάτωσης. Συμπερασματικά, ενδείκνυνται παροχές άντλησης από τις τρεις ζώνες του υδροφορέα που να αντιστοιχούν στο 40% της συνολικής τροφοδοσίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΤΡΑ

8.1 Ανακεφαλαίωση

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης για τον φρεάτιο υπόγειο υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής του αεροδρομίου της νήσου Σαντορίνης. Προϋπόθεση για την εφαρμογή της προσομοίωσης αποτελεί η γνώση και η χρήση του μαθηματικού μοντέλου ροής των υπόγειων νερών. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του υδροφορέα μελέτης είναι το SEAWAT, ένα μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο διαφορικών και αριθμητικών εξισώσεων, οι οποίες περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού καθώς και την μεταφορά διαλυμένης μάζας. Αυτές είναι η εξίσωση συνέχειας και ο νόμος του Darcy στην περίπτωση της κίνησης του νερού και οι εξισώσεις του Strack και η προσέγγιση των Ghyben και Herzberg στην περίπτωση της μεταφοράς διαλυμένης μάζας.

Η δημιουργία του μοντέλου του εν λόγω υπόγειου υδροφορέα έγινε με την βοήθεια του προγράμματος GROUNDWATER VISTAS. Σε αυτό εισάχθηκαν ως δεδομένα το ακριβές σχήμα του υδροφορέα, οι οριακές συνθήκες και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα, όπως αυτές προέκυψαν από τη Διδακτορική Διατριβή του Γ. Κουράκου (Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων με Περιβαλλοντικά και Οικονομικά Κριτήρια, 2003). Βέβαια, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πολλά από τα απαιτούμενα δεδομένα απλώς είχαν εκτιμηθεί, καθώς ήταν αδύνατον να μετρηθούν ή να υπολογισθούν, αφού 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 διαφορικές εξισώσεις οι οποίες επιλύονται με αριθμητικά μοντέλα που μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο ακριβή.

Επίσης, υιοθετήθηκαν οι παραδοχές του ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα, μιας ζώνης στην οποία η μεταβολή της πυκνότητας του νερού μεταξύ του θαλασσινού και του γλυκού νερού γίνεται σταδιακά και της μόνιμης οριζόντιας ροής για το γλυκό νερό.

Εξετάστηκαν εκτενώς διάφορα σενάρια ισοκατανεμημένων και ανισοκατανεμημένων παροχών αντλήσεως. Για κάθε σενάριο εξετάζεται η συμπεριφορά του υδροφορέα, ελέγχεται η περίπτωση υφαλμύρωσης των πηγαδιών του και επιζητείται η ποσότητα της άντλησης, ώστε να αποφευχθεί η υφαλμύρωση των πηγαδιών. Η διαδικασία αναζήτησης βέλτιστων τιμών άντλησης για τα διάφορα σενάρια έγινε με δοκιμές, όπου έπρεπε να επιτευχθούν θετικές τιμές υδραυλικού φορτίου, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν λαμβάνουν χώρα εντατικές αντλήσεις σε μεγάλη κλίμακα και τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών μεγαλύτερες από την οριακή τιμή 0,5 kg/m^3.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι το υδραυλικό φορτίο στην περιοχή μελέτης, καθώς επίσης και οι τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών ή αλλιώς οι τιμές συγκέντρωσης άλατος στο νερό του υδροφορέα.

8.2 Συμπεράσματα

Οι τιμές της άντλησης που εισήχθησαν στο μοντέλο ήταν συνάρτηση της μέσης φυσικής τροφοδοσίας, έτσι όπως υπολογίστηκε σε μελέτη των Π. Γιαννουλόπουλου και Α. Μαντόγλου από πρόγραμμα βελτιστοποίησης. Οι τιμές εκκίνησης των αντλήσεων αντιστοιχούν στο 60% της μέσης φυσικής τροφοδοσίας (μέγιστη τιμή), έτσι ώστε να διερευνηθεί η πιθανότητα κάλυψης των αναγκών σε νερό σε περιόδους μεγάλης ζήτησης και φτάνουν έως και το 40% (ελάχιστη τιμή). Οι αντλήσεις πραγματοποιήθηκαν από βάθος 10 m και 30 m. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται μεγαλύτερη υφαλμύρωση στα πηγάδια όταν γίνονται αντλήσεις από μεγάλα βάθη σε σχέση με μικρότερα βάθη.

Επίσης, τα πηγάδια του υδροφορέα είναι συνολικά 70. Από το σύνολο των πηγαδιών στην περιοχή μελέτης το 42% είναι δημόσιες γεωτρήσεις, ενώ το υπόλοιπο 58% ανήκει σε ιδιώτες. 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. Στα σημεία των γεωτρήσεων που βρίσκονται κοντά στην ακτή, το πάχος του φακού του γλυκού νερού είναι μικρότερο από αυτών των εσωτερικών γεωτρήσεων.

Εν συνεχεία, ο διαχωρισμός του υδροφορέα σε δύο ζώνες (μηδενισμός παροχών άντλησης στα παράκτια πηγάδια με τις μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης) δίνει μεγαλύτερο βαθμό υφαλμύρωσης συγκριτικά με αυτό που προκύπτει από το διαχωρισμό του υδροφορέα σε τρεις ζώνες (μηδενισμός παροχών άντλησης στα πηγάδια που απέχουν λιγότερο από 1 km).

Επίσης, για τα διάφορα σενάρια που προσομοιώθηκαν, με βάση πάντα τις παραδοχές και τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας, οι παροχές άντλησης στην παράκτια ζώνη θα πρέπει να είναι μηδενικές, καθώς η διείσδυση του θαλασσινού νερού είναι μεγάλη και δημιουργεί προβλήματα υφαλμύρωσης των πηγαδιών, γεγονός που προέκυψε από την σύγκριση των ισοκατανεμημένων και ανισοκατανεμημένων αντλήσεων.

Έτσι, ένα από τα βασικά συμπεράσματα των εκτελούμενων προσομοιώσεων είναι 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. Μια μεγάλης κλίμακας υφαλμύρωση του υδροφορέα λόγω υπεράντλησης μπορεί να κατέστρεφε τον υδροφορέα.

Οι ποσότητες του υπόγειου νερού που μπορούν να αντληθούν με ασφάλεια καθορίζονται από τη θέση (απόσταση από την ακτή), τον αριθμό, τη διάταξη, την τροφοδοσία και το βάθος των φρεάτων. Η χωροθέτηση του πηγαδιού κοντά στην ακτή αυξάνει τον κίνδυνο υφαλμύρωσης περιορίζοντας την

βέλτιστη τιμή άντλησης. Μεγαλύτερη τροφοδοσία σε συνδυασμό με μη άντληση από τα παράκτια πηγάδια, εξασφαλίζει υψηλότερες τιμές άντλησης.

Στο σενάριο στο οποίο δεν είχαν οριστεί παροχές άντλησης (συνθήκες ισορροπίας) διαπιστώθηκε ότι η αλάτινη σφήνα προχωρά πολύ μέσα στο εσωτερικό του υδροφορέα στο βάθος των 30m, με αποτέλεσμα τα πηγάδια της παράκτιας ζώνης να κρίνονται ακατάλληλα για ανθρώπινη χρήση, καθώς παρουσίαζαν αρκετά υψηλές τιμές συγκέντρωσης διαλυμένων ουσιών (όριο 0.5 kg/m^3). Αντίθετα, σε βάθος 10m τα πηγάδια της παράκτιας ζώνης που κρίνονται ακατάλληλα είναι σαφώς λιγότερα.

Για την εκμετάλλευση των πηγαδιών στο εσωτερικό του υδροφορέα μελέτης πραγματοποιήθηκαν διάφορα σενάρια άντλησης για τον υπολογισμό της μέγιστης ημερήσιας άντλησης, ώστε τα πηγάδια αυτά να είναι κατάλληλα για ανθρώπινη χρήση. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η μέγιστη ημερήσια ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί χωρίς να παρατηρείται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης είναι 1.485,04 m^3/ημέρα ή 542.039,6 m^3/έτος που αντιστοιχεί σε ποσοστό άντλησης 40% της συνολικής μέσης τροφοδοσίας. Βέβαια, προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα αυτά, χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν πολλά σενάρια, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι προβάλλει απαραίτητη η χρήση προγραμμάτων βελτιστοποίησης προς επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων.

Στο νότιο τμήμα του υδροφορέα παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, γεγονός που καθιστά το νότιο τμήμα ιδιαίτερα επικίνδυνο για υφαλμύρωση σε περίπτωση ελαχίστης αύξησης της άντλησης ή μείωσης της τροφοδοσίας. Ακόμη, από τα αποτελέσματα του λογισμικού, όσον αφορά τον χρόνο διαμόρφωσης της στατικής ισορροπίας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού, διαπιστώθηκε ότι ο υδροφορέας ισορροπεί από τις 240.000 μέρες και μετά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις παραμέτρους της προσομοίωσης (πάχος υδροφορέα, υδραυλική αγωγιμότητα κ.α.) είχαν εκτιμηθεί κατά το δυνατόν βάσει των διαθέσιμων στοιχείων, ωστόσο η

εκτίμηση είναι μόνο προσεγγιστική και μπορεί να απέχει από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών αυτών χρειάζονται εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες στην παρούσα φάση δεν ήταν διαθέσιμες. Ακόμα όμως και αν υπήρχαν προσδιορισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του συστήματος του υδροφορέα, οι φυσικές συνθήκες και διεργασίες είναι πάντα δύσκολο να προσομοιωθούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Επομένως, σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνει απλώς μια προσέγγιση στη λειτουργία του υδροφορέα εκτιμώντας τις πιθανές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό το φυσικό σύστημα.

Επίσης, οι ανάγκες σε νερό, οι οποίες διαφέρουν από μήνα σε μήνα, θεωρήθηκαν ίδιες για όλη τη διάρκεια του έτους, κάτι που πρακτικά δεν είναι σωστό και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα αν οι τιμές αυτές υποεκτιμηθούν.

Η χρήση των παραπάνω δεδομένων θα μπορούσε να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια τις διαδικασίες της υπόγειας ροής ενός υδροφορέα επιτυγχάνοντας το στόχο του, που δεν είναι άλλος από την πρόγνωση και έγκαιρη πρόληψη πιθανών μελλοντικών καταστάσεων που θα οδηγούσαν σε ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των αποθεμάτων του υδροφορέα.

8.3 Μέτρα Προστασίας και Ανάκαμψης Υδροφορέα

Η έλλειψη σωστής διαχείρισης των διαθέσιμων αποθεμάτων του υδροφορέα της Σαντορίνης και ειδικότερα η ανεξέλεγκτη, μακροχρόνια και εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων νερών αποτελούν αιτίες ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης του υδροφορέα. Η υπερεκμετάλλευση τους έχει προκαλέσει στις παράκτιες περιοχές σημαντική πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, καθιζήσεις εδαφών, υφαλμύρωση και γενικότερα ποιοτική υποβάθμιση του νερού. Το φαινόμενο της μη ορθολογικής χρήσης των αποθεμάτων παρατηρείται περισσότερο τους θερινούς μήνες, καθώς οι ανάγκες σε νερό αυξάνονται, οδηγώντας, έτσι, στην καταστροφή ολόκληρου του υδροφορέα.

Δεδομένης της επιβαρυμένης αυτής εικόνας του υδροφορέα και του ότι οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι απολύτως απαραίτητοι για τη συντήρηση της ζωής και της ανάπτυξης του περιβάλλοντος, προβάλλει επιτακτική η εξασφάλιση της βιωσιμότητας του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της Σαντορίνης και κατ' επέκταση η εφαρμογή μέτρων προστασίας και ανάκαμψης και ο στρατηγικός σχεδιασμός για μια ορθολογική διαχείριση στο πλαίσιο της βιώσιμης τουριστικής και κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης της περιοχής. Συγκεκριμένα, προτείνονται τα ακόλουθα μέτρα:

- Βελτίωση των υποδομών με αντικατάσταση των πεπαλαιωμένων δικτύων για περιορισμό των απωλειών. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα υδατικών πόρων επιβάλλει την αντικατάσταση ή βελτίωση των δικτύων διανομής για τη μείωση του συντελεστή απωλειών. Τα διαβρωμένα δίκτυα πολλαπλασιάζουν τις απαιτούμενες ανάγκες και επιπλέον επιβαρύνουν την ποιότητα του νερού, θέτοντας σε κίνδυνο σε κάποιες περιπτώσεις τη δημόσια υγεία. Η αντικατάσταση ή βελτίωση των δικτύων θα έχει ως συνέπεια τη μείωση ή και παύση των αντλήσεων από φρεάτια και γεωτρήσεις και τη σταδιακή βελτίωση των χαρακτηριστικών του υπόγειου υδροφορέα.
- Ουσιαστική μείωση των αντλήσεων υπόγειου νερού.
- Επεξεργασία των λυμάτων και ανακύκλωση του νερού εξόδου του βιολογικού καθαρισμού για δευτερεύουσες χρήσεις (πότισμα, καθαριότητα, οικοδομικές εργασίες, πλυντήρια αυτοκινήτων, χρήση στα λιμάνια κ.λπ.).
- Κατασκευή παράλληλου δικτύου κατώτερης ποιότητας νερού για χρήσεις στις οποίες δεν απαιτείται άριστης ποιότητας νερό.
- Κατασκευή λιμνοδεξαμενών και φραγμάτων, υποκαθιστώντας έτσι τα υπόγεια νερά με επιφανειακά, μέσω έργων ταμίευσης επιφανειακών νερών.
- Δημιουργία έργων για τη μείωση της επιφανειακής απορροής σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης, ώστε τα όμβρια να συγκρατούνται και να διηθούνται στους υπόγειους υδροφορείς. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία αναβαθμίδων, οι οποίες μειώνουν την ταχύτητα απορροής και αυξάνουν την διήθηση και την εφαρμογή πολιτικής αναδάσωσης. Η αναβάθμιση και προστασία της φυσικής χλωρίδας και η οργανωμένη αναδάσωση θα

βελτιώσει τις συνθήκες απορροής του νερού, ευνοώντας την κατείσδυσή του και συνεπώς την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα.

- Δημιουργία συνθηκών οικονομικής άνθησης, χωρίς κατασπατάληση των υπαρχόντων φυσικών πόρων, επιδιώκοντας ισόρροπη ανάπτυξη τουριστικών και οικιστικών μονάδων με βάση την αειφορία.
- Τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα.
- Αξιοποίηση του παράκτιου υφάλμυρου υδροφόρου με εγκατάσταση μονάδας αφαλάτωσης. Με τη μέθοδο της αφαλάτωσης, αφαιρούνται κάποια από τα άλατα του αλμυρού νερού, προκειμένου να ληφθεί νερό που θα είναι κατάλληλο για την άρδευση, ή, εάν σχεδόν όλα τα άλατα αφαιρούνται, για την ανθρώπινη κατανάλωση. Η μεγάλης κλίμακας αφαλάτωση απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας τα οποία βέβαια εξαρτώνται από την αλατότητα του νερού λήψης, την απαιτούμενη ποιότητα του νερού παραγωγής, και την εκάστοτε τεχνολογία αφαλάτωσης που χρησιμοποιείται. Αυτό όμως, την καθιστά πολύ δαπανηρή γνωρίζοντας το μεγάλο ενεργειακό πρόβλημα των ημερών μας. Το μεγάλο αυτό κόστος ενέργειας θα μπορούσε να ελαχιστοποιηθεί με την εκμετάλλευση των Ήπιων Μορφών Ενέργειας και συγκεκριμένα με την Αιολική ή την Ηλιακή Ενέργεια.
- Ακριβή και αδιάκοπη γνώση των παραμέτρων εκείνων που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα και την ποσότητα των υπόγειων υδάτων μέσα από συνεχή συλλογή πρωτογενών στοιχείων. Οι αυξανόμενες ανάγκες της περιοχής σε νερό και η ταυτόχρονη υποβάθμιση της ποιότητας των υδατικών πόρων που παρατηρείται ως συνέπεια των κοινωνικοοικονομικών δραστηριοτήτων (τουρισμός, γεωργία κτλ), καθιστούν αναγκαία τη συστηματική παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των διαθέσιμων υδατικών πόρων. Στη λογική αυτή συντείνει και η έλλειψη επαρκών υδρολογικών στοιχείων, ώστε να είναι εφικτή η σύνταξη τεκμηριωμένου υδατικού ισοζυγίου.
- Εντατικός έλεγχος λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων.
- Αλλαγή θέσης των πηγαδιών άντλησης. Η εγκατάσταση προς το εσωτερικό του υδροφορέα 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 κατανεμημένη διάταξη των φρεάτων άντλησης επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά του υδροφορέα.

- Θέσπιση ρητής νομοθεσίας. Η Διαχείριση των Υδατικών Πόρων στον Ελληνικό χώρο διέπεται από το θεσμικό πλαίσιο που απορρέει από το Ν.1739/87 και τα σχετικά προεδρικά διατάγματα, καθώς επίσης και από τη νέα κοινοτική Οδηγία - Πλαίσιο 2000/60 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο παραπάνω νόμος αν και καταγράφει την πρόθεση για ενιαία εθνική υδατική πολιτική, παρουσιάζει πολλά κενά και ενισχύει την πολυδιάσπαση των αρμοδιοτήτων, με αποτέλεσμα αλληλοκαλύψεις και τριβές.
- Ενημέρωση του κοινού, με αποτέλεσμα την ουσιαστική ευαισθητοποίηση στην χρήση των φυσικών πόρων, αλλά και την επαρκή αντίληψη της κρισιμότητας του προβλήματος της υφαλμύρωσης. Ουσιαστικά, για την παραγωγική και αποδοτική διαχείριση των υδατικών πόρων απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η αλλαγή στη νοοτροπία του κοινωνικού συνόλου σε ό, τι αφορά στη χρήση των πόρων. Καθοριστικό, επίσης, ρόλο στην αποτελεσματική εφαρμογή πολιτικής για τη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων θα διαδραματίσει η ενημέρωση του εποχιακού πληθυσμού της περιοχής, η προσέλευση του οποίου προκαλεί αύξηση των υδρευτικών αναγκών κατά τους θερινούς μήνες που οι βροχοπτώσεις είναι μηδενικές και συνεπώς δεν πραγματοποιείται τροφοδοσία των υδατικών διαθεσίμων.
- Μεταφορά νερού με πλοία από το πλησιέστερο γειτονικό νησί που διαθέτει νερό, ως λύση ανάγκης σε περιπτώσεις που οι άλλες λύσεις δεν εφαρμόζονται

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω μέτρα – προτάσεις, εξασφαλίζεται η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων, που συμπεριλαμβάνει την προστασία των υπόγειων υδάτινων σχηματισμών από το φαινόμενο της υφαλμύρωσης και την αύξηση των υδάτινων αποθεμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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.

Δραγάζης Ε., “Αξιολόγηση των Ποιοτικών Χαρακτηριστικών Υπόγειου Νερού στην Παράκτια Περιοχή της Χαλέπας”, Χανιά 2010

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.

Μαντόγλου Α., *“Προσομοίωση και διαχείριση παράκτιων υδροφορέων”* Διαχείριση Φυσικών Καταστροφών, Ημερίδα, Δεκέμβριος 2007.

Μητρόπαπας Α., “Προσομοίωση παράκτιου υπόγειου υδροφορέα Ιρίων Ν. Αργολίδας”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010.

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

Στάμος Κ., “Προσομοίωση Παράκτιου Υδροφορέα Ζεφυρίας Μήλου”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010.

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

Τρούσσα-Μάρτη Σοφία, “Υφαλμύρωση Υπόγειων Υδροφορέων Νομού Χανίων”, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Χανιά 2009

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

Mantoglou A., “Pumping Management of Coastal Aquifers using Analytical Models of Saltwater Intrusion”, Water Resources Research, 2004.

Mantoglou A., Papantoniou M. and Giannoulopoulos P., “Coastal Aquifer using Numerical Simulation and Nonlinear Optimization”, 2003.

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

Michael G. Pitman and Andre Lauchli, “Global Impact of Salinity and Agricultural Ecosystems”, University of California, One Shields Avenue, Davis, CA 95616, USA

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Υδρογεωλογικές Μελέτες Λεκανών και Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Δημόπουλος Γ.: http://www.geo.auth.gr

ΙΤΙΑ, Ερευνητική Ομάδα: http://www.itia.ntua.gr

ΤΕΕ, Τεύχος 2039, “Η Υφαλμύρωση των Υπόγειων Υδάτων” 15 Φεβρουαρίου 1999: http://www.tee.gr/online/epikaira

Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Μεταλλείων, Ε.Μ.Π., Κυρούσης Ι.: http://www.metal.ntua.gr

UNESCO Organization, UNESCO Water: http://www.unesco.org/water