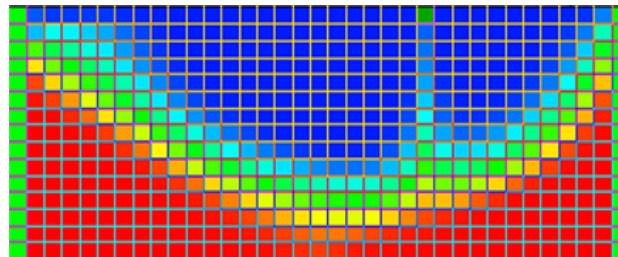
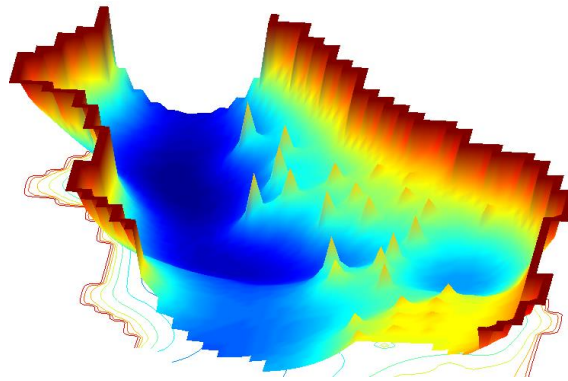




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕ
ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ»**



Εκπόνηση: Μηνιώτη Λήδα Γεωργία

Επιβλέπων καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

Επιτροπή εξέτασης: Μαντόγλου Αριστοτέλης
Ναλμπάντης Ιωάννης
Τσιχριντζής Βασίλειος

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Την επίβλεψη της εργασίας ανέλαβε ο καθηγητής του Ε.Μ.Π. Αριστοτέλης Μαντόγλου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την πολύτιμη καθοδήγησή του για την εκπόνηση της εργασίας, την υπομονή του και την καλή συνεργασία που είχαμε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., Γεώργιο Κοψιαύτη για την ιδιαίτερα σημαντική βοήθειά του στην εξοικείωση με το λογισμικό και την επίλυση σχετικών αποριών.

Ευχαριστίες αρμόζουν, επίσης, στον Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Γεώργιο Κουράκο ο οποίος με τις συμβουλές του βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του υδροφορέα και στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συναισθηματική αλλά και οικονομική στήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τους φίλους μου που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Α. Παναγιωτόπουλο για τις συζητήσεις επί της διπλωματικής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ	3
2.1 Υπόγεια νερά και υδροφορείς	3
2.2 Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων	4
2.3 Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών.....	6
2.3.1 Συστήματα και μοντέλα	6
2.3.2 Ο νόμος του Darcy.....	8
2.3.3 Η υπόθεση Dupuit	9
2.3.4 Εξίσωση Συνέχειας	10
2.3.5 Αρχικές και οριακές συνθήκες	13
2.3.6 Δίκτυα γραμμών ροής και δυναμικού.....	14
2.3.7 Υδραυλική των πηγαδιών.....	14
2.4 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης.....	17
2.4.1 Γενικά στοιχεία.....	17
2.4.2 Μοντέλα υφαλμύρισης υπόγειων παράκτιων υδροφορέων	19
2.4.3 Αναλυτικές σχέσεις για τη θέση της διεπιφάνειας	21
2.4.4 Αναλυτικές σχέσεις για την υφαλμύριση στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας ..	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ.....	29
3. 1 Μοντέλο απότομης διεπιφάνειας.....	29
3.1.1 Εισαγωγή	29
3.2.2 Μαθηματική αναπαράσταση του υπόγειου υδρολογικού συστήματος	30
3.2.3 Διακριτοποίηση υδροφορέα	31
3.2.4 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών	32
3.2.5 Επαναληπτική διαδικασία.....	36
3. 2 Μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας	38
3.2.1 Η έννοια του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου	38

3.2.2 Η μεθοδολογία του SEAWAT.....	40
3.2.3 Το μαθηματικό μοντέλο του προγράμματος SEAWAT	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	45
4.1 Γεωγραφική θέση και μορφολογία.....	45
4.2 Κλίμα.....	47
4.3 Ηφαίστειο	47
4.4 Ανθρωπογενή στοιχεία.....	48
4.4.1 Πολεοδομική και χωροταξική θεώρηση	48
4.4.2 Πληθυσμιακά Στοιχεία	50
4.4.3 Οικονομικά Στοιχεία.....	51
4.4.4 Ύδρευση και ζήτηση νερού.....	52
4.5 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ.....	61
5.1 Εισαγωγή	61
5.2 Περιγραφή προγράμματος βελτιστοποίησης	61
5.3 Βασική εφαρμογή του προγράμματος βελτιστοποίησης	65
5.4 Αναλύσεις ευαισθησίας	68
5.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της κατείσδυσης	68
5.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας.....	74
5.5 Μεταβολή βιώσιμης απόδοσης με τη μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ	81
6.1 Εισαγωγή	81
6.2 Εισαγωγή παραμέτρων και γενικές ρυθμίσεις προσομοιώσεων	82
6.2.1 Διακριτοποίηση	82
6.2.2 Αρχικές και Οριακές συνθήκες.....	84
6.2.3 Πορώδες, Αποθηκευτικότητα και Διασπορά	84
6.2.4 Ρυθμίσεις μοντέλου	85
6.3 Προσομοίωση υδροφορέα – Περίπτωση 1η.....	86
6.4 Προσομοίωση υδροφορέα – Περίπτωση 2η.....	94
6.5 Διαχείριση υδροφορέα	103
6.5.1 Μεταβολή αντλήσεων 8 πηγαδιών.....	103
6.5.2 Επαναληπτική μέθοδος με βάση τη γραμμική παρεμβολή.....	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	109
7.1 Ανακεφαλαίωση	109

7.2 Συμπεράσματα	110
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	111
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	113
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	127

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα σημαντικό τμήμα της διαχείρισης υδατικών πόρων είναι η προστασία των υπόγειων υδροφορέων. Συχνά, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό, οι υδροφορείς υπεραντλούνται και οδηγούνται σε υφαλμύριση και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Για να αποφευχθεί αυτό είναι απαραίτητη η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους.

Η περιοχή μελέτης είναι ένας παράκτιος υδροφορέας που βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Σαντορίνης. Το βάθος του υδροφορέα είναι μικρό συγκριτικά με το πλάτος του. Έτσι, ο υδροφορέας έχει την ιδιαιτερότητα να μην έχει αδιαπέρατο υπόβαθρο αλλά να σχηματίζεται ένας φακός γλυκού νερού, που επιπλέει πάνω στο βαρύτερο αλμυρό νερό. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται αύξηση του μόνιμου πληθυσμού του νησιού και έντονη τουριστική ανάπτυξη, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Έτσι, υπάρχουν μεγάλες ανάγκες σε νερό ενώ οι περιορισμένες βροχοπτώσεις και η έλλειψη επιφανειακών ταμιευτήρων κάνουν την κατάσταση ακόμα πιο περίπλοκη.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μοντέλα για την προσομοίωση του υδροφορέα. Το ένα βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού ενώ το άλλο βασίζεται στη θεώρηση μιας ζώνης ανάμειξης. Το πρώτο μοντέλο είναι πιο απλό αλλά το δεύτερο περιγράφει καλύτερα τη φυσική πραγματικότητα.

Αρχικά, γίνεται αναφορά στη συμπεριφορά και στις βασικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή των υπόγειων νερών και την υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων. Ακόμα, περιγράφονται τα δύο μοντέλα προσομοίωσης ενός υδροφορέα και δίνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από τα δύο λογισμικά που χρησιμοποιούνται (Modflow και Seawat). Πριν αρχίσει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, δίνονται ορισμένες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια, γίνεται βελτιστοποίηση των αντλήσεων του υδροφορέα με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας και ένα πρόγραμμα βελτιστοποίησης που παραχωρήθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή Ματόγλου Α. Επίσης, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της βιώσιμης απόδοσης στις τιμές της κατείσδυσης και της υδραυλικής αγωγιμότητας και ελέγχεται η επιρροή της θέσης των πηγαδιών στη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα.

Ο υδροφορέας προσομοιώνεται με βάση το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας για δύο περιπτώσεις, με διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας και υδραυλικής αγωγιμότητας και για τιμές αντλήσεων από 10% έως 80% της τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία αλλά και οι αντλήσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στον χρόνο και κάθε πηγάδι θεωρείται ότι αντλεί με την ίδια παροχή. Επίσης, ο υδροφορέας προσομοιώνεται, για τις πραγματικές σημερινές τιμές αντλήσεων αλλά και για τις βέλτιστες τιμές που δίνει η βελτιστοποίηση με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας. Στη συνέχεια, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων, και των δύο μοντέλων και ελέγχεται η εξάρτηση της υφαλμύρισης του

υδροφορέα από την παροχή άντλησης αλλά και η επιρροή της τροφοδοσίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας στην υφαλμύριση του υδροφορέα.

Κατόπιν, παρατηρείται ότι η σχέση της παροχής άντλησης με τη συγκέντρωση, για κάθε πηγάδι, είναι περίπου γραμμική. Έτσι, υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή, η παροχή άντλησης που αντιστοιχεί στη μέγιστη επιθυμητή συγκέντρωση αλάτων θεωρώντας το κάθε πηγάδι ανεξάρτητο από τα άλλα. Έπειτα, γίνεται προσομοίωση του υδροφορέα με τις νέες τιμές αντλήσεων. Μετά από λίγες επαναλήψεις η διαδικασία συγκλίνει και προκύπτουν τιμές παροχής για κάθε πηγάδι που προστατεύουν τον υδροφορέα και δίνουν πολύ μεγαλύτερη συνολική αντλούμενη ποσότητα από ότι οι ομοιόμορφες αντλήσεις.

ABSTRACT

Groundwater aquifers play a significant role in water resources management. In many instances, in order to meet the freshwater demand, the aquifers are intensively pumped, causing saltwater intrusion and deterioration of water quality. In order to avoid this, study of groundwater hydrology is necessary.

The study area is a coastal aquifer, located in the central part of Santorini Island. The aquifer depth is relatively large compared to the aquifer width. Thus, the salt water interface does not meet the impermeable base of the aquifer. As a result, the freshwater floats above a denser saltwater layer, forming a lens. Over the last decades, Santorini has experienced a huge tourism growth, particularly during the summer months as well as an increase in resident population. So, the fresh water demand has increased greatly while limited rainfall and lack of surface reservoirs make the situation even more complex.

In the present thesis, two different models are used to simulate the aquifer. The first one is based on the sharp interface approach, using the software Modflow, while the second one is based on the approach of a variable density zone, using the software Groundwater Vistas and a variable density model called Seawat. The first model is simpler but the second one describes in a better way the physical reality.

At first, the equations governing the flow of groundwater and salinization, according to the two models, are explained. Some important information about the study area is also presented.

Then, the sustainable yield of the studied aquifer is estimated using a numerical simulation of fresh water flow, coupled with a nonlinear optimization algorithm, developed in Matlab by the supervisor Mantoglou A. The simulation is executed under the sharp interface model. Also, a sensitivity analysis on the values of surface recharge and hydraulic conductivity are implemented. Moreover, the effect of wells positions in the sustainable yield of the aquifer is studied.

The aquifer is simulated under the variable density model for two cases with different surface recharge and hydraulic conductivity values. For each case, seven different pumping rates are used, varying from 10% to 80% of the surface recharge. The pumping rate and the surface recharge are considered to be evenly distributed in time and each well is considered to pump with the same rate. Furthermore, the aquifer is simulated, in both cases, using the actual current pumping rates of the aquifer and the results of the sharp interface model optimization. Then, comparisons of the two models and the two cases are implemented and the dependence of salinization on the pumping rate is mentioned.

Last but not least, it is noticed that the pumping rate and the salt concentration are approximately linearly related. So the pumping rate corresponding to the maximum

allowable salt concentration, for the potable water, can be calculated by linear interpolation. This value is calculated for each well independently. Using these values, a new simulation is executed. The results are used for a new linear interpolation etc. After a few iterations, the method converges in pump rates that protect the aquifer and give a much higher yield than the evenly distributed case.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο και σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και διαχείριση του υπόγειου υδροφορέα της νήσου Σαντορίνης. Η Σαντορίνη είναι ένα νησί των Κυκλάδων στο οποίο σημειώνεται έντονη τουριστική ανάπτυξη και τάση αύξησης του μόνιμου πληθυσμού. Παρόλα αυτά οι βροχοπτώσεις στο νησί είναι περιορισμένες και το ίδιο είναι και τα επιφανειακά αποθέματα. Οι παράγοντες αυτοί έχουν οδηγήσει σε υφαλμύριση του υδροφορέα και άντληση νερού που οδηγείται σε μονάδες αφαλάτωσης. Για τους λόγους αυτούς, η μελέτη των υπόγειων υδροφορέων είναι εξέχουσας σημασίας.

Ο υδροφορέας που μελετάται βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου και έχει την ιδιομορφία να μη διαθέτει αδιαπέρατο υπόβαθρο αλλά να σχηματίζεται ένας φακός γλυκού νερού που επιπλέει πάνω από το βαρύτερο αλμυρό νερό.

Για τη διαχείριση του υδροφορέα χρησιμοποιούνται δύο μαθηματικά μοντέλα τα οποία επιλύονται αριθμητικά. Το πρώτο μοντέλο θεωρεί απότομη διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού ενώ το δεύτερο μια ζώνη μεταβλητής πυκνότητας.

Για το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Modflow. Οι εξισώσεις του βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας και την σχέση του Darcy. Ο υδροφορέας διακριτοποιείται και οι εξισώσεις επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Για το μοντέλο αυτό, πραγματοποιήθηκαν βελτιστοποιήσεις, με βάση λογισμικό που δημιουργήθηκε από τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Μαντόγλου Α. Ο στόχος ήταν να καταδειχθεί η ευαισθησία του υδροφορέα στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της τροφοδοσίας καθώς και η επίδραση των θέσεων των πηγαδιών στη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα.

Για το δεύτερο μοντέλο, χρησιμοποιείται το λογισμικό Seawat. Οι εξισώσεις του βασίζονται επίσης στην εξίσωση συνέχειας και τη σχέση του Darcy. Για την επίλυση τους, χρησιμοποιείται η έννοια του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου. Με βάση το μοντέλο αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις, που στόχο είχαν να γίνει φανερή η συμπεριφορά του υδροφορέα σε συνθήκες άντλησης, να καταδειχθεί η επιρροή της τροφοδοσίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας στην υφαλμύριση του υδροφορέα καθώς και να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων. Στο τέλος έγιναν προσπάθειες να βρεθούν τιμές αντλήσεων για κάθε πηγάδι που να προστατεύουν τον υδροφορέα και ταυτόχρονα να είναι κατά το δυνατόν μεγαλύτερες.

1.2 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Για να αναλυθούν και να παρουσιαστούν τα θεωρητικά τμήματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η εργασία οργανώθηκε σε 7 κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο (το παρόν κεφάλαιο), γίνεται μία σύντομη περιγραφή του θέματος και της δομής της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση των παραμέτρων και των θεωρητικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Επεξηγείται το πρόβλημα της υφαλμύρισης και τα δύο μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Δίνονται ορισμένες αναλυτικές λύσεις για τον προσδιορισμό της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού και την υφαλμύριση με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται αναλυτικά τα δύο μοντέλα προσομοίωσης, δίνονται οι εξισώσεις τους και επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο επιλύονται αριθμητικά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, δίνονται ορισμένα σημαντικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Παρατίθενται ορισμένες πληροφορίες για το κλίμα της, το ηφαίστειο, τα πληθυσμιακά, πολεοδομικά και οικονομικά στοιχεία του νησιού, τον τρόπο ύδρευσης και τη ζήτηση νερού, τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία.

Το πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρεται στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας. Περιγράφεται το πρόγραμμα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα από τη βασική εφαρμογή του καθώς και τις αναλύσεις ευαισθησίας στην τροφοδοσία και την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα. Επίσης, δίνονται αποτελέσματα βελτιστοποιήσεων για διάφορες θέσεις των πηγαδιών.

Το έκτο κεφάλαιο, αναφέρεται στο μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας. Επεξηγείται το πώς καταρτίστηκε το μοντέλο και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για δύο περιπτώσεις παραμέτρων και για διάφορες τιμές αντλήσεων. Ακόμα, ο υδροφορέας προσομοιώνεται θέτοντας μηδενική παροχή άντλησης στα τέσσερα πιο ευαίσθητα σε υφαλμύριση πηγάδια και διπλάσια παροχή άντλησης στα 4 λιγότερο ευαίσθητα. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μία επαναληπτική μέθοδος που βασίζεται στη γραμμική παρεμβολή και στόχο έχει να προσδιορίσει τη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται ανακεφαλαίωση και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας καθώς και προτάσεις για περισσότερη εμβάθυνση στη διαχείριση των υπόγειων υδάτων της Σαντορίνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ

2.1 Υπόγεια νερά και υδροφορείς

Υπόγειο νερό είναι το νερό το οποίο βρίσκεται αποθηκευμένο ή κινείται μέσα στα διάφορα πετρώματα και εδάφη, τα οποία ονομάζονται πορώδη μέσα. Αυτά αποτελούνται από ένα στερεό σκελετό, δηλαδή μια συνάθροιση στερεών κόκκων που διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα, πόρους ή ρωγμές, που μπορούν να γεμίσουν με νερό, αέρια και οργανικές ουσίες.

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται μέσα σε πορώδη μέσα. Αυτά τα πορώδη μέσα ονομάζονται υδροφορείς. Αδιαπέρατοι θεωρούνται εκείνοι οι σχηματισμοί που έχουν μεν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν νερό, αλλά δεν έχουν πρακτικά τη δυνατότητα μεταφοράς του. Ημιπερατοί είναι εκείνοι οι σχηματισμοί που επιτρέπουν στο νερό να κινηθεί, αλλά με πάρα πολύ μικρές ταχύτητες.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν τα υπόγεια νερά χωρίζονται σε δύο ζώνες: τη ζώνη αερισμού και τη ζώνη κορεσμού. Το νερό των βροχοπτώσεων, αρδεύσεων κ.τ.λ. διηθείται από την επιφάνεια του εδάφους και κινείται, εξαιτίας κυρίως της βαρύτητας, προς τα κάτω. Βρίσκοντας ένα αδιαπέρατο πέτρωμα σε κάποιο βάθος συσσωρεύεται και γεμίζει όλα τα διάκενα του γεωλογικού σχηματισμού μέχρι μια ανώτερη επιφάνεια που αποτελεί το πάνω όριο της ζώνης κορεσμού και ονομάζεται ελεύθερη επιφάνεια ή υδροφόρος ορίζοντας. Πάνω από αυτή την επιφάνεια υπάρχει νερό, το οποίο όμως δεν καλύπτει όλο τον όγκο των διακένων. Η ιδεατή ελεύθερη επιφάνεια συμπίπτει με το σύνολο των σημείων εκείνων όπου η πίεση είναι ίση με τη ατμοσφαιρική. Η ζώνη αερισμού είναι το τμήμα από την ελεύθερη επιφάνεια ως την επιφάνεια του εδάφους. Υπόγεια νερά θεωρούνται τα νερά που βρίσκονται και κινούνται στη ζώνη κορεσμού.

Περιορισμένος η υπό πίεση θεωρείται ένας υδροφορέας εάν περιορίζεται στο πάνω και κάτω μέρος του από αδιαπέρατα στρώματα. Πιεζομετρική επιφάνεια είναι η ιδεατή εκείνη επιφάνεια που θα οριζόταν από τις στάθμες των πιεζομέτρων που θα τοποθετούνταν κατά την οριζόντια έκταση ενός περιορισμένου υδροφορέα.

Φρεάτιοι υδροφορείς είναι αυτοί που το κάτω όριό τους συμπίπτει με ένα αδιαπέρατο στρώμα ενώ το πάνω όριό τους είναι μια ελεύθερη επιφάνεια. Υπάρχουν επίσης υδροφορείς στους οποίους το πάνω, κάτω ή και τα δύο στρώματα είναι ημιπερατά. Οι υδροφορείς αυτοί ονομάζονται υδροφορείς με διαρροή.

Τα υπόγεια ύδατα θεωρούνται ανανεώσιμη πηγή παροχής νερού και μάλιστα συνήθως καλής ποιότητας καθώς οι υδροφορείς έχουν την ιδιότητα να λειτουργούν ως φίλτρα καθαρισμού.

Η ροή των υπόγειων νερών γενικά εξελίσσεται σε χώρο τριών διαστάσεων. Όμως, επειδή συνήθως το πάχος των υπόγειων υδροφορέων είναι κατά πολύ μικρότερο από τις

οριζόντιες διαστάσεις τους, είναι δυνατόν να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι η κίνηση γίνεται σε δύο διαστάσεις. Μαθηματικά αυτό υλοποιείται με την ολοκλήρωση ως προς το πάχος του υδροφορέα. Η θεώρηση αυτή ονομάζεται υδραυλική θεώρηση.

Υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στη γη είναι ίση με $1.370 \times 10^{15} \text{ m}^3$. Ένα μεγάλο ποσοστό όμως αυτού του νερού είναι είτε αλμυρό είτε σε μορφή χιονιού και πάγου. Έτσι, περίπου το 0.6% του συνολικού νερού, αποτελεί τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση. Από το νερό αυτό, το 98% είναι υπόγειο νερό. Σχεδόν η μισή ποσότητα από το υπόγειο αυτό νερό είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης ($>800\text{m}$), όπου η ποσότητα των περιεχόμενων αλάτων είναι πολύ μεγάλη και από όπου η άντλησή του είναι υπερβολικά δαπανηρή. Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι το διαθέσιμο για εκμετάλλευση νερό είναι πράγματι ένα πολύτιμο αγαθό.

Το υπόγειο νερό προέρχεται από το νερό των βροχοπτώσεων και των επιφανειακών ταμειυτήρων που διηθείται κατακόρυφα από την επιφάνεια του εδάφους προς τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Ένα σύνολο μελετών που έχουν εκπονηθεί προβλέπουν σημαντική μείωση τόσο του ύψους όσο και των ημερών βροχόπτωσης μέσα στις επόμενες δεκαετίες. Με δεδομένη και την άνιση κατανομή του τόσο χρονικά όσο και χωρικά αλλά και το γεγονός ότι η ζήτηση είναι μεγαλύτερη στις περιόδους που οι βροχοπτώσεις είναι χαμηλότερες, καθίσταται σαφές ότι η μελέτη για την ορθή αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων είναι εξέχουσας σημασίας.

Στα πλαίσια της προστασίας των υπόγειων υδάτων ορίζεται η βιώσιμη απόδοση ενός υδροφορέα ως ένα ποσοστό (20%-80%) του υπολοίπου βροχόπτωσης (παροχή βροχοπτώσεων που παραμένει στην επιφάνεια ή μέσα στο έδαφος μετά τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής). Η τιμή αυτή ορίζεται συναρτήσει των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης, άλλων παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα των υπόγειων υδάτων ή με νομικές, πολιτικές, οικονομικές ή αισθητικές θεωρήσεις.

2.2 Παράμετροι υπόγειων υδροφορέων

Παρακάτω αναφέρονται οι βασικές παράμετροι και ιδιότητες που διέπουν την κίνηση του νερού και τη λειτουργία του υδροφορέα.

- Υδραυλική αγωγιμότητα $K [L/T]$:
Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μία παράμετρος που εξαρτάται τόσο από το πορώδες μέσο όσο και από το κινούμενο ρευστό. Όταν ένα ρευστό έχει μεγαλύτερο κινηματικό ιξώδες –ιξώδες προς πυκνότητα ρευστού- από κάποιο άλλο σημαίνει ότι η υδραυλική του αγωγιμότητα για τον ίδιο υδροφορέα θα είναι μικρότερη από το δεύτερο. Επίσης, η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου. Γενικότερα όταν η τιμή της είναι μεγάλη, η κίνηση διαμέσου του πορώδους μέσου διευκολύνεται.

- Μεταφορικότητα ή διοχετευτικότητα T [L^2/T]: Είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας K επί το πάχος b της κορεσμένης ζώνης του υδροφορέα : $T = kb$. Η έννοια της μεταφορικότητας αφορά μόνο διδιάστατη ή οριζόντια ροή. Σε προβλήματα που το φαινόμενο εξελίσσεται σε χώρο τριών διαστάσεων δεν θα είχε νόημα ο πολλαπλασιασμός με το πάχος γιατί δεν θα ήταν απαραίτητα ενιαία η τιμή σε όλο το πάχος. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται η υδραυλική αγωγιμότητα K (K_x, K_y, K_z) για την περιγραφή της κίνησης των υδάτων. Συνήθως χρησιμοποιείται για υπό πίεση υδροφορείς. Στην περίπτωση των φρεάτιων υδροφορέων η υδραυλική αγωγιμότητα πολλαπλασιάζεται με ένα μέσο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας.
- Πορώδες η[αδιάστατο μέγεθος]: Το πορώδες είναι ο όγκος των διακένων ή πόρων του εδάφους ως προς τον συνολικό όγκο: $n = \frac{U_n}{U}$.
- Αποθηκευτικότητα S [Αδιάστατο μέγεθος]:
 - Αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα ή ελαστική αποθηκευτικότητα [αδιάστατο μέγεθος] : Ορίζεται ως ο όγκος νερού που απομακρύνεται (ή προστίθεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου. Στους υπό πίεση υδροφορείς εξαρτάται από την ελαστικότητα του στερεού σκελετού. Χρησιμοποιείται κατά τη θεώρηση διδιάστατης ροής.
 - Αποθηκευτικότητα φρεάτιου υδροφορέα ή φρεάτια αποθηκευτικότητα [αδιάστατο μέγεθος] : Η αποθηκευτικότητα ενός φρεάτιου υδροφορέα, είναι ο όγκος του νερού που απομακρύνεται (ή προστίθεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) της στάθμης. Η πτώση της στάθμης σημαίνει απομάκρυνση ή μεταφορά νερού με βαρύτητα από τον όγκο των διακένων της συγκεκριμένης έκτασης σε μια άλλη θέση. Η αποθηκευτικότητα ενός φρεάτιου υδροφορέα είναι ουσιαστικά το ενεργό πορώδες και είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την ελαστική αποθηκευτικότητα.
 - Ειδική αποθηκευτικότητα υπό πίεση υδροφορέα [L^{-1}]: Ορίζεται ως ο όγκος νερού που απελευθερώνεται (ή προσλαμβάνεται) ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου. Εκφράζει την επίδραση της συμπιεστότητας του στερεού σκελετού και του ρευστού. Πολλαπλασιαζόμενη με το πάχος ενός περιορισμένου υδροφορέα δίνει την αποθηκευτικότητά του. Εάν πολλαπλασιαστεί με τη μέση ελεύθερη επιφάνεια ενός φρεάτιου υδροφορέα θα δώσει μια τιμή μικρότερη της αποθηκευτικότητάς του, που όμως μπορεί κατά προσέγγιση να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικότητα.

- Ομογένεια και ισοτροπία: Στα πρακτικά προβλήματα της υδραυλικής υπόγειων νερών οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαπερατότητα είναι η υδραυλική αγωγιμότητα και η μεταφορικότητα. Οπότε οι ιδιότητες της ομογένειας και ισοτροπίας αφορούν στις δύο αυτές παραμέτρους. Ένας υδροφορέας λέγεται ότι έχει την ιδιότητα της ομογένειας ή ότι το πορώδες μέσο που τον αποτελεί είναι ομογενές όταν η διαπερατότητά του είναι ίδια σε κάθε σημείο. Αντίθετα, αν η τιμή της μεταβάλλεται στον χώρο, το μέσο λέγεται ανομογενές. Ένας υδροφόρος σχηματισμός είναι ισότροπος αν σε κάθε σημείο του η διαπερατότητά του είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι ανισότροπος.

2.3 Το μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων νερών

2.3.1 Συστήματα και μοντέλα

Ως σύστημα ορίζεται ένα σύνολο φυσικών ή ανθρωπογενών στοιχείων, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και παράγουν αποτέλεσμα γενικά διαφορετικό από εκείνο που είναι δυνατό να παραχθεί από την κάθε συνιστώσα ξεχωριστά. Κάθε σύστημα χωρίζεται από το περιβάλλον του με όριο μέσω του οποίου δέχεται εισόδους και αποδίδει εξόδους.

Ανάλυση συστήματος είναι ο εντοπισμός, μεταξύ πολλών εναλλακτικών δράσεων, μιας ή περισσότερων δράσεων που προτιμώνται έναντι των υπολοίπων. Κατά κύριο λόγο για την ανάλυση συστημάτων χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι:

- Η προσομοίωση η οποία σύμφωνα με τον Winston είναι η «τεχνική μίμησης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού συστήματος σε ότι αφορά στη χρονική του εξέλιξη».
- Η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία του σχεδιασμού ή της λειτουργίας ενός συστήματος η οποία κάνει το σύστημα όσο το δυνατόν καλύτερο υπό μία καθορισμένη έννοια. Μαθηματικά αυτό είναι ισοδύναμο με την εύρεση μιας ή περισσότερων λύσεων που είναι οι καλύτερες δυνατές.

Το σύστημα που θα αναλυθεί στην παρούσα εργασία είναι ο υπόγειος υδροφορέας της Σαντορίνης. Οι εισόδός του είναι η συνολική κατείσδυση και το αλμυρό νερό που εισέρχεται από τη θάλασσα και οι έξοδοί του είναι η συνολική ποσότητα νερού που αντλείται καθώς και η έξοδος προς τη θάλασσα. Σύμφωνα με τα μοντέρνα πρότυπα ASTM (American Society for Testing and Material), D5880-95, το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν το σύστημα καθώς και τις υποθέσεις και τις παραδοχές που έχουν γίνει ονομάζεται μοντέλο. Σε γενικές γραμμές ένα μοντέλο 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 κ.τ.λ.), οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι συνήθως διαστάσεις χώρου και χρόνου, οι παράμετροι περιγράφουν τις ιδιότητες και τη σύσταση του συστήματος (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες κ.τ.λ.), ενώ οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν εξωτερικές επιδράσεις και τάσεις.

Οι εξισώσεις των μοντέλων στα προβλήματα των υπόγειων ροών είναι κατά κύριο λόγο διαφορικές και για την επίλυσή τους χρησιμοποιείται μία εκ των δύο μεθόδων:

- Η αναλυτική μέθοδος: Στη μέθοδο αυτή οι μαθηματικές εξισώσεις επιλύονται αναλυτικά. Το μεγαλύτερο συγκριτικό πλεονέκτημα των αναλυτικών μεθόδων επίλυσης έγκειται στη δυνατότητα να παράγουν, σε μερικές μόνο περιπτώσεις, ακριβείς λύσεις ιδιαίτερα σε απλά προβλήματα ροής ή μεταφοράς διαλυτών ουσιών. Η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη στον έλεγχο της ακρίβειας των αριθμητικών μεθόδων έναντι των αναλυτικών.
- Η αριθμητική μέθοδος: Στη μέθοδο αυτή οι μερικές διαφορικές εξισώσεις επιλύονται καλύτερα με τη χρήση αριθμητικών προσεγγίσεων. Τα αριθμητικά μοντέλα είναι πιο κατάλληλα για πολύπλοκα φυσικά συστήματα. Στις περισσότερες αριθμητικές μεθόδους, η συνεχής μορφή των μερικών διαφορικών εξισώσεων αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων.

Στην παρούσα εργασία η επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων θα πραγματοποιηθεί με αριθμητικές μεθόδους.

Οι πιο αντιπροσωπευτικές αριθμητικές μέθοδοι είναι οι ακόλουθες:

- Η μέθοδος των «πεπερασμένων διαφορών». Η μέθοδος αυτή, στην περίπτωση των διδιάστατων προβλημάτων, απαιτεί τη διακριτοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος σε τετραγωνικά ή ορθογώνια κελιά, ενώ σε τριδιάστατα προβλήματα σε ορθορομβικά. Τα κελιά αυτά μπορούν να δομούν είτε ομοιόμορφο, είτε μεταβλητού μεγέθους κανάβο ή πλέγμα. Ακόμα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου για κάθε κομβικό σημείο και αυτή η τιμή, αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Η μέθοδος προγραμματίζεται και κατανοείται σχετικά εύκολα. Επίσης, σε γενικές γραμμές απαιτεί λιγότερα δεδομένα.
- Η μέθοδος των «πεπερασμένων στοιχείων». Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι βασικά πιο ευέλικτη στη διακριτοποίηση της περιοχής προσομοίωσης. Σε διδιάστατα προβλήματα τα επιμέρους στοιχεία είναι τρίγωνα ή τετράπλευρα ενώ σε τριδιάστατα προβλήματα, τετράεδρα, εξαέδρα ή πρίσματα. Η μέθοδος προσεγγίζει καλύτερα ακανόνιστα όρια και εσωτερικές γεωλογικές δομές, όπως ρήγματα, ενώ μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα σημειακές πηγές και καταβόθρες, επιφάνειες διήθησης και τη μεταβαλλόμενη ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Στη μέθοδο αυτή, σε αντίθεση με την προηγούμενη, το υδραυλικό

φορτίο ορίζεται πλήρως σε κάθε σημείο του στοιχείου με τη χρήση των συναρτήσεων παρεμβολής (interpolation function).

- Η μέθοδος των «οριακών στοιχείων» (boundary Integral Equation ή Boundary element method). Χρησιμοποιείται συνήθως για γραμμικά, ομογενή μέσα, γεγονός που περιορίζει το εύρος των προβλημάτων στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί. Λειτουργεί με την κατασκευή ενός πλέγματος πάνω από την επιφάνεια που μοντελοποιείται.
- Η μέθοδος των «αναλυτικών στοιχείων» (analytical element method). Είναι παρόμοιας φύσης με τη μέθοδο των οριακών στοιχείων (BEM), καθώς δεν στηρίζεται στη διακριτοποίηση των όγκων ή των περιοχών αλλά γίνεται διακριτοποίηση μόνο στα εσωτερικά και εξωτερικά σύνορα. Μία από τις κύριες διαφορές μεταξύ AEM και BEM είναι ότι στην πρώτη τα ολοκληρώματα στα όρια υπολογίζονται αναλυτικά.

Τα πιο διαδεδομένα λογισμικά επίλυσης προβλημάτων ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών στο υπέδαφος υιοθετούν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούν και τα λογισμικά που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία (Γιαννουλόπουλος Π.Κ., 2000, Ναλμπάντης Ι., 2007).

2.3.2 Ο νόμος του Darcy

Παρότι οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, επειδή οι διατομές στις οποίες κινούνται τα υπόγεια ύδατα είναι τεράστιες, οι όγκοι νερού που μετακινούνται είναι τελικά ιδιαίτερα μεγάλοι. Έτσι, ενδιαφέρει η παροχή νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Τη σχέση της παροχής νερού με το πιεζομετρικό φορτίο και τις παραμέτρους του υδροφορέα προσπάθησε να προσδιορίσει με ένα πείραμά του ο Darcy. Τελικά κατέληξε στην παρακάτω θεμελιώδη σχέση:

$$Q = KA \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{L} \quad (2.1)$$

όπου:

K : η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα [L/ T],

A : η διατομή του υδροφορέα [L²],

φ_1, φ_2 : τα πιεζομετρικά φορτία μεταξύ των δύο διατομών του υδροφορέα, μεταξύ των οποίων κινείται το νερό. Μετρούνται από ένα αυθαίρετο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς [L],

L : η απόσταση μεταξύ των δύο διατομών [L].

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί με βάση την ειδική παροχή. Ως ειδική παροχή ορίζεται ο όγκος του νερού που περνά ανά μονάδα χρόνου από μια μοναδιαίου εμβαδού

διατομή, κάθετη στην διεύθυνση της ροής:

$$q = \frac{Q}{A} = K J \quad (2.2)$$

όπου:

q : η ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy [L/T].

J : η υδραυλική κλίση [αδιάστατο μέγεθος] που δίνεται από τη σχέση: $J = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{L}$

Η ειδική παροχή είναι ουσιαστικά μια μακροσκοπική ταχύτητα, δηλαδή μια μέση ταχύτητα για όλη τη διατομή A και έτσι ονομάζεται και ταχύτητα διηθήσεως ή ταχύτητα Darcy. Όμως, δεν είναι μια πραγματική ταχύτητα κίνησης του νερού στους υδροφορείς. Δε λαμβάνει υπόψη το πορώδες του εδάφους, δηλαδή το γεγονός ότι ένα μέρος μόνο της διατομής αποτελείται από νερό. Επίσης, η πραγματική ταχύτητα αλλάζει μέγεθος και διεύθυνση με έντονο ρυθμό και άρα έχει τοπικό χαρακτήρα.

2.3.3 Η υπόθεση Dupuit

Στους περιορισμένους υδροφορείς χρησιμοποιείται, με ένα σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας, η υδραυλική θεώρηση και η ροή θεωρείται οριζόντια. Όμως, στους φρεάτιους υδροφορείς οι ταχύτητες ροής μεταβάλλονται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η ελεύθερη επιφάνεια δεν είναι σχεδόν ποτέ οριζόντια. Ουσιαστικά στην ελεύθερη επιφάνεια ισχύει μία παραβολική οριακή συνθήκη και η θέση της δεν είναι γνωστή σε κάθε χρονική στιγμή. Η κλίση, όμως, της ελεύθερης επιφάνειας συνήθως είναι πολύ μικρή. Έτσι, ο Dupuit υπέθεσε ότι σε κάθε κατακόρυφη διατομή οι οριζόντιες ταχύτητες είναι ίσες. Κατά συνέπεια οι μεταβολές της ροής κατά την έννοια του κατακόρυφου άξονα z θεωρούνται αμελητέες. Με βάση αυτή τη θεώρηση κατέληξε σε μια σχέση που είναι γνωστή ως σχέση Dupuit-Forchheimer:

$$Q' = K \frac{(h_0^2 - h_L^2)}{2L} \quad (2.3)$$

όπου:

Q' : η παροχή ανά μονάδα πλάτους, κάθετα στο επίπεδο ροής [L^2/T],

K : η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα [L/T],

h_0, h_L : η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στις θέσεις 0 και L αντίστοιχα [L],

L : η απόσταση μεταξύ των δύο διατομών του υδροφορέα [L].

Στην πραγματικότητα, η ελεύθερη επιφάνεια καταλήγει σε μια στάθμη ψηλότερη απ' αυτήν της κατάντη δεξαμενής, δημιουργώντας μια επιφάνεια διήθησης, όπου το νερό κινείται κατακόρυφα στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα κατά μήκος αυτής της επιφάνειας. Όμως,

στα περισσότερα πρακτικά προβλήματα η υπόθεση Dupuit ισχύει για το μεγαλύτερο μέρος της ροής μέχρι το κατάντη άκρο

2.3.4 Εξίσωση Συνέχειας

Σύμφωνα με τη γενικευμένη εξίσωση συνέχειας η ανά μονάδα χρόνου μεταβολή της μάζας μέσα στον όγκο αναφοράς ισούται με την ολική καθαρή εισροή μάζας από την επιφάνεια E που περιβάλλει τον όγκο αυτό. Η εξίσωση συνέχειας λοιπόν, γράφεται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = -\text{div}(\rho q) \quad (2.4)$$

όπου:

q : η ειδική παροχή στους τρεις άξονες ροής [L/T],
 n : το πορώδες του εδάφους [αδιάστατο μέγεθος],
 ρ : η πυκνότητα του ρευστού [M/L³].

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ειδικής αποθηκευτικότητας S_s , την έκφραση της ειδικής παροχής από το νόμο του Darcy και υποθέτοντας ότι η πυκνότητα ρ δε μεταβάλλεται στο χώρο, η εξίσωση 2.4 μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \text{div}(K \text{ grad} \varphi) \quad (2.5)$$

όπου:

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα [L⁻¹]
 φ : το πιεζομετρικό φορτίο [L]

Για τις διάφορες κατηγορίες υδροφορέων και **τριδιάστατη ροή**, η εξίσωση παίρνει τις παρακάτω μορφές:

Για μη μόνιμη ροή

- Ανομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

- Ομογενής και ανισότροπος υδροφορέας

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = K_{xx} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right) + K_{yy} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + K_{zz} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

- Ανομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

- Ομογενής και ισότροπος υδροφορέας

$$S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right) + K \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right) + K \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

όπου:

K_{XX}, K_{YY} : η υδραυλική αγωγιμότητα στις διευθύνσεις X,Y αντίστοιχα [L/ T]

Για μόνιμη ροή

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής ή όταν τόσο ο στερεός σκελετός του εδάφους όσο και το ρευστό θεωρηθούν ασυμπίεστα, δηλαδή $S_S=0$ και ρ =σταθερό, το αριστερό σκέλος των παραπάνω εξισώσεων είναι ίσο με μηδέν. Στην περίπτωση που ισχύει ένα από τα παραπάνω και ταυτόχρονα το μέσο είναι ομογενές και ισότροπο η εξίσωση συνέχειας καταλήγει στην εξίσωση Laplace:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.10)$$

Στην περίπτωση που ισχύει η υδραυλική θεώρηση, δηλαδή που η ροή είναι οριζόντια, το πρόβλημα της ροής στους υπόγειους υδροφορείς ανάγεται σε **πρόβλημα δύο διαστάσεων**. Οι εξισώσεις που διέπουν την υπόγεια ροή για φρεάτιο υδροφορέα (που είναι και ο υδροφορέας της Σαντορίνης) και για φρεάτιο υδροφορέα με διαρροή παρουσιάζονται παρακάτω.

Για μη μόνιμη ροή

- Ροή σε φρεάτιο υδροφορέα

Για έναν ανομογενή και ανισότροπο φρεάτιο υδροφορέα η εξίσωση συνέχειας γράφεται ως ακολούθως:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q \quad (2.11)$$

όπου:

S: η φρεάτια αποθηκευτικότητα [αδιάστατο μέγεθος],

h : η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφορέα μελέτης [L],

Q : ο όρος της συνολικής παροχής των πηγαδιών [L^3/T]. Στην περίπτωση που πρόκειται για άντληση, η παροχή παίρνει θετικό πρόσημο. Στην περίπτωση που πρόκειται για τροφοδοσία του υδροφορέα, η παροχή παίρνει αρνητικό πρόσημο.

Θεωρώντας $T = kb$ όπου h ένα μέσο ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα και αγνοώντας την ελαστικότητα του νερού και του στερεού ($S = S_s h \ll S_y$, όπου S_y το ενεργό πορώδες) η εξίσωση παίρνει μορφή ίδια με αυτή που θα ίσχυε για περιορισμένους υδροφορείς.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q \quad (2.12)$$

όπου:

T_{xx}, T_{yy} : η μεταφορικότητα του υδροφορέα στις διευθύνσεις X,Y,Z αντίστοιχα [L^2/T].

- Ροή σε φρεάτιο υδροφορέα με διαρροή

Η κατηγορία αυτή, περιγράφει ουσιαστικά ένα φρεάτιο υδροφορέα που σαν πυθμένα έχει ένα ημιπερατό στρώμα, το οποίο με τη σειρά του αποτελεί το πάνω όριο ενός περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή. Η εξίσωση συνέχειας για την περίπτωση αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$s \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q - \frac{h - \varphi}{c} \quad (2.13)$$

όπου:

h : η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφορέα μελέτης [L],

φ : η πιεζομετρική επιφάνεια του υποκείμενου περιορισμένου υδροφορέα [L],

c : η αντίσταση του ημιπερατού στρώματος [T].

Για μόνιμη ροή

Οι εξισώσεις για διδιάστατους υδροφορείς, μπορούν να γραφούν για συνθήκες μόνιμης ροής εάν μηδενιστεί το αριστερό σκέλος. Επίσης, μεταβάλλοντας τη θέση αλλά και τον συμβολισμό, και συνεπώς και τις τιμές της μεταφορικότητας, κατά όμοιο τρόπο με αυτόν που μεταβαλλόταν η υδραυλική αγωγιμότητα στο τριδιάστατο πρόβλημα, είναι δυνατόν οι εξισώσεις να γραφούν για όλους τους συνδυασμούς ισοτροπικών, ομοιόμορφων, ανισοτροπικών και ανομοιόμορφων υδροφορέων

Σημειώνεται ακόμα ότι στην περίπτωση που ο υδροφορέας τροφοδοτείται από ανώτερα στρώματα (κατείσδυση) τότε αυτή η ποσότητα νερού (N) προστίθεται στο 2ο μέρος των εξισώσεων είτε η ροή είναι μόνιμη είτε όχι.

2.3.5 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Όταν μελετάται ένα μη μόνιμο φαινόμενο ροής ορίζεται σαν $t=0$ ένας αρχικός χρόνος αναφοράς, τη στιγμή που αρχίζει η μελέτη του φαινομένου. Στην αρχική χρονική στιγμή πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της άγνωστης ή των άγνωστων μεταβλητών. Αυτή, σε προβλήματα υπόγειων ροών είναι συνήθως το πιεζομετρικό φορτίο ή η συγκέντρωση σε άλατα.

Κατά το σχεδιασμό ενός μαθηματικού μοντέλου ροής σε έναν υπόγειο υδροφορέα, είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο καθορισμός των ορίων του και των συνθηκών που επικρατούν κατά μήκος τους. Οι τύποι των οριακών συνθηκών που συναντώνται συνήθως σε προβλήματα υπόγειας ροής είναι οι ακόλουθοι:

- **Συνθήκες Dirichlet**
Οι συνθήκες αυτές αφορούν τη μεταβλητή του προβλήματος. Όταν σε κάποιο όριο του υδροφορέα το πιεζομετρικό φορτίο είναι ανεξάρτητο από τις συνθήκες ροής στον υδροφορέα, τότε το όριο αυτό είναι όριο γνωστού φορτίου. Το πιεζομετρικό φορτίο μπορεί είτε να είναι σταθερό (οπότε αποτελεί και ισοδυναμική γραμμή), είτε να μεταβάλλεται με γνωστό τρόπο στο χρόνο. Τέτοια όρια υπάρχουν σε περιπτώσεις που υπάρχει άμεση υδραυλική επικοινωνία με ποταμό, λίμνη ή θάλασσα. Επίσης, οι πηγές μπορούν να αποτελέσουν ειδική περίπτωση της κατηγορίας αυτής.
- **Συνθήκες Neumann**
Οι συνθήκες αυτές αφορούν την παράγωγο της μεταβλητής του προβλήματος. Όταν σε κάποιο όριο του υδροφορέα, η ανά μονάδα μήκους του ορίου αυτού διηθούμενη παροχή είναι γνωστή (είτε σταθερή είτε μεταβαλλόμενη με γνωστό τρόπο), το όριο ονομάζεται όριο γνωστής παροχής. Τέτοιο όριο υπάρχει στις θέσεις όπου ο υπό εξέταση υδροφορέας τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται από κάποιον άλλο υδροφορέα – υπόγειο ή επιφανειακό. Ειδική περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη αδιαπέρατου ορίου. Όταν η εισροή ή εκροή είναι σταθερή τότε το όριο αυτό αποτελεί ταυτόχρονα και γραμμή ροής.
- **Συνθήκες Cauchy (μικτού τύπου)**
Οι συνθήκες αυτές αφορούν συνδυασμό της μεταβλητής του προβλήματος και της παραγώγου της. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα συνδυασμό των άλλων δύο τύπων ορίων. Ένα κλασσικό παράδειγμα είναι όταν μέρος, ή ολόκληρη η κοίτη ποταμού ή λίμνης, έχει αποφράξει μερικώς λόγω της απόθεσης λεπτόκοκκων υλικών. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος με χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα που θέτει εμπόδιο στη ροή. Έτσι ελαττώνεται το μέγεθος της

δηθούμενης παροχής και δημιουργείται διαφορά μεταξύ της στάθμης του ποταμού (ή λίμνης) και της στάθμης ή του πιεζομετρικού φορτίου του υδροφορέα αμέσως μετά το ημιπερατό στρώμα .

2.3.6 Δίκτυα γραμμών ροής και δυναμικού

Σε αρκετά προβλήματα υπόγειων ροών χρησιμοποιείται το δυναμικό αντί του πιεζομετρικού φορτίου. Η συνάρτηση δυναμικού είναι το γινόμενο του πιεζομετρικού φορτίου με την υδραυλική αγωγιμότητα.

Γραμμές ίσου δυναμικού ή ισοδυναμικές γραμμές είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων στα οποία το πιεζομετρικό φορτίο έχει σταθερή τιμή. Έτσι, για έναν περιορισμένο υδροφορέα οι γραμμές ίσου δυναμικού στο οριζόντιο επίπεδο παριστάνουν την αντίστοιχη πιεζομετρική επιφάνεια ενώ για έναν φρεάτιο υδροφορέα οι γραμμές ίσου δυναμικού παριστάνουν την τοπογραφική κατανομή της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου νερού. Το διάνυσμα της ειδικής παροχής (ταχύτητα Darcy) σε κάθε σημείο της ισοδυναμικής καμπύλης είναι κάθετο σε αυτήν.

Γραμμές ροής ονομάζονται οι καμπύλες εκείνες του οριζόντιου επιπέδου Χ,Υ σε κάθε σημείο των οποίων το διάνυσμα της ειδικής παροχής είναι εφαπτόμενο.

2.3.7 Υδραυλική των πηγαδιών

Η λειτουργία μεμονωμένων ή συστημάτων πηγαδιών (άντλησης ή φόρτισης) μεταβάλλει τη ροή των υπόγειων υδάτων μέχρι μια καθορισμένη απόσταση, πέρα από την οποία η ροή δεν επηρεάζεται. Η απόσταση αυτή ονομάζεται ακτίνα επιρροής. Στο παρόν υποκεφάλαιο, μελετάται η επίδραση των πηγαδιών σε τοπικό επίπεδο γύρω από τα πηγάδια.

Η άντληση από έναν φρεάτιο υδροφορέα προκαλεί υποβιβασμό της ελεύθερης επιφάνειας εξαιτίας της απομάκρυνσης νερού από τα κενά του κορεσμένου εδάφους. Έτσι, για κάθε χρονική στιγμή και για κάθε σημείο του υδροφορέα μετράται η πτώση στάθμης ως μια κατακόρυφη απόσταση της νέας από την αρχική θέση της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα. Για έναν περιορισμένο υδροφορέα, η πτώση στάθμης είναι η κατακόρυφη απόσταση της πιεζομετρικής επιφάνειας, ανάμεσα στην αρχική θέση και τη θέση έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα. Το νερό που αντλείται, απομακρύνεται από τα αποθηκευμένα αποθέματα εξαιτίας της συμπίεστικότητας του νερού καθώς και του στερεού σκελετού του υδροφορέα.

Για να ισχύουν τα παραπάνω, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η οριζόντια ροή. Για έναν περιορισμένο υδροφορέα, οι γραμμές ροής μπορούν πρακτικά να θεωρηθούν οριζόντιες. Σε έναν φρεάτιο υδροφορέα η ροή δεν είναι σχεδόν ποτέ οριζόντια. Ιδιαίτερα όταν η πτώση στάθμης είναι σημαντική ή όταν το φρεάτιο ή περιορισμένο πηγάδι δεν διανοίγεται μέχρι τον αδιαπέρατο πυθμένα, οι γραμμές ροής καμπυλώνονται έντονα στη γειτονιά του

πηγαδιού. Όμως, οι αποκλίσεις αυτές περιορίζονται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από το διπλάσιο του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα. Πέρα από αυτή την απόσταση, η ροή δε διαφέρει από αυτήν που υπολογίζεται με την υπόθεση της οριζόντιας ροής. Για μικρότερες αποστάσεις χρησιμοποιούνται διορθωτικοί τύποι.

Η μελέτη της επίδρασης της παρουσίας των πηγαδιών διαχωρίζεται σε μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες. Μόνιμη ροή γενικά είναι η ροή όταν καμιά μεταβλητή (ταχύτητα, πιεζομετρικό φορτίο, συγκέντρωση κτλ) δε μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χρόνου (Μαντόγλου Α. 2009). Στην περίπτωση του φαινομένου άντλησης από έναν άπειρης έκτασης υδροφορέα, θεωρητικά δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μονιμότητα εφόσον η συνεχής απόληψη νερού από αποθέματα που δεν ανανεώνονται, προκαλεί μία συνεχή επέκταση του λεγόμενου κώνου πτώσης που δημιουργεί μία άντληση από πηγάδι. Πρακτικά όμως, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα άντλησης η ροή γίνεται ψευδο-μόνιμη αφού δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της πτώσης στάθμης με την πάροδο του χρόνου. Μόνιμη ροή μπορεί επίσης να υπάρχει στην περίπτωση ύπαρξης κάποιας πηγής τροφοδοσίας που μπορεί να επαναπληρώσει τις αντλούμενες ποσότητες.

Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις πτώσης της στάθμης εξαιτίας της παρουσίας των πηγαδιών για φρεάτιους υδροφορείς με και χωρίς διαρροή και για μόνιμη και μη μόνιμη ροή.

- Μόνιμη ροή σε πηγάδια
 - Πηγάδι σε φρεάτιο υδροφορέα

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \ln \frac{R}{r} \quad (2.14)$$

όπου:

H : Το αρχικό ύψος της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα [L],

h : Το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας στο υπό μελέτη σημείο [L],

Q_0 : η σταθερή παροχή άντλησης του πηγαδιού [L^3/T],

K : η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα [L/ T],

R : η ακτίνα επιρροής [L],

r : η ακτινική απόσταση του σημείου μελέτης από το σημείο άντλησης - κέντρο της ακτίνας του πηγαδιού, [L].

Εκφράζοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς την ακτίνα του πηγαδιού (r_0) και το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας στη θέση αυτή η σχέση μετατρέπεται στη σχέση Dupuit-Forchheimer:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \ln \frac{R}{r_0} \quad (2.15)$$

Για μικρή πτώση στάθμης σχετικά με το αρχικό ύψος της ελεύθερης επιφάνειας και θεωρώντας ότι το αρχικό ύψος της ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί με ένα μέσο ύψος έτσι ώστε η μεταφορικότητα να είναι $T=K \cdot H$, η σχέση που προκύπτει για φρεάτιο υδροφορέα είναι ίδια με τη σχέση που θα ίσχυε για περιορισμένο:

$$s = \frac{Q_0}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (2.16)$$

- Πηγάδι σε φρεάτιο υδροφορέα με διαρροή

Η βασική σχέση που περιγράφει τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (h) σε έναν τέτοιο υδροφορέα είναι:

$$h = \varphi - \frac{Q_0}{2\pi T_0} K_0\left(\frac{r}{\lambda}\right) \quad (2.17)$$

όπου:

φ το πιεζομετρικό φορτίου του υποκείμενου περιορισμένου υδροφορέα [L],

Q_0 : η σταθερή παροχή άντλησης του πηγαδιού [L^3/T],

T : η μεταφορικότητα του υδροφορέα [L^2/T],

K_0 : η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δεύτερου είδους.

- Μη μόνιμη ροή σε πηγάδια

Όταν η ροή είναι μη μόνιμη σημαίνει ότι μελετάται ένας υδροφορέας στον οποίο υπάρχουν μεταβολές με το χρόνο. Για παράδειγμα, μπορεί να μεταβάλλονται οι αντλήσεις ή η τροφοδοσία του υδροφορέα. Συνεπώς και η πτώση στάθμης εξαρτάται κι αυτή από τη χρονική στιγμή που μελετάται.

- Πηγάδι σε περιορισμένο ή φρεάτιο υδροφορέα

Η λύση για αυτό το πρόβλημα υπόγειων ροών δόθηκε από τον Thiem και είναι η ακόλουθη εξίσωση:

$$s(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u) \quad (2.18)$$

όπου:

$s(r,t)$: η πτώση στάθμης συναρτήσει της θέσης και του χρόνου [L],

$W(u)$: είναι η συνάρτηση πηγαδιού με $u = (Sr^2)/(4Tt)$ όπου S η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και t η χρονική στιγμή μελέτης.

Αποδεικνύεται ότι η ίδια σχέση μπορεί να εφαρμοστεί και σε φρεάτιο

υδροφορέα.

- Πηγάδι σε περιορισμένο ή φρεάτιο υδροφορέα με διαρροή

Οι περιορισμένοι και οι φρεάτιοι υδροφορείς με διαρροή μπορούν προσεγγιστικά να υπολογιστούν από την ίδια σχέση. Υποθέτοντας σταθερή αποθηκευτικότητα, η προσεγγιστική λύση του προβλήματος είναι η ακόλουθη σχέση (Λατινόπουλος Π. Δ., 1986):

$$s(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} W(u, \frac{r}{\lambda}) \quad (2.19)$$

όπου:

$W(u,r/\lambda)$: είναι η συνάρτηση πηγαδιού για υδροφορέα με διαρροή .

2.4 Το πρόβλημα της υφαλμύρισης

2.4.1 Γενικά στοιχεία

Με τον όρο «υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων» εννοείται η ύπαρξη όχι μόνο γλυκού αλλά και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς αυτούς.

Η υφαλμύριση μπορεί να προκληθεί από γεωλογικούς παράγοντες, συνήθως όμως το φαινόμενο παρατηρείται κατά τη διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Η διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς παράγοντες (πχ. ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, ξηρασία), όσο και σε ανθρωπογενείς (υπεραντλήσεις, εγγειοβελτιωτικά έργα) ή πολλές φορές σε συνδυασμό των δύο. Όταν ο ρυθμός άντλησης σε φρέατα κοντά στη θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε θαλάσσιο νερό εισρέει στους υδροφορείς, καταστρέφοντάς τους από πηγή πόσιμου νερού. Προβλήματα υφαλμύρισης παρατηρούνται σε μεγάλη-περιφερειακή ή μικρή-τοπική κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως πχ. από εγγειοβελτιωτικά έργα. Λέγοντας μικρής κλίμακας προβλήματα, εννοείται η επίδραση που παρατηρείται στη διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού στην περιοχή γύρω και κάτω από ένα φρέαρ άντλησης (Νάνου- Γιάνναρου Α., 2001).

Το φαινόμενο παρουσιάζεται σε πολλές περιοχές του κόσμου αλλά και στην Ελλάδα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα νησιά του Αιγαίου, όπου η αυξημένη τουριστική ανάπτυξη και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, σε συνδυασμό με την ανεπάρκεια υδατικών πόρων καθιστούν αναγκαία την αξιοποίηση του υπόγειου δυναμικού (Μαντόγλου Α. και Κουράκος Γ., 2005).

Οι συνέπειες του φαινομένου είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Η υφαλμύριση καθιστά βαθμιαία το υπόγειο νερό κακής ποιότητας έως ακατάλληλο για κάθε χρήση. Έτσι, η πρόσβαση σε πόσιμο νερό στην περιοχή καθίσταται δυσκολότερη, γεγονός που αυξάνει το κόστος ζωής. Συχνά όμως, το υφάλμυρο νερό χρησιμοποιείται για αρδεύσεις και αυτό μπορεί να έχει επίσης ένα σύνολο αρνητικών επιπτώσεων: Συσσώρευση αλάτων στο έδαφος με αποτέλεσμα την καταστροφή θρεπτικών συστατικών και την αυξημένη διάβρωση, μείωση της αγροτικής παραγωγής ανάλογα με την αντοχή της κάθε καλλιέργειας στην αλατότητα του εδάφους, μείωση της ανταγωνιστικότητας, μείωση της αξίας της αγροτικής γης και συρρίκνωση του πρωτογενούς τομέα στην περιοχή, με στροφή της απασχόλησης των κατοίκων προς τους άλλους τομείς όπως για παράδειγμα ο τουρισμός (Γαλαζούλας Ε. Χ. και Πεταλάς Χ. Π., 2014).

Η υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα εξαιτίας των ακόλουθων παραγόντων:

- Ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών καθώς και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης (ζώνη υφαλμύρισης) 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 ανομογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Ιδιαίτερα σε καρστικούς και ρηγματωμένους υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι εντελώς διαφορετικής φύσης από αυτή σε ομογενείς και ισοτροπικούς πορώδεις υδροφορείς (Mantoglou A. & Giannouloropoulos P., 2004).

Λόγω της πολυπλοκότητας αλλά και των σημαντικών επιπτώσεων της υφαλμύρισης η χρήση και αποκατάσταση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού ή της παράκτιας περιοχής. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου συχνά προτείνονται μέτρα τα οποία στοχεύουν συνήθως στην αύξηση του γλυκού νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα και κινείται προς τη θάλασσα. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο τεχνητός εμπλουτισμός με πηγάδι φόρτισης ή δημιουργία επιφανειακών φραγμάτων για την αύξηση της κατείσδυσης.

Είναι ακόμα σημαντικό να αναφερθεί ότι όλα τα υπόγεια νερά περιέχουν διαλυμένα άλατα που η συγκέντρωσή τους κυμαίνεται από 25 mg/l έως και πάνω από 300000 mg/l σε υπεράλμυρα νερά. Ο όρος αλμυρό υπόγειο νερό αναφέρεται σε υπόγειο νερό που περιέχει >1000 mg/l ολικά διαλυμένα στερεά (TDS). Η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών δίνει κατευθυντήριες γραμμές που ρυθμίζουν μολυσματικούς παράγοντες που μπορεί να προκαλέσουν αισθητικές επιδράσεις (όπως στο δέρμα ή αποχρωματισμό των δοντιών) ή αισθητικά αποτελέσματα (όπως η γεύση, η οσμή, ή το

χρώμα) στο πόσιμο νερό. Σύμφωνα με αυτά, το ανώτατο όριο για την περιεκτικότητα TDS είναι 500 mg/l ή 0.5 kg/m³ (Τσακίρης Γ., 1995, U.S. Environmental Protection Agency, 2003).

2.4.2 Μοντέλα υφαλμύρισης υπόγειων παράκτιων υδροφορέων

Στους παράκτιους υδροφορείς, στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη, μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους γνωστή ως διεπιφάνεια. Πάνω από αυτή κινείται το ελαφρύτερο γλυκό νερό (ειδικό βάρος περίπου 1.000 cm³/g) που εξέρχεται προς τη θάλασσα ενώ από κάτω συναντάται το αλμυρό νερό (ειδικό βάρος περίπου 1.025 cm³/g). Η διεπιφάνεια γλυκού - αλμυρού νερού οριοθετεί την αλάτινη σφήνα, δηλαδή το τμήμα του υδροφορέα στο οποίο έχει εισέλθει το θαλασσινό νερό. Οι υδραυλικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής στη μεταβατική ζώνη μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η πυκνότητα εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης άλατος.

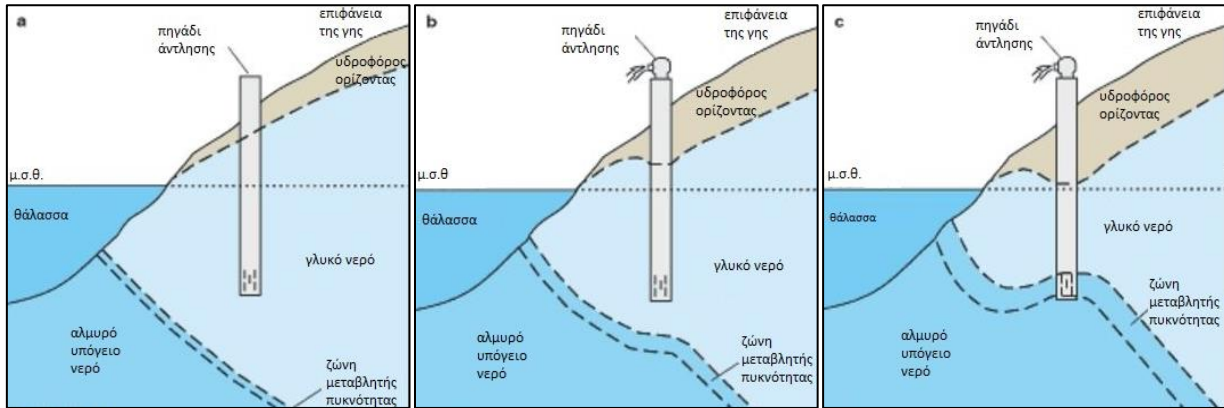
Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας (απουσία άντλησης) η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Η αυξημένη όμως άντληση - σε τέτοιο βαθμό ώστε η φυσική επαναπλήρωση να μην οδηγεί στην αποκατάστασή του υδροφορέα - έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την κίνηση της διεπιφάνειας προς το εσωτερικό μέχρι την επίτευξη νέας κατάστασης ισορροπίας. Η ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα καθορίζεται από τις τιμές του πιεζομετρικού φορτίου, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τις οριακές συνθήκες, την επιφανειακή τροφοδοσία και την άντληση (Μαντόγλου Α. και Κουράκος Γ., 2005).

Το γενικό πρόβλημα της κίνησης υπόγειων υδάτων σε παράκτιους υδροφορείς είναι πολύπλοκο και απαιτεί πάρα πολλές παραμέτρους που δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν λόγω της ανομοιογένειας τους στο χώρο. Έτσι, γίνονται κατάλληλες απλοποιήσεις ώστε να προκύψουν τα ορθά συμπεράσματα με βάση τα υπάρχοντα κάθε φορά δεδομένα.

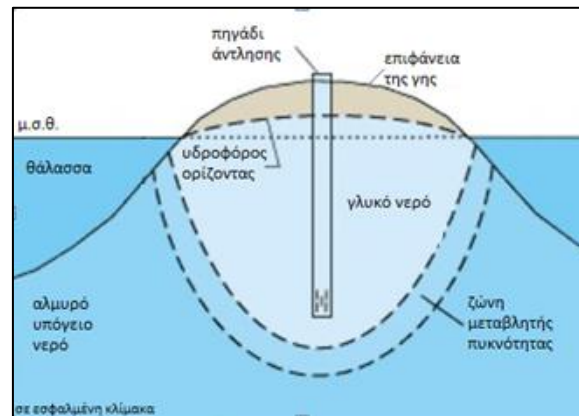
Έχουν προταθεί διαφόρων ειδών προσεγγίσεις στην βιβλιογραφία για την απλοποίηση του προβλήματος. Η συνηθέστερη παραδοχή, είναι η παραδοχή του ευδιάκριτου ορίου (sharp interface) μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, θεωρώντας ότι υπό συγκεκριμένη δυναμική και κατανομή των αντλήσεων το μέτωπο του αλμυρού νερού (διεπιφάνεια) αποκτά τελικά μία σταθερή γεωμετρία και τα δύο υγρά δεν αναμιγνύονται. Η προσέγγιση αυτή ισχύει σε συνθήκες που προσεγγίζουν συνθήκες μόνιμης ή σταθερής ροής (steady state) ή μετά από μεγάλους χρόνους από την έναρξη μίας μεταβολής.

Με βάση το μοντέλο της απότομης διεπιφάνειας, σε έναν φρεάτιο υδροφορέα όπως αυτόν στην εικόνα 2.1 παρατηρούνται ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία. Το τ αντιπροσωπεύει το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον οριζόντιο πυθμένα του υδροφορέα που ονομάζεται πόδι της αλάτινης σφήνας. Επιπλέον, ορίζεται ως S (stagnation point) το σημείο που αντιστοιχεί σε κλίση υδραυλικού φορτίου ίση με μηδέν, και πρακτικά καθορίζει την περιοχή στην οποία το νερό κινείται προς το πηγάδι με παροχή άντλησης Q_w . Το σημείο S, πρακτικά

θάλασσας και το καθαρό νερό του υδροφορέα. Η περίπτωση αυτή είναι πιο σύνθετη ως προς την επίλυση αλλά προσεγγίζει καλύτερα το φυσικό πρόβλημα. Στις εικόνες 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται με βάση τη θεώρηση της διεπιφάνειας μεταβλητής πυκνότητας, η υφαλμύριση παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα και ένας φρεάτιος υδροφορέας με φακό αντίστοιχα.



Εικόνα 2.3: Υφαλμύριση παράκτιου υδροφορέα με βάση τη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, σε εσφαλμένη κλίμακα α) πηγάδι άνευ άντλησης, σε συνθήκες ισορροπίας β) πηγάδι άντλησης με εισχώρηση θαλασσινού νερού στον υδροφορέα χωρίς να επηρεαστεί το πηγάδι γ) πηγάδι άντλησης που αντλεί πλέον υφάλμυρο νερό (Lyles J. R., 2000)



Εικόνα 2.4: Τομή Υδροφορέα με σχηματισμό φακού, με βάση τη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας, σε εσφαλμένη κλίμακα (Lyles J. R., 2000)

2.4.3 Αναλυτικές σχέσεις για τη θέση της διεπιφάνειας

Λόγω των απλοποιημένων φυσικών παραδοχών και της γεωμετρίας, οι αναλυτικές λύσεις δεν μπορούν να επιλύσουν πραγματικά προβλήματα και απαιτούνται κατάλληλες μαθηματικές προσομοιώσεις. Εν τούτοις, είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο και απαραίτητο εργαλείο σε πολλές περιπτώσεις. Παρακάτω θα αναφερθούν ορισμένες αναλυτικές προσεγγίσεις για τη θέση της διεπιφάνειας:

Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Με βάση την παραδοχή της απότομης διεπιφάνειας, η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή ονομάζεται Ghyben - Herzberg όμως αξίζει να αναφερθεί ότι θα πρέπει να αποδίδεται στον DU Commun.

Ορίζοντας h_f το υδραυλικό φορτίο μετρημένο από τον πυθμένα του υδροφορέα, d το πάχος του υδροφορέα, b το συνολικό βάθος του γλυκού νερού στη ζώνη 2 και ξ το βάθος του γλυκού νερού μετρημένο από τη μέση στάθμη θάλασσας (μ.σ.θ.) πάλι στη ζώνη 2, με βάση την εξίσωση Ghyben - Herzberg ισχύει:

$$h_f - d = \delta \xi \quad (2.20)$$

όπου:

$$\delta = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f \text{ [αδιάστατο μέγεθος],}$$

ρ_s είναι η πυκνότητα του θαλασσινού νερού και ρ_f η πυκνότητα του γλυκού νερού [M/L³].

Η παράμετρος δ θεωρείται σταθερή.

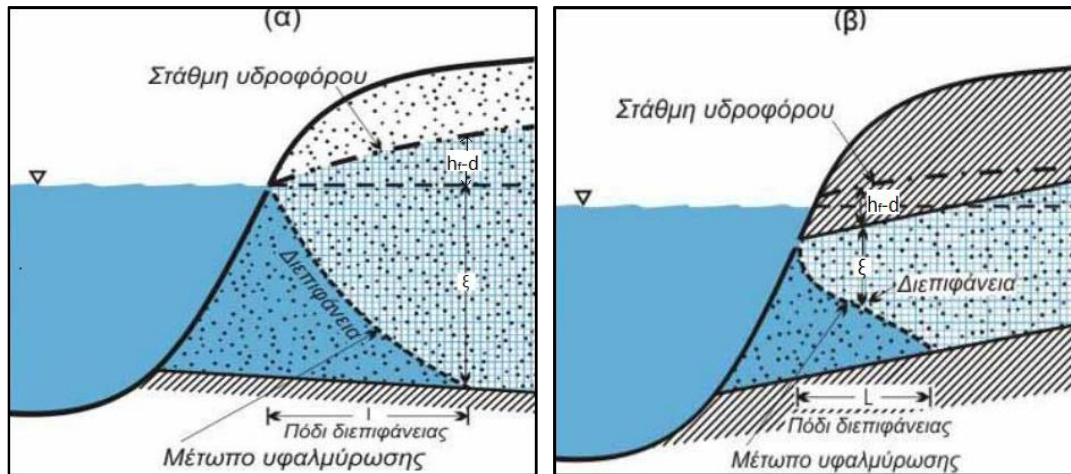
Για $\rho_f=1,000 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_s=1,025 \text{ g/cm}^3$, υπολογίζεται ότι: $h_f - d \approx 0.0025 \xi$

Η εξίσωση Ghyben - Herzberg προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού και επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Βασίζεται στις ακόλουθες απλουστευμένες παραδοχές:

- η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη,
- η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές,
- ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit,
- το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού είναι μηδέν στο σημείο εκροής

Στην πράξη η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Επίσης, υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων. Αξιοσημείωτη είναι και η αδυναμία της προσέγγισης Ghyben - Herzberg να προβλέψει στην περίπτωση φρεατίων υδροφορέων, την επιφάνεια διήθησης. Το πιο σοβαρό σφάλμα όμως, περιγράφεται από την τελευταία παραδοχή (Κουράκος Γ., 2009, Νάνου-Γιάνναρου Α., 2001).

Στην εικόνα 2.5 απεικονίζεται η σχέση Ghyben - Herzberg για φρεάτιο και για περιορισμένο υδροφορέα.



Εικόνα 2.5: Αρχή Ghyben Herzberg (α) Τομή φρεατίου και (β) Τομή περιορισμένου υδροφορέα (Κουράκος Γ., 2009)

Προσέγγιση Muskat και Hubert

Στα τέλη της δεκαετίας του 1930 οι Muskat και Hubert 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. Το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού h_f μπορεί να οριστεί ως:

$$h_f = \frac{P}{(\rho_f g)} + Z \quad (2.21)$$

και το αντίστοιχο του αλμυρού νερού h_s ως:

$$h_s = \frac{P}{(\rho_s g)} + Z \quad (2.22)$$

όπου:

Z : το υψόμετρο του σημείου στο οποίο μετράται η πίεση σε σχέση με ορισμένο επίπεδο αναφοράς [L],

P : η πίεση στο ίδιο σημείο [M / (T² L)] και

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας [L/T²].

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να διατυπωθούν για ένα τυχαίο σημείο της διεπιφάνειας. Με απαλοιφή της πίεσης από τις 2 εξισώσεις προκύπτει:

$$z = \frac{\rho_f}{(\rho_f - \rho_s)} h_f - \frac{\rho_s}{(\rho_f - \rho_s)} h_s \quad (2.23)$$

Η εξίσωση αυτή ορίζει τη θέση της διεπιφάνειας σε συνθήκες ισορροπίας. Αποτελεί σημαντική πρόοδο σε σχέση με την αρχή Ghyben – Herzberg καθώς λαμβάνει υπόψη το υψόμετρο του σημείου και έτσι δεν χρησιμοποιούνται μόνο μετρήσεις του υδραυλικού φορτίου.

Προσέγγιση Glover

Μια άλλη σημαντική πρόοδος έγινε με την εργασία του Glover ο οποίος διατύπωσε μια σχέση που περιγράφει την αλληλεπίδραση γλυκού και αλμυρού νερού, με χρήση της θεωρίας διεπιφάνειας σε παράκτιους υδροφορείς, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση αλλά και την εκροή του γλυκού νερού και ταυτόχρονα διατηρώντας την ισορροπία στο πεδίο πιέσεων:

$$\xi^2 - \frac{2Q}{\delta K} X - \frac{Q^2}{\delta^2 K^2} = 0 \quad (2.24)$$

όπου:

Q : η παροχή του γλυκού νερού ανά μοναδιαίο μήκος ακτής [L^2/T],

K : η υδραυλική αγωγιμότητα του πορώδους μέσου [L/T],

$\delta = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ [αδιάστατο],

ρ_s και ρ_f η πυκνότητα του αλμυρού και του γλυκού νερού αντίστοιχα [M/L^3],

X : η απόσταση από την ακτή [L] και

ξ : το βάθος μετρημένο από τη μ.σ.θ. [L].

Με βάση την εξίσωση αυτή το πάχος του ανοίγματος από όπου εκρέει το γλυκό νερό στην ακτή είναι:

$$x_0 = -\frac{Q}{2\delta K} \quad (2.25)$$

2.4.4 Αναλυτικές σχέσεις για την υφαλμύριση στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας

Με βάση τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.2, έχουν δοθεί ορισμένες αναλυτικές λύσεις για το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Για τις λύσεις αυτές, θεωρήθηκε ότι ο υδροφορέας έχει μια απλή και γνωστή γεωμετρία, οριζόντιο πυθμένα και γνωστές παραμέτρους και ότι η υδραυλική αγωγιμότητα είναι ισοτροπική και ομογενής. Επίσης, η ροή θεωρήθηκε οριζόντια και μόνιμη και χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Ghyben - Herzberg για τον υπολογισμό της μορφής της διεπιφάνειας.

Για μόνιμη, οριζόντια ροή η εξίσωση συνέχειας παίρνει την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q_w \quad (2.26)$$

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

$b = h_f$	φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 1
$h_f - d + \xi$	φρεάτιος υδροφορέας, ζώνη 2 ή φρεάτιος υδροφορέας με φακό
B	περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 1
$\xi - d + B$	περιορισμένος υδροφορέας, ζώνη 2

Ορίζεται δυναμικό ροής για φρεάτιο υδροφορέα και μόνιμη, οριζόντια ροή ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\delta\epsilon\xi} &= \frac{1}{2} [h_f^2 - (1 + \Delta s) d h^2] && \text{ζώνη 1} \\ \varphi_{\alpha\rho} &= \frac{1 + \Delta s}{2 \Delta s} (h_f - d)^2 && \text{ζώνη 2} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

όπου:

$\Delta s = 0.0025$ και αντιστοιχεί στο δ από τη σχέση Ghyben-Herzberg.

Στη θέση του σημείου επαφής τ (πόδι αλάτινης σφήνας), όπου η διαχωριστική επιφάνεια γλυκού - θαλασσινού νερού συναντά το αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφορέα, ισχύει $\xi = d$ οπότε η σχέση Ghyben-Herzberg δίνει $h_f = (1 + \Delta s) \cdot d$ και οι εξισώσεις 2.27 γίνονται:

$$\varphi_{\alpha\rho} = \varphi_{\delta\epsilon\xi} = \varphi_{\tau} = \frac{(1 + \Delta s) \Delta s}{2} d^2 \quad (2.28)$$

Επομένως, στη θέση τ ισχύει $\varphi_{\alpha\rho} = \varphi_{\delta\epsilon\xi} = \varphi_{\tau}$, οπότε η νέα συνάρτηση δυναμικού, είναι συνεχής στο όριο μεταξύ των ζωνών 1 και 2. Στο χείλος της διεπιφάνειας, δηλαδή στο σημείο $x=0$, ισχύει ότι $\xi=0$, άρα $h_f=d$ οπότε με βάση την εξίσωση 2.27 το δυναμικό προκύπτει μηδέν.

Στην περίπτωση που ο υδροφορέας περιορίζεται στη μια πλευρά του από τη θάλασσα, αλλά μπορεί να θεωρηθεί ότι στις άλλες πλευρές είναι απείρων διαστάσεων, και αντλείται από μια μόνο γεώτρηση, με σταθερή παροχή Q_w η οποία βρίσκεται σε απόσταση x_w από την ακτή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των εικόνων, το δυναμικό $\varphi(x,y)$ σε κάθε σημείο του υδροφορέα δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi(x,y) = \frac{q}{K} x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x - x_w)^2 + y^2}{(x + x_w)^2 + y^2} \right] \quad (2.29)$$

Θέτοντας $\varphi(x,y)=\varphi_\tau$ από τη σχέση 2.28 προκύπτει ο γεωμετρικός τόπος των σημείων επαφής από τη σχέση:

$$\frac{q}{K} x_\tau + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x_\tau - x_w)^2 + y^2}{(x_\tau + x_w)^2 + y^2} \right] = \varphi_\tau = \frac{(1+\Delta s)\Delta s}{2} d^2 \quad (2.30)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να επιλυθεί ως προς x_τ συναρτήσει του y_τ με αριθμητικές μεθόδους. Για μηδενική παροχή άντλησης, $Q_w = 0$, η 2.30 δίνει:

$$x_\tau = x_{\min} = \frac{(1+\Delta s)\Delta s d^2 K}{2q} \quad (2.31)$$

Καθώς η παροχή άντλησης αυξάνει, γίνεται μετατόπιση των σημείων επαφής (πόδι αλάτινης σφήνας) προς τη θέση του πηγαδιού, δηλαδή προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Επίσης, με την αύξηση της παροχής, μετατοπίζεται ο υπόγειος υδροκρίτης S (stagnation point) προς την ακτή. Υπάρχει μια κρίσιμη τιμή της παροχής άντλησης $Q_w=Q_c$ για την οποία δημιουργείται μια ασταθής κατάσταση των σημείων επαφής και για μια ελαχίστη αύξηση της παροχής άντλησης Q_w , προκύπτει πολύ γρήγορη μετακίνηση της θέσης του σημείου επαφής, σε σημεία γύρω από το πηγάδι. Δηλαδή, για $Q_w \geq Q_c$ επέρχεται γρήγορη υφαλμύριση του πηγαδιού και καταστροφή του. Αυτό που ουσιαστικά συμβαίνει στην κρίσιμη παροχή είναι ότι ο υπόγειος υδροκρίτης συμπίπτει με το πόδι της αλάτινης σφήνας. Έτσι, για μεγαλύτερη παροχή αντλείται πλέον και αλμυρό νερό. Η κρίσιμη τιμή της παροχής αυτής είναι και η μέγιστη δυνατή χωρίς να υφαλμυριστεί το πηγάδι και δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi_\tau = \frac{q x_w}{K} \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi q x_w}} + \frac{Q_c}{2\pi K} \ln \left[\frac{1 - \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi q x_w}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi q x_w}}} \right] \quad (2.32)$$

Το φ_τ δίνεται από την εξίσωση 2.28. Η εξίσωση 2.32 μπορεί να επιλυθεί ως προς Q_c με αριθμητικές μεθόδους και κατόπιν η κρίσιμη απόσταση $x_{\tau,\max}$ του ποδιού της αλάτινης σφήνας από την ακτή, που αντιστοιχεί στην Q_c δίνεται από την σχέση:

$$x_{\tau,\max} = x_S = x_w \sqrt{1 - \frac{Q_c}{\pi q x_w}} \quad (2.33)$$

Όταν τα πηγάδια άντλησης είναι περισσότερα του ενός και αντλούν ταυτόχρονα η λύση

προκύπτει από την αρχή επαλληλίας:

$$\varphi(x, y) = \frac{q}{K}x + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi K} \ln \left[\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{(x+x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right] \quad (2.34)$$

όπου:

Q_i : η παροχή άντλησης κάθε πηγαδιού [L^3/T],

x_i, y_i : οι συντεταγμένες κάθε πηγαδιού άντλησης.

Αν οι παροχές άντλησης Q είναι γνωστές μπορούμε να υπολογίσουμε με αριθμητικές μεθόδους τον γεωμετρικό τόπο των σημείων επαφής (x συναρτήσει του y), θέτοντας στην εξίσωση 2.34 το $\varphi(x, y)$, με βάση την εξίσωση 2.28.

Οι παραπάνω σχέσεις, έχουν ισχύ όταν ο υδροφορέας είναι ημίπειρων διαστάσεων και το μόνο όριο του υδροφορέα είναι το όριο της θάλασσας. Επειδή στον ελληνικό χώρο και ιδιαίτερα στα νησιά οι διαστάσεις των υδροφορέων είναι περιορισμένες, έγινε επέκταση του παραπάνω μοντέλου (Μαντόγλου Α., 2003). Έτσι, έγινε εκτίμηση με αναλυτικές σχέσεις της συμπεριφοράς ενός παράκτιου υδροφορέα πεπερασμένων διαστάσεων, ορθογωνίου σχήματος όπου το ένα όριο είναι η θάλασσα και τα άλλα τρία είναι αδιαπέρατοι σχηματισμοί. Η επέκταση αυτή βασίζεται στη μέθοδο των εικόνων και την πρόσθεση των επιμέρους πραγματικών και φανταστικών πηγαδιών. Εξαιτίας του παράλληλου σχήματος υπάρχουν άπειρα φανταστικά πηγάδια. Όσο περισσότερα χρησιμοποιηθούν, τόσο περισσότερο πλησιάζει η αναλυτική λύση τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

Στην περίπτωση τυχαίου σχήματος υδροφορέα με μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα ή τροφοδοσία, όπως στην περιοχή μελέτης, η επίλυση με αναλυτικές σχέσεις είναι αδύνατη. Έτσι, εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι μέσω μοντέλων όπως το MODFLOW που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, το SUTRA ή το SHARP (Mantoglou Α., 2003, Παπαντωνίου Μ., 2003).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ

3.1 Μοντέλο απότομης διεπιφάνειας

3.1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να προσομοιωθεί ο υδροφορέας με βάση το μοντέλο του ευδιάκριτου ορίου μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Modflow.

Το Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988) αποτελεί ένα τριδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης και πρόγνωσης της συμπεριφοράς υπόγειων υδροφορέων. Για την επίλυση των διαφόρων προβλημάτων ροής εφαρμόζει την αριθμητική μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Αποτελείται από ένα σύνολο «πακέτων» - μοντέλων καθένα από τα οποία ασχολείται αποκλειστικά με ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του υδρολογικού συστήματος που προσομοιώνεται (π.χ. επιφανειακή τροφοδοσία, αντλήσεις κ.τ.λ.).

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά προ-επεξεργασίας και προετοιμασίας των δεδομένων εισόδου στο Modflow, όπως είναι το Processing Modflow for Windows (PMWIN) το οποίο προσφέρει ένα φιλικό στο χρήστη γραφικό περιβάλλον εργασίας και σε συνδυασμό με το Modflow αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσομοίωσης της ροής υπόγειου νερού. Το PMWIN διευκολύνει την εισαγωγή των δεδομένων όπως τις διαστάσεις και τις διάφορες παραμέτρους του υδροφορέα. Τα δεδομένα αυτά καταχωρούνται στα αντίστοιχα binary αρχεία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από το Modflow.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το Modflow υπολογίζουν το υδραυλικό φορτίο. Αντιθέτως, η θεωρητική ανάλυση του Strack, που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιεί το δυναμικό. Για έναν ισότροπο και ομογενή υδροφορέα οι εξισώσεις 2.28 ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας, η οποία λαμβάνοντας υπόψη και την επιφανειακή τροφοδοσία παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$K\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) + N - Q_w = 0 \quad (3.1)$$

Το φ συμβολίζει το δυναμικό.

Η μορφή της εξίσωσης (3.1) είναι όμοια με αυτή της εξίσωσης οριζόντιας ροής για ομογενή και ισότροπο περιορισμένο υδροφορέα:

$$T\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) + N - Q_w = 0 \quad (3.2)$$

Το φ συμβολίζει το πιεζομετρικό φορτίο.

Οι διαφορές μεταξύ (3.1) και (3.2) είναι ότι η (3.1) αντί του πιεζομετρικού φορτίου χρησιμοποιεί το δυναμικό και αντί της μεταφορικότητας T , την υδραυλική αγωγιμότητα K . Έτσι για την επίλυσή της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα λογισμικό επίλυσης των προβλημάτων ροής όπως είναι το Modflow.

Το Modflow υπολογίζει το υδραυλικό φορτίο σε συγκεκριμένα σημεία του υδροφορέα. Στην παρούσα εργασία όμως, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δυναμικού έπειτα από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης 3.1. Έτσι, το πρόβλημα της υφαλμύρισης όπως έχει αναλυθεί και επιλυθεί από το Strack ανάγεται σε πρόβλημα οριζόντιας ροής ενός περιορισμένου υδροφορέα του οποίου η μεταφορικότητα τίθεται ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα του εξεταζόμενου φρεάτιου υδροφορέα. Η εισαγωγή των παραμέτρων στο Modflow γίνεται σαν ο υδροφορέας να είναι περιορισμένος.

3.2.2 Μαθηματική αναπαράσταση του υπόγειου υδρολογικού συστήματος

Η τρισδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών με σταθερή πυκνότητα, σε πορώδες μέσο περιγράφεται στο Modflow από την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(K_x \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K_y \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K_z \frac{\theta h}{\theta z} \right) - W = S_s \frac{\theta h}{\theta t} \quad (3.3)$$

όπου:

K_x, K_y, K_z : η υδραυλική αγωγιμότητα κατά μήκος των αξόνων ροής x, y, z [$L T^{-1}$]. Θεωρείται ότι ταυτίζονται με τους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας,

h : το πιεζομετρικό φορτίο [L],

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου [L^{-1}],

W : η παροχή άντλησης ή τροφοδοσίας ανά μονάδα όγκου [T^{-1}],

t : ο χρόνος [T].

Σε γενικές γραμμές οι παράμετροι S_s, K_x, K_y, K_z είναι συναρτήσεις του χώρου:

$S_s = S_s(x, y, z), K_x = K_x(x, y, z)$ κ.τ.λ. ενώ η παράμετρος W αποτελεί συνάρτηση χώρου και χρόνου ($W = W(x, y, z, t)$ κ.τ.λ.).

Η εξίσωση 3.3 είναι ουσιαστικά η εξίσωση συνέχειας σε συνδυασμό με τον νόμο του Darcy και μαζί με τις οριακές και αρχικές συνθήκες στην περιοχή προσομοίωσης αποτελούν τη μαθηματική αναπαράσταση ενός συστήματος ροής υπόγειου νερού.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, εκτός από ορισμένες απλές περιπτώσεις η εξίσωση συνέχειας δεν επιλύεται αναλυτικά αλλά αριθμητικά. Από τις διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις που υπάρχουν, το Modflow επιλέγει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Με τη μέθοδο αυτή, το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση 3.3 αντικαθίσταται από ένα σύνολο διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο και οι

3.2.4 Εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Το ανάλογο της εξίσωσης 3.3 σε μορφή πεπερασμένων διαφορών και για όλο τον όγκο του κελιού είναι:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (3.4)$$

όπου:

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

S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα [L^{-1}],

ΔV ο όγκος του κελιού [L^3] και

dh η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου σε χρονικό διάστημα dt [L].

Η εξίσωση αυτή θεωρεί ότι η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή. Επίσης, βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας η οποία ορίζει ότι το άθροισμα όλων των εισροών και εκροών σε ένα κελί (i,j,k) (αριστερό μέρος εξίσωσης) ισούται με τη μεταβολή του αποθηκευμένου όγκου νερού σε αυτό το κελί, σε χρόνο dt (δεξί μέρος εξίσωσης). Συμβατικά, οι ροές που εισέρχονται στο κελί θεωρούνται θετικές ενώ αυτές που εξέρχονται αρνητικές.

Το αριστερό μέρος της 3.4 προκύπτει αθροίζοντας τις εσωτερικές επιμέρους ροές από τα 6 γειτονικά κελιά και τις εξωτερικές ροές από πηγάδια, ποτάμια, επιφανειακή τροφοδοσία κ.τ.λ.

Η εισροή νερού στο κελί (i,j,k) από το κελί $(i,j-1,k)$ κατά τη διεύθυνση της γραμμής i , για μονοδιάστατη ροή, δίνεται από το νόμο του Darcy (εξίσωση 3.5). Το αρνητικό πρόσημο του νόμου Darcy φεύγει εξαιτίας της υπόθεσης για τα πρόσημα των ροών.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta c_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.5)$$

όπου:

$q_{i,j-1/2,k}$: η παροχή νερού που μεταφέρεται από το κελί $i,j-1,k$ στο κελί i,j,k [L^3T^{-1}],

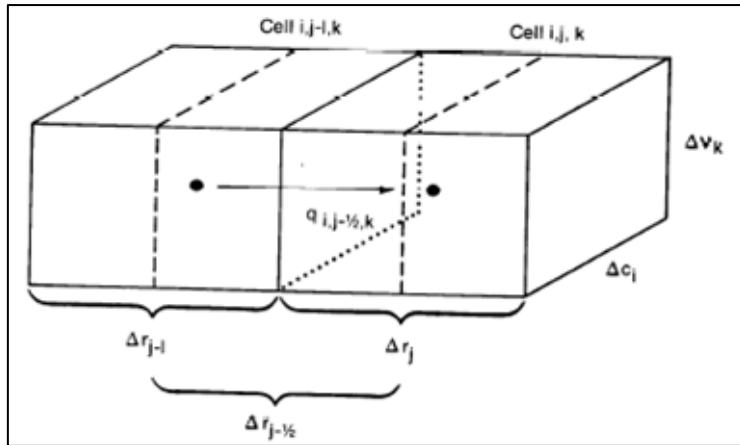
$KR_{i,j-1/2,k}$: η υδραυλική αγωγιμότητα (αρμονικός μέσος) κατά μήκος της γραμμής i μεταξύ των κόμβων i,j,k και $i,j-1,k$ [LT^{-1}],

$\Delta c_i \Delta c_k$: η επιφάνεια της διατομής μεταξύ των κελιών στη διεύθυνση της γραμμής i [L^2],

$(h_{i,j-1,k}, h_{i,j,k})$: το πιεζομετρικό φορτίο στο κελί i,j,k και $i,j-1,k$ αντίστοιχα [L],

$\Delta r_{j-1/2}$: η απόσταση μεταξύ των κέντρων των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$ [L].

Ανάλογες εκφράσεις μπορούν να γραφούν και για την προσέγγιση της ροής μεταξύ των υπολοίπων πέντε πλευρών του κελιού i,j,k .



Εικόνα 3.2 Ροή από το κελί $i,j-1,k$ στο i,j,k (Macdonald M. G. & Harbaugh A. W., 1988)

Η ροή κατά μήκος της ίδιας γραμμής R_i , μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j+1,k$ δίνεται από τη σχέση :

$$q_{i,j+1/2,k} = KR_{i,j+1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j+1/2}} \quad (3.6)$$

Κατά τη διεύθυνση της στήλης C_j , η ροή μεταξύ των κελιών i,j,k και $i-1,j,k$ και i,j,k και $i+1,j,k$ αντίστοιχα είναι:

$$q_{i-1/2,j,k} = KC_{i-1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i-1/2}} \quad (3.7)$$

$$q_{i+1/2,j,k} = K_{i+1/2,j,k} \Delta r_j \Delta v_k \frac{(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k})}{\Delta c_{i+1/2}} \quad (3.8)$$

Κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η ροή μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j,k-1$ και i,j,k και $i,j,k+1$ αντίστοιχα, υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$q_{i,j,k-1/2} = KV_{i,j,k-1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k-1/2}} \quad (3.9)$$

$$q_{i,j,k+1/2} = KV_{i,j,k+1/2} \Delta r_j \Delta c_i \frac{(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k})}{\Delta v_{k+1/2}} \quad (3.10)$$

Οι σχέσεις αυτές απλοποιούνται αν οι διαστάσεις του κελιού και η υδραυλική αγωγιμότητα (hydraulic conductivity) περιγραφούν με μία σταθερά, την «αγωγιμότητα» (conductance).

Κατά τη διεύθυνση της γραμμής R_i , στο επίπεδο k και μεταξύ των κελιών i,j,k και $i,j-1,k$, η αγωγιμότητα $CR_{i,j-1/2,k}$ ορίζεται ως εξής :

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3.11)$$

Κατά τη διεύθυνση της στήλης, η αγωγιμότητα συμβολίζεται με CC ενώ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση με CV και ορίζονται με ανάλογο τρόπο.

Οι εξωτερικές ροές (αποστραγγιστικά δίκτυα, πηγάδια κ.τ.λ.) μπορεί να εξαρτώνται από το πιεζομετρικό φορτίο στο υπό μελέτη κελί και να είναι ανεξάρτητες από όλα τα άλλα πιεζομετρικά φορτία του υδροφορέα (όπως π.χ. για τη διαρροή από την κοίτη ενός ποταμού) ή μπορεί να μην εξαρτώνται από κανένα πιεζομετρικό φορτίο (όπως π.χ. στην περίπτωση ενός πηγαδιού). Η εξωτερική εισροή νερού στο κελί περιγράφεται από την εξίσωση :

$$\alpha_{i,j,k,n} = P_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (3.12)$$

όπου:

$\alpha_{i,j,k,n}$ είναι η ροή από τη n -οστή εξωτερική πηγή στο κελί i,j,k [$L^3 T^{-1}$],

$P_{i,j,k,n}$ και $q_{i,j,k,n}$ είναι σταθερές με μονάδες [$L^2 T^{-1}$] και [$L^3 T^{-1}$] αντίστοιχα.

Αν υπάρχουν N εξωτερικές πηγές ή πηγάδια τότε η συνολική ροή στο κελί i,j,k είναι το άθροισμα των $\alpha_{i,j,k,n}$:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (3.13)$$

$$\text{με } P_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \quad \text{και} \quad Q_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις ροές από τα 6 γειτονικά κελιά καθώς και τις εξωτερικές ροές για ένα κελί i,j,k η εξίσωση συνέχειας 3.4 γίνεται:

$$q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (3.14)$$

όπου:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$: η πεπερασμένη διαφορά που αντικαθιστά την παράγωγο ως προς τον χρόνο [L/T],

$S_{S_{i,j,k}}$: η ειδική αποθηκευτικότητα στο κελί i,j,k [L^{-1}],

$\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$: ο όγκος του κελιού i,j,k [L³].

Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές της παραγώγου του πιεζομετρικού φορτίου με τον χρόνο εκφράζεται μέσω της οπισθοδρομικής διαφοράς:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)_m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (3.15)$$

σύμφωνα με την οποία, η παράγωγος αντικαθίσταται με τη μεταβολή του h στο χρονικό διάστημα που εκτείνεται από την προηγούμενη χρονική στιγμή t_{m-1} έως τη χρονική στιγμή που μας ενδιαφέρει (t_m). Οι εναλλακτικές μέθοδοι έκφρασης μέσω της εμπροσθοδρομικής ή της κεντρικής διαφοράς απορρίπτονται παρότι οδηγούν σε μικρότερα συστήματα εξισώσεων. Οι λύσεις αυτές, ενέχουν τον κίνδυνο πρόκλησης αριθμητικής αστάθειας δηλαδή μετάδοσης ή και αύξησης των σφαλμάτων που εισάγονται στους υπολογισμούς του πιεζομετρικού φορτίου στις διαδοχικές χρονικές στιγμές.

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 3.14 τις σχέσεις 3.5-3.10, τις σχέσεις για την αγωγιμότητα (την 3.11 και τις αντίστοιχές της), τη σχέση 3.13 και χρησιμοποιώντας τις οπισθοδρομικές διαφορές προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} & CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & + CC_{i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & + CV_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = Ss_{i,j,k} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Τα γνωστά μεγέθη στην εξίσωση (3.16) είναι ο όρος $Q_{i,j,k}$, οι συντελεστές των υδραυλικών φορτίων καθώς και το υδραυλικό φορτίο στην αρχή του χρονικού βήματος $h_{i,j,k}^{m-1}$. Τα άγνωστα μεγέθη είναι οι επτά τιμές του υδραυλικού φορτίου στο χρονικό βήμα m . Πρόκειται, λοιπόν, για μία εξίσωση με επτά αγνώστους. Μια τέτοια εξίσωση γράφεται για κάθε κόμβο ενεργού κελιού του δικτύου πεπερασμένων διαφορών οπότε, εφόσον υπάρχει μόνο ένα άγνωστο πιεζομετρικό φορτίο για κάθε κελί, προκύπτει ένα σύστημα n εξισώσεων με n αγνώστους που λύνεται με επαναληπτική διαδικασία.

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής το δεύτερο μέλος της εξίσωσης συνεχείας 3.16 είναι ίσο με 0. Με δεδομένα τις οριακές συνθήκες, τις φορτίσεις (π.χ. άντληση, τροφοδοσία) και τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα υπολογίζονται με επαναληπτική διαδικασία τα υδραυλικά φορτία στους κόμβους του κανάβου, τη δεδομένη χρονική στιγμή. Στην εργασία αυτή η ροή θεωρήθηκε μόνιμη και ο υδροφορέας προσομοιώθηκε με το λογισμικό Modflow.

Στην περίπτωση της μη μόνιμης ροής υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού φορτίου στους κόμβους του κανάβου σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Τα δεδομένα αναφέρονται στις αρχικές και οριακές συνθήκες, στις φορτίσεις, στις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα καθώς και στα διάφορα χρονικά βήματα που επιζητείται ο υπολογισμός του υδραυλικού φορτίου. Οι αρχικές τιμές των υδραυλικών φορτίων που ορίζονται από το μελετητή, είναι οι τιμές του υδραυλικού φορτίου στην αρχή του 1ου χρονικού βήματος και στην εξίσωση συνεχείας 3.16 συμβολίζονται με $h_{i,j,k}^1$ για κάθε κόμβο του κανάβου. Κατά τη διαδικασία επίλυσης, προσδιορίζονται αρχικά οι τιμές των υδραυλικών φορτίων στο τέλος του 1ου χρονικού βήματος $h_{i,j,k}^2$. Ακολουθεί ο υπολογισμός του υδραυλικού φορτίου στο τέλος του δεύτερου χρονικού βήματος $h_{i,j,k}^3$ (με αρχική τιμή $h_{i,j,k}^2$) κ.ο.κ. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το υδραυλικό φορτίο υπολογισθεί για όλα τα χρονικά βήματα που έχουν ορισθεί. Όπως και στην περίπτωση της μόνιμης ροής ο προσδιορισμός των υδραυλικών φορτίων στο τέλος κάθε χρονικού βήματος γίνεται με επαναληπτική διαδικασία. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι σε κάθε χρονικό βήμα, το σύστημα των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών επανακαθορίζεται. Τα υδραυτικά φορτία στο τέλος κάθε χρονικού βήματος αποτελούν τους αγνώστους του συστήματος. Αφού υπολογισθούν χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές στο επόμενο χρονικό βήμα, προκειμένου να υπολογιστούν τα νέα υδραυτικά φορτία. Προκύπτουν τελικά τόσες τιμές υδραυλικών φορτίων στους κόμβους του κανάβου όσα είναι τα χρονικά βήματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μόνιμη ροή χαρακτηρίζεται από ένα χρονικό βήμα.

Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων της μορφής 3.26 για κάθε κόμβο του κανάβου, οι εξισώσεις αναδιατάσσονται έτσι ώστε οι όροι που περιέχουν τα υδραυτικά φορτία στο τέλος του τρέχοντος χρονικού βήματος m (δηλαδή οι μεταβλητές του προβλήματος), να βρίσκονται στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης ενώ οι υπόλοιποι όροι στη δεξιά. Προκύπτει έτσι, ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με μία εξίσωση για κάθε κελί μεταβλητού φορτίου στον κανάβο των πεπερασμένων διαφορών. Σε μορφή πίνακα είναι:

$$[A] \cdot \{h\} = \{q\} \quad (3.17)$$

Όπου: A ο πίνακας των συντελεστών του υδραυλικού φορτίου στο αριστερό μέρος των εξισώσεων, h ένας διανυσματικός πίνακας των τιμών του υδραυλικού φορτίου στο τέλος του χρονικού βήματος m , q ένα διάνυσμα των σταθερών όρων για όλους τους κόμβους του δικτύου.

3.2.5 Επαναληπτική διαδικασία

Η επίλυση των εξισώσεων των πεπερασμένων διαφορών σε κάθε χρονικό βήμα γίνεται με μια επαναληπτική διαδικασία. Αποδίδονται αυθαίρετα αρχικές, προσωρινές τιμές του υδραυλικού φορτίου στα κελιά του κανάβου και ελέγχεται η ικανοποίηση του συστήματος των εξισώσεων. Στη συνέχεια, παράγεται ένα νέο «σετ» προσωρινών τιμών οι οποίες προσεγγίζουν περισσότερο την επίλυση του συστήματος κ.ο.κ. Καθένα από τα παραπάνω

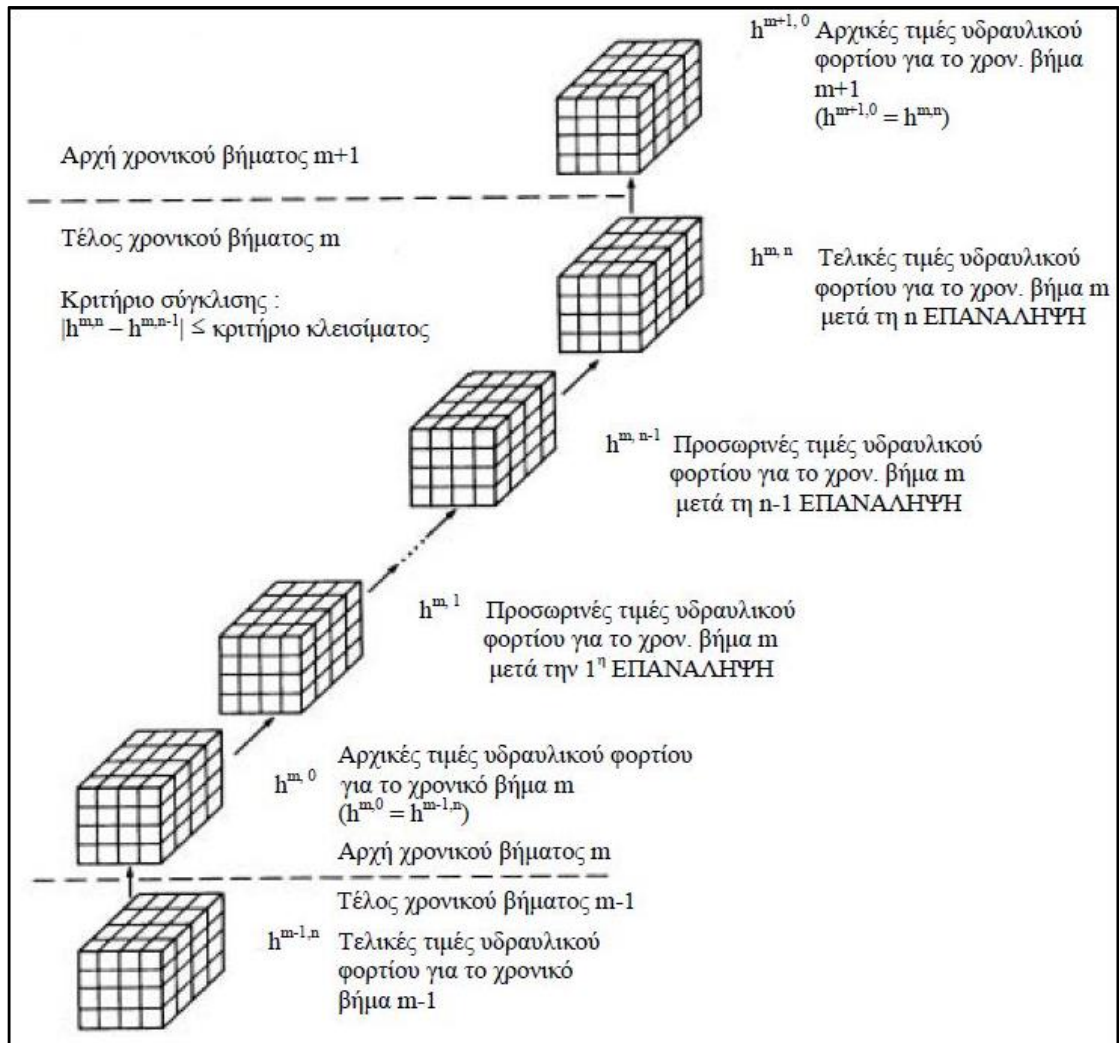
βήματα που οδηγούν στην παραγωγή νέων τελικών τιμών για κάθε χρονικό βήμα ονομάζεται επανάληψη.

Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων η διαφορά των τιμών των υδραυλικών φορτίων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων μειώνεται. Οι υπολογισμοί σταματούν όταν η διαφορά αυτή γίνει μικρότερη από το κριτήριο κλεισίματος που έχει ορισθεί από το χρήστη. Η τιμή του κριτηρίου αυτού είναι καλό να είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την επιθυμητή ακρίβεια στις τελικές τιμές των πιεζομετρικών φορτίων. Υπάρχει επίσης ο περιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου αριθμού επαναλήψεων σε κάθε χρονικό βήμα. Αν δεν επιτευχθεί σύγκλιση μετά την ολοκλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων, το πρόγραμμα σταματάει και ενημερώνει το μελετητή με κατάλληλο μήνυμα.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η περιγραφόμενη διαδικασία. Καθένας από τους τριδιάστατους κανάλους αναπαριστά τα υπολογισμένα σε κάθε επανάληψη υδραυλικά φορτία τα οποία συμβολίζονται με h και δύο εκθέτες. Ο πρώτος εκθέτης υποδηλώνει το χρονικό βήμα για το οποίο υπολογίζονται τα υδραυλικά φορτία και ο δεύτερος, εκφράζει τον αριθμό των επαναλήψεων. Για παράδειγμα, το h^{m-2} είναι το αποτέλεσμα της δεύτερης επανάληψης για τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων στο m χρονικό βήμα.

Θεωρητικά, η επαναληπτική διαδικασία καταλήγει στο ίδιο αποτέλεσμα ανεξάρτητα από τις αρχικές τιμές που αποδίδονται στα υδραυλικά φορτία. Όμως, ο υπολογιστικός φόρτος και ο απαιτούμενος χρόνος σύγκλισης εξαρτάται από την επιλογή αυτή. Για αυτό το Modflow χρησιμοποιεί ως πρώτες δοκιμαστικές τιμές για το m χρονικό βήμα (h^{m-0}) αυτές που έχουν προκύψει έπειτα από την ολοκλήρωση των επαναλήψεων και τον έλεγχο του κριτηρίου κλεισίματος στο χρονικό βήμα $m-1$.

Το αποτέλεσμα της επαναληπτικής διαδικασίας, είναι μια προσέγγιση της λύσης του συστήματος εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Η ακρίβεια της προσέγγισης αυτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (σφάλμα κλεισίματος κ.α.). Ακόμα όμως, κι αν βρίσκονταν οι ακριβείς λύσεις στο σύστημα εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, κι αυτές θα ήταν μια προσέγγιση των τιμών που αποτελούν λύση της διαφορικής εξίσωσης 3.3. Αυτή η ασυμφωνία (truncation error) αυξάνεται όσο η χωρική διακριτοποίηση γίνεται αραιότερη και το μήκος τους χρονικού βήματος αυξάνεται. Τέλος, ακόμα κι αν αυτό το σφάλμα δεν υπήρχε, και πάλι οποιαδήποτε λύση θα ήταν εκτίμηση της πραγματικότητας καθώς παράμετροι όπως η υδραυλική αγωγιμότητα ή η ειδική αποθηκευτικότητα είναι σπάνια γνωστές με ακρίβεια.



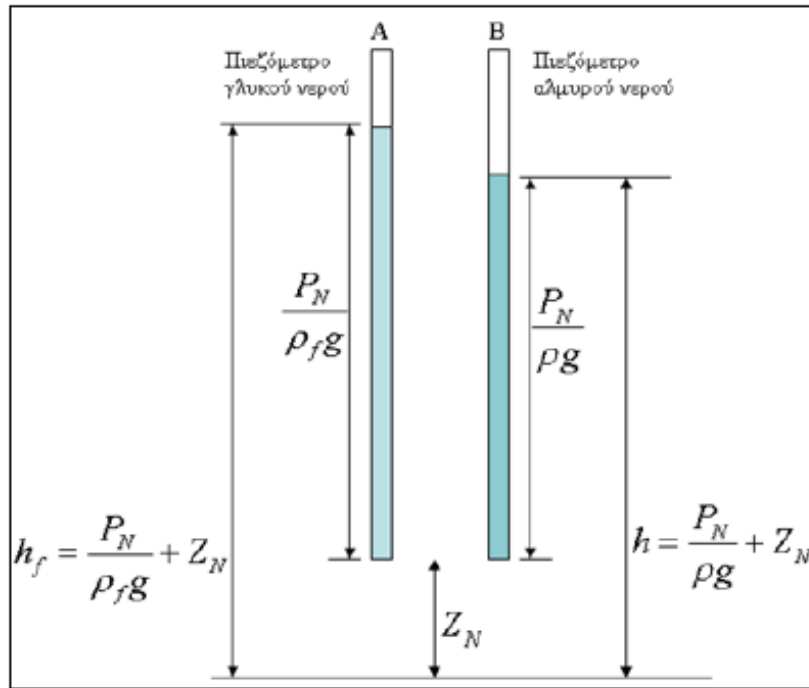
Εικόνα 3.3: Περιγραφή επαναληπτικής διαδικασίας (Παπαντωνίου Μ., 2003)

3.2 Μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας

3.2.1 Η έννοια του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου

Τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας θεωρούν ότι η διεπιφάνεια μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού είναι πεπερασμένου πάχους με μεταβλητή πυκνότητα (transient density). Η θεώρηση αυτή κάνει την επίλυση πιο σύνθετη ως προς την επίλυση και απαιτεί περισσότερο χρόνο αλλά προσεγγίζει καλύτερα το φυσικό πρόβλημα.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και στο πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του υδροφορέα, η κίνηση του νερού μεταβλητής πυκνότητας εξετάζεται χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο και την πυκνότητα του υγρού. Η έννοια ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο μπορεί να εξηγηθεί με βάση την παρακάτω εικόνα .



Εικόνα 3.4: Επεξήγηση ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου (Καρρά Θ., 2011)

Στην εικόνα 3.4. φαίνονται δύο πιεζόμετρα σε κάποιο σημείο N του υπόγειου, υφαλμυρισμένου υδροφορέα. Το πιεζόμετρο A περιέχει γλυκό νερό και είναι εξοπλισμένο με μηχανισμό που δεν επιτρέπει στο αλμυρό νερό του υδροφορέα να αναμειχθεί με το γλυκό νερό του πιεζόμετρου, ενώ επιτρέπει στο πιεζόμετρο να ανταποκρίνεται με ακρίβεια στην πίεση στο σημείο N. Το πιεζόμετρο B περιέχει υφάλμυρο νερό, ίδιο με του υδροφορέα στο σημείο N. Το ύψος της στήλης του νερού στο πιεζόμετρο A, με βάση το νόμο της υδροστατικής πίεσης είναι $\frac{P_N}{\rho_f g}$. Επομένως, το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού στο σημείο N ισούται με το ύψος της στήλης του νερού συν την απόσταση από το επίπεδο αναφοράς:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f g} + z_N \quad (3.18)$$

Το ύψος της στήλης του νερού στο πιεζόμετρο B πάνω από το σημείο N είναι $\frac{P_N}{\rho g}$. Το υδραυλικό φορτίο στο σημείο αυτό δίνεται από τον τύπο:

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + z_N \quad (3.19)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται φανερό ότι σε δύο σημεία με ίδια πίεση και υψόμετρο, αλλά διαφορετική πυκνότητα θα καταγραφεί διαφορετικό υδραυλικό φορτίο. Η εξίσωση κίνησης της υπόγειας ροής μπορεί να σχηματιστεί με βάση το φορτίο του υφάλμυρου

νερού (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.

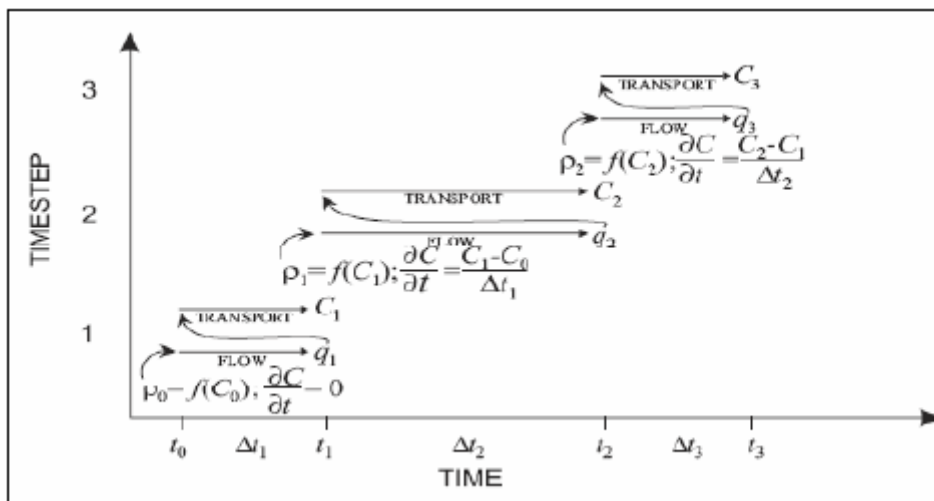
Οι υπολογισμοί που κάνει το χρησιμοποιούμενο πρόγραμμα (SEAWAT) γίνονται με τιμές ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου, όπως αντιστοιχούν στο πιεζόμετρο A . Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την εξίσωση Darcy, τροποποιημένη για προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας, για τον υπολογισμό της ροής σε υπόγειο υδροφόρα. Ωστόσο, οι τιμές των υδραυλικών φορτίων που προκύπτουν από την προσομοίωση δε θα συμπίπτουν με τις 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 αποτελεσμάτων του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου σε υδραυλικό φορτίο υφάλμυρου νερού. Η μετατροπή αυτή γίνεται αυτόματα από το SEAWAT με κατάλληλη εντολή.

3.2.2 Η μεθοδολογία του SEAWAT

Το πρόγραμμα Seawat αναπτύχθηκε από την USGS στα πλαίσια της θεώρησης μεταβλητής πυκνότητας. Βασίζεται στα προγράμματα MODFLOW και MT3DMS και επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης του υπόγειου νερού (με το πρόγραμμα MODFLOW) και της μεταφοράς διαλυμένης μάζας σε πορώδες μέσο (με το πρόγραμμα MT3DMS).

Το SEAWAT περιλαμβάνει δύο μεθοδολογίες επίλυσης (τη ρητή και την πεπλεγμένη) για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με τη ρητή επίλυση, πραγματοποιείται μια επαναληπτική διαδικασία και χρησιμοποιείται μια υστέρηση (lag) στον καθορισμό των πυκνοτήτων στην εξίσωση ροής. Η μέθοδος περιγράφεται στην εικόνα 3.5. Αρχικά, επιλύεται η εξίσωση ροής με το διαμορφωμένο σε προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας πρόγραμμα MODFLOW, για να υπολογιστούν τα ισοδύναμα υδραυλικά φορτία και η ειδική απορροή τη χρονική στιγμή μελέτης. Στη φάση αυτή, χρησιμοποιούνται οι τιμές των πυκνοτήτων της προηγούμενης χρονικής στιγμής ή τιμές που υπολογίζονται με βάση την αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας, εάν η περίοδος είναι η πρώτη. Στη συνέχεια, με βάση την εξίσωση μεταφοράς, υπολογίζεται η συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας και κατόπιν το πεδίο πυκνοτήτων της χρονικής στιγμής μελέτης, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πεδίου ροής στο επόμενο χρονικό βήμα. Το μέγεθος των χρονικών βημάτων υπολογίζεται με βάση τις ταχύτητες που προκύπτουν από το αμέσως προηγούμενο χρονικό βήμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια εξαιτίας του ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από τις συγκεντρώσεις του προηγούμενου χρονικού βήματος.

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 ωστόσο η μέγιστη διαφορά πυκνότητας στα κελιά, για διαδοχικές επαναλήψεις, γίνει μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή που δίνεται από τον χρήστη.



Εικόνα 3.5: Η ρητή μέθοδος επίλυσης (Guo W. & Langevin C. D., 2002).

Στα περισσότερα προβλήματα είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να επιτευχθούν αναλυτικές λύσεις και για αυτό εφαρμόζονται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι. Έτσι, το πρόγραμμα SEAWAT ακολουθεί και αυτό αριθμητικές μεθόδους. Είναι απαραίτητο οι διαφορικές εξισώσεις να διακριτοποιηθούν στον χώρο και στο χρόνο.

Ο τρόπος χωρικής διακριτοποίησης είναι αντίστοιχος με την εικόνα 3.1. Για τον υπολογισμό οποιασδήποτε παραμέτρου σε ένα κελί i, j, k χρησιμοποιούνται τα έξι γειτονικά κελιά $i-1, j, k, i+1, j, k, i, j-1, k, i, j+1, k, i, j, k-1, i, j, k+1$. Επίσης, χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και το κέντρο των κελιών για τη θέση των κόμβων.

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 πιο ακριβή και 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} . 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.

3.2.3 Το μαθηματικό μοντέλο του προγράμματος SEAWAT

Η εξίσωση 3.20 βασίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας και περιγράφει τη ροή

μεταβλητής πυκνότητας σε υπόγειο υδροφορέα με βάση το πρόγραμμα SEAWAT.

$$-\nabla(\rho \bar{q}) + \bar{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial P}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3.20)$$

όπου:

ρ : η πυκνότητα του υφάλμυρου υπόγειου νερού [ML⁻³],

\bar{q} : το διάνυσμα της ειδικής παροχής (specific discharge vector) [LT⁻¹],

$\bar{\rho}$: η πυκνότητα του νερού που εισρέει στο σύστημα ή εκρέει από αυτό [ML⁻³],

q_s : η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας που αφορά τις πηγές / καταβόθρες [T⁻¹],

n : το ενεργό πορώδες [αδιάστατο μέγεθος],

P : η πίεση στους πόρους εξαιτίας του ρευστού [ML⁻¹T⁻²],

c : συγκέντρωση διαλυμένης μάζας [ML⁻³] και

t : ο χρόνος [T]

Η ειδική παροχή στην εξίσωση 3.20 υπολογίζεται από τον νόμο του Darcy. Ως εκ τούτου, η γενικευμένη εξίσωση που περιγράφει την κίνηση υγρού, μεταβλητής πυκνότητας σε έναν υδροφορέα είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{f\beta} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{f\gamma} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (3.21)$$

όπου:

α, β : οι κύριες κατευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας

γ : η κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο των α και β ,

ρ και ρ_f : οι πυκνότητες του υφάλμυρου και του γλυκού νερού αντίστοιχα [ML⁻³],

Z : το υψόμετρο του κελιού [L],

h και h_f : το υδραυλικό φορτίο και το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο αντίστοιχα [L],

K_f : η υδραυλική αγωγιμότητα για το γλυκό νερό [L/T],

S_f : η ειδική αποθηκευτικότητα για το γλυκό νερό [L⁻¹].

Σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας η πυκνότητα ενός υγρού επηρεάζεται κυρίως από τη 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:

$$\rho = \rho_f + Ec \quad (3.22)$$

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial c} = E \quad (3.23)$$

Αντικαθιστώντας την 3.23 στην 3.21 προκύπτει η τροποποιημένη εξίσωση μεταφοράς – διασποράς του λογισμικού MT3DMS που επιλύεται από το SEAWAT.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\rho K_{fa} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial \beta} \left(\rho K_{fb} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right] \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(\rho K_{fy} \left[\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right] \right) = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial c}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (3.24)$$

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (3.21) υπολογίζουν την διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής της μάζας, ανά μονάδα όγκου, διαμέσου των πλευρών του στοιχείου διακριτοποίησης του υδροφορέα (π.χ. κελί). Ο πρώτος όρος, στο δεξί 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 δεξί 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 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.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις εφαρμόζονται μόνο σε ενδεικτικές περιπτώσεις θαλασσινού νερού, όπου η σχέση μεταξύ της πυκνότητας του νερού και της συγκέντρωσης είναι γραμμική συνάρτηση. Για τις διαφορετικές περιπτώσεις θα πρέπει να αναπτυχθούν διαφορετικές εμπειρικές εξισώσεις μεταξύ συγκέντρωσης και πυκνότητας.

Χρησιμοποιώντας το σχήμα των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών στο χώρο και των οπισθοδρομικών πεπερασμένων διαφορών στον χρόνο, η προσέγγιση της εξίσωσης της κίνησης των υπόγειων νερών έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} \frac{K_{a,i+1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i+1/2,j,k}} A_{j,k} \left[h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} \frac{K_{a,i-1/2,j,k}}{\Delta\alpha_{i-1/2,j,k}} A_{j,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i-1,j,k} + \frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} \frac{K_{\beta,i,j+1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j+1/2,k}} A_{i,k} \left[h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} \frac{K_{\beta,i,j-1/2,k}}{\Delta\beta_{i,j-1/2,k}} A_{i,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j-1,k} + \frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} \frac{K_{\gamma,i,j,k+1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k+1/2}} A_{i,j} \left[h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} \frac{K_{\gamma,i,j,k-1/2}}{\Delta\gamma_{i,j,k-1/2}} A_{i,j} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j,k-1} + \frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\theta C}{\theta t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k} \tag{3.25}
\end{aligned}$$

όπου:

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

$A_{i,k}$: το εμβαδόν της κάθετης στον άξονα πλευράς του κελιού των πεπερασμένων διαφορών [L²]

$A_{j,k}$ έτσι ώστε $A_{j,k} = \Delta\beta_j \Delta\gamma_k$ και παρόμοια για τις άλλες διευθύνσεις [L²]

$Z_{i,j,k}$: 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 έτσι ώστε $V_{i,j,k} = \Delta\alpha_i \Delta\beta_j \Delta\gamma_k$ [L³]

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 3.25 αναφέρονται στη χρονική στιγμή $n+1$. Επίσης, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί συμβολισμοί της πυκνότητας. Η διαφορετικότητα έχει να κάνει με τον τρόπο υπολογισμού της πυκνότητας στο μεσοδιάστημα δύο κελιών και η τιμή της εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής. Έτσι, αν υποθεθεί ότι η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί i,j,k στο $i,j,k+1$, τότε ισχύει $\rho_{i,j,k+1/2} = \rho_{i,j,k}$ ενώ αν η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί $i,j,k+1$ στο κελί i,j,k τότε $\rho_{i,j,k+1/2} = \rho_{i,j,k+1}$. Αντίθετα, η πυκνότητα, που συμβολίζεται με ρ , υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμητικό μέσο όρο των γειτονικών κελιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

4.1 Γεωγραφική θέση και μορφολογία

Η Σαντορίνη είναι ένα νησιωτικό σύμπλεγμα που αποτελείται από τα νησιά Θήρα, Θηρασιά και Ασπρονήσι καθώς και από τα ηφαιστεια Παλαιά Καμένη και Νέα Καμένη (εικόνα 4.1). Τα τρία νησιά είναι υπολείμματα του προϊστορικού στρογγυλού νησιού. Περιβάλλουν μια βαθιά λεκάνη, στο κέντρο της οποίας αναδύθηκαν η Παλαιά και η Νέα Καμένη. Η λεκάνη αυτή ονομάζεται Καλδέρα ή Καλντέρα και έχει διαστάσεις 8 επί 5 km και το βάθος της φτάνει τα 730 m.

Η Σαντορίνη είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων και βρίσκεται πάνω στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου πελάγους, το οποίο εκτείνεται από τις ανατολικές ακτές της ηπειρωτικής Ελλάδας, ως τις δυτικές ακτές της Τουρκίας. Είναι μεταξύ της Ίου και της Ανάφης. Απέχει 128 ναυτικά μίλια από το λιμάνι του Πειραιά και 63 ναυτικά μίλια από την Κρήτη. Η έκτασή της είναι 73 km² και το μήκος των ακτών της 69 km. Η περίμετρός της είναι περίπου 36 ν. μίλια. Η Σαντορίνη έχει Γεωγραφικό Πλάτος από 36° 19' 56" έως 36° 28' 40" Βόρειο και Γεωγραφικό Μήκος από 25° 19' 22" έως 25° 29' 13" Ανατολικό.

Το κυρίως νησί, η Θήρα, έχει σχήμα ημισελήνου και βρίσκεται στην ανατολικότερη θέση του συμπλέγματος. Η δυτική πλευρά της αποτελείται από τα τοιχώματα της Καλντέρας, όπου έχουν κτιστεί οι οικισμοί της, και αποτυπώνεται η γεωλογική ιστορία του νησιού. Διατηρείται επίσης, ένα σύνολο υπόσκαφων σπιτιών, δηλαδή σπιτιών που είναι σκαμμένα μέσα στο βράχο. Το ανάγλυφο του νησιού γίνεται πιο ήπιο στα Ανατολικά, όπου βρίσκονται οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις, που καταλήγουν στις παραλίες του νησιού. Στην ανατολική πλευρά βρίσκονται και οι γεωτρήσεις.

Πρωτεύουσα του νησιού είναι τα Φηρά, όνομα που προήλθε από παραφορά της λέξης Θήρα. Νοτιοδυτικά των Φηρών βρίσκεται ο Αθηνιός, το μεγαλύτερο λιμάνι της Σαντορίνης. Στο ΝΑ τμήμα του νησιού βρίσκεται το βουνό του Προφήτη Ηλία, με το ομώνυμο μοναστήρι, το οποίο έχει υψόμετρο 567 μέτρα. Η συνέχειά του είναι το Μέσα Βουνό ή βουνό του Αγίου Στεφάνου, λόγω του Παλαιοχριστιανικού ναού που υπάρχει εκεί, στο οποίο είναι κτισμένη η αρχαία Θήρα και έχει υψόμετρο 366 μέτρα.

Η Θηρασιά είναι ένα εξ ολοκλήρου ηφαιστειογενές νησί, χωρίς κανένα στερεό υπόβαθρο να φτάνει μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. Το Ασπρονήσι, δυτικά της Θήρας και νότια της Θηρασιάς, είναι ένα μικρό ερημονήσι, με απότομες πλαγιές. Πήρε το όνομά του από το παχύ στρώμα λευκής ελαφρόπετρας που το καλύπτει. Οι πλευρές και των τριών νησιών από τη μεριά του κόλπου είναι γκρεμνώδεις. Όσο απότομα και ψηλά είναι τα γκρεμνά πάνω από τη θάλασσα, άλλο τόσο είναι και κάτω από την επιφάνειά της. Το μέγιστο ύψος των γκρεμών που αντικρίζει κάποιος μπαίνοντας στον κόλπο της Σαντορίνης είναι στο Ημεροβίγλι και είναι 330 m περίπου (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Θήρας, 2013-2014, Τουριστική Πύλη Δήμου Θήρας, Doumas C., 1980).



Εικόνα 4.1: Χάρτης της Σαντορίνης (Doumas C., 1980)

4.2 Κλίμα

Το κλίμα της Σαντορίνης παρουσιάζει ιδιομορφίες (μολονότι είναι το νοτιότερο νησί των Κυκλάδων είναι και το ψυχρότερο), γεγονός που οφείλεται στους ακόλουθους παράγοντες: υπάρχει πολλή δροσιά την άνοιξη και το καλοκαίρι κατά τις πρωινές κυρίως ώρες και ομίχλη το βράδυ, το έδαφος είναι λευκού χρώματος και ως εκ τούτου έχει αφενός αυξημένη ακτινοβολία και αφετέρου περιορισμένη απορρόφηση ηλιακής θερμότητας, υπάρχει υψηλή μέση σχετική υγρασία, η ένταση των ανέμων – σε σύγκριση με τα άλλα Κυκλαδονήσια – είναι μεγαλύτερη ενώ η μέση ετήσια θερμοκρασία του νησιού είναι μικρότερη και 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. Επίσης, εφαρμόζοντας την μέθοδο Emberger, Gaussen, Kassas, de Philippris και Bagnoulis βρέθηκε πως ο χαρακτήρας του μεσογειακού κλίματος της Θήρας είναι ο Ξηρο-θερμομεσογειακός (Γιούργα Χ., 1991, Δρόσου Κ., 2005).

4.3 Ηφαιστειο

Η Θήρα είναι ένα ηφαιστειακό νησί, το οποίο δεν είχε πάντα το σημερινό μέγεθος και σχήμα. Προτού αρχίσει η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην περιοχή, η Σαντορίνη αποτελούνταν από δύο βραχώδεις άξονες από ημικρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα που είναι ορατοί έως σήμερα. Ο ένας άξονας ξεκινάει ΝΑ από το Μέσα Βουνό και καταλήγει ΒΔ στον Αθηνιό, μέσω των σχηματισμών του Προφήτη Ηλία και του Πύργου. Ο άλλος άξονας είναι παρακλάδι του πρώτου προς τα ΝΔ και καταλήγει στον Γαβρήλο, στο Ακρωτήριο, που έχει 160 m ύψος, φτάνει ως τη θάλασσα και καταλήγει στη Βλυχάδα.

Η αρχική Σαντορίνη μεγάλωσε σταδιακά και επεκτάθηκε κυρίως προς τα βόρεια, τα βορειοδυτικά και τα δυτικά με την εναπόθεση λάβας από διάφορους κρατήρες, όταν πριν από πολλές εκατοντάδες χιλιετίες ξεκίνησε η ηφαιστειακή δράση. Στην πορεία του χρόνου, η Σαντορίνη πήρε ένα περίπου στρογγυλό σχήμα το οποίο αντιστοιχεί κάπως με τη σημερινή εξωτερική γραμμή της Θήρας, της Θηρασίας και του Ασπρονησιού. Εξαιτίας αυτού του σχήματος πήρε το όνομα Στρογγυλή. Η Στρογγυλή ήταν ένας ηφαιστειακός κώνος. Το κεντρικό τμήμα της ανατινάχθηκε μαζί με τον κρατήρα του ηφαιστείου από τη Μινωική έκρηξη που έγινε το 1613 π.Χ. και είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αυτού που σήμερα ονομάζουμε καλδέρα της Σαντορίνης και την καταστροφή του προϊστορικού πολιτισμού του νησιού. Στο θαλάσσιο χάσμα που σχηματίστηκε μεταξύ Θήρας και Θηρασίας, που έχει βάθος 1.500 μέτρων, κατά καιρούς βγήκαν στην επιφάνεια ηφαιστειακοί κώνοι που σχημάτισαν τα εξής νησιά: την Παλαιά, τη Μικρή και τη Νέα Καμένη, την Καμένη Γεωργίου του Α΄, την Καμένη του Φουκέ, την Αφρόσσα και τη Δάφνη. Όλα αυτά τα νησιά μεγάλωναν σιγά-σιγά και ενώθηκαν, εκτός από την Παλαιά Καμένη. Η δημιουργία τους παρουσιάζεται στην εικόνα 1 του παραρτήματος.

Τμήματα του ηφαιστείου της Σαντορίνης είναι επίσης το υποθαλάσσιο ηφαίστειο Κολούμπο που είναι ενεργό (1650 μ.Χ.) και τα Χριστιανά νησιά. Η Σαντορίνη ανήκει στο ηφαιστειακό

τόξο του Αιγαίου και χαρακτηρίζεται ενεργό ηφαίστειο. Η τελευταία ηφαιστειακή δραστηριότητα ήταν το έτος 1950 (Santorini Guide to the Volcano).

4.4 Ανθρωπογενή στοιχεία

4.4.1 Πολεοδομική και χωροταξική θεώρηση

Σήμερα, με βάση το Πρόγραμμα Καλλικράτης, ολόκληρη η Σαντορίνη καθώς και τα νησιά Θηρασία, Ασπρονήσι και Άνυδρος (ακατοίκητο νησί Βορειοανατολικά της Σαντορίνης), το σύμπλεγμα νησιών Χριστιανά (ακατοίκητο νησί Νοτιοδυτικά της Σαντορίνης), και τα ηφαίστεια Παλαιά και Νέα Καμένη ανήκουν διοικητικά στον Δήμο Θήρας, ο οποίος έχει πρωτεύουσα τη Θήρα. Αποτελείται από τις δημοτικές ενότητες Θήρας και Οίας. Στους πίνακες 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται τα δημοτικά και τα κοινοτικά διαμερίσματα καθώς και οι οικισμοί που υπάγονται στον πρώην δήμο Θήρας και την πρώην κοινότητα Οίας-Θηρασιάς –προ Καλλικράτη- και νυν δημοτικών ενοτήτων Θήρας και Οίας Θηρασιάς.

Η αρχιτεκτονική και η χωροταξική οργάνωση της Σαντορίνης έχουν ένα σύνολο Κυκλαδίτικων στοιχείων αλλά και ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά εξαιτίας του ιδιαίτερου τοπίου του νησιού. Από τον Μεσαίωνα ως το τέλος του 18^{ου} αιώνα οι οικισμοί ήταν κτισμένοι έτσι ώστε να προστατεύονται από τους πειρατές. Από τα τέλη του 18^{ου} αιώνα η ανάγκη αυτή ξεπεράστηκε και η αρχιτεκτονική άρχισε να εξυπηρετεί άλλους σκοπούς. Οι οικονομικά εύποροι μπορούσαν να κατασκευάσουν μεγάλα και περίτεχνα σπίτια ή ακόμα και να αντιγράψουν ξένα πρότυπα.

Οι Βασικοί τύποι οικισμών στο νησί είναι:

- Γραμμικοί: Αναπτύσσονται στο χείλος της Καλντέρας όπως τα Φηρά, η Οία και η Θηρασία,
- Οχυροί: Αναπτύσσονται γύρω από τα τείχη ενός οχυρού πυρήνα όπως ο Πύργος, το Εμπορείον και το Ακρωτήριο,
- Υπόσκαφοι: Τα σπίτια είναι σκαμμένα μέσα στο βράχο όπως ο Βόθωνας, ο Καρτεράδος και η Φοινικιά.

Στη σύγχρονη Σαντορίνη υπάρχει οικιστική πίεση, στην οποία συντελεί και η έντονη τουριστική ανάπτυξη του νησιού. Παλαιότερα τα όρια των οικισμών ήταν ευκρινή, τώρα οι οικιστικές επεκτάσεις έχουν δημιουργήσει μία συνεχόμενη λευκή γραμμή κατά μήκος της καλντέρας. Μετά τον μερικό κορεσμό της καλντέρας, οι επεκτάσεις άρχισαν και στην ενδοχώρα, όπου γεωργικές εκτάσεις γης δίνουν τη θέση τους σε κατοικίες, ενοικιαζόμενα δωμάτια και ξενοδοχεία. Το αρνητικό στοιχείο είναι ότι η αυθαίρετη δόμηση έχει αρχίσει να επεκτείνεται και στις πλαγιές της καλντέρας. Πέρα από την αισθητική υποβίβαση του τοπίου, λόγω της γεωλογίας των πλαγιών παραμένουν άγνωστες οι γεωτεχνικές και γεωλογικές συνέπειες. Πιθανές κατολισθήσεις ή χαλάρωση των εδαφών μπορεί να

προκαλέσουν επικίνδυνα ατυχήματα και ανεπανόρθωτες καταστροφές άγνωστου μήκους (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Θήρας, 2013-2014, Στράτζαλης Κ., 2008).

Πίνακας 4.1: Διοικητική διαίρεση Σαντορίνης-Δήμος Θήρας (Ελληνική Στατιστική Αρχή).

ΔΗΜΟΣ ΘΗΡΑΣ	
Δ. Δ. Θήρας	Δ. Δ. Έξω Γωνιάς
Θήρα,η	Έξω Γωνιά, η
Άνυδρος, ο (νησίς)	Περιβόλια, τα
Ασκανιά, τα (νησίς)	Δ. Δ. Επισκοπής Γωνιάς
Ασπρονήσι,το (νησίς)	Επισκοπή Γωνιάς, η
Έξω Γιαλός, ο (Δ. Δ. Θήρας)	Καμάριον, το
Έξω Κατοικίες, οι	Δ. Δ. Ημεροβιγίου
Εσχάτη, η (νησίς)	Ημεροβίγλιον, το
Μέσα Κατοικίες, οι	Παναγία Καλού, η
Νέα Καμένη, η	Δ. Δ. Καρτεράδου
Όρμος Φηρών, ο	Καρτεράδος, ο
Παλαιά Καμένη, η	Έξω Γιαλός, ο
Χριστιανά, τα	Δ. Δ. Μεγαλοχωρίου
Χριστιανή, η (νησίς)	Μεγαλοχώριον, το
Δ. Δ. Ακρωτηρίου	Δ. Δ. Μεσαριάς
Ακρωτήριο, το	Μεσαριά, η
Δ. Δ. Βόθωνος	Μονόλιθος, ο
Βόθων, ο	Δ. Δ. Πύργου Καλλίστης
Αγία Παρασκευή, η	Πύργος Καλλίστης, ο
Δ. Δ. Βουρβούλου	Μονή Προφήτου Ηλιού, η
Βουρβούλος, ο	Όρμος Αθηνιός, ο
Δ. Δ. Εμπορείου	
Εμπορείον, το	
Άγιος Γεώργιος, ο	
Εξωμύτης, ο	
Πέρισσα, η	

Πίνακας 4.2: Διοικητική διαίρεση Σαντορίνης-Δήμος Οίας (Ελληνική Στατιστική Αρχή).

ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΙΑΣ
Κ. Δ. Οίας
Οία, η
Θόλος, ο
Κολούμπος, ο
Όρμος Αμμουδιού, ο
Όρμος Αρμένης, ο
Παράδεισος, ο
Φοινικιά, η
Κ. Δ. Θηρασίας
Θηρασία, η
Αγία Ειρήνη, η
Αγριλιά, η
Όρμος Κόρφου, ο
Ποταμός, ο

4.4.2 Πληθυσμιακά Στοιχεία

Με βάση τα στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, τα άτομα που δήλωναν μόνιμη κατοικία τον Δήμο Θήρας, το έτος 2001, ήταν 12453 και τον Δήμο Οίας 1272. Αναλυτικά ο πληθυσμός σε κάθε δήμο, δημοτικό ή κοινοτικό διαμέρισμα και κάθε οικισμό παρουσιάζεται στους πίνακες 1 και 2 του παραρτήματος. Τα στοιχεία αυτά για τους οικισμούς και τα δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα είναι τα πιο πρόσφατα που είναι διαθέσιμα από την Ελληνική Στατιστική Αρχή.

Με βάση την ίδια αρχή το 2001 ο πραγματικός πληθυσμός του Δήμου Θήρας ήταν 12440 και ο αντίστοιχος της κοινότητας Οίας 1230 ενώ το 1991 οι πληθυσμοί αυτοί ήταν 8771 και 822. Συνεπώς, στη δεκαετία αυτή σημειώθηκε μια αύξηση του πραγματικού πληθυσμού της τάξης του 41.8% στο Δήμο Θήρας, 49.6% στην κοινότητα Οίας και 42.5% για ολόκληρη τη Σαντορίνη. Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα μπορεί να γίνει και μια σύγκριση μεταξύ των κατοίκων που δήλωναν μόνιμη κατοικία το Δήμο Θήρας τα έτη 2011 και 2001. Το 2001 ήταν 12453 ενώ το 2011 ήταν 15550. Άρα υπήρξε μια αύξηση της τάξης του 24.9%.

Η Σαντορίνη, κατά τους θερινούς κυρίως μήνες, συγκεντρώνει ένα μεγάλο αριθμό τουριστών. Ο πληθυσμός αυτός πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της συνολικής ποσότητας ύδατος που χρειάζεται προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες. Επίσης, εξαιτίας του τουρισμού, οι ανάγκες μεταβάλλονται εποχιακά.

Με βάση στοιχεία του ξενοδοχειακού επιμελητηρίου της Ελλάδος διαπιστώνεται μείωση των αφίξεων αλλοδαπών τουριστών στη Σαντορίνη τα έτη 2008 και 2009 ως προς το αντίστοιχο προηγούμενο έτος. Το έτος 2012 παρατηρείται μία πολύ μικρή μείωση και όλα τα υπόλοιπα έτη χαρακτηρίζονται από αυξήσεις των αφίξεων. Ιδιαίτερα σημαντική – της τάξης του 20% - είναι η αύξηση το έτος 2013 ως προς το 2012. Οι αεροπορικές αφίξεις

αλλοδαπών τουριστών τους μήνες Ιανουάριο έως Οκτώβριο για τα έτη 2006-2013 παρουσιάζονται στον πίνακα 3 του παραρτήματος.

Πέρα από τους αλλοδαπούς τουρίστες η Σαντορίνη υποδέχεται κι ένα σύνολο ημεδαπών επισκεπτών. Με βάση στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής για τα έτη 2005 έως 2009, για τέσσερα μόνο από τα δημοτικά διαμερίσματα του νησιού, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για όλα τα έτη, το ποσοστό των αλλοδαπών επισκεπτών ήταν κατά μέσο όρο 78%. Κάνοντας την υπόθεση ότι το ίδιο ποσοστό περίπου διατηρήθηκε ως το 2013 και ισχύει για ολόκληρη τη Σαντορίνη μπορεί να υπολογιστεί ένας συνολικός αριθμός επισκεπτών που κατά μέσο όρο επισκέπτεται τη Σαντορίνη τα τελευταία χρόνια. Ο μέσος όρος αλλοδαπών τουριστών τα έτη 2006-2013 είναι 192210. Άρα ένας συνολικός, προσεγγιστικός αριθμός επισκεπτών στη Σαντορίνη είναι 237296 ανά έτος.

Ο αριθμός των επισκεπτών δεν είναι κατανομημένος ομοιόμορφα σε όλο το έτος αλλά είναι εποχιακός. Συγκεκριμένα το 1996 ο μόνιμος πληθυσμός της Θήρας ήταν 10680 άτομα, ο εποχιακός πληθυσμός 47220 και ο συνολικός (μόνιμος και εποχιακός) 57900 άτομα. Το 1998, ο μόνιμος πληθυσμός της Θήρας ήταν 11200 άτομα, ο εποχιακός πληθυσμός 49806 και ο συνολικός 61006 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.

Επίσης, είναι αξιοσημείωτη η αύξηση των ξενοδοχειακών εγκαταστάσεων της Σαντορίνη από το 2005 ως το 2015 (πίνακας 4 παραρτήματος). Η αύξηση αυτή είναι απόρροια της μεγάλης τουριστικής προσέλευσης και της ανάπτυξης του κλάδου στο νησί.

4.4.3 Οικονομικά Στοιχεία

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 .

Στο παρελθόν, η οικονομία του νησιού βασιζόταν σε μεγάλο βαθμό στην παραγωγή τοματοπολτού και κρασιού. Αρχικά, η παραγωγή γινόταν σε οικογενειακές βιοτεχνίες ενώ αργότερα δημιουργήθηκαν και εργοστάσια. Το πρώτο εργοστάσιο τοματοπολτού κατασκευάστηκε μεταξύ 1925-1926 στον Μονόλιθο. Η ανάπτυξη της βιομηχανίας τοματοπολτού σε συνδυασμό με την ανοδική τάση του τουρισμού στη Σαντορίνη, από τη δεκαετία του 70 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. 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 οι τουριστικά ανεπτυγμένοι και αναπτυσσόμενοι οικισμοί (Περίσσα, Καμάρι, Μεσαριά), σημειώνουν μεγάλες αυξήσεις του μόνιμου πληθυσμού τους.

Την δεκαετία του 1991 ο πληθυσμός ασχολούταν 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 το 2001, η απορρόφηση εργατικού δυναμικού στον κλάδο να μην είναι τόσο μεγάλη. Το έτος 2001 πρώτος εμφανίζεται ο κλάδος υπηρεσιών, συγκεκριμένα η απασχόληση σε ξενοδοχεία και εστιατόρια. 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.

Με βάση στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, συνολικά ο τριτογενής τομέας, δηλαδή ο τομέας των υπηρεσιών και του εμπορίου, το έτος 2001 καλύπτει το 66.3% των απασχολούμενων στους Δήμους Θήρας και Οίας. Αντίστοιχα ο πρωτογενής τομέας καλύπτει το 27.7% των απασχολούμενων και ο δευτερογενής τομέας το 6% των απασχολούμενων. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό των ποσοστών αυτών εξαιρούνται τα οικονομικά ενεργά άτομα που δε δήλωσαν κλάδο οικονομικής δραστηριότητας.

Ο κλάδος του τουρισμού εξακολουθεί ως και σήμερα να απασχολεί μεγάλο ποσοστό του ενεργού πληθυσμού, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες όπου παρατηρείται ραγδαία προσέλευση τουριστών (Αποστολάκη Μ., 2007, Δρόσου Κ., 2005)

Στον πίνακα 5 του παραρτήματος, παρατίθενται ο οικονομικώς ενεργός και μη ενεργός πληθυσμός, απασχολούμενοι κατά τομέα οικονομικής δραστηριότητας και άνεργοι για τους δύο δήμους, τα κοινοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα της Σαντορίνης, το έτος 2001. Ακόμα, στον πίνακα 6 του παραρτήματος, δίνεται το ποσοστό του οικονομικά ενεργού πληθυσμού που απασχολείται με κάθε κλάδο οικονομικής δραστηριότητας για τα έτη 1991 και 2001.

4.4.4 Ύδρευση και ζήτηση νερού

Η Σαντορίνη δε διαθέτει επιφανειακά νερά. Οι ανάγκες σε γλυκό νερό καλύπτονται πρωτίστως από τις αντλήσεις υπόγειων νερών και δευτερευόντως από την αποθήκευση του βρόχινου νερού σε δεξαμενές. Οι ανάγκες του Δήμου Θήρας, ως το 2007, καλύπτονταν σε

ποσοστό 60% από τα δίκτυα της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης Άρδευσης Θήρας και κατά 40% από υδροπωλητές. Έκτοτε, η ΔΕΥΑΘ έχει πραγματοποιήσει ένα σύνολο έργων και ενδέχεται το ποσοστό κάλυψης των αναγκών να έχει βελτιωθεί. Με βάση στοιχεία από το επιχειρησιακό πρόγραμμα του δήμου Θήρας 2013-2014, η ΔΕΥΑΘ παρέχει στους καταναλωτές της ετησίως, νερό της τάξεως των 800000 κυβικών, εκ των οποίων περίπου το 25% είναι αφαλατωμένο και καλύπτει τις ανάγκες του Δ. Δ. Φηρών ενώ το υπόλοιπο 75% είναι υφάλμυρο.

Στο επιχειρησιακό πρόγραμμα του δήμου Θήρας αναφέρεται επίσης, ότι κατά την περίοδο 2013-2014 στη Σαντορίνη υπήρχαν συνολικά περισσότερες από 400 γεωτρήσεις (δημόσιες και ιδιωτικές). Πολλές, όμως, από αυτές υπολειπούν ή είχαν εγκαταλειφθεί. Συνολικά απογράφηκαν 196 γεωτρήσεις και φρέατα που λειτουργούσαν.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Φηρών

Υδρεύεται από 9 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή 70 m³ στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης στη θέση Κατοικίες δυναμικότητας 55 m³/h. Από το αντλιοστάσιο αυτό τροφοδοτείται, με την βοήθεια ενδιάμεσου αντλιοστασίου, στη θέση Ψαράδικα, η κεντρική δεξαμενή χωρητικότητας 600 m³.

Στον Έξω Γιαλό Φηρών λειτουργούν δύο μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, δυναμικότητας 1000 m³/day για την κάλυψη των αναγκών των δημοτικών διαμερισμάτων Φηρών, Καρτεράδου, Βουρβούλου και Ημεροβιγλίου.

Οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Φηρών κυμαίνονται από 350 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 1250 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Καρτεράδου

Υδρεύεται από 6 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή 40 m³ στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας 35 m³/h. Από το αντλιοστάσιο αυτό τροφοδοτείται διπλή δεξαμενή συνολικής χωρητικότητας 550 m³. Το ένα μέρος της δεξαμενής τροφοδοτεί τον Καρτεράδο, με βαρυτικό αγωγό και το άλλο μέρος με πιεστικό συγκρότημα.

Οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Καρτεράδου κυμαίνονται από 200 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 840 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Βουρβούλου

Υδρεύεται από 3 υδρογεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή χωρητικότητας 60 m³ στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας 12 m³/h. Από το κεντρικό αντλιοστάσιο το νερό οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 100 m³ η οποία υδρεύει τον Κάτω Βουρβούλο και από εκεί με αντλητικό συγκρότημα σε δεξαμενή χωρητικότητας 100 m³ που τροφοδοτεί τον Άνω Βουρβούλο.

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Βουρβούλου κυμαίνονται από 100 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 270 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Ακρωτηρίου

Υδρεύεται αποκλειστικά με μεταφορά νερού με υδροφόρες από την κεντρική δεξαμενή Βόθωνα – Μεσσαριάς στην κεντρική δεξαμενή του Ακρωτηρίου χωρητικότητας 500 m³.

Για την κάλυψη των αναγκών του Δημοτικού Διαμερίσματος Ακρωτηρίου και Εμπορείου προβλέπεται η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού σε περιοχή κοντά στην ΜΕΛ Εμπορείου σε οικόπεδο ιδιοκτησίας του Δήμου Θήρας.

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Ακρωτηρίου κυμαίνονται από 50 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 110 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Εμπορείου

Υδρεύεται από 2 γεωτρήσεις οι οποίες συλλέγουν το παραγόμενο νερό σε δεξαμενή χωρητικότητας 25m³ στο κεντρικό αντλιοστάσιο ύδρευσης δυναμικότητας 16m³/h. Από το αντλιοστάσιο το νερό οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 50 m³.

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Εμπορείου κυμαίνονται από 150m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 350 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικά Διαμερίσματα Βόθωνα και Μεσσαριάς

Υδρεύονται από κοινού από 5 υδρογεωτρήσεις. Το νερό συλλέγεται σε κοινή δεξαμενή χωρητικότητας 600 m³ μέσω ενδιάμεσου αντλιοστασίου δυναμικότητας 35 m³/h στο οποίο υπάρχει και δεξαμενή χωρητικότητας 50 m³. Η κεντρική δεξαμενή βρίσκεται στον Βόθωνα και αποτελεί σταθμό μεταφόρτωσης νερού με υδροφόρες, για περιοχές στις οποίες δεν μπορούμε να καλύψουμε προς το παρόν διαφορετικά τις ανάγκες τους.

Για την κάλυψη των αναγκών των Δημοτικών Διαμερισμάτων Επισκοπής Γωνιάς, Έξω Γωνιάς, Μεσσαριάς, Βόθωνα, Πύργου Καλλίστης και Μεγαλοχωρίου προβλέπεται η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού δυναμικότητας 5.000 m³/day στη θέση αεροδρόμιο.

Συνολικά οι καταναλώσεις στα Δ. Δ. Βόθωνα και Μεσσαριάς κυμαίνονται από 200 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 580 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Μεγαλοχωρίου

Υδρεύεται με μεταφορά νερού με υδροφόρες, από την κεντρική δεξαμενή Βόθωνα – Μεσσαριάς στην κεντρική δεξαμενή του Μεγαλοχωρίου χωρητικότητας 1200 m³. Η

δεξαμενή του Μεγαλοχωρίου λειτουργεί και ως ομβροσυλλέκτης ο οποίος καλύπτει τις ανάγκες του χωριού τους χειμερινούς μήνες.

Οι καταναλώσεις του Δ. Δ. Μεγαλοχωρίου κυμαίνονται από 40 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 100 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Έξω Γωνιάς

Υδρεύεται με μια γεώτρηση το νερό της οποίας οδηγείται σε δεξαμενή χωρητικότητας 100 m³, στο κεντρικό αντλιοστάσιο και από εκεί με αντλητικό συγκρότημα δυναμικότητας 14 m³/h στην κεντρική δεξαμενή ύδρευσης χωρητικότητας 60 m³. Υπάρχει δυνατότητα σε περίπτωση ανάγκης το χωριό να υδρευθεί και από τη γεώτρηση η οποία λειτουργεί για τις ανάγκες της Μέσα Γωνιάς, οικισμού του Δ. Δ. Επισκοπής Γωνιάς. Παράλληλα πλησίον της κεντρικής δεξαμενής ύδρευσης υπάρχει υπόσκαφη ομβροδεξαμενή.

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Έξω Γωνιάς κυμαίνονται από 60 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 120 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

- Δημοτικό Διαμέρισμα Επισκοπής Γωνιάς

Υδρεύεται συνολικά από 10 υδρογεωτρήσεις. Εκ των οποίων οι 7 γεωτρήσεις τροφοδοτούν την κεντρική δεξαμενή ύδρευσης Καμαρίου χωρητικότητας 600 m³. Η δεξαμενή αυτή, επικοινωνεί βαρυτικά με δεύτερη δεξαμενή με την επωνυμία «Χριστοφόρα» χωρητικότητας 500 m³ η οποία ενισχύεται με άλλες δυο γεωτρήσεις. Για την κάλυψη των αναγκών τμημάτων δικτύων, σε υψηλότερο σημείο από τις δεξαμενές λειτουργεί πιεστικό συγκρότημα με δεξαμενή 12 m³ που τροφοδοτείται από την δεξαμενή «Χριστοφόρας». Τέλος, όπως αναφέρθηκε και στην ανωτέρω παράγραφο για τις ανάγκες ύδρευσης του οικισμού Μέσα Γωνιάς λειτουργεί μια γεώτρηση η οποία στέλνει το παραγόμενο νερό στην κεντρική δεξαμενή Μέσα Γωνιάς, θέση Ταξιάρχης, χωρητικότητας 150 m³.

Συνολικά οι καταναλώσεις στο Δ. Δ. Επισκοπής Γωνιάς κυμαίνονται από 450 m³/day ως ελάχιστο τον χειμώνα και 1960 m³/day ως μέγιστο το καλοκαίρι.

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις για κάθε τετράμηνο, σε κάθε δημοτικό διαμέρισμα της Δημοτικής Ενότητας Θήρας, για το έτος 2006.

Η Δημοτική Ενότητα Οίας Θηρασίας καλύπτει τις ανάγκες της αξιοποιώντας τη μέθοδο της αφαλάτωσης.

- Κοινοτικό Διαμέρισμα Οίας

Στην Οία λειτουργεί εργοστάσιο αφαλάτωσης για τις ανάγκες υδροδότησης της περιοχής. Το 2012 μάλιστα ολοκληρώθηκε η διαδικασία προμήθειας μονάδας αφαλάτωσης 500 κυβικών ημερησίως. Κατά τους θερινούς μήνες όμως, εξαιτίας της έντονης τουριστικής ανάπτυξης της περιοχής, υπάρχει σοβαρό πρόβλημα επάρκειας ύδατος. Μέχρι στιγμής, το

Πίνακας 4.3: Καταναλώσεις νερού το έτος 2006 (Αποστολάκη Μ., 2007)

Δημοτικό Διαμέρισμα	Α΄ Τετράμηνο (m ³)	Β΄ Τετράμηνο (m ³)	Γ΄ Τετράμηνο (m ³)	Σύνολο έτους (m ³)
Ακρωτηρίου	2848	3493	3909	10250
Βόθωνα	6787	12208	10161	29156
Βουρβούλου	5148	9185	8899	23232
Έξω Γωνιάς	4771	7127	5498	17396
Εμπορείου	9906	13598	14900	38404
Ημεροβιγλίου	0	0	0	0
Επισκοπή Γωνιάς	46070	155993	81029	283092
Καρτεράδου	14625	27635	26061	68321
Μεγαλοχωρίου	1261	2896	3588	7745
Μεσσαριάς	13653	21620	20935	56208
Πύργου Καλλίστης	0	0	0	0
Φηρών	29984	86021	58240	174245
Συνολικά ετήσια κυβικά:				708049

πρόβλημα αντιμετωπιζόταν μεταφέροντας τις επιπλέον απαιτούμενες ποσότητες νερού με υδροφόρα οχήματα από τις εγκαταστάσεις αφαλάτωσης των Φηρών στην Οία. Το Σεπτέμβριο του 2015 όμως προκηρύχθηκε η προμήθεια φορητής μονάδας αφαλάτωσης θαλασσινού νερού μέγιστης ικανότητας παραγωγής πόσιμου νερού 900 κυβικών ανά ημέρα. Η εν λόγω προμήθεια αποσκοπεί στην αντικατάσταση και επέκταση της δυναμικότητας της υφιστάμενης 1ης μονάδας αφαλάτωσης, η οποία βρίσκεται εγκατεστημένη στο εργοστάσιο αφαλάτωσης της Οίας. Η υφιστάμενη μονάδα αφαλάτωσης λόγω παλαιότητας (λειτουργία άνω της 20ετίας) εμφανίζει συχνές βλάβες, είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και δεν μπορεί να καλύψει την αυξημένη θερινή ζήτηση σε πόσιμο νερό. Στόχος της προμήθειας είναι ο τερματισμός της ανεπάρκειας πόσιμου νερού, με την κάλυψη της υψηλής θερινής ζήτησης στην Δημοτική Κοινότητα Οίας, και παράλληλα η βελτίωση της ποιότητας του παρεχόμενου πόσιμου νερού.

- Κοινοτικό Διαμέρισμα Θηρασιάς

Στη νήσο Θηρασιά έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί επιτυχώς από τις 11/04/2012 μονάδα αφαλάτωσης δυναμικότητας 140 κυβικών ημερησίως. Το νησί πλέον είναι αυτόνομο και δεν εξαρτάται η υδροδότηση του από τυχόν καθυστερήσεις υδροφόρου πλοίου (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Θήρας, 2013-2014, Μαντόγλου Α., 2014).

4.5 Γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία

Η γεωλογική διάρθρωση της νήσου αποτυπώνεται λεπτομερώς στον σχετικό γεωλογικό χάρτη, έκδοσης ΙΓΜΕ, κλίμακας 1:50.000 (Pichler et. al., 1980).

Στο νησί σχηματίζονται ελεύθεροι υδροφορείς, οι οποίοι δεν διαθέτουν (εκτός από την ορεινή κεντρική περιοχή) ένα εμφανές αδιαπέρατο υπόβαθρο. Μπορούμε να δεχθούμε, με αρκετά καλή προσέγγιση, ότι στην παράκτια ζώνη το γλυκό νερό βρίσκεται σε πλευρική επαφή με το αλμυρό νερό της θάλασσας. Στο κέντρο του νησιού, το γλυκό νερό, επειδή είναι αραιότερο, επιπλέει επάνω στο υφάλμυρο, σχηματίζοντας ένα φακό γλυκού νερού.

Οι διάφοροι λιθολογικοί σχηματισμοί που παρουσιάζονται στο χάρτη (εικόνα 4.2) ταξινομούνται σε τέσσερις διαφορετικές υδρολιθολογικές ενότητες (εικόνα 4.3): Η πρώτη λιθολογική ενότητα είναι οι ηφαιστειακοί σχηματισμοί –που καλύπτουν ως επί το πλείστον το νησί. Η δεύτερη ενότητα είναι οι αλλουβιακές αποθέσεις ενώ στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού εμφανίζεται επιφανειακά το προηφαιστειακό, μεταμορφωμένο υπόβαθρο του νησιού στο οποίο διακρίνονται δύο διαφορετικοί λιθολογικοί σχηματισμοί: οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι του Ανώτερου Τριαδικού και το ημιμεταμορφωμένο σύστημα των φυλλιτών.

Οι φυλλιτικοί σχηματισμοί, σύμφωνα με τα μέχρι τώρα διαθέσιμα στοιχεία, χαρακτηρίζονται ως πρακτικά αδιαπέρατοι και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

Σε γενικές γραμμές, στα ηφαιστειακά πετρώματα διακρίνονται δύο κύριες υδρογεωλογικές ενότητες, αυτή του βόρειου τμήματος (βόρεια του Προφήτη Ηλία) και αυτή του νότιου τμήματος, που αναπτύσσεται στην ευρύτερη περιοχή του Εμπορείου – Ακρωτηρίου.

Ο υδροφόρος σχηματισμός που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της ανάπτυξης των σχετικών μοντέλων είναι αυτός της ευρύτερης περιοχής του αεροδρομίου, δηλαδή στη βόρεια ενότητα. Τα γεωγραφικά του όρια προσεγγιστικά εκτείνονται νότια, έως τις βόρειες παρυφές του όρους Προφήτης Ηλίας, βόρεια έως την περιοχή του ρέματος Καρτεράδος. Καλύπτει τις ευρύτερες περιοχές Καρτεράδου, Μονόλιθου, Μεσσαριάς, Βόθωνα και Καμαρίου.

Στην περιοχή κοντά στα Φηρά (Κοινότητες Ημεροβιγλίου, Βουρβούλου, Θήρας και Καρτεράδου) οι υδροφόροι σχηματισμοί αντιστοιχούν στα στρώματα της κίσηρης, που παρουσιάζουν γενική κλίση προς τα Ανατολικά. Οι σύγχρονες γεωτρήσεις στην περιοχή κατασκευάζονται σε υψόμετρο 100 - 120 μ. και βρίσκονται περίπου στο κέντρο του νησιού, δηλαδή στη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση από την παραλία, όπου αναμένεται το στρώμα του γλυκού νερού να έχει το μεγαλύτερο πάχος (Επιχειρησιακό πρόγραμμα δήμου Θήρας, 2013-2014).

Από την παρακολούθηση των δημοτικών γεωτρήσεων, βγαίνει το συμπέρασμα, ότι αυτές είναι συγκεντρωμένες σε ένα πολύ μικρό χώρο και αντλούνται με υπερβολικό ρυθμό. Οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή άντλησης ανά γεώτρηση, ώστε να εξασφαλίζεται ανεκτή ποιότητα νερού, είναι της τάξης των 5-7 m³/h. Εάν ξεπερασθεί αυτός ο ρυθμός τότε η γεώτρηση αντλεί και θαλασσινό νερό, που προέρχεται από τα βαθύτερα στρώματα, κάτω από την διαχωριστική επιφάνεια γλυκού - αλμυρού νερού. Η θέση σε αργία μιας γεώτρησης (πράγμα που γίνεται τον χειμώνα) δεν φαίνεται να βελτιώνει την κατάσταση. Η υφαλμύριση είναι συνάρτηση περισσότερο της παροχής άντλησης και λιγότερο της διάρκειας της. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δοθεί έμφαση στην μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς κάθε γεώτρησης χωριστά, ενώ το θέμα των αποθεμάτων φαίνεται να παίζει δευτερεύοντα ρόλο, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι υπάρχουν ανεξάντλητα αποθέματα.

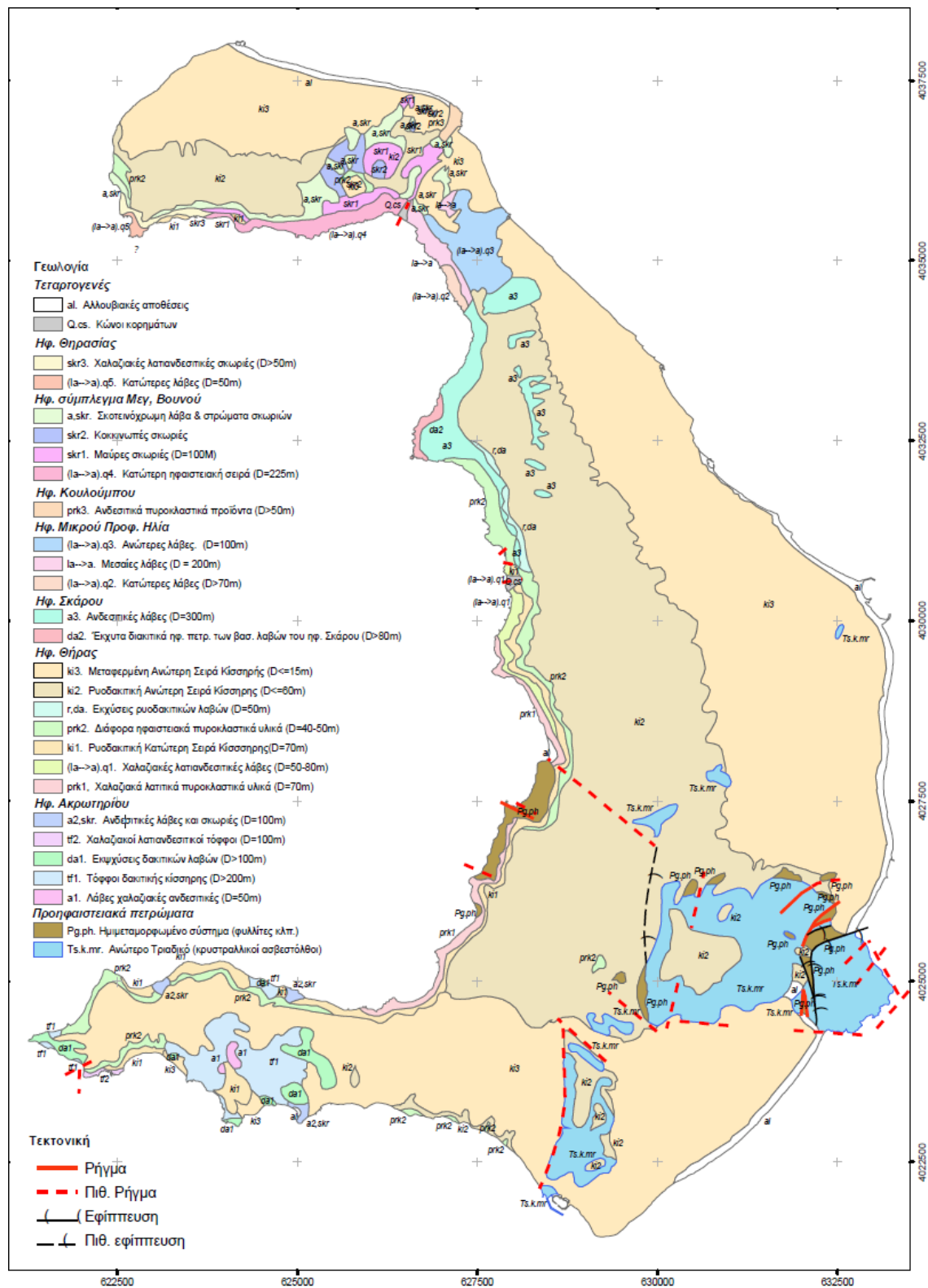
Στην περιοχή κοντά στη Μεσαρία (Κοινότητες Μεσαριάς, Βόθωνα, Έξω Γωνιάς και Επισκοπής Γωνιάς) οι συνθήκες είναι παρόμοιες με αυτές της περιοχής Φηρών. Υπάρχει γενικά η αίσθηση, ότι τα στρώματα της κίσσηρης βρίσκονται λίγο υψηλότερα, απ' ότι στην περιοχή των Φηρών. Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται ευνοημένη από απόψεως ισοζυγίου, διότι υπάρχουν πολλά επιφανειακά νερά, που προέρχονται από τον ορεινό όγκο του Προφήτη Ηλία και τα οποία καταλήγουν σε χείμαρρους, που διασχίζουν την πεδιάδα και εμπλουτίζουν τους υδροφόρους ορίζοντες. Η κακή ποιότητα του νερού των Δημοτικών γεωτρήσεων οφείλεται, όπως και στην περιοχή Φηρών, στον μικρό αριθμό των γεωτρήσεων και στην υπερβολική παροχή άντλησης ανά γεώτρηση. Τα τελευταία χρόνια η περιοχή υφίσταται την έντονη επέμβαση του ανθρώπου με την κατασκευή του αεροδρομίου και την ασφαλτόστρωση των χείμαρρων, που μετατρέπονται σε δρόμους, με αποτέλεσμα να έχει μειωθεί εξαιρετικά ο εμπλουτισμός των υδροφόρων οριζόντων.

Ο υδροφόρος ορίζοντας που αναπτύσσεται στο νότιο τμήμα της νήσου στην περιοχή του Εμπορείου, σε ότι αφορά στα πιθανά εκμεταλλεύσιμα υδατικά αποθέματα, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Γεωτρήσεις που έγιναν στην περιοχή αυτή απέδωσαν υφάλμυρο νερό.

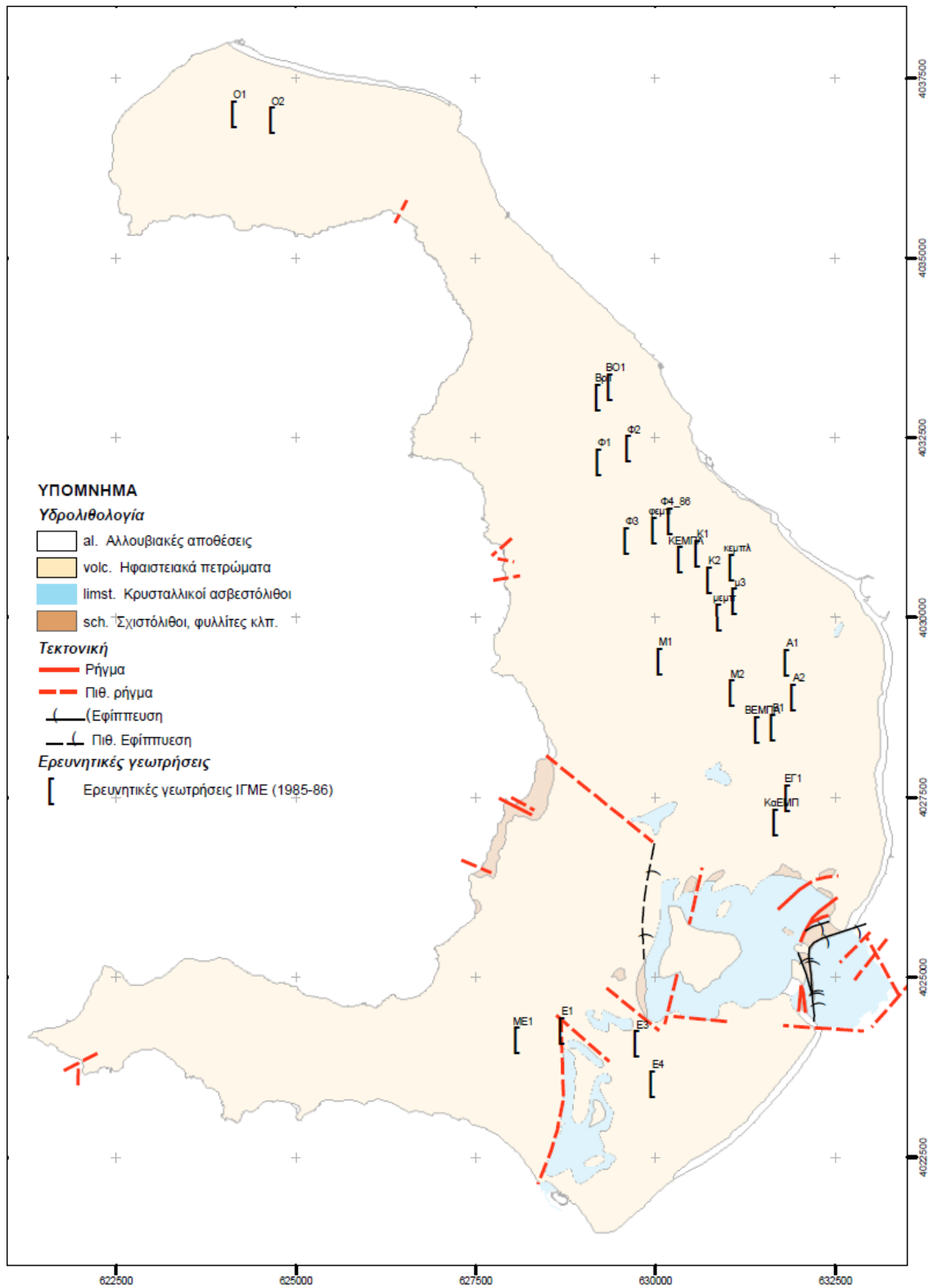
Η γεωμετρική δομή των υδροφόρων σχηματισμών, η οριζόντια και κατακόρυφη ανάπτυξή τους δεν είναι με ακρίβεια γνωστή. Στο βόρειο τμήμα εκτιμάται ότι το πάχος των ηφαιστειακών σχηματισμών εκτείνεται αρκετά μέτρα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ στην ευρύτερη περιοχή της Μεσαριάς και του Βόθωνα, σε ποικίλα βάθη, βρίσκονται κάτω από τους ηφαιστειακούς σχηματισμούς, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι. Η γεωμετρική διάρθρωση και τα όρια των επιμέρους αυτών σχηματισμών (ηφαιστειακοί σχηματισμοί, ασβεστόλιθοι, φυλλίτες) δεν είναι γνωστά.

Με βάση το επιχειρησιακό πρόγραμμα του δήμου Θήρας για το 2013-2014, διαπιστώθηκε ότι γενικό χαρακτηριστικό της στάθμης των υδροφόρων οριζόντων είναι ότι αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στο επίπεδο της θάλασσας. Οι υψηλότερες στάθμες παρατηρούνται στις γεωτρήσεις που βρίσκονται μακριά από την παραλία και βρίσκονται περίπου στο επίπεδο +1,5 m. Η ετήσια διακύμανση της στάθμης είναι πολύ μικρή και πολύ δύσκολο να μετρηθεί ή να εκτιμηθεί. Οι δυσκολίες στην εκτίμηση της απόλυτης στάθμης οφείλονται πιθανότατα

στο γεγονός ότι η στάθμη επηρεάζεται από την μέση στάθμη της επιφανείας της θάλασσας (Επιχειρησιακό πρόγραμμα δήμου Θήρας, 2013-2014).



Εικόνα 4.2: Γεωλογικός χάρτης Ν. Θήρας (Mantoglou A. & Giannouloupoulos P., 2004)



Εικόνα 4.3: Υδρολιθολογικός χάρτης ν. Θήρας (Mantoglou A. & Giannoulou P., 2004)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΟΤΟΜΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους ο υδροφορέας μελέτης βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου, είναι φρεάτιος και θεωρείται ότι δε διαθέτει αδιαπέρατο υπόβαθρο αλλά σχηματίζεται φακός γλυκού νερού που επιπλέει πάνω από το βαρύτερο αλμυρό νερό.

Με βάση το επιχειρησιακό πρόγραμμα του δήμου Θήρας, στο νησί λειτουργούν 196 γεωτρήσεις και φρέατα. Όμως, στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης (μοντέλο απότομης διεπιφάνειας) αλλά και στις προσομοιώσεις που έγιναν με βάση το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, χρησιμοποιήθηκαν μόνο 30 γεωτρήσεις και φρέατα. Αυτό γίνεται τόσο για λόγους απλοποίησης του προβλήματος όσο και επειδή τα δεδομένα για τις ακριβείς θέσεις και τον αριθμό των πηγαδιών, σε παρόντα χρόνο, δεν ήταν διαθέσιμα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των αντλήσεων των 30 πηγαδιών και πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για ορισμένες σημαντικές παραμέτρους. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα που αναπτύχθηκε από τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Μαντόγλου καθώς και τον διδάκτορα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο σε MATLAB. Το μοντέλο του υδροφορέα είχε ουσιαστικά δημιουργηθεί από τους Μαντόγλου Α. και Γιαννουλόπουλο Π. αλλά και από αντίστοιχη εργασία του Αλέξανδρου Μαντόγλου στο Πολυτεχνείο Κρήτης και έτσι δε χρειάστηκε να καταρτιστεί ξανά. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας, ήταν η τροποποίηση ορισμένων δεδομένων του προγράμματος για τις παραμέτρους του υδροφορέα αλλά και για τις αντλήσεις ώστε να διερευνηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε αυτές. Οι παράμετροι αυτές άλλωστε, δεν είναι με ακρίβεια γνωστές για τις διάφορες περιοχές του υδροφορέα αλλά γίνονται ορισμένες παραδοχές και εκτιμήσεις. Γίνεται, λοιπόν, μία προσπάθεια να εκτιμηθεί η εξάρτηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης στις διάφορες παραμέτρους του υδροφορέα και συνεπώς και στις εκτιμήσεις οι οποίες έχουν γίνει.

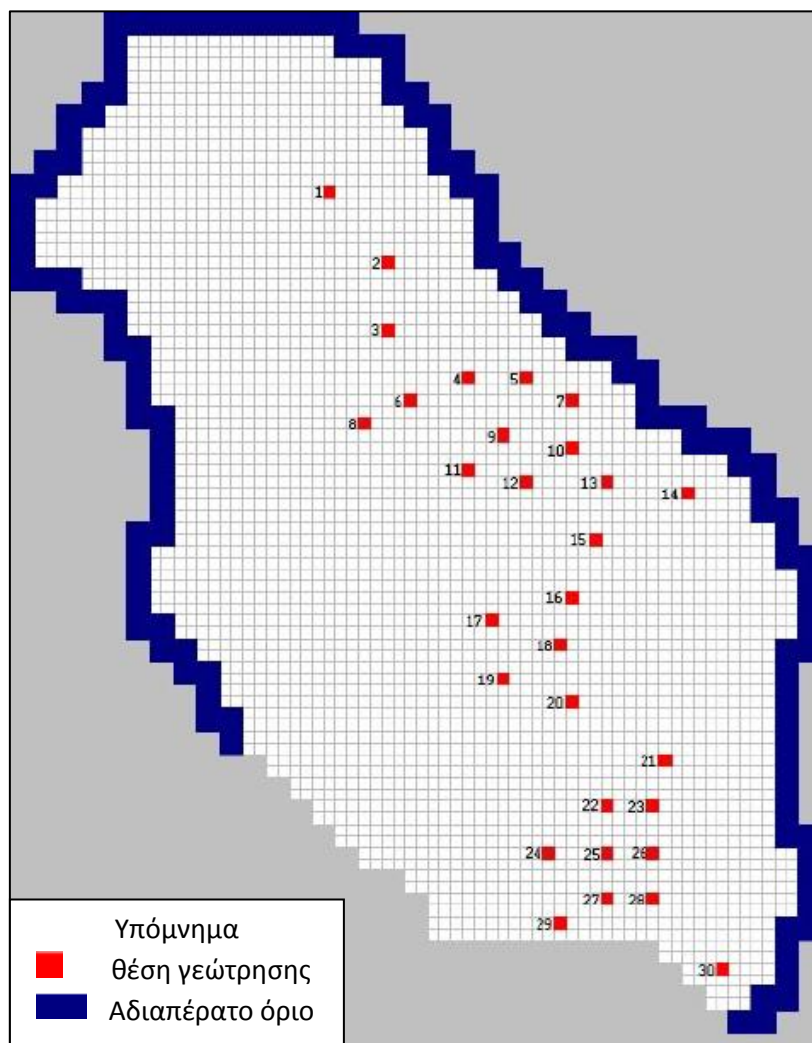
5.2 Περιγραφή προγράμματος βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται για την εύρεση του καλύτερου τρόπου λειτουργίας ενός συστήματος. Για να βελτιστοποιηθεί ένα σύστημα θα πρέπει να μετασχηματιστεί σε μία μαθηματική έκφραση που περιλαμβάνει τρία κύρια χαρακτηριστικά: την αντικειμενική συνάρτηση, τις μεταβλητές απόφασης και τους περιορισμούς, αν υπάρχουν. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι πρακτικά το μέτρο ή κριτήριο επίδοσης ενός φυσικού ή μαθηματικού συστήματος, ενώ οι μεταβλητές απόφασης είναι μεταβλητές που πρέπει να βελτιστοποιηθούν και αποτελούν τη λύση του προβλήματος. Οι

διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης που έχουν αναπτυχθεί, εφαρμόζονται για να βρεθεί ένα σετ μεταβλητών απόφασης το οποίο θα μπορεί να χαρακτηρίζεται ως βέλτιστο με βάση κάποιο κριτήριο που είναι η αντικειμενική συνάρτηση (Μαντόγλου Α. και Κουράκος Γ., 2005).

Στόχος της βελτιστοποίησης στην εργασία αυτή είναι η εύρεση της μέγιστης παροχής άντλησης, από το σύνολο των πηγαδιών, αποφεύγοντας την υφαλμύρισή τους. Η παροχή αυτή καλείται βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Δε λαμβάνονται υπόψη άλλοι πιθανοί στόχοι που θα μπορούσαν να υπάρχουν σε μία τέτοια βελτιστοποίηση όπως η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους ή η εύρεση των βέλτιστων θέσεων των γεωτρήσεων.

Οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων (x_i, y_i) με $i=1, \dots, M$, θεωρούνται γνωστές και βρίσκονται στις θέσεις που σημειώνονται στην εικόνα 5.1 με κόκκινο χρώμα. Με μπλε παχιά γραμμή είναι τα όρια σταθερού φορτίου του υδροφορέα ενώ στη δυτική πλευρά υπάρχει αδιαπέρατο όριο.



Εικόνα 5.1: Θέσεις γεωτρήσεων

Έτσι το πρόβλημα περιγράφεται ως εξής:

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize: } Q_{tot} = -Q_1 - Q_2 - \dots - Q_M \\ \text{subjected to: } c \leq 0, \quad c = d_{\min} - \xi(Q_1, Q_2, \dots, Q_M), \quad i=1, \dots, M \\ Q_i \geq 0, \quad i=1, \dots, M \\ Q_i \leq Q_{\max, i}, \quad i=1, \dots, M \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το άθροισμα των παροχών άντλησης Q_i με $i=1, \dots, M$. Είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της συνάρτησης αυτής. Αντί για αυτό όμως, τοποθετούνται αρνητικά πρόσθετα από τις παροχές έτσι ώστε να χρειάζεται να γίνει ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια έτοιμη συνάρτηση ελαχιστοποίησης που διαθέτει η MATLAB, η `fmincon`. Η συνάρτηση αυτή είναι κατάλληλη για μη γραμμικό προγραμματισμό και για περιπτώσεις ελαχιστοποίησης με περιορισμούς και πολλές μεταβλητές απόφασης.

Η προστασία των γεωτρήσεων και συνεπώς και του υδροφορέα από υφαλμύριση, μπορεί να γίνει με διάφορους περιορισμούς, όπως για παράδειγμα μη επιτρέποντας το πόδι της αλάτινης σφήνας να εισχωρήσει στον υδροφορέα περισσότερο από ένα σημείο, ή ελέγχοντας την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου ή την συγκέντρωση άλατος σε διάφορες θέσεις. Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται επιλέχθηκε να τεθεί ως περιορισμός η διατήρηση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού κάτω από ένα βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας (εικόνα 2.2). Δηλαδή ξ είναι το βάθος της διεπιφάνειας (απόσταση από τη μέση στάθμη της θάλασσας) και d_{\min} το βάθος της γεώτρησης κάτω από τη μ.σ.θ. Το βάθος αυτό συμβολίζει το ελάχιστο βάθος στο οποίο μπορεί να φτάσει η διεπιφάνεια. Στην πραγματικότητα το σημείο άντλησης των γεωτρήσεων είναι 1-5 m κάτω από τη μ.σ.θ. (Κουράκος Γ., 2009).

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε μια δεύτερη ομάδα περιορισμών που επιβάλλει μη αρνητικές αντλήσεις. Η τρίτη ομάδα περιορισμών καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό άντλησης από κάθε γεώτρηση. Καθορίζεται είτε από τη δυναμικότητα των αντλιών, είτε έτσι ώστε να διατηρηθεί χωρικά μια ομοιομορφία για την αποφυγή ανισορροπιών λόγω των υπερβολικά μεγάλων ρυθμών άντλησης από ορισμένες γεωτρήσεις. Η μέγιστη αυτή τιμή τέθηκε στο πρόγραμμα ως $Q_{\max} = 150$ για όλες τις γεωτρήσεις.

Σημειώνεται ακόμα ότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μη γραμμικό. Η συνάρτηση στόχου είναι γραμμική. Ομοίως, η δεύτερη και η τρίτη ομάδα περιορισμών είναι γραμμικές ως προς τη μεταβλητή απόφασης. Όμως η θέση της διεπιφάνειας συνδέεται με τις μεταβλητές απόφασης, δηλαδή τις παροχές άντλησης των πηγαδιών, με μη γραμμικό τρόπο. Αν στη σχέση 2.28 για φρεάτιο υδροφορέα και τη 2^η ζώνη τεθεί όπου $h_f - d = \Delta s \xi$ (που είναι η σχέση Ghyben - Herzberg), η θέση της διεπιφάνειας υπολογίζεται ως εξής:

$$\xi = \sqrt{\frac{2\varphi}{(1 + \Delta s) \Delta}} \quad (5.2)$$

Συνεπώς, η πρώτη ομάδα περιορισμών είναι μη γραμμική και το πρόβλημα ανάγεται σε μη γραμμικό προγραμματισμό.

Η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια μιας λύσης εξαρτάται τόσο από το μέγεθος του προβλήματος (αριθμός μεταβλητών απόφασης και περιορισμών) όσο και από τα χαρακτηριστικά της αντικειμενικής συνάρτησης και περιορισμών. Όταν η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης τότε το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με γραμμικό προγραμματισμό. Κατά την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με περιορισμούς όπως στην περίπτωση που μελετάται ο κύριος στόχος είναι να μετασχηματιστεί το πρόβλημα σε ένα πιο εύκολο υποπρόβλημα.

Υπάρχει ένα σύνολο αλγορίθμων που θα μπορούσαν να επιλύσουν ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η συνάρτηση `fmincon` της MATLAB δίνει τις ακόλουθες επιλογές: `trust region reflective`, `active set`, `interior point`, `SQP` (sequential quadratic programming). Στην έκδοση που χρησιμοποιήθηκε, η MATLAB έχει ως προεπιλογή τον `trust region reflective algorithm`. Παρ' όλα αυτά, αναφέρει ότι σε επόμενη έκδοση πρόκειται να τεθεί ο αλγόριθμος `interior point` ως προεπιλογή. Αυτός ο αλγόριθμος επιλέχθηκε και στην παρούσα εργασία.

Ο `interior point` μπορεί να διαχειριστεί μεγάλης αλλά και μικρής κλίμακας προβλήματα και ικανοποιεί τους περιορισμούς σε κάθε επανάληψη. Το 1984 δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος ο οποίος είχε σύντομο χρόνο επίλυσης και στον οποίο οι επαναλήψεις διατηρούσαν τα παραγόμενα σημεία στο εσωτερικό του εφικτού συνόλου σε αντίθεση με άλλες μεθόδους. Η ερευνητική προσπάθεια που ακολούθησε οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων οι οποίοι αποδείχθηκαν ανταγωνιστικοί με τις άλλες μεθόδους, τόσο στη θεωρία όσο και στην πράξη. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα υπερτερούν. Η μέθοδος `SQP` η οποία προτείνεται από άλλες εργασίες (Μαντόγλου Α., 2014, Παπαντωνίου Μ., 2003) έχει αρκετά μειονεκτήματα όπως οι απαιτήσεις συνέχειας της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο κ.α.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος `interior point` σε διαδοχικές επαναλήψεις για τον ίδιο υδροφορέα και τις ίδιες τιμές των παραμέτρων δίνει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα με ακρίβεια 4^{00} δεκαδικού ψηφίου. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα που δίνουν οι μέθοδοι `SQP` και `trust region reflective`, για κάθε γεώτρηση, διαφέρουν μεταξύ τους (για διαδοχικές επαναλήψεις, με τον ίδιο κάθε φορά αλγόριθμο και με ίδιες τιμές παραμέτρων) στο 3° δεκαδικό ψηφίο. Παρ' όλα αυτά τα αποτελέσματα που δίνουν οι αλγόριθμοι `interior point` και `SQP` διαφέρουν μεταξύ τους σε ένα ποσοστό περίπου 0.2% ενώ οι διαφορές μεταξύ `interior` και `trust region reflective` και `SQP` και `trust region reflective` είναι περίπου 0.3% και 0.1% αντίστοιχα. Δηλαδή οι μεταξύ τους διαφοροποιήσεις ως προς τα τελικά αποτελέσματα είναι πρακτικά ασήμαντες.

Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και τον προσδιορισμό των πιεζομετρικών φορτίων χρησιμοποιείται το λογισμικό `MODFLOW` και η θεωρητική βάση που χρησιμοποιεί αυτό, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.1. Το λογισμικό αυτό βασίζεται στη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού. Το `PROCESSING`

MODFLOW επιτρέπει τη δημιουργία του μοντέλου του υδροφορέα και την εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων (π.χ. τις διαστάσεις, τη διακριτοποίηση, τις οριακές συνθήκες, την κατείσδυση, την υδραυλική αγωγιμότητα κ.τ.λ.).

5.3 Βασική εφαρμογή του προγράμματος βελτιστοποίησης

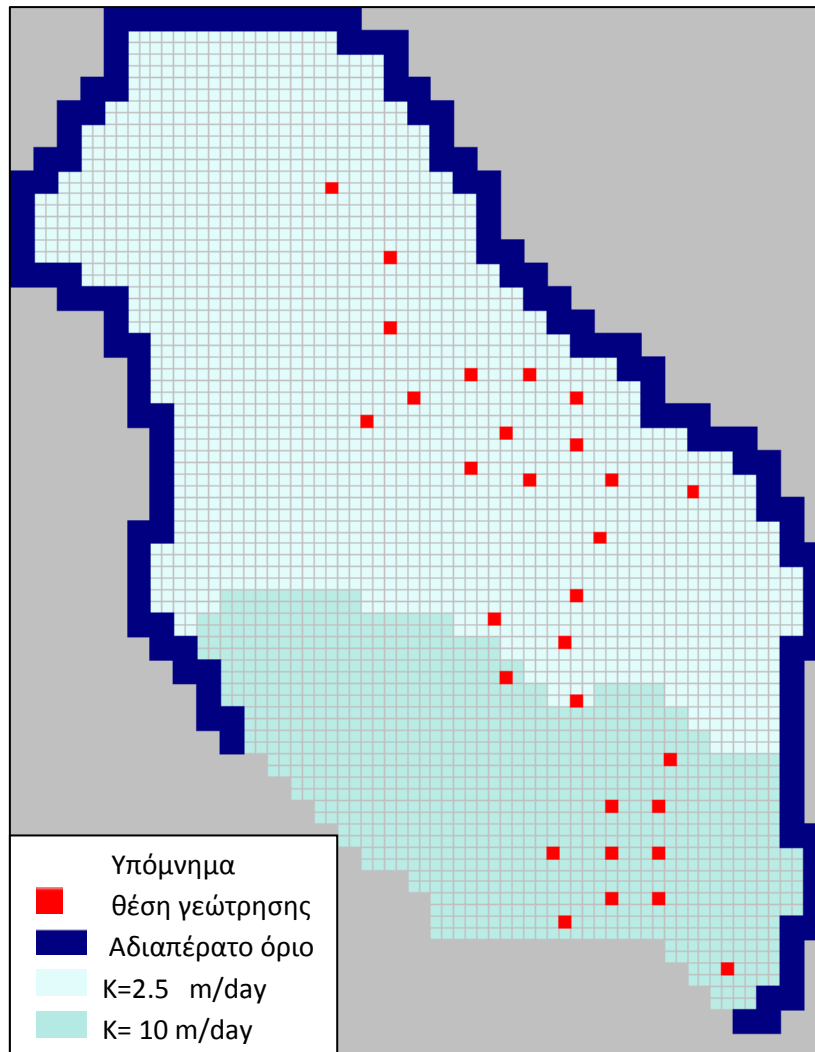
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος βελτιστοποίησης με τις παραμέτρους όπως είχαν οριστεί από τον Μαντόγλου Αλέξανδρο στη διπλωματική του. Ο σκοπός της εκτέλεσης αυτής είναι να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων των επόμενων σεναρίων ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι: κατείσδυση $N=40.25$ mm/y ή 0.0001 m/day, υδραυλική αγωγιμότητα που χωρίζεται σε δύο ζώνες με $K_1=2.5$ m/day και $K_2=10$ m/day αντίστοιχα όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Οι θέσεις των πηγαδιών θεωρήθηκαν αρχικά όπως στην εικόνα 5.2.

Ορισμένες άλλες σημαντικές παράμετροι, που διατηρήθηκαν σταθερές σε όλες τις εφαρμογές του μοντέλου απότομης διεπιφάνειας είναι: το βάθος του υδροφορέα που θεωρήθηκε 80 m και το βάθος (d_{min}) από τη μ.σ.θ. που δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το βάθος της διεπιφάνειας και ορίστηκε να είναι 15 m. Επιπροσθέτως, η πυκνότητα του γλυκού νερού θεωρήθηκε ίση με 1.000 g/cm³ ενώ του θαλασσινού 1.025 g/cm³. Ο υδροφορέας διακριτοποιήθηκε με πυκνότητα 100 επί 100 μέτρα και οι τελικές διαστάσεις του μοντέλου είναι 70 γραμμές και 90 στήλες.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την εκτέλεση καταγράφηκαν στο αρχείο output.dat. Από αυτά, εκείνα που μας αφορούν είναι οι αντλήσεις κάθε γεώτρησης (πίνακας 5.1) και η αθροιστική αντλούμενη ποσότητα νερού. Με δεδομένο ότι η πραγματική έκταση του υδροφορέα είναι περίπου $31.64 \cdot 10^6$ m² και η κατείσδυση 40.25 m/y (με βάση την μελέτη του Μαντόγλου Αλέξανδρου), η συνολική τροφοδοσία του υδροφορέα είναι περίπου $1.274 \cdot 10^6$ m³/y. Η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα προκύπτει 1534 m³/day, δηλαδή περίπου το 45% της τροφοδοσίας του.

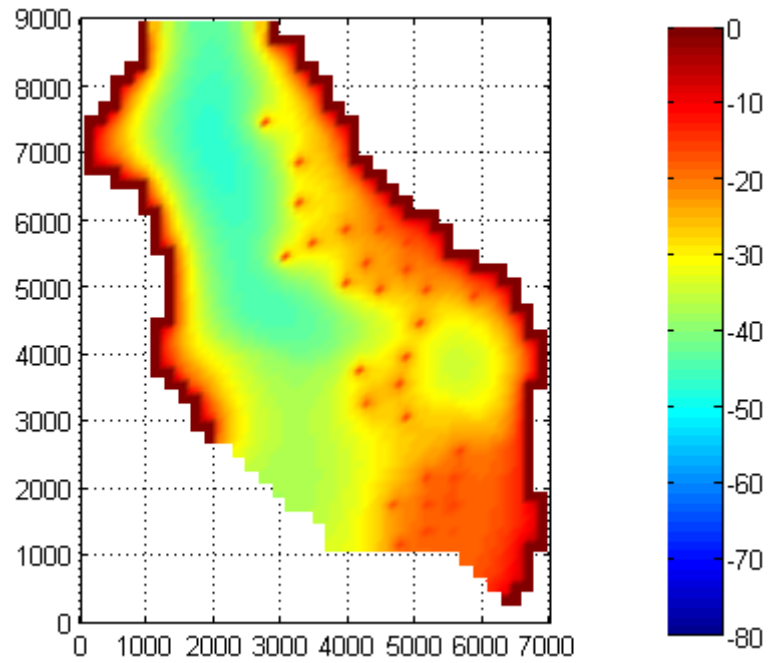
Η γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού φαίνεται στις εικόνες 5.3 και 5.4 σε τομή αλλά και σε τρισδιάστατη απεικόνιση αντίστοιχα. Το σκούρο μπλε χρώμα αντιστοιχεί σε μεγάλα βάθη της διεπιφάνειας ενώ το κόκκινο σε μικρά βάθη. Παρατηρείται ότι στις θέσεις των πηγαδιών η διεπιφάνεια έχει ανέλθει σε μικρότερα βάθη.



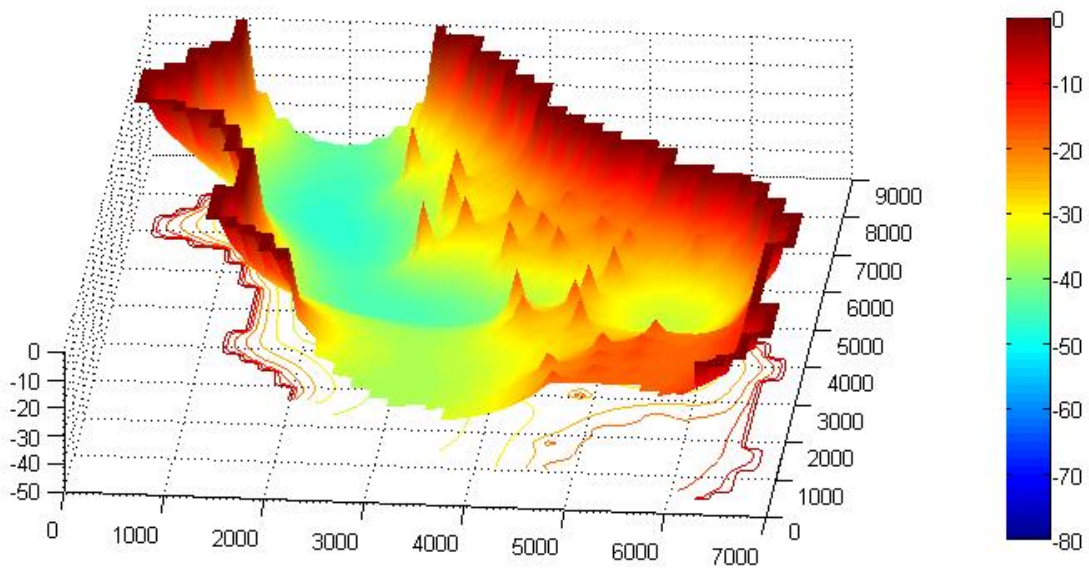
Εικόνα 5.2: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας

Πίνακας 5.1: Αντλήσεις από κάθε γεώτρηση για $N=0.0001$ m/day, $K_1=2.5$ και $K_2=10$ m/day

ΕΠΙΠΕΔΟ	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΑΠΟΔΟΣΗ (m^3/day)
1	16	28	1	87.716
1	22	33	2	61.471
1	28	33	3	67.133
1	32	40	4	36.848
1	32	45	5	18.788
1	34	35	6	55.608
1	34	49	7	12.115
1	36	31	8	87.101
1	37	43	9	31.789
1	38	49	10	23.863
1	40	40	11	59.751
1	41	45	12	42.647
1	41	52	13	30.535
1	42	59	14	24.059
1	46	51	15	48.655
1	51	49	16	50.114
1	53	42	17	65.094
1	55	48	18	42.141
1	58	43	19	149.563
1	60	49	20	54.870
1	65	57	21	76.738
1	69	52	22	71.858
1	69	56	23	41.514
1	73	47	24	97.237
1	73	52	25	35.664
1	73	56	26	31.803
1	77	52	27	36.735
1	77	56	28	19.815
1	79	48	29	72.417
1	83	62	30	0.062



Εικόνα 5.3: Γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού σε κάτοψη



Εικόνα 5.4: Τριδιάστατη γραφική απεικόνιση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού

5.4 Αναλύσεις ευαισθησίας

5.4.1 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της κατείσδυσης

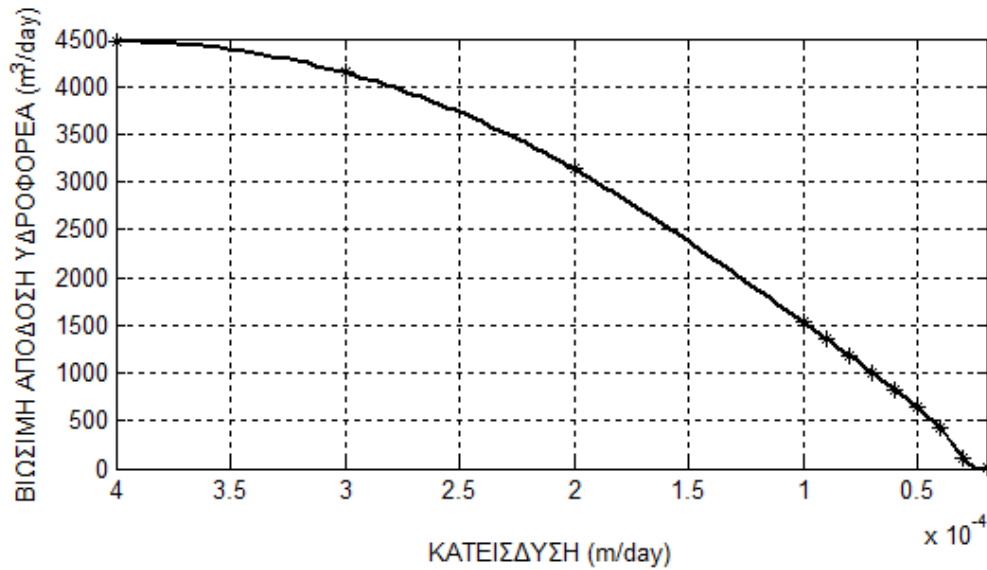
Η τροφοδοσία του υδροφορέα από το νερό της βροχής δεν είναι μια τιμή γνωστή και σταθερή σε όλη την έκταση και τον χρόνο μελέτης. Εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους

όπως η λιθολογική σύσταση του υδροφορέα, το πορώδες, η κλίση της επιφάνειας του εδάφους, η ένταση και η διάρκεια της βροχής, το κλίμα, η βλάστηση κ.α. Επίσης, για αυτές τις παραμέτρους δεν υπάρχουν συνήθως τα μακροχρόνια και λεπτομερή δεδομένα που θα οδηγούσαν σε πιο βέβαια αποτελέσματα. Έτσι γίνονται μελέτες που οδηγούν στην αποδοχή μιας τιμής για την τροφοδοσία του υδροφορέα. Οι μελέτες αυτές όμως, ανάλογα με τα δεδομένα και τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιήσει καταλήγουν σε συμπεράσματα που διαφοροποιούνται μεταξύ τους. Ακόμα, προβλέπεται μείωση τόσο του ύψους όσο και τις διάρκειας βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης αλλά και στη νότια Ευρώπη γενικότερα για την περίοδο 2070-2100 (Ακύλας Ε., Λυκούδης Σ. & Λάλας Δ., 2005). Για τους παραπάνω λόγους, είναι σημαντικό να γίνει ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της κατείδυσης στον υδροφορέα.

Στη βασική εφαρμογή του προγράμματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η τιμή από τη διπλωματική του Αλέξανδρου Μαντόγλου που είναι $N=0.0001 \text{ m/day}$. Σε άλλες μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί διαφορετικές τιμές. Για παράδειγμα οι Κουράκος Γ. και Μαντόγλου Α. σε άρθρο του 2011 χρησιμοποίησαν ως τιμή βάσης: $N=0.0004 \text{ m/day}$ και έλεγξαν την ευαισθησία του δικού τους μοντέλου με τιμές $N= 0.0003, 0.0002, 0.0001$ και 0.00001 m/day αντίστοιχα. Σε άλλες διπλωματικές εργασίες χρησιμοποιήθηκαν τιμές κατείδυσης $N=0.0001-0.0002 \text{ m/day}$ (Καρρά Θ., 2011, Στράτζαλης Κ., 2008). Έτσι προκειμένου να γίνει ανάλυση ευαισθησίας επιλέχθηκαν τιμές από $N=0.00002 \text{ m/day}$ που μηδενίζει πρακτικά τη βιώσιμη απόδοση έως $N=0.0004 \text{ m/day}$ που ήταν από τις μεγαλύτερες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από άλλες μελέτες.

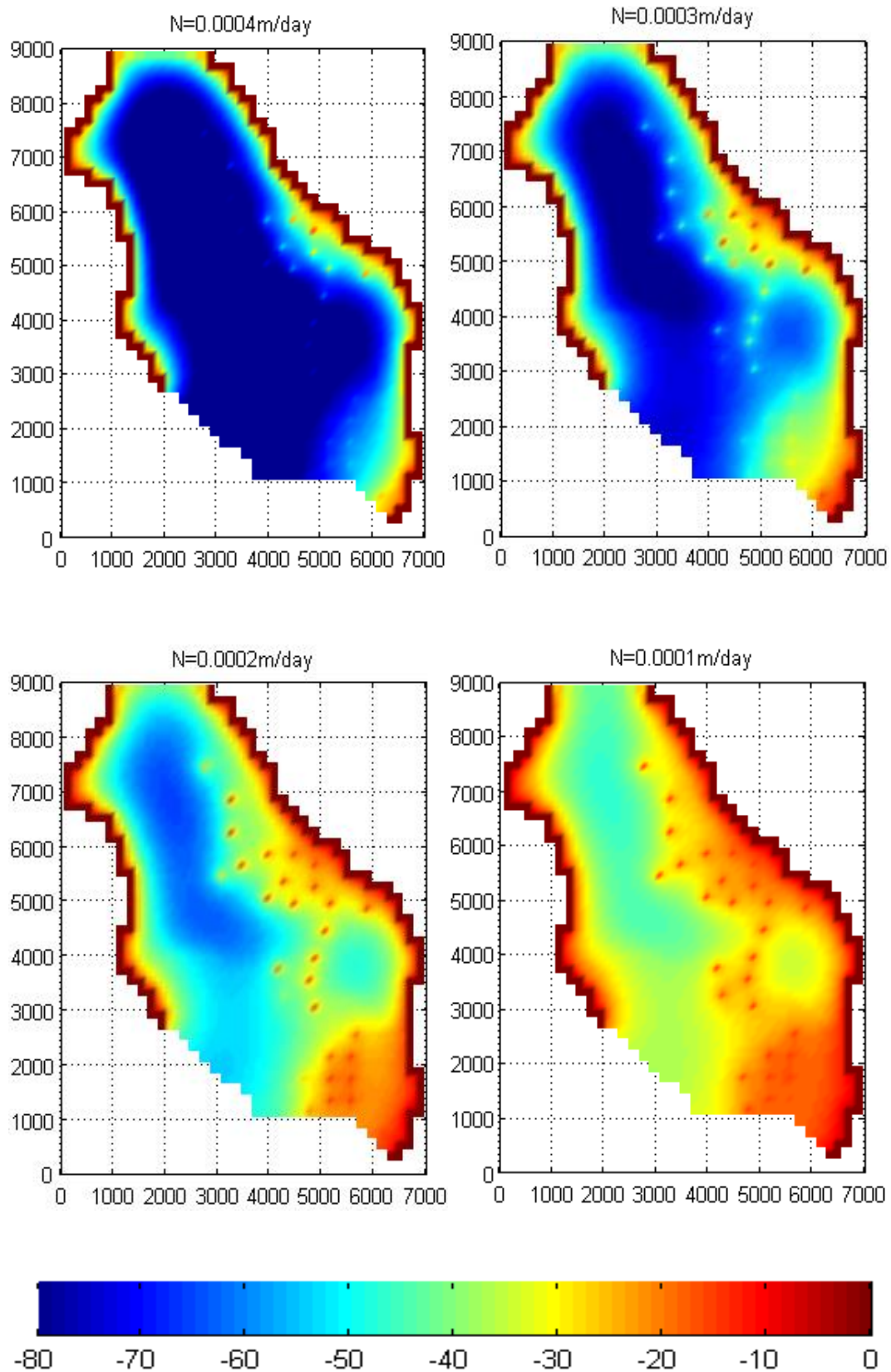
Σημειώνεται ότι για τιμές κατείδυσης $N \leq 0.00008 \text{ m/day}$ μεταβλήθηκε η αρχική τιμή των παροχών στο πρόγραμμα από $Q_0=30 \text{ m}^3/\text{day}$ σε $Q_0=10 \text{ m}^3/\text{day}$ και για $N=0.00002 \text{ m/day}$ σε $Q_0=5 \text{ m}^3/\text{day}$. Αυτό είναι απαραίτητο επειδή η πολύ μεγάλη αρχική τιμή παροχής (σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν τελικά για την αντίστοιχη τροφοδοσία) οδηγεί σε αρνητικό δυναμικό σε ορισμένα σημεία με αποτέλεσμα η τιμή $c= dmin-\xi$ να παίρνει μιγαδικές τιμές.

Τα αποτελέσματα για κάθε πηγάδι και για κάθε τιμή κατείδυσης, παρουσιάζονται στον πίνακα 7 του παραρτήματος. Παρατηρείται ότι όσο η τιμή της κατείδυσης μειώνεται, μειώνεται και η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Για τιμή κατείδυσης $N=0.00002 \text{ m/day}$, πρακτικά δεν μπορεί να αντληθεί καθόλου νερό από τον υδροφορέα. Για μεγάλες τιμές κατείδυσης παρατηρείται ότι η βιώσιμη απόδοση για κάθε πηγάδι παίρνει περίπου την ίδια τιμή. Στην εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα, δηλαδή του συνόλου των πηγαδιών του, σε σχέση με τη μεταβολή της τροφοδοσίας σε μορφή διαγράμματος.

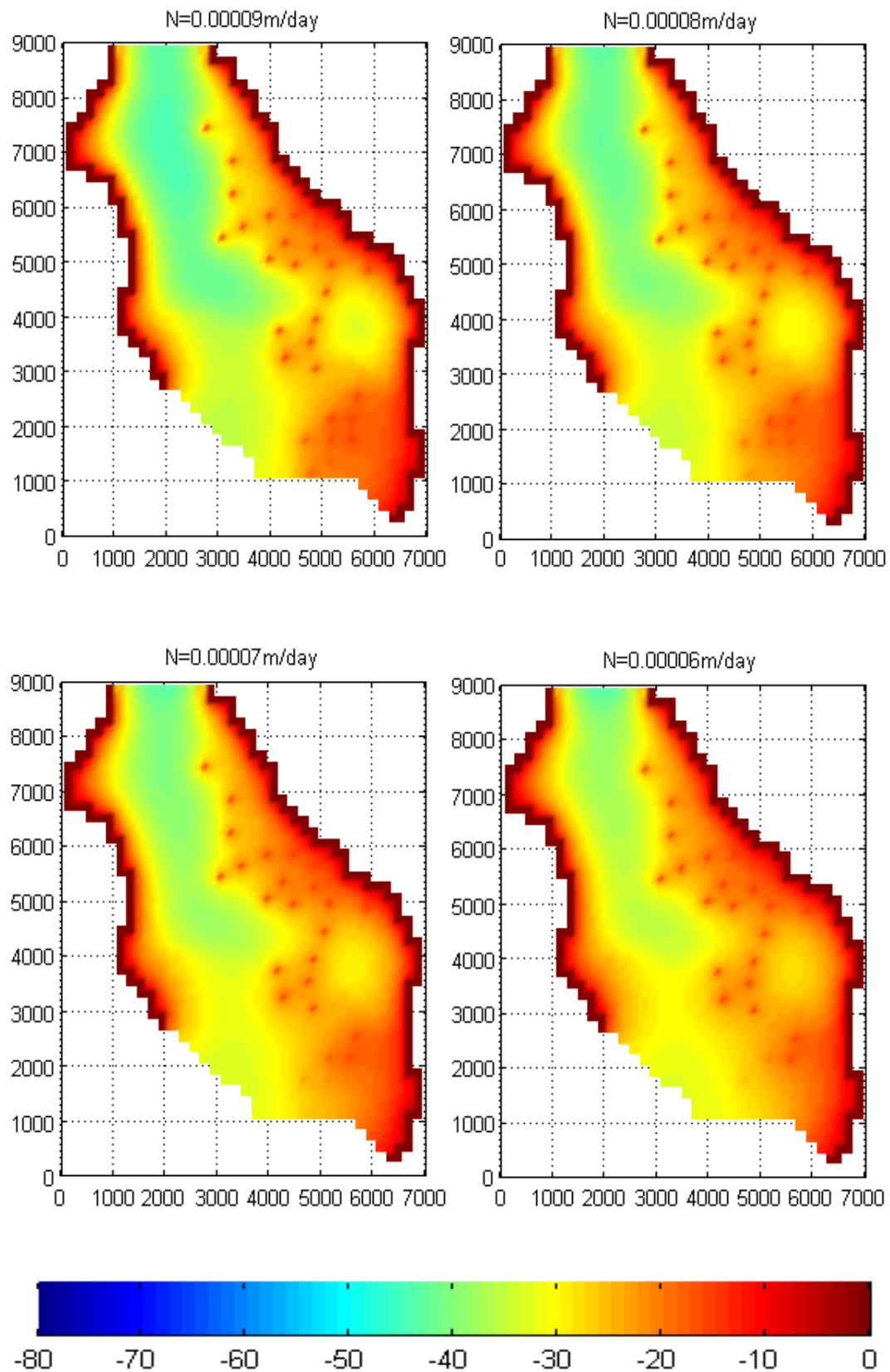


Εικόνα 5.5: Μείωση της βιώσιμης απόδοσης συναρτήσει της κατείσδυσης του υδροφορέα.

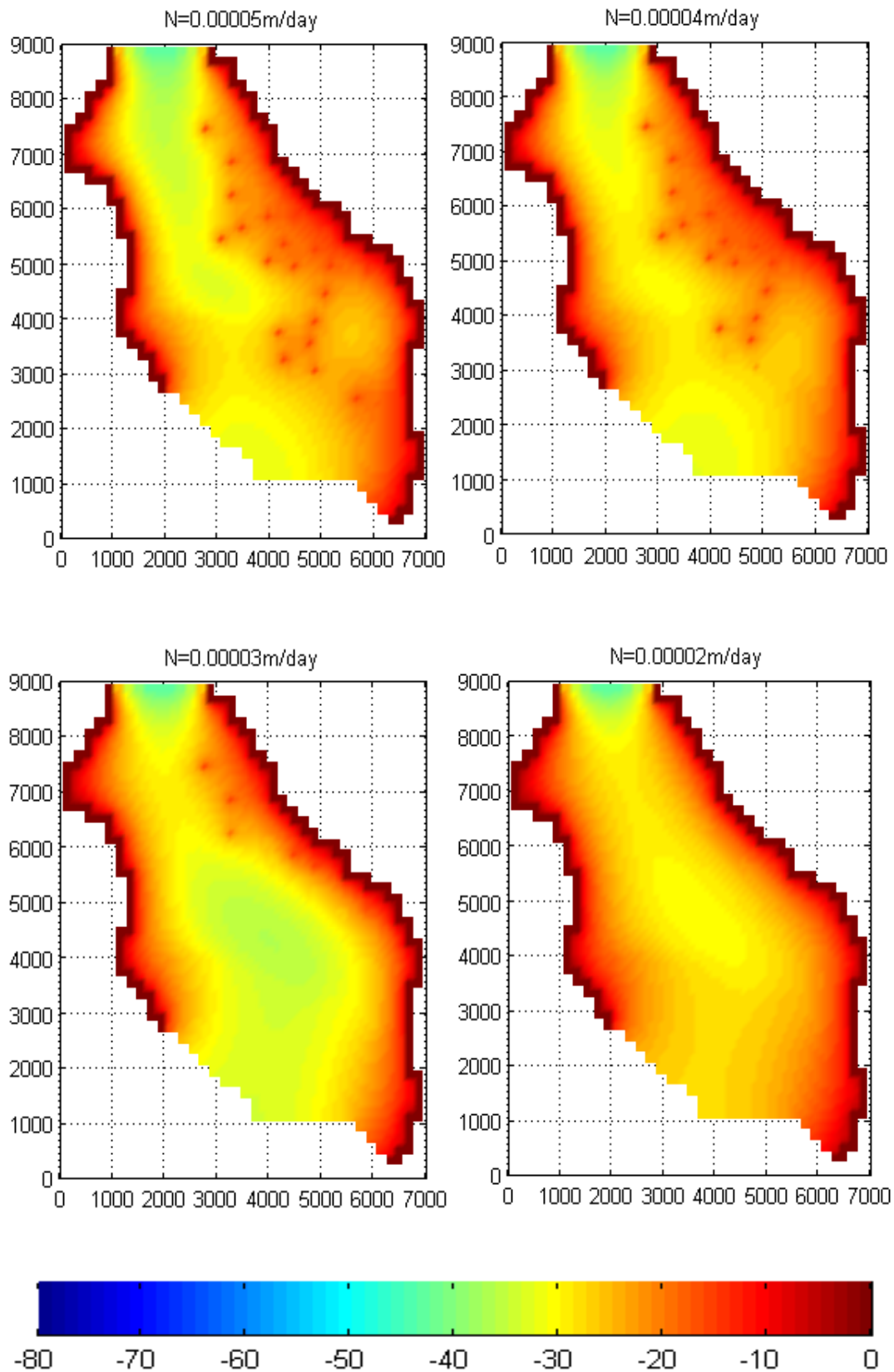
Στην εικόνα 5.6 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού. Για την αναπαράσταση χρησιμοποιήθηκε έγχρωμο σύνθετο RGB. Με κόκκινους τόνους είναι οι περιοχές στις οποίες η διεπιφάνεια φτάνει σε μικρή απόσταση από τη μ.σ.θ. ενώ με μπλε τόνους οι περιοχές όπου η διεπιφάνεια απέχει πολύ από τη μ.σ.θ. Είναι φανερό ότι όσο οι τιμές κατείσδυσης μειώνονται τόσο πιο κόκκινη γίνεται η αναπαράσταση του υδροφορέα.



Εικόνα 5.6: Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της τροφοδοσίας του υδροφορέα



Εικόνα 5.6 (συνέχεια): Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της τροφοδοσίας του υδροφορέα.



Εικόνα 5.6 (συνέχεια): Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της τροφοδοσίας του υδροφορέα.

5.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι επίσης μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος του υδροφορέα. Η τιμή της εκφράζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου. Όταν η τιμή της είναι μεγάλη, η κίνηση διαμέσου του πορώδους μέσου διευκολύνεται. Έτσι, είναι πιο εύκολο το γλυκό νερό να μετακινηθεί προς τη θάλασσα και να «χαθεί» από τον υδροφορέα. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο όσο η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας μειώνεται να αυξάνεται η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα.

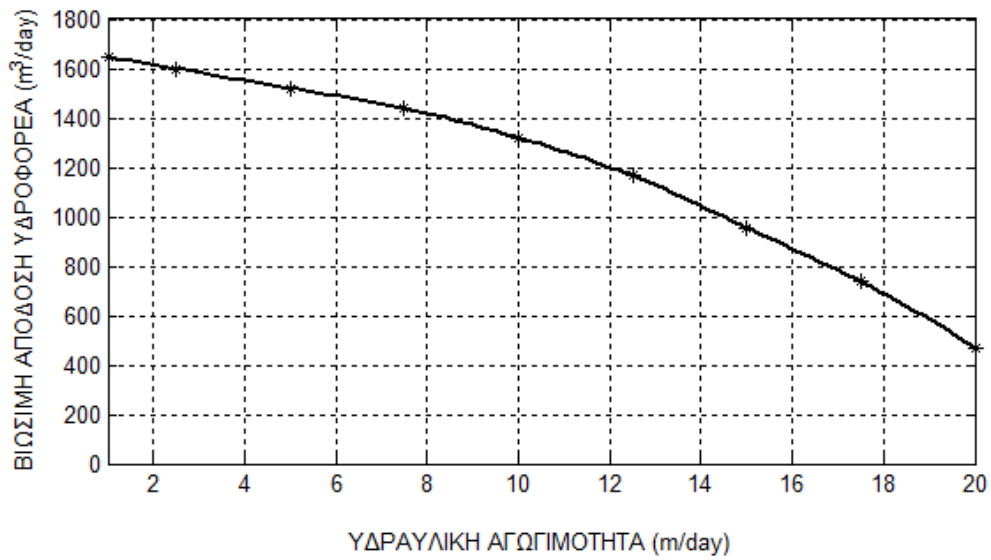
Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη σύσταση του εδάφους. Για παράδειγμα για λεπτόκοκκη άμμο είναι περίπου $2.88 \cdot 10^{-3}$ m/day, ενώ για άργιλο $9 \cdot 10^{-8}$ m/day (Λατινόπουλος Π. Δ., 1986). Η λιθολογική σύσταση του εδάφους συνήθως δεν είναι λεπτομερώς γνωστή, έτσι γίνονται και πάλι μελέτες οι οποίες δίνουν διαφορετικές τιμές στην παράμετρο αυτή. Η περιοχή μελέτης είναι μια μεγάλη έκταση και στην πραγματικότητα δεν είναι ομογενής. Συνήθως οι μελέτες χωρίζουν την περιοχή σε υποπεριοχές, κάθε μια εκ των οποίων θεωρείται ομογενής ή με μικρή μεταβολή της παραμέτρου. Στην βασική βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν 2 ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας με $K=2.5$ m²/day και $K=10$ m²/day αντίστοιχα όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Σε άλλες μελέτες χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές. Για παράδειγμα διαχωρισμός του υδροφορέα μελέτης σε 5 ζώνες με τιμές 1, 1.001-3.500, 3.501-7.500, 7.501-12.500, 12.501-18.750 m²/day αντίστοιχα (Κουράκος Γ. 2009) ή διαχωρισμός του υδροφορέα σε 5 ζώνες με τιμές 0.01-2, 2-5, 5-10, 10-15, 15-22.5 m²/day αντίστοιχα (Mantoglou A. & Giannouloroulos, P. 2004).

Για να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε ο υδροφορέας ομογενής και δόθηκαν οι ακόλουθες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας: 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 και 20 m²/day.

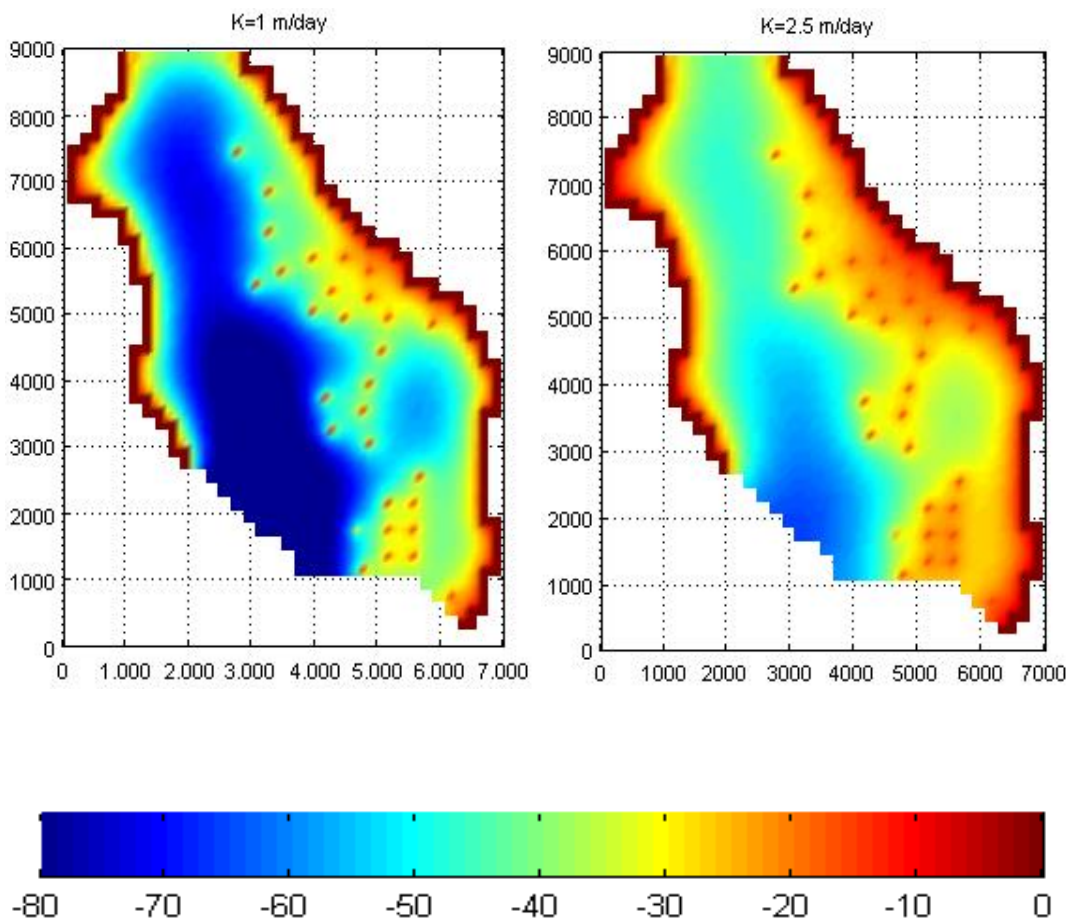
Τα αποτελέσματα για κάθε πηγάδι παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 8 του παραρτήματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας οδηγεί σε μείωση της βιώσιμης απόδοσης του υδροφορέα.

Στην εικόνα 5.7 παρουσιάζεται η μεταβολή της βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα, δηλαδή του συνόλου των πηγαδιών του, σε σχέση με τη μεταβολή υδραυλικής αγωγιμότητας σε μορφή διαγράμματος.

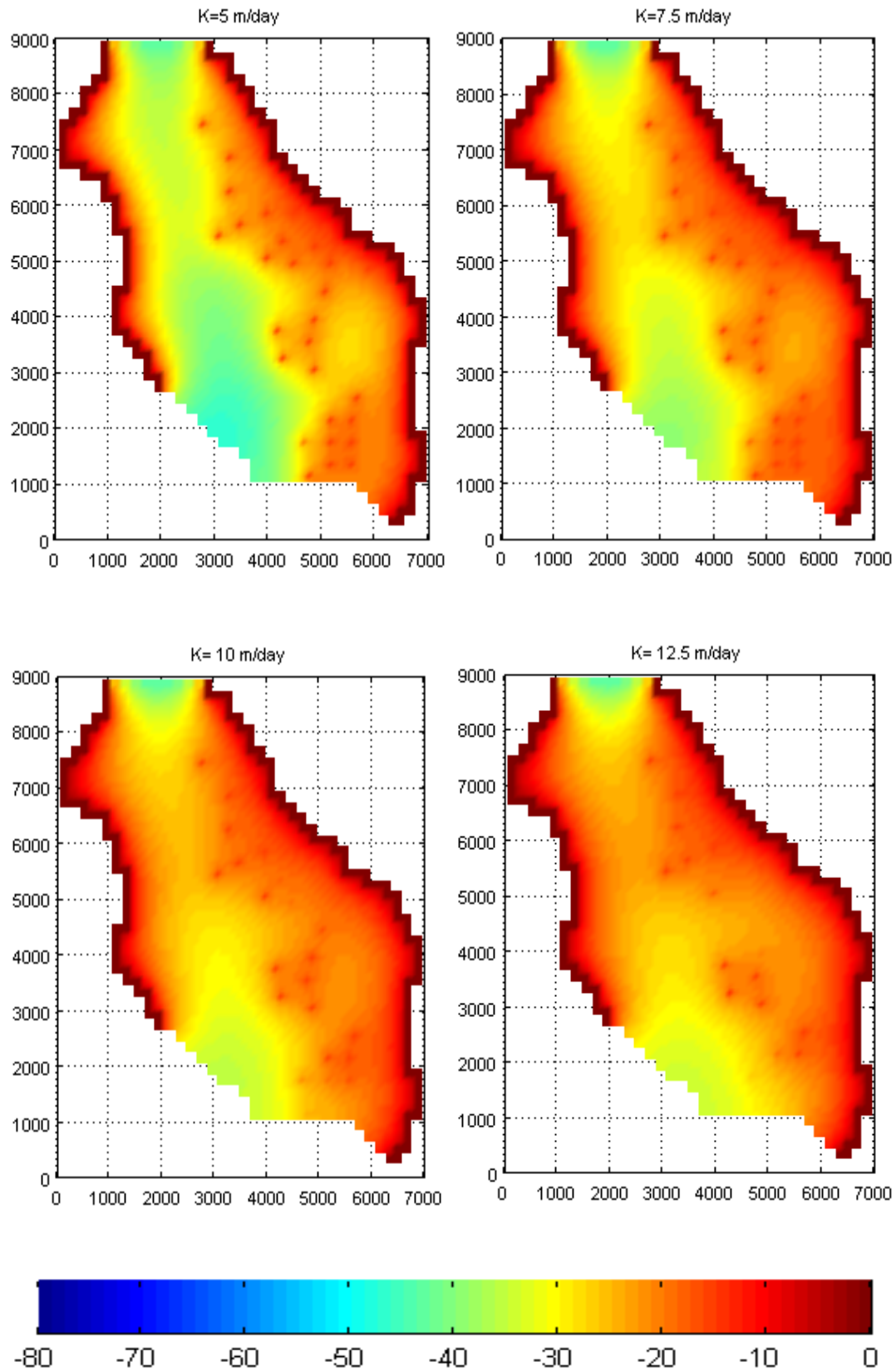
Επιπροσθέτως, στην εικόνα 5.8 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού σε κάτοψη. Για την αναπαράσταση χρησιμοποιήθηκε έγχρωμο σύνθετο RGB. Με κόκκινους τόνους είναι και πάλι οι περιοχές στις οποίες η διεπιφάνεια φτάνει σε μικρή απόσταση από τη μ.σ.θ. ενώ με μπλε τόνους οι περιοχές όπου η διεπιφάνεια απέχει πολύ από τη μ.σ.θ. Είναι φανερό ότι όσο οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας αυξάνονται τόσο πιο κόκκινη γίνεται η αναπαράσταση του υδροφορέα.



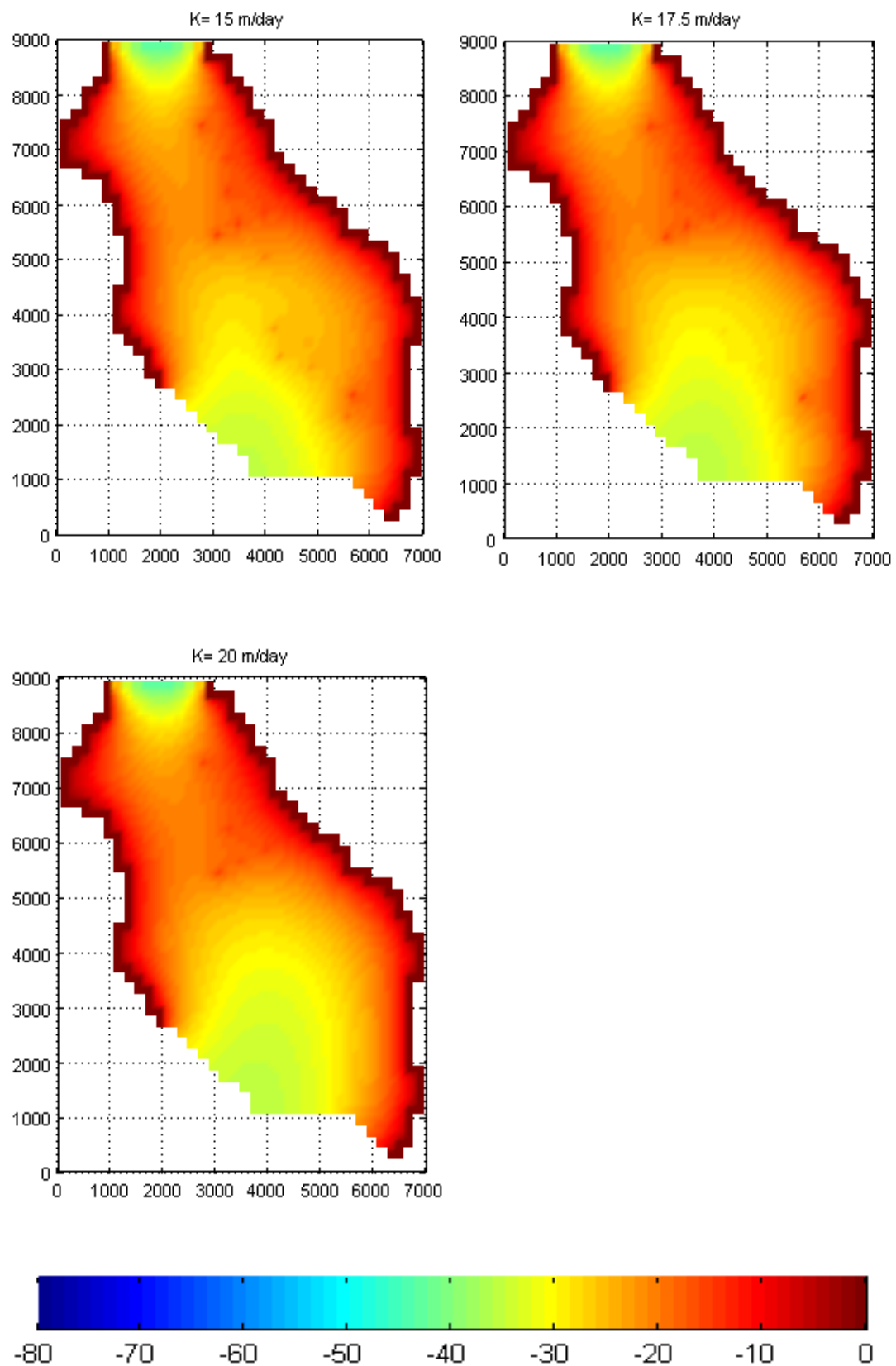
Εικόνα 5.7: Μεταβολή της βιώσιμης απόδοσης συναρτήσει της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα.



Εικόνα 5.8: Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα.



Εικόνα 5.8 (συνέχεια): Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα



Εικόνα 5.8 (συνέχεια): Μεταβολή διεπιφάνειας με τη μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα

5.5 Μεταβολή βιώσιμης απόδοσης με τη μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών

Από τα αποτελέσματα των προηγούμενων παραγράφων διαπιστώνεται ότι για ίδια παροχή άντλησης δεν υφαλμυρίζονται όλα τα πηγάδια στον ίδιο βαθμό. Τα πηγάδια που είναι κοντά στη θάλασσα ή σε αδιαπέρατα όρια είναι πιο εύκολο να υφαλμυριστούν και για αυτό το λόγο αντλούνται με μικρότερες παροχές. Επίσης, τα πηγάδια που είναι κοντά μεταξύ τους, είναι πιθανό να έχουν κοινό κώνο ταπείνωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό που συμβαίνει ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η διεπιφάνεια ανάμεσά τους ανυψώνεται εξαιτίας και των δύο και έτσι φτάνει σε μεγαλύτερο ύψος από ότι θα έφτανε εάν υπήρχε το ένα εκ των δύο. Έτσι όταν τα πηγάδια είναι πυκνά το καθένα έχει βιώσιμη απόδοση πολύ χαμηλότερη από ότι όταν είναι αραιά.

Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η επίδραση της θέσης των πηγαδιών στη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Επιλέχθηκαν τα πηγάδια που με βάση τη βασική βελτιστοποίηση είχαν τις μικρότερες παροχές άντλησης. Τα πηγάδια αυτά παρατηρείται ότι επαληθεύουν την παραπάνω διαπίστωση. Για παράδειγμα τα πηγάδια 30 και 7 (εικόνα 5.1) που έχουν τις χαμηλότερες παροχές άντλησης βρίσκονται πολύ κοντά στη θάλασσα. Το πηγάδι 14 που επίσης είναι πολύ κοντά στη θάλασσα έχει σχετικά χαμηλή τιμή παροχής, αλλά υψηλότερη από άλλα πηγάδια που είναι επίσης κοντά στη θάλασσα και ταυτόχρονα είναι κοντά μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό, τα πηγάδια που επιλέχθηκαν μεταφέρθηκαν σε θέσεις μακριά από τα όρια της θάλασσας και τα αδιαπέρατα όρια και όσο το δυνατόν πιο μακριά από τα υπόλοιπα πηγάδια. Ακόμα, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι δεν επιλέχθηκε να τοποθετηθούν πηγάδια στο δυτικό τμήμα του υδροφορέα λόγω των μεγάλων υψομέτρων που θα καθιστούσαν τις αντλήσεις αντικοινομικές.

Δημιουργήθηκαν 4 διαφορετικές περιπτώσεις. Οι νέες θέσεις και ο αριθμός των πηγαδιών, για κάθε μια από τις περιπτώσεις αυτές, παρουσιάζονται στον πίνακα 9 του παραρτήματος και στις εικόνες 2 έως 5 του παραρτήματος.

Στην 1^η περίπτωση, μετατοπίστηκαν 5 πηγάδια. Αποτέλεσμα αυτής της μετατόπισης είναι μια νέα βιώσιμη απόδοση 1561 m³/day η οποία είναι αυξημένη κατά 2% σε σχέση με τις αρχικές θέσεις. Προκειμένου να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η βιώσιμη απόδοση των πηγαδιών δημιουργήθηκε η περίπτωση 2 στην οποία μετακινήθηκαν 6 φρέατα. Η νέα βιώσιμη απόδοση είναι 1591 m³/day η οποία είναι αυξημένη κατά 3.7% σε σχέση με τις αρχικές θέσεις. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μια 3^η περίπτωση στην οποία τα 5 πηγάδια μετατοπίστηκαν προς το εσωτερικό του υδροφορέα στο μέγιστο βαθμό που αυτό θα ήταν εφικτό (όχι πιο αριστερά από το πιο δυτικό που υπήρχε). Η περίπτωση αυτή έδωσε βιώσιμη απόδοση 1620 m³/day δηλαδή μία αύξηση της τάξης του 5.6% σε σχέση με τις αρχικές θέσεις, η οποία κρίνεται αρκετά σημαντική. Στην 4^η και τελευταία περίπτωση θεωρήθηκε διακοπή των αντλήσεων από τρία πηγάδια. Η βιώσιμη απόδοση που προέκυψε είναι 1525 m³/day δηλαδή μειώθηκε μόνο κατά 0.6% σε σχέση με τις αρχικές θέσεις. Αυτό δείχνει ότι οι θέσεις των πηγαδιών δεν είναι οι βέλτιστες και ότι θα ήταν προτιμότερο να μεταφερθούν. Επίσης, ακόμα και εάν σταματούσε η λειτουργία συγκεκριμένων πηγαδιών,

μιας και συνεπάγεται οικονομικό κόστος, δε θα υπάρχει σημαντική μείωση της βιώσιμης απόδοσης του υδροφορέα.

Είναι ακόμα χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα πηγάδια που άλλαξαν θέσεις αντλούν πολύ περισσότερο από πριν (πίνακας 10 του παραρτήματος).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΣΑΝΤΟΡΙΝΗ

6.1 Εισαγωγή

Με βάση τη θεώρηση μεταβλητής πυκνότητας για τη διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδροφορέα χρησιμοποιώντας το λογισμικό Groundwater Vistas (GV). Το GV είναι ένα γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει τη χρήση ενός μεγάλου εύρους μοντέλων προσομοίωσης της υπόγειας ροής, όπως το Modflow, το MT3DMS, το Seawat κ.α. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Seawat.

Ο υδροφορέας προσομοιώθηκε για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων του υδροφορέα (τροφοδοσία, υδραυλική αγωγιμότητα, αριθμός και θέση πηγαδιών κ.τ.λ.), που είχαν χρησιμοποιηθεί και κατά τη βελτιστοποίηση με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές τροφοδοσίας και υδραυλικής αγωγιμότητας με βάση τις υποθέσεις που έκανε ο Κουράκος Γ. στη διδακτορική διατριβή του. Όλες οι άλλες παράμετροι πήραν τις ίδιες τιμές με την πρώτη περίπτωση. Η δεύτερη περίπτωση είχε μεγαλύτερη τροφοδοσία και μικρότερη (κατά μέσο όρο) υδραυλική αγωγιμότητα. Αυτός ο συνδυασμός παραμέτρων, ήταν αναμενόμενο να οδηγήσει σε μικρότερες συγκεντρώσεις αλάτων σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τιμές των παραμέτρων δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια. Γίνονται διάφορες μελέτες που οδηγούν σε κάποιες τιμές, συχνά διαφορετικές μεταξύ τους. Επίσης, οι διαθέσιμες πληροφορίες για την περιοχή μελέτης ήταν περιορισμένες. Δεν ήταν γνωστός ο ακριβής αριθμός και η θέση των πηγαδιών ούτε και η παροχή άντλησης του καθενός και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός και η θέση των πηγαδιών που χρησιμοποιήθηκαν και στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας (εικόνα 5.1). Οι αντλήσεις από ολόκληρο τον υδροφορέα σήμερα είναι $1.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ (Mantoglou A. & Giannouloroulos P., 2004). Θεωρώντας ότι όλα τα πηγάδια αντλούν με την ίδια παροχή μεταξύ τους και με σταθερή τιμή όλο το χρόνο, η τιμή $1.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$, αντιστοιχεί σε άντληση περίπου $110 \text{ m}^3/\text{d}$. Με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα, δηλαδή η ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί χωρίς να υφαλμυριστεί κανένα πηγάδι, είναι περίπου $0.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$. Δηλαδή περίπου το μισό από την πραγματική τιμή. Αυτό είναι λογικό μιας και σήμερα αντλείται από αρκετά πηγάδια υφάλμυρο νερό και πραγματοποιείται αφαλάτωση.

Η διαδικασία της προσομοίωσης, υλοποιείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο πραγματοποιείται προσομοίωση του υδροφορέα, χωρίς αντλήσεις, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας, στην οποία δεν θα μεταβάλλονται οι τιμές του υδραυλικού φορτίου και η συγκέντρωση της άλμης. Το χρονικό αυτό διάστημα θεωρήθηκε ότι είναι 2000 έτη. Στην κατάσταση αυτή, η θάλασσα έχει διεισδύσει ως ένα σημείο και δεν

πρόκειται να μετακινηθεί περισσότερο προς το εσωτερικό του υδροφορέα αν δεν μεταβληθούν οι συνθήκες. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για μια περίοδο εντατικής άντλησης μέσω της οποίας ο υδροφορέας θα φτάσει σε μια νέα κατάσταση, η οποία θα προσεγγίζει την κατάσταση του υδροφορέα σήμερα. Στην εργασία αυτή, θεωρήθηκε ότι ο υδροφορέας της Σαντορίνης αντλείται εντατικά για 50 έτη. Επειδή δεν είναι γνωστή η πραγματική παροχή άντλησης κάθε πηγαδιού για αυτά τα έτη, ο υδροφορέας προσομοιώθηκε, για κάθε περίπτωση, για διάφορες τιμές αντλήσεων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για υψηλές τιμές αντλήσεων ο υδροφορέας δεν έχει προλάβει να φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας μέσα στα 50 έτη. Στο τρίτο στάδιο, χρησιμοποιείται ως αρχική συνθήκη η σημερινή κατάσταση του υδροφορέα και εφαρμόζονται διάφορες τιμές για τις μελλοντικές αντλήσεις ώστε να διαπιστωθεί ποιες θα οδηγούσαν σε υφαλμύριση και ποιες όχι. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής υλοποιήθηκαν τα δύο πρώτα στάδια.

6.2 Εισαγωγή παραμέτρων και γενικές ρυθμίσεις προσομοιώσεων

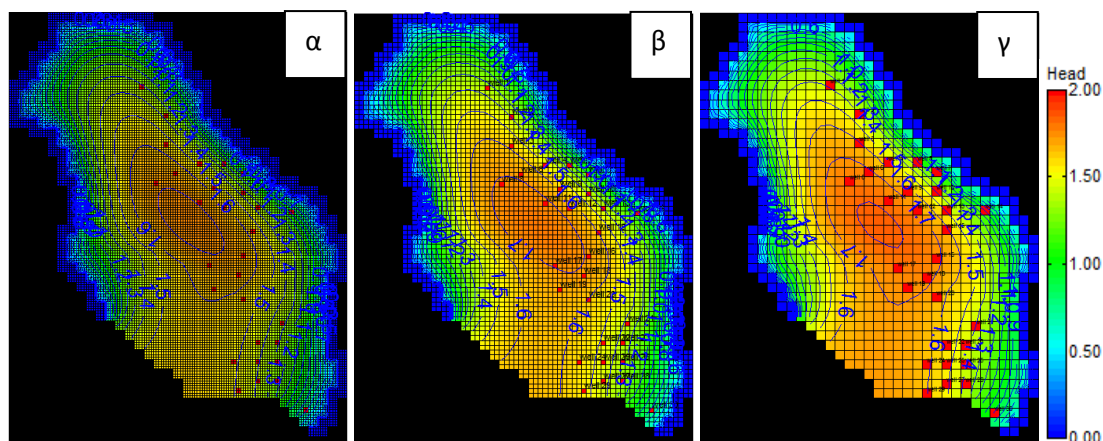
6.2.1 Διακριτοποίηση

Για να προσομοιωθεί ο υδροφορέας είναι απαραίτητο να επιλεγεί πρώτα η χωρική και χρονική διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης, να εισαχθούν οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι τιμές των παραμέτρων του υδροφορέα καθώς και να γίνει ένα σύνολο ρυθμίσεων (π.χ. να οριστεί η συγκέντρωση αλάτων του αλμυρού νερού, πληροφορίες για τη χρονική διακριτοποίηση κ.τ.λ.).

Η οριζόντια διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τη χρήση γραμμών και στηλών που δημιουργούν έναν ομοίμορφο κάναβο. Η κατακόρυφη διακριτοποίηση πραγματοποιείται με τη δημιουργία επιπέδων.

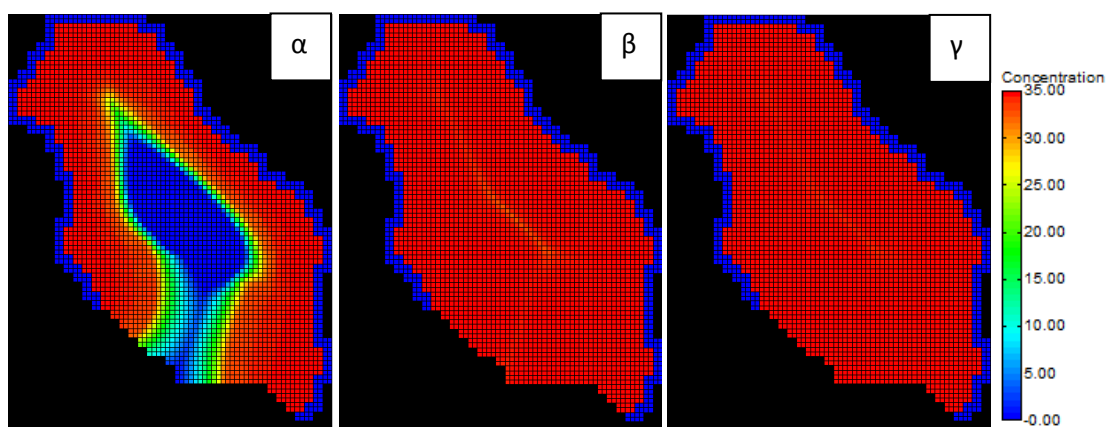
Η εικόνα της περιοχής μελέτης αντιστοιχεί σε διαστάσεις 9000×7000 m. Προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη διακριτοποίηση του υδροφορέα πραγματοποιήθηκε έλεγχος. Ως προς την οριζόντια διακριτοποίηση εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές λύσεις: κάναβος 180×140 με διαστάσεις κελιών 50×50 m, κάναβος 90×70 με διαστάσεις κελιών 100×100 m και κάναβος 45×35 με διαστάσεις κελιών 200×200 m. Τα κριτήρια επιλογής ήταν η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή των αποτελεσμάτων και τη μεταβολή των παραμέτρων του μοντέλου. Επιλέχθηκε η αραιότερη διακριτοποίηση η οποία δε διαφέρει σημαντικά σε αποτελέσματα από την αμέσως πυκνότερη, εφόσον ο απαιτούμενος χρόνος το επιτρέπει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η παραγωγή αποτελεσμάτων με διακριτοποίηση 50×50 m ήταν απαγορευτική ως προς τον χρόνο που απαιτούσε και έτσι επιλέχθηκε η αμέσως αραιότερη δηλαδή ένας κάναβος 90 σειρών και 70 στηλών με διαστάσεις κελιών 100×100 m. Η διακριτοποίηση 200×200 απορρίφθηκε καθώς τα αποτελέσματά της διέφεραν σημαντικά από αυτά της διακριτοποίησης 100×100.

Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση στα αποτελέσματα του ισοδύναμου πιεζομετρικού φορτίου για τις διακριτοποιήσεις 50×50, 100×100 και 200×200 για την 1^η περίπτωση, το 1^ο στάδιο προσομοίωσης (2000 έτη, χωρίς αντλήσεις) και για το 1^ο επίπεδο του υδροφορέα.



Εικόνα 6.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων διακριτοποιήσεων: α) διακριτοποίηση 50×50 m, β) διακριτοποίηση 100×100 m και γ) διακριτοποίηση 200×200 m

Για την επιλογή της κατακόρυφης διακριτοποίησης πραγματοποιήθηκε επίσης δοκιμή. Θεωρήθηκε ότι η βάση ενός επιπέδου είναι η οροφή του αμέσως κατώτερου επιπέδου. Εφόσον δεν υπήρχαν επαρκείς πληροφορίες ως προς το βάθος του υδροφορέα, αρχικά επιλέχθηκε να θεωρηθεί 80 m όπως θεωρήθηκε και στην προσομοίωση με το modflow. Στη Σαντορίνη όμως, δημιουργείται ένας φακός γλυκού νερού που επιπλέει πάνω από το υφάλμυρο νερό και δεν συναντάται αδιαπέρατο υπόβαθρο. Με τη θεώρηση των 80 m και τις υπόλοιπες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται, ο φακός αυτός δεν κλείνει. Υπήρχαν δηλαδή τμήματα στο κατώτερο επίπεδο που ενώ θα έπρεπε να έχουν συγκέντρωση άλμης 35 kg/m^3 , είχαν σημαντικά μικρότερες τιμές. Έτσι, δοκιμάστηκε το βάθος των 120 m με το οποίο ο φακός πρακτικά έκλεινε, χωρίς να έχει ουσιαστική διαφορά από την προσομοίωση με βάθος 140 m.



Εικόνα 6.2: Φακός γλυκού νερού για πάχος υδροφορέα: α) 80 m, β) 120 m και γ) 140 m στο κατώτερο επίπεδο.

Ως προς τον αριθμό των επιπέδων και το πάχος τους δοκιμάστηκαν και πάλι διάφορες τιμές: 12 επίπεδα με πάχος 10 m, 15 επίπεδα με πάχος 8 m και 24 επίπεδα με πάχος 5 m. Με κριτήριο κυρίως τον χρόνο που απαιτείται αλλά και την κατά το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν 15 επίπεδα πάχους 8 m.

6.2.2 Αρχικές και Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας του ρευστού με το περιβάλλον του, δηλαδή τους άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς ή υδάτινους όγκους.

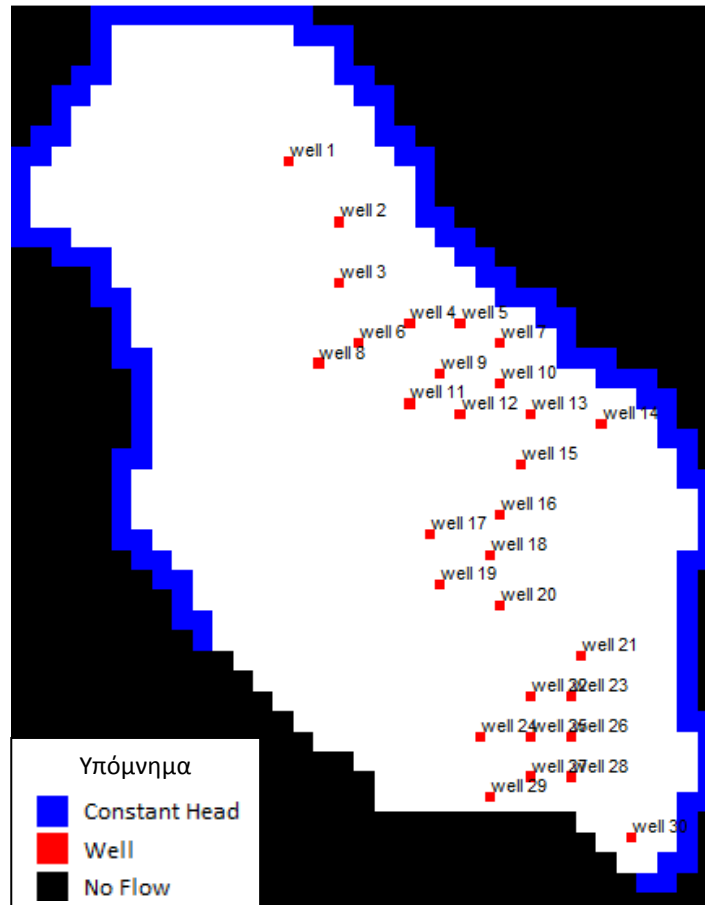
Ο υδροφορέας της Σαντορίνης επικοινωνεί ανατολικά και δυτικά με τη θάλασσα. Επίσης, παρότι στο βόρειο όριο υπάρχει στεριά, το μήκος της είναι σχετικά στενό. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι το αλμυρό νερό ρέει υπογείως και φθάνει ως την επιφάνεια σχεδόν του εδάφους. Άρα πρακτικά είναι σαν να συνορεύει με τη θάλασσα. Το νότιο όριο είναι αδιαπέρατο εξαιτίας του φυλλιτικού υποβάθρου. Στα όρια σταθερού υδραυλικού φορτίου, δηλαδή στα όρια με τη θάλασσα αποδόθηκε η τιμή 0 για το ισοδύναμο υδραυλικό φορτίο και η τιμή 35 kg/m^3 για τη συγκέντρωση της άλμης. Οι τιμές αυτές δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (steady state boundary condition). Τα αδιαπέρατα όρια είναι όρια σταθερής ροής, όπου η ροή θεωρείται μηδενική. Για τα κελιά αυτά, δεν υπολογίζεται υδραυλικό φορτίο και περιεκτικότητα σε άλατα. Για τον λόγο αυτό, εκτός από τα αδιαπέρατα όρια, χαρακτηρίστηκαν έτσι και τα κελιά που δεν συνορεύουν άμεσα με τον υδροφορέα, ώστε να περιορισθεί ο αριθμός των ενεργών κελιών τα οποία απαιτούν υπολογισμό της συγκέντρωσης και του πιεζομετρικού φορτίου.

Τα κελιά στα οποία βρίσκονται τα πηγάδια, θεωρούνται και αυτά όρια σταθερής ροής. Το Seawat θεωρεί ότι αρνητική τιμή για παροχή του πηγαδιού αντιστοιχεί σε άντληση και θετική σε φόρτιση. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα να καθοριστεί εάν η άντληση είναι μόνιμη ή μεταβάλλεται. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, τα πηγάδια αντλούσαν μονίμως με την ίδια παροχή άντλησης. Όπως αναφέρει στη διατριβή του ο Γ. Κουράκος το πραγματικό βάθος άντλησης των γεωτρήσεων είναι 1-5 μέτρα κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Με δεδομένο ότι το Seawat θεωρεί ότι η άντληση είναι περίπου στη μέση του επιπέδου που επιλέγουμε, θεωρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια αντλούν από το 1^ο επίπεδο. Οι οριακές συνθήκες του υδροφορέα παρουσιάζονται στην εικόνα 6.3.

Για τα ενεργά κελιά θεωρήθηκε ως αρχική συνθήκη για το πιεζομετρικό φορτίο και τη συγκέντρωση η τιμή 0.

6.2.3 Πορώδες, Αποθηκευτικότητα και Διασπορά

Από βιβλιογραφική έρευνα, επιλέχθηκαν οι τιμές $S=0.01$ και $S_v=0.01$ για την αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και η τιμή $P=0.3$ για το πορώδες. Ο ορισμός των μεγεθών αυτών έχει γίνει στο κεφάλαιο 2.2.



Εικόνα 6.3: Οριακές συνθήκες υδροφορέα της Σαντορίνης στο επίπεδο 1.

Η μηχανική διασπορά είναι μία διεργασία μέσω της οποίας αναμιγνύεται το αλμυρό με το γλυφό νερό του υδροφορέα. Περιγράφεται με τρεις συντελεστές: Τον συντελεστή κατά μήκος διασποράς, που χαρακτηρίζει το κύριο φαινόμενο της εξάπλωσης των ρύπων ως αποτέλεσμα των διαφορών στον χρόνο διάχυσης των μορίων, κατά μήκος των γραμμών ροής. Τον συντελεστή εγκάρσιας διασποράς, που χαρακτηρίζει ένα μικρότερης έντασης φαινόμενο που προκαλείται από τις μετακινήσεις μορίων μεταξύ γειτονικών γραμμών ροής. Και τον συντελεστή κατακόρυφης διασποράς, που προκαλείται από την κίνηση των μορίων στην κατακόρυφη διεύθυνση (Λατινόπουλος Π. Δ., 1986).

Οι συντελεστές διασποράς έχουν διαστάσεις μήκους στο τετράγωνο προς χρόνο [L^2/T]. Ο προσδιορισμός των συντελεστών αυτών είναι αρκετά δύσκολος. Ερευνώντας την υπάρχουσα βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν για τον υδροφορέα της Σαντορίνης οι τιμές 5, 0.5 και 0 m^2/d αντίστοιχα.

6.2.4 Ρυθμίσεις μοντέλου

Στη συνέχεια ορίσθηκε η θέση αποθήκευσης των αρχείων και οι μονάδες μέτρησης για το Modflow (τα μέτρα ως μονάδα μήκους και οι ημέρες ως μονάδα χρόνου). Ακόμα καθορίστηκε η μέγιστη συγκέντρωση άλμης, δηλαδή η συγκέντρωση άλμης του θαλασσινού

νερού, που είναι 35 kg/m^3 . Επίσης, ορίσθηκε ο λόγος των συγκεντρώσεων θαλασσινού και γλυκού νερού ως 0.025.

Ακόμα, καθορίσθηκε το είδος των επιπέδων. Το GV προτείνει να οριστούν τα επίπεδα ως περιορισμένα εκτός από το πρώτο. Με τον τρόπο αυτό επιταχύνεται η σύγκλιση του μοντέλου και αποφεύγεται το ενδεχόμενο να ξεραθούν κάποια κελιά.

Μία από τις βασικότερες ρυθμίσεις είναι ο ορισμός του μήκους της περιόδου προσομοίωσης. Κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης, διατηρούνται σταθερές οι παροχές αλλά και οι ιδιότητες του υδροφορέα όπως η τροφοδοσία. Για μόνιμη άντληση και τροφοδοσία ορίζεται μόνο μία περίοδος προσομοίωσης, ενώ για μη μόνιμη ο αριθμός των περιόδων καθορίζεται από το χρήστη. Η περίοδος προσομοίωσης για το πρώτο στάδιο ήταν 2000 έτη (730000 μέρες) και για το δεύτερο στάδιο 50 έτη (18250 μέρες).

Επιπροσθέτως, επιλέχθηκαν οι μονάδες του MT3DMS. Για τον χρόνο ήταν ημέρες (D), για το μήκος μέτρα (M) και για τη μάζα κιλά (Kg). Ορίσθηκε ο μέγιστος αριθμός βημάτων μεταφοράς σε κάθε βήμα ροής καθώς και το μέγιστο χρονικό βήμα. Οι τιμές αυτές δόθηκαν εμπειρικά ως 10000 και 100 αντίστοιχα προκειμένου να συγκλίνει το μοντέλο και να μπορεί να γίνει προσομοίωση για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επίσης, έγινε η ρύθμιση ώστε να μην ληφθούν υπόψη αντιδράσεις με το έδαφος. Τέλος, ορίσθηκε ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε που είναι το Seawat, δημιουργήθηκαν τα δεδομένα και κατόπιν ξεκίνησε η προσομοίωση.

-6.3 Προσομοίωση υδροφορέα – Περίπτωση 1η

Πριν την προσομοίωση του υδροφορέα πρέπει να ορισθούν για κάθε περίπτωση οι τιμές της τροφοδοσίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα. Η πρώτη περίπτωση δημιουργήθηκε κυρίως για να είναι δυνατή η σύγκριση με τα αποτελέσματα του Modflow. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και τροφοδοσίας με το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας.

Η τιμή της τροφοδοσίας ήταν $N = 40.25 \text{ mm/y} \approx 0.0001 \text{ m/d}$. Με δεδομένο ότι τα ενεργά κελιά του υδροφορέα είναι 54960, τα κελιά σταθερού πιεζομετρικού φορτίου 7500, και η διακριτοποίηση $100 \times 100 \text{ m}$ για τα 15 επίπεδα, η συνολική έκταση του υδροφορέα είναι:

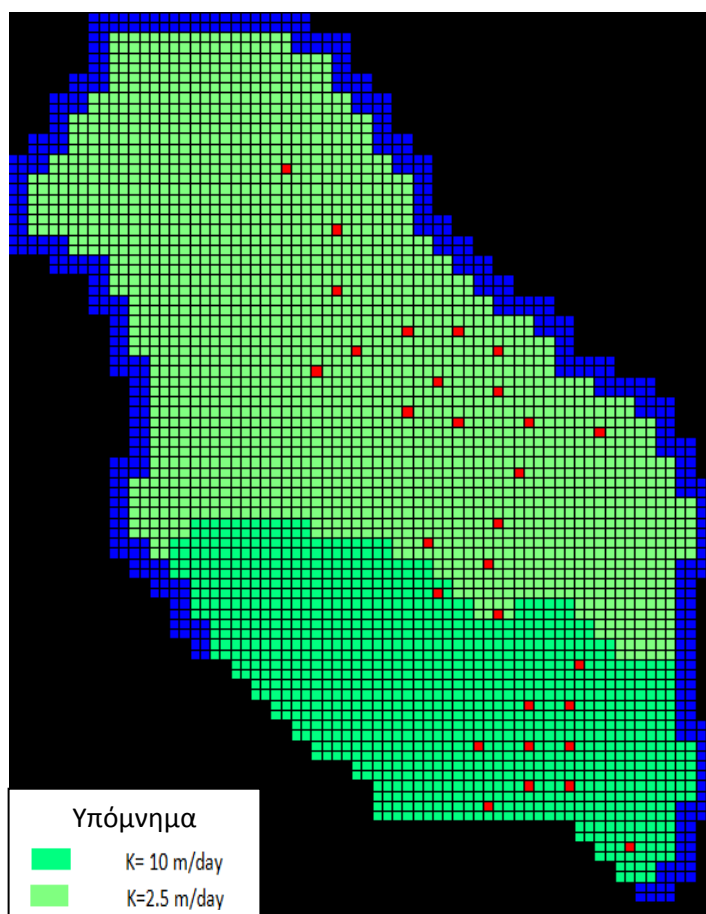
$E = (\text{ενεργά κελιά} - \text{κελιά σταθερού πιεζομετρικού φορτίου}) / \text{αριθμό επιπέδων} \cdot \text{πραγματικό εμβαδόν κελιού}$

$$\Rightarrow E = (54960 - 7500) / 15 \cdot 100 \cdot 100 = 31.64 \cdot 10^6 \text{ m}^2.$$

Συνεπώς, η συνολική τροφοδοσία του υδροφορέα είναι:

$$\text{Νολ.} = E \cdot N = 31.64 \cdot 10^6 \cdot 40.25 / 1000 = 1273510 \text{ m}^3/\text{y}$$

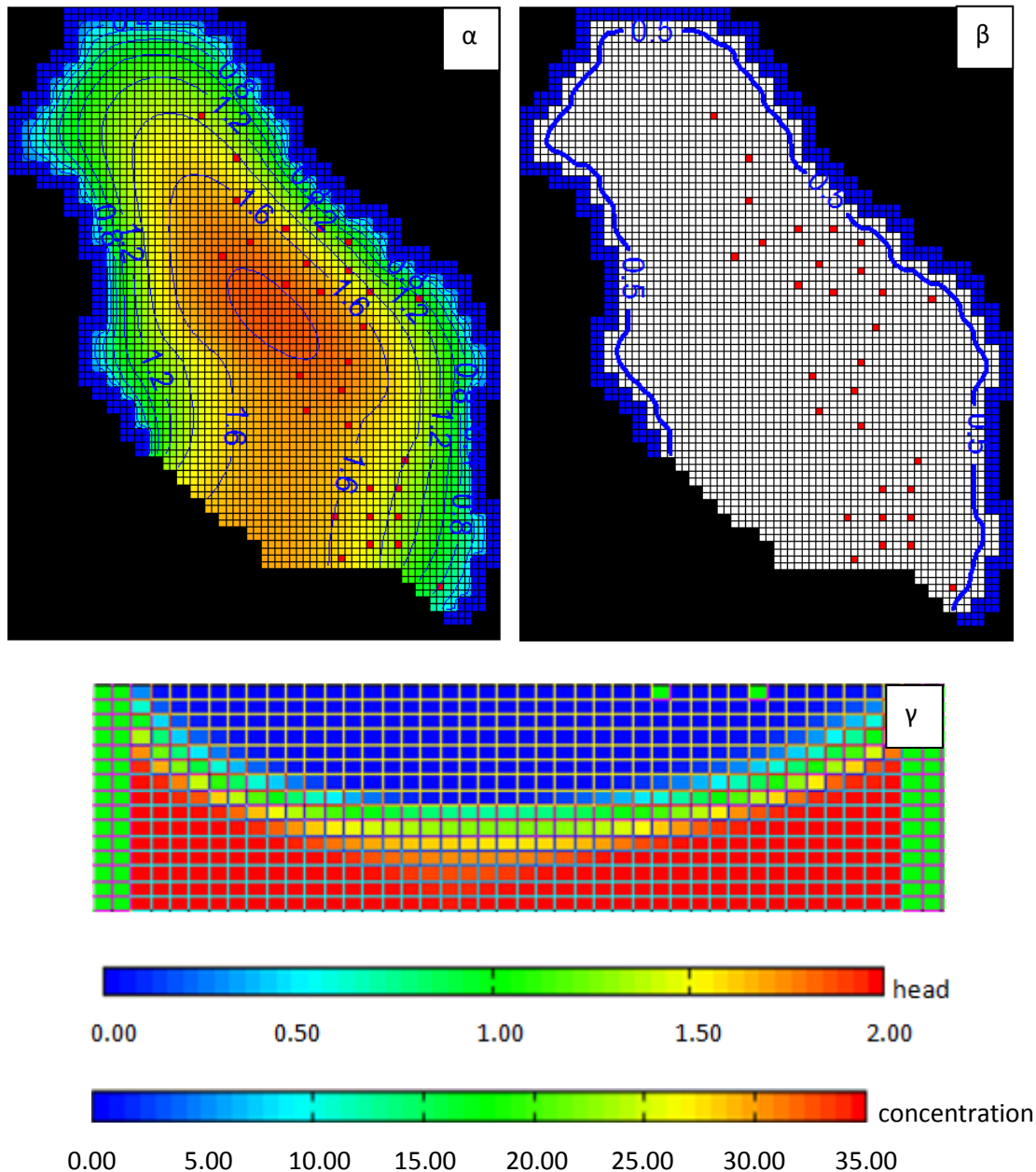
Η υδραυλική αγωγιμότητα χωρίστηκε σε 2 ζώνες. Η μία έχει τιμή 10 m/d και η άλλη 2.5 m/dόπως φαίνονται στην εικόνα 6.4.



Εικόνα 6.4: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας-1^η περίπτωση

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για περίοδο 2000 ετών, για το πρώτο επίπεδο του υδροφορέα, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.5. Στις εικόνες 6.5α και 6.5β ο υδροφορέας είναι σε κάτοψη ενώ στην 6.5γ είναι σε τομή, στη γραμμή 34. Στην τομή απεικονίζονται και τα δύο πηγάδια που βρίσκονται στη συγκεκριμένη γραμμή ενώ επιλέχθηκε να απεικονιστεί το 1^ο επίπεδο καθώς οι αντλήσεις γίνονται από αυτό και συνεπώς εάν αυτό έχει υφάλμυρο νερό, υφάλμυρο νερό θα αντλεί και το πηγάδι. Για τη συγκέντρωση επιλέχθηκε η ισοϋψής των 0.5 kg/m³ που θεωρείται όριο για το πόσιμο νερό (παράγραφος 2.4.1). Παρατηρώντας τα αποτελέσματα (πίνακας 6.1), διαπιστώνεται ότι δεν υφαλμυρίζεται κανένα πηγάδι και ότι οι συγκεντρώσεις σε όλες τις θέσεις των πηγαδιών είναι μηδενικές εκτός από το πηγάδι με αριθμό 30 στο οποίο η συγκέντρωση είναι 0.02 kg/m³. Σημειώνεται ότι στο τέλος αυτής της χρονικής περιόδου, ο υδροφορέας έχει φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας ως αρχικές συνθήκες τα αποτελέσματα από το 1^ο στάδιο (2000 έτη, χωρίς αντλήσεις), προσομοιώθηκε ο υδροφορέας για 50 έτη για διάφορες τιμές αντλήσεων. Συνήθως οι αντλήσεις κυμαίνονται από το 20-80% της τροφοδοσίας του υδροφορέα. Επειδή όμως ορισμένα πηγάδια υφαλμυρώνονταν και για πολύ μικρές



Εικόνα 6.5 Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης χωρίς αντλήσεις για την 1^η περίπτωση για α) το πιεζομετρικό φορτίο σε κάτοψη, στο επίπεδο 1, β) τις συγκεντρώσεις σε κάτοψη στο επίπεδο 1 και γ) τις συγκεντρώσεις σε τομή στην 32^η γραμμή.

αντλήσεις, έγιναν προσομοιώσεις για παροχές άντλησης από 10-80% της τροφοδοσίας. Από τα αποτελέσματα (πίνακας 6.1), διαπιστώνεται ότι αύξηση των αντλήσεων οδηγεί σε αύξηση της υφαλμύρισης. Επίσης, ο υδροφορέας είναι ευαίσθητος σε υφαλμύριση καθώς ακόμα και για αντλήσεις που αντιστοιχούν στο 10% της τροφοδοσίας ($12 \text{ m}^3/\text{d}$ το κάθε πηγάδι) αντλείται υφάλμυρο νερό από 3 πηγάδια, ενώ για αντλήσεις 80% ($93 \text{ m}^3/\text{d}$) παρέμεινε χωρίς υφαλμύριση μόνο ένα πηγάδι.

Στη συνέχεια, έγινε προσομοίωση θεωρώντας ότι ο υδροφορέας αντλούνταν για 50 έτη με την πραγματική σημερινή τιμή των αντλήσεων που είναι $1.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$ ή $110 \text{ m}^3/\text{d}$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί περίπου στο 94% της τροφοδοσίας του υδροφορέα και οδήγησε σε υφαλμύριση όλων των πηγαδιών.

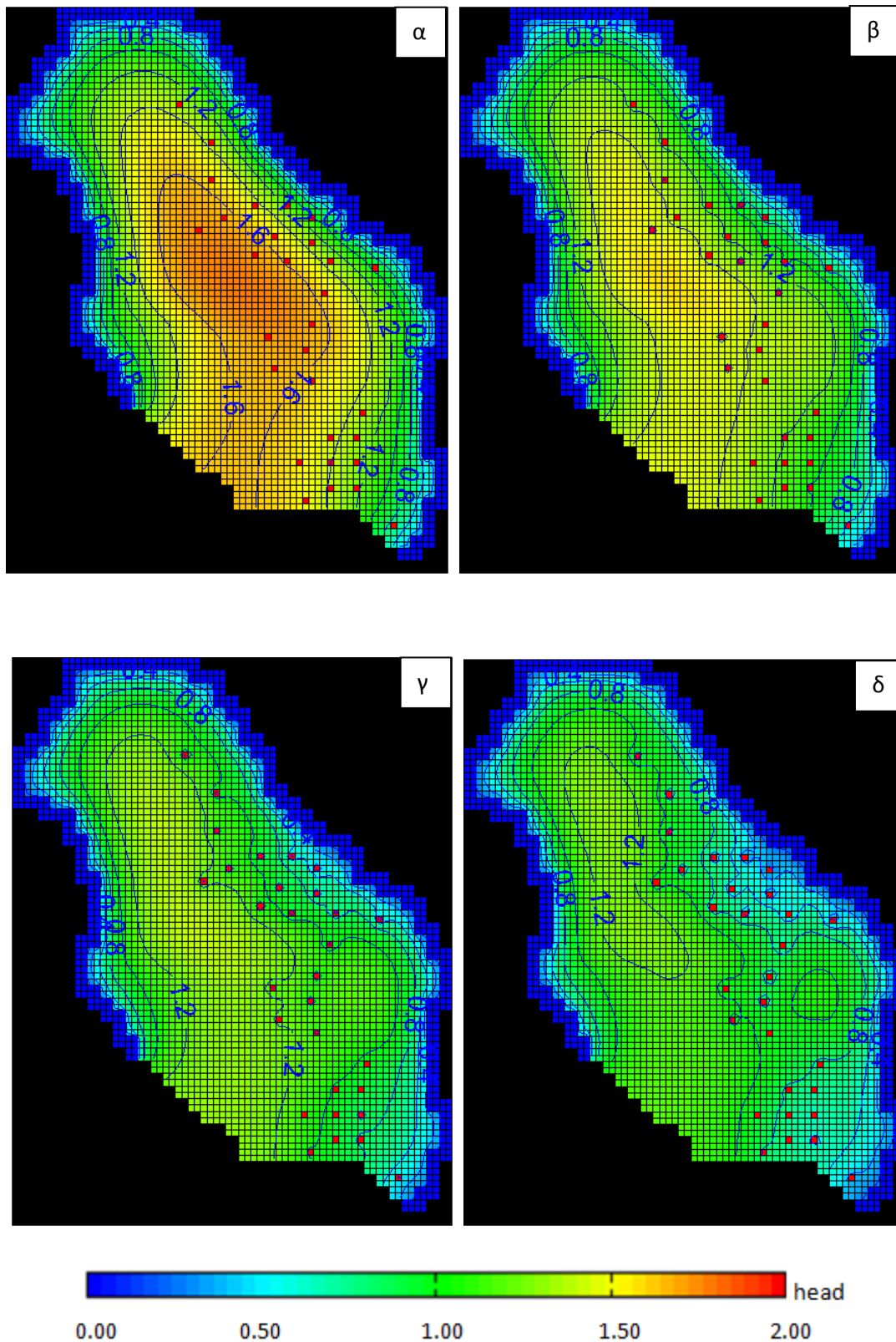
Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις οι αντλήσεις ήταν ισομερώς κατανεμημένες στα πηγάδια και στον χρόνο. Στη συνέχεια, ο υδροφορέας προσομοιώθηκε θεωρώντας ότι για 50 έτη πραγματοποιούνταν άντληση με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας. Τα αποτελέσματα αυτά, ήταν διαφορετικές τιμές για κάθε πηγάδι και συνολικά αντιστοιχούν περίπου στο 44% της τροφοδοσίας του υδροφορέα. Το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας έδινε αυτές τις τιμές ως βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα απόδοση δηλαδή, που δεν υφαλμύριζε κανένα πηγάδι. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας δείχνει ότι δεν υφαλμυρίζονται μόνο 4 πηγάδια δηλαδή περίπου όσα δε θα υφαλμυρίζονταν και με ομοιόμορφη κατανομή των αντλήσεων. Συνεπώς τα δύο μοντέλα δεν συμφωνούν μεταξύ τους. Θεωρείται καλύτερο ο σχεδιασμός να βασιστεί στο μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας καθώς είναι από τη μεριά της ασφάλειας και περιγράφει καλύτερα τη φυσική πραγματικότητα.

Στον πίνακα 6.1, δίνονται οι τιμές των συγκεντρώσεων σε kg/m^3 , για κάθε πηγάδι και για κάθε τιμή άντλησης του υδροφορέα. Με γαλάζιο χρώμα είναι οι τιμές που ξεπερνούν το όριο αλατότητας ενώ στην τελευταία σειρά αναγράφεται ο αριθμός των υφάλμυρων πηγαδιών για κάθε τιμή αντλήσεων.

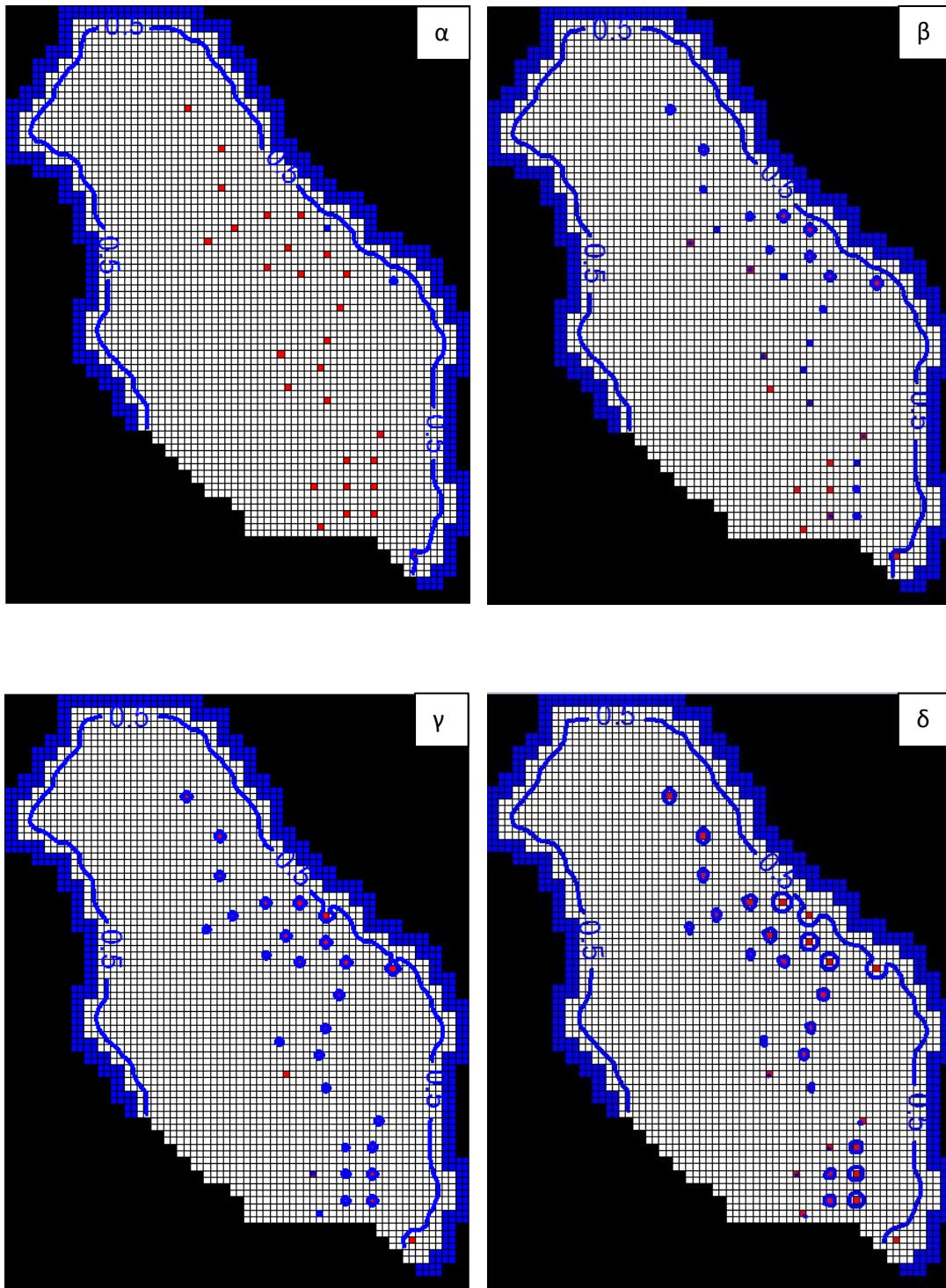
Επίσης, στις εικόνες 6.6 έως 6.8 παρουσιάζονται το πιεζομετρικό φορτίο του υδροφορέα σε κάτοψη και η συγκέντρωση σε κάτοψη και τομή για ένα σύνολο περιπτώσεων αντλήσεων. Παρατηρώντας αυτές τις εικόνες, γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνονται οι αντλήσεις τόσο μειώνεται το πιεζομετρικό φορτίο. Αυτό είναι λογικό καθώς αφαιρείται γλυκό νερό από τον υδροφορέα. Επίσης, με την αύξηση των αντλήσεων η συγκέντρωση αλάτων στο ανώτερο επίπεδο αυξάνεται σε τοπικό επίπεδο δηλαδή στις θέσεις των πηγαδιών ενώ η ζώνη μεταβλητής πυκνότητας ανεβαίνει προς την επιφάνεια του υδροφορέα.

Πίνακας 6.1: Συγκεντρώσεις άλατος σε kg/m³ - 1^η περίπτωση

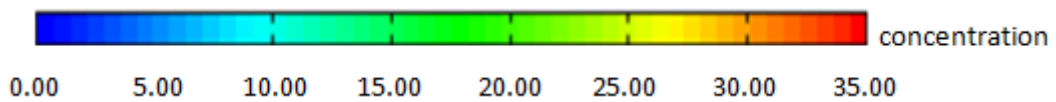
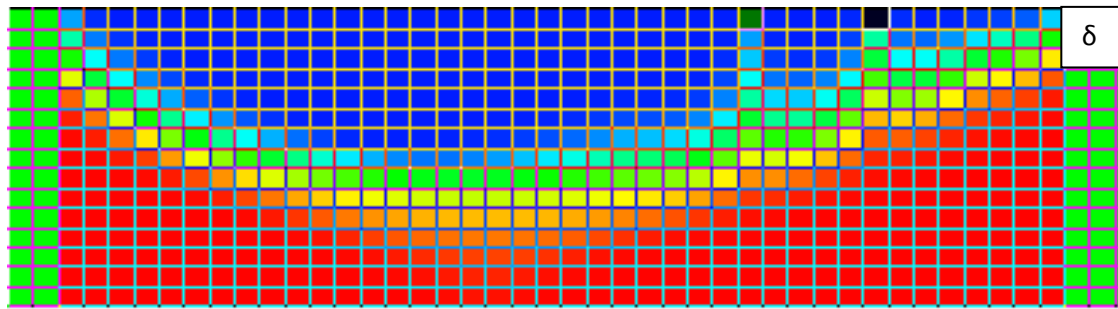
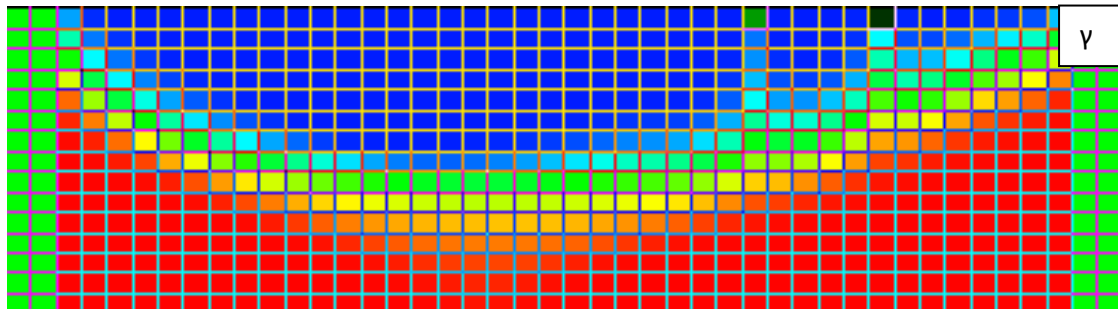
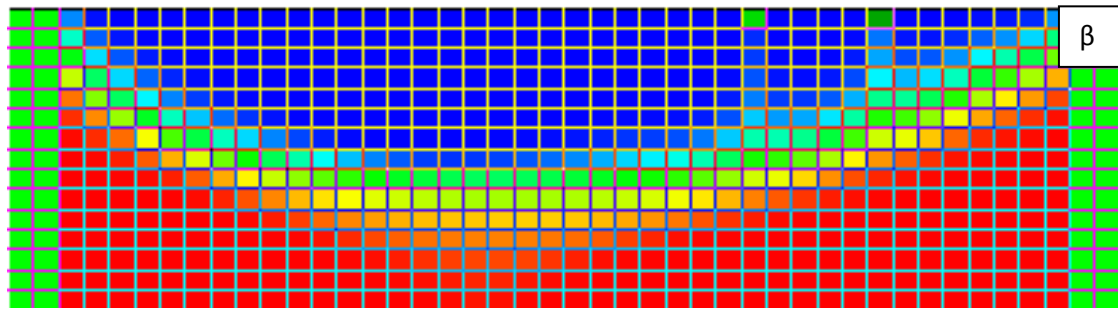
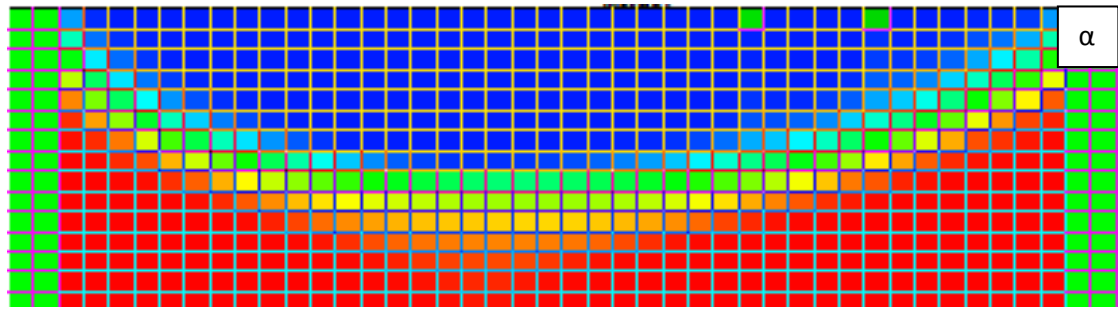
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΘΕΣΕΙΣ ΠΗΓΑΔΙΩΝ		ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 12 m ³ /d (10%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 23 m ³ /d (20%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 35 m ³ /d (30%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 41 m ³ /d (35%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 47 m ³ /d (40%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 58 m ³ /d (50%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 70 m ³ /d (60%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 81 m ³ /d (70%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 93 m ³ /d (80%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΓΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ 110 m ³ /d (94%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΡΤΙΜ ΑΝΤΛΗΣΗ (44%)
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ												
1	16	28	0	0.16	0.57	1.01	1.25	1.5	1.98	2.53	3.05	3.61	4.41	3.31
2	22	33	0	0.14	0.53	0.96	1.18	1.41	1.86	2.38	2.87	3.42	4.2	2.02
3	28	33	0	0.05	0.27	0.53	0.67	0.82	1.1	1.43	1.75	2.1	2.62	1.34
4	32	40	0	0.09	0.42	0.79	0.98	1.19	1.61	2.10	2.56	3.09	3.85	0.89
5	32	45	0	0.38	1.18	2.1	2.56	3.06	4.04	5.18	6.26	7.47	9.22	1.07
6	34	35	0	0.03	0.18	0.4	0.51	0.64	0.87	1.16	1.43	1.74	2.2	0.85
7	34	49	0	0.68	1.85	3.19	3.87	4.61	6.05	7.67	9.16	10.78	13.01	0.94
8	36	31	0	0.03	0.17	0.36	0.45	0.55	0.74	0.96	1.17	1.42	1.78	1.28
9	37	43	0	0.05	0.31	0.62	0.78	0.97	1.34	1.78	2.22	2.72	3.45	0.59
10	38	49	0	0.18	0.69	1.28	1.6	1.94	2.64	3.47	4.25	5.14	6.45	0.83
11	40	40	0	0.02	0.16	0.35	0.45	0.55	0.76	1.00	1.24	1.51	1.91	0.78
12	41	45	0	0.03	0.23	0.47	0.6	0.74	1.02	1.35	1.68	2.06	2.62	0.65
13	41	52	0	0.17	0.66	1.2	1.48	1.79	2.39	3.10	3.77	4.51	5.61	1.06
14	42	59	0	0.89	2.18	3.49	4.13	4.8	6.06	7.46	8.72	10.03	11.76	2.49
15	46	51	0	0.05	0.27	0.53	0.68	0.83	1.13	1.48	1.81	2.19	2.73	0.87
16	51	49	0	0.03	0.18	0.4	0.52	0.64	0.88	1.16	1.43	1.74	2.19	0.71
17	53	42	0	0.02	0.16	0.35	0.45	0.55	0.74	0.96	1.17	1.4	1.75	0.91
18	55	48	0	0.03	0.19	0.41	0.53	0.66	0.9	1.19	1.47	1.79	2.27	0.61
19	58	43	0	0.01	0.05	0.11	0.14	0.17	0.23	0.31	0.39	0.47	0.61	0.84
20	60	49	0	0.03	0.19	0.37	0.47	0.57	0.76	0.98	1.19	1.43	1.79	0.75
21	65	57	0	0.03	0.14	0.32	0.42	0.52	0.72	0.94	1.17	1.44	1.85	0.95
22	69	52	0	0.02	0.09	0.22	0.29	0.37	0.52	0.72	0.91	1.15	1.53	0.66
23	69	56	0	0.04	0.18	0.39	0.52	0.65	0.91	1.23	1.57	1.97	2.6	0.62
24	73	47	0	0.01	0.06	0.14	0.18	0.23	0.33	0.45	0.57	0.71	0.93	0.63
25	73	52	0	0.02	0.11	0.26	0.36	0.46	0.66	0.93	1.2	1.54	2.11	0.37
26	73	56	0	0.05	0.22	0.49	0.65	0.81	1.13	1.57	2.02	2.59	3.42	0.53
27	77	52	0	0.02	0.12	0.29	0.39	0.5	0.73	1.02	1.32	1.71	2.35	0.41
28	77	56	0	0.07	0.26	0.56	0.73	0.91	1.228	1.75	2.24	2.87	3.74	0.32
29	79	48	0	0.01	0.07	0.17	0.24	0.3	0.44	0.61	0.79	1	1.35	0.58
30	83	62	0.02	0.9	1.9	3.08	3.66	4.25	5.229	6.49	7.64	8.99	10.98	0.03
ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ			0	3	8	12	19	25	27	28	29	29	30	26



Εικόνα 6.6: Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου για την 1^η περίπτωση, στο 1^ο επίπεδο, σε κάτοψη για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (40%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (70%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (94%).



Εικόνα 6.7: Κατανομή συγκέντρωσης για την 1^η περίπτωση, στο 1^ο επίπεδο, σε κάτοψη για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (40%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (70%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (94%). Απεικονίζεται η ισούψης των 0.5 kg/m³.








Εικόνα 6.8: Κατανομή συγκέντρωσης για την 1^η περίπτωση, στην 32 γραμμή, σε τομή για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (40%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (70%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (94%).

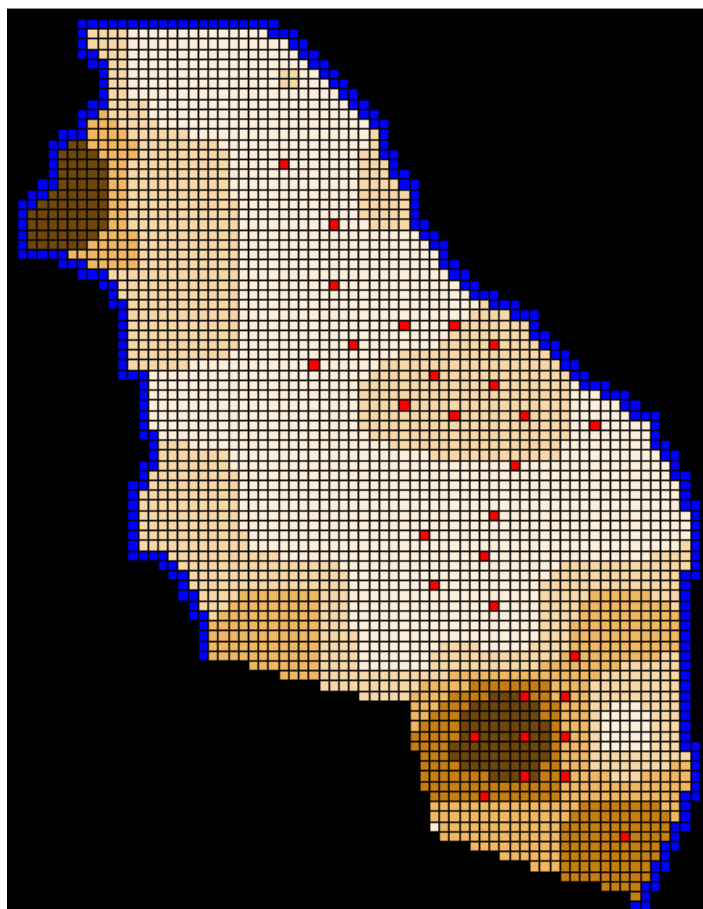
6.4 Προσομοίωση υδροφορέα – Περίπτωση 2η

Η περίπτωση αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας όμοιες με αυτές που χρησιμοποίησε ο Κουράκος Γ. στη διδακτορική διατριβή του και τιμές τροφοδοσίες επίσης περίπου όμοιες με αυτήν την πηγή (Κουράκος Γ., 2009). Στόχος ήταν να ελεγχθεί εάν η θεώρηση διαφορετικών παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα ως προς την υφαλμύριση του υδροφορέα.

Στον πίνακα 6.2 και στην εικόνα 6.9 φαίνονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που εισήχθησαν.

Πίνακας 6.2: Υδραυλική αγωγιμότητα – 2^η περίπτωση




ΖΩΝΗ	ΕΥΡΟΣ Κ	Κ	ΧΡΩΜΑ ΖΩΝΗΣ
1	1	1	
2	1.001-3.500	2.25	
3	3.501-7.500	5.5	
4	7.501-12.500	10	
5	12.501-18.750	15.625	

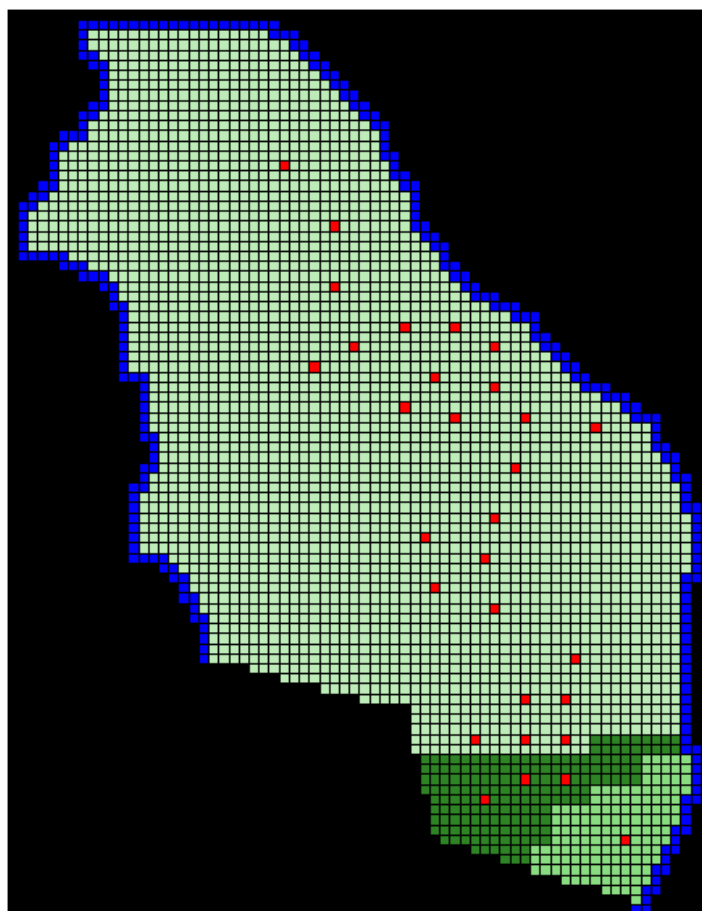


Εικόνα 6.9: Ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας-2^η περίπτωση

Η τροφοδοσία του υδροφορέα για την περίπτωση αυτή, δίνεται στον πίνακα 6.3 και στην εικόνα 6.10.

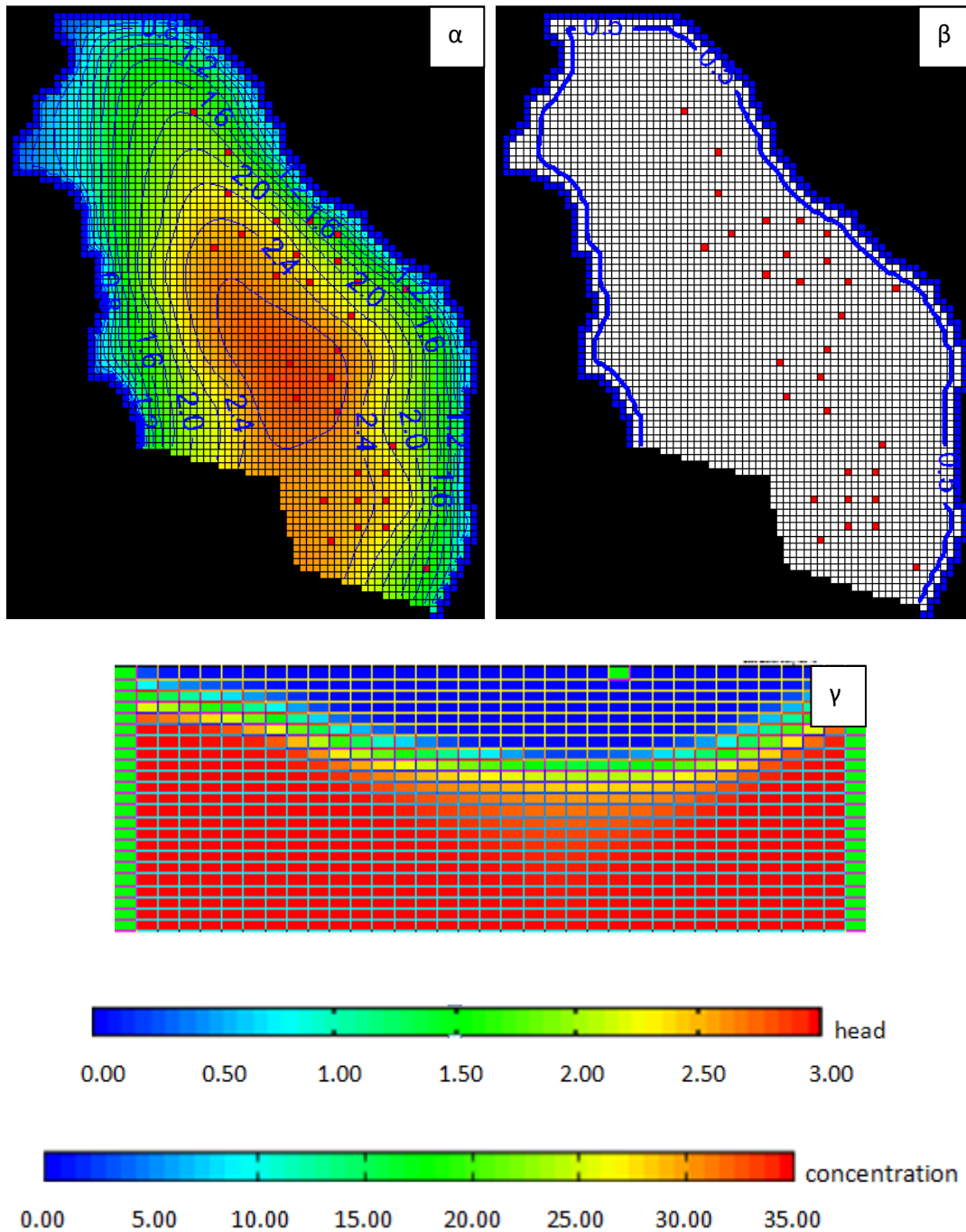
Πίνακας 6.3: Τροφοδοσία υδροφορέα – 2^η περίπτωση

ΖΩΝΗ	ΚΕΛΙΑ	ΕΚΤΑΣΗ (m ²)	N (m/d)	N (m ³ /y)	ΧΡΩΜΑ ΖΩΝΗΣ
1	2804	28040000	0.0001	1023460	
2	136	1360000	0.0002	99280	
3	173	1730000	0.00035	221008	
ΣΥΝΟΛΟ				1343748	-



Εικόνα 6.10: Ζώνες τροφοδοσίας-2^η περίπτωση

Για την περίπτωση αυτή, ο υδροφορέας προσομοιώθηκε αρχικά για 2000 έτη χωρίς αντλήσεις. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, για το πρώτο επίπεδο του υδροφορέα, παρουσιάζεται στην εικόνα 6.11. Για τη συγκέντρωση επιλέχθηκε η ισοϋψής των 0.5 kg/m³ που θεωρείται όριο για το πόσιμο νερό (παράγραφος 2.4.1). Διαπιστώνεται ότι και σε αυτή την περίπτωση δεν υφαλμυρίζεται κανένα πηγάδι και οι συγκεντρώσεις σε όλες τις θέσεις των πηγαδιών είναι μηδενικές. Σημειώνεται ότι στο τέλος αυτής της χρονικής περιόδου, ο υδροφορέας έχει φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας.



Εικόνα 6.11 Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης χωρίς αντλήσεις για τη 2^η περίπτωση για α) το πιεζομετρικό φορτίο σε κάτοψη, στο επίπεδο 1, β) τις συγκεντρώσεις σε κάτοψη στο επίπεδο 1 και γ) τις συγκεντρώσεις σε τομή στην 16^η γραμμή.

Στη συνέχεια, έγινε προσομοίωση της λειτουργίας του υδροφορέα για 50 έτη για τις ίδιες παροχές άντλησης με την περίπτωση 1 έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των δύο θεωρήσεων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μπορεί οι τιμές αντλήσεων να ήταν ίδιες με την 1^η περίπτωση, διέφεραν όμως σαν ποσοστά της τροφοδοσίας, αφού η συνολική τροφοδοσία του υδροφορέα είχε διαφορετική τιμή στη 2^η σε σχέση με την 1^η περίπτωση.

Στον πίνακα 6.4, δίνονται οι τιμές των συγκεντρώσεων σε kg/m^3 , για κάθε πηγάδι και για κάθε τιμή άντλησης του υδροφορέα. Με γαλάζιο χρώμα είναι οι τιμές που ξεπερνούν το όριο αλατότητας ενώ στην τελευταία σειρά αναγράφεται ο αριθμός των υφάλμυρων πηγαδιών για κάθε τιμή άντλησεων.

Επίσης, στις εικόνες 6.12 έως 6.14 παρουσιάζονται το πιεζομετρικό φορτίο του υδροφορέα σε κάτοψη και η συγκέντρωση σε κάτοψη και τομή για ένα σύνολο περιπτώσεων άντλησεων.

Παρατηρώντας τον πίνακα 6.4 προκύπτουν ορισμένα συμπεράσματα. Ο υδροφορέας υφαλμυρώθηκε ακόμα και για σχετικά χαμηλές τιμές άντλησεων ($12 \text{ m}^3/\text{d}$). Δηλαδή, χαμηλή μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας και η υψηλή τροφοδοσία δεν προστατεύουν απόλυτα τον υδροφορέα από υφαλμύριση. Όμως, ο αριθμός των υφάλμυρων πηγαδιών ήταν πολύ μικρότερος σε σχέση με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις της περίπτωσης 1. Για παράδειγμα, για άντληση $47 \text{ m}^3/\text{d}$, στην πρώτη περίπτωση υφαλμυρίστηκαν 25 πηγάδια ενώ στην 2^η περίπτωση μόνο 10. Δηλαδή, ο αριθμός των πηγαδιών που υφαλμυρίστηκαν, στα 50 έτη, για αυτήν την τιμή άντλησης, στην 2^η περίπτωση ήταν μειωμένος κατά 60%.

Αντίστοιχη διαπίστωση προκύπτει και για άντληση $110 \text{ m}^3/\text{d}$, που είναι η πραγματική τιμή άντλησης του υδροφορέα σήμερα, ισοκατανεμημένη στο χρόνο και στα πηγάδια. Για την πραγματική σημερινή τιμή, ο υδροφορέας υφαλμυρίζεται ακόμα κι αν χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι της 2^{ης} περίπτωσης. Όμως, στη 2^η περίπτωση υφαλμυρίστηκαν 23 πηγάδια σε αντίθεση με την περίπτωση 1 που υφαλμυρίστηκαν και τα 30 πηγάδια. Η υφαλμύριση ορισμένων πηγαδιών σε συνθήκες άντλησης που είναι κοντά στις πραγματικές κρίνεται λογικό αποτέλεσμα, καθώς στην πραγματικότητα αντλείται υφάλμυρο νερό και πραγματοποιείται αφαλάτωση.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα, έτσι όπως προέκυψε από το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας (με διαφορετικές άντλήσεις από κάθε πηγάδι), οδηγεί σε υφαλμύριση ακόμα και στην δεύτερη περίπτωση παραμέτρων. Ο αριθμός των πηγαδιών που υφαλμυρίστηκαν ήταν λίγο μικρότερος από ότι εάν θεωρούταν ίδια τιμή άντλησης για κάθε πηγάδι.

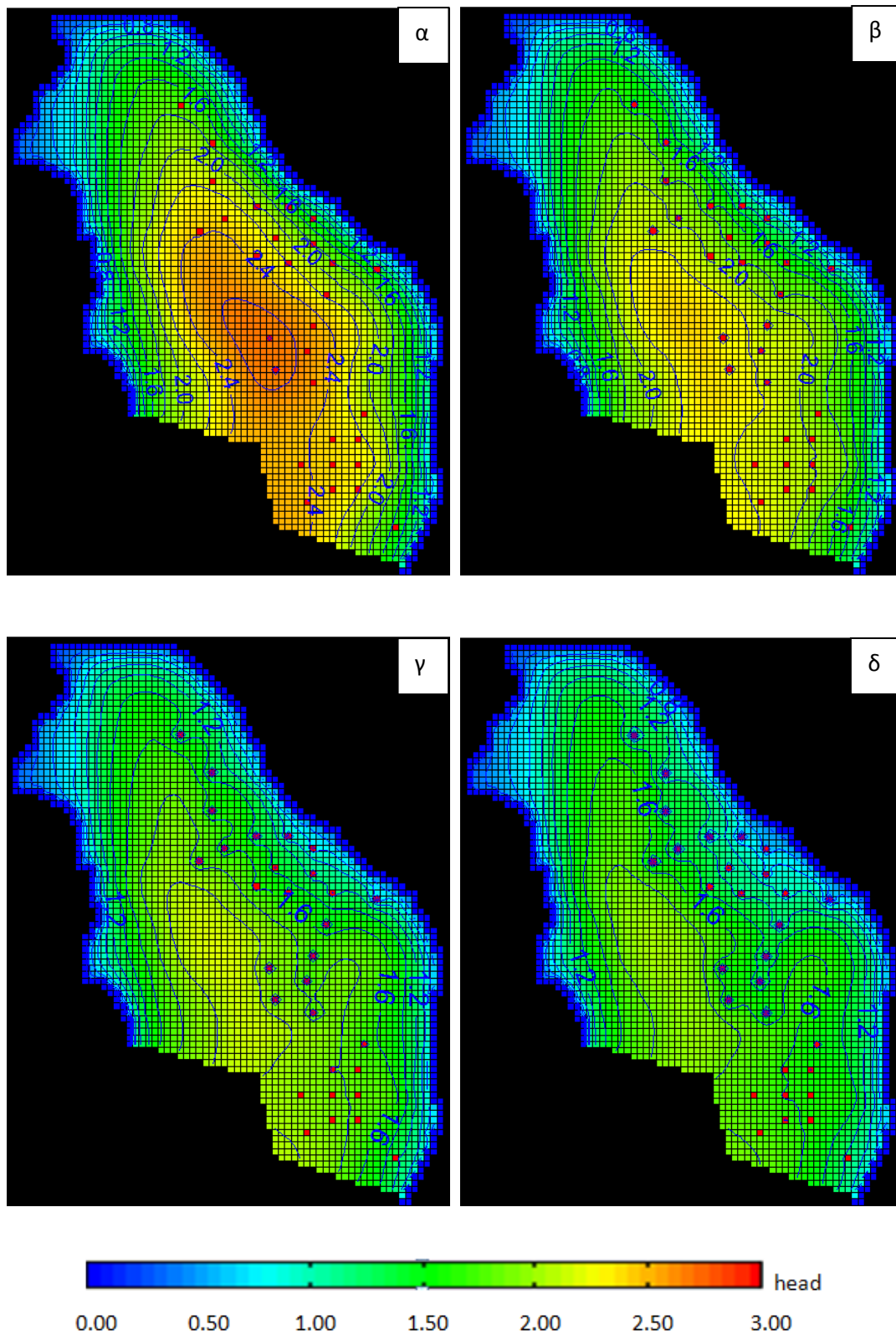
Αναφέρεται ακόμα ότι τα πηγάδια που βρίσκονται στα νότια όρια του υδροφορέα, υφαλμυρίζονται με αρκετά μεγαλύτερη παροχή άντλησης στη δεύτερη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Αυτό, εκτός από τις διαφορετικές τιμές τροφοδοσίας και υδραυλικής αγωγιμότητας, οφείλεται και στη μικρή διαφορά στη θέση του αδιαπέρατου ορίου μεταξύ των δύο περιπτώσεων.

Παρατηρώντας τις εικόνες 6.12 έως 6.14, διαπιστώνεται ότι αύξηση των άντλησεων οδηγεί σε μείωση του πιεζομετρικού φορτίου στον υδροφορέα, αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων στις θέσεις των πηγαδιών και ανύψωση της ζώνης μεταβλητής πυκνότητας. Επίσης, σε σύγκριση με την περίπτωση 1, η υφαλμύριση του υδροφορέα είναι μικρότερη ενώ το πιεζομετρικό φορτίο είναι μεγαλύτερο.

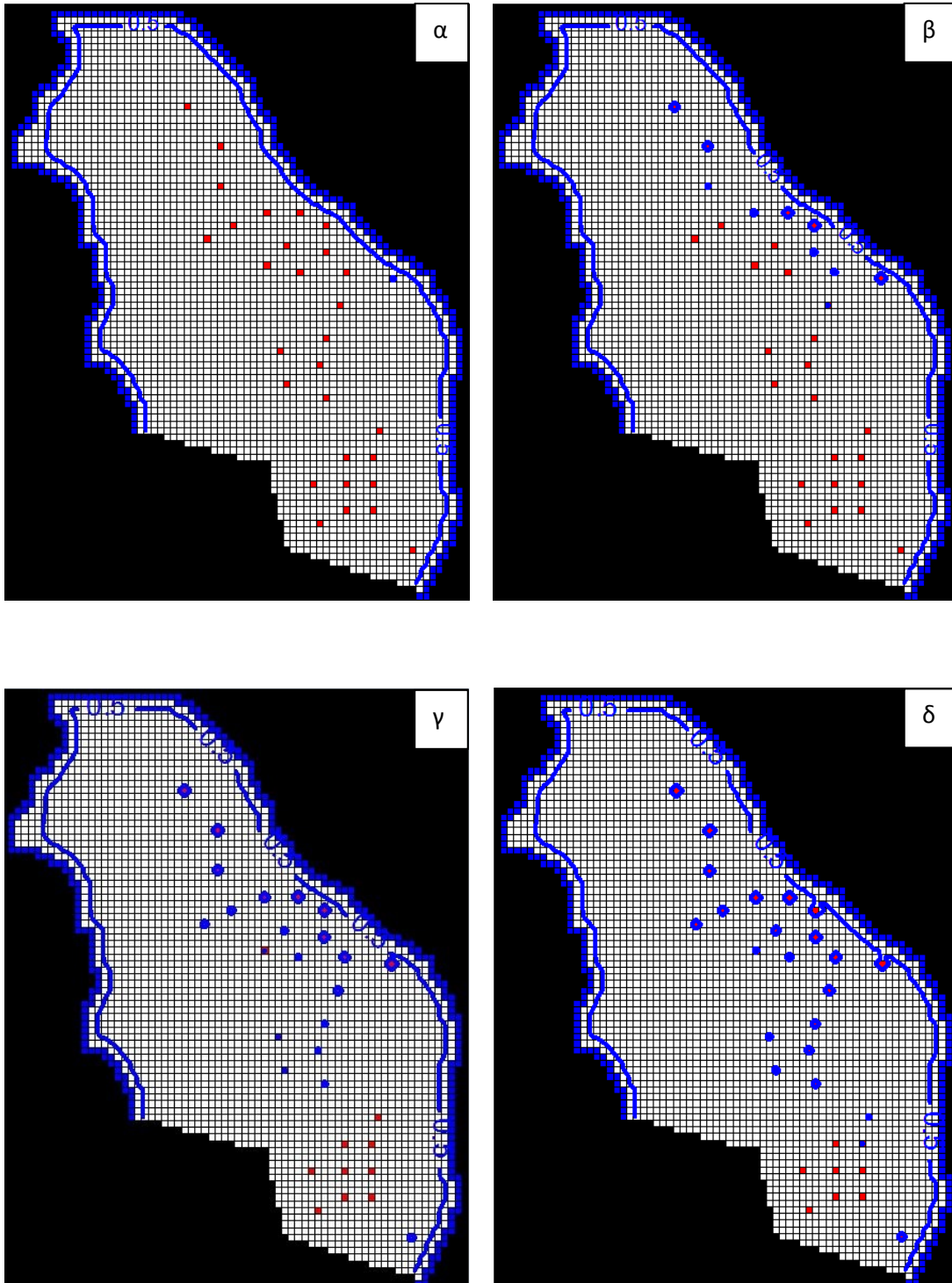
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για μεγάλες τιμές αντλήσεων της περίπτωσης 1 αλλά και για τις περισσότερες τιμές αντλήσεων της περίπτωσης 2, ο υδροφορέας δεν έχει προλάβει να σταθεροποιηθεί απόλυτα στα 50 έτη που θεωρείται ότι αντλείται εντατικά. Συνεπώς, εάν οι αντλήσεις συνεχιστούν στο μέλλον με τις ίδιες τιμές, ο υδροφορέας ενδέχεται να οδηγηθεί σε αρκετά χειρότερες συνθήκες από τις σημερινές.

Πίνακας 6.4: Συγκεντρώσεις άλατος σε kg/m³ - 2^η περίπτωση

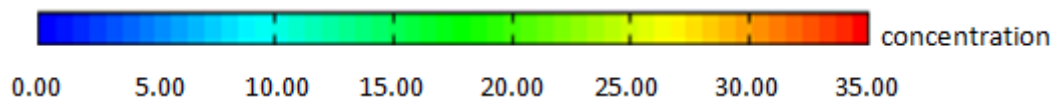
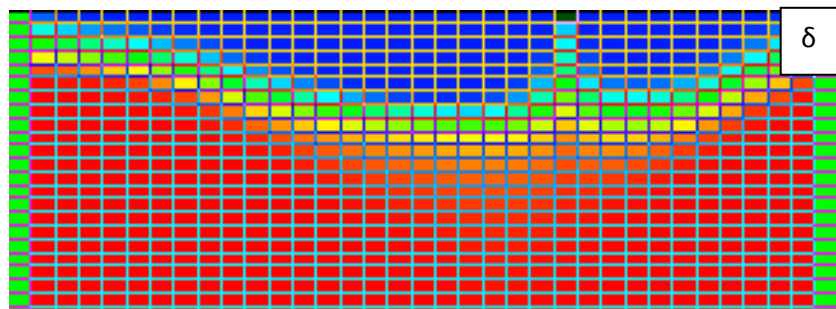
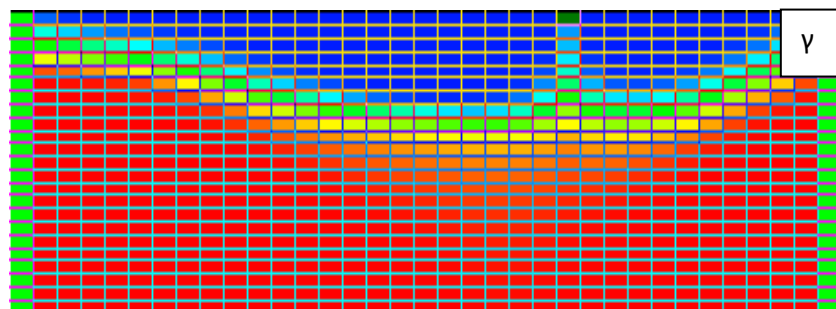
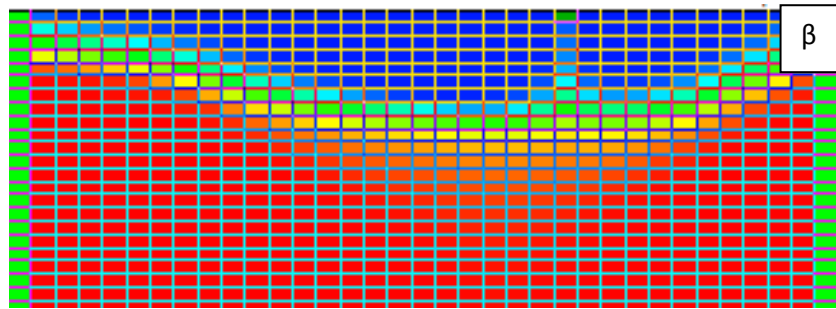
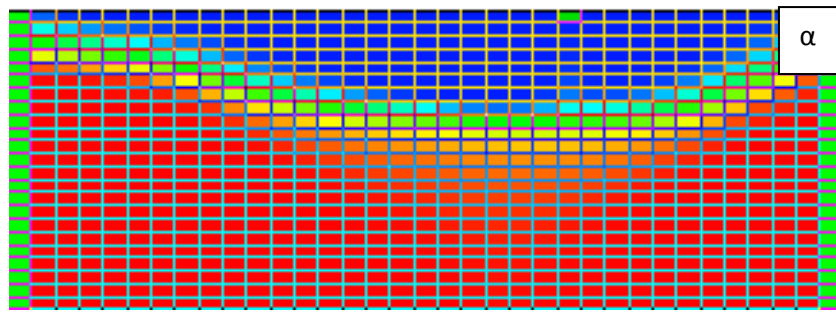
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΘΕΣΕΙΣ ΠΗΓΑΔΙΩΝ		ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 12 m ³ /d (10%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 23 m ³ /d (19%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 35 m ³ /d (29%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 47 m ³ /d (38%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 58 m ³ /d (47%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 70 m ³ /d (57%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 81 m ³ /d (66%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 93 m ³ /d (76%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΑΝΤΛΗΣΗ 110 m ³ /d (90%)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΡΤΙΜ ΑΝΤΛΗΣΗ (42%)
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ											
1	16	28	0.00	0.12	0.61	1.21	1.85	2.24	3.14	3.75	4.42	5.34	4.10
2	22	33	0.00	0.11	0.59	1.14	1.70	1.05	2.84	3.41	4.02	4.88	2.42
3	28	33	0.00	0.01	0.19	0.47	0.77	1.05	1.38	1.68	2.03	2.53	1.28
4	32	40	0.00	0.03	0.27	0.60	0.95	1.29	1.69	2.07	2.51	3.14	0.68
5	32	45	0.00	0.26	0.91	1.67	2.43	3.20	4.09	4.96	5.94	7.40	0.79
6	34	35	0.00	0.00	0.08	0.27	0.48	0.69	0.92	1.14	1.40	1.79	0.65
7	34	49	0.00	0.30	0.92	1.79	2.70	3.56	4.60	5.64	6.82	8.60	0.43
8	36	31	0.00	0.00	0.07	0.24	0.43	0.61	0.81	1.00	1.22	1.55	1.09
9	37	43	0.00	0.01	0.08	0.24	0.41	0.58	0.79	1.00	1.26	1.67	0.23
10	38	49	0.00	0.05	0.27	0.62	0.99	1.35	1.80	2.26	2.81	3.64	0.37
11	40	40	0.00	0.00	0.03	0.11	0.20	0.29	0.40	0.50	0.62	0.81	0.30
12	41	45	0.00	0.00	0.06	0.19	0.32	0.46	0.61	0.77	0.97	1.27	0.28
13	41	52	0.00	0.04	0.25	0.55	0.86	1.16	1.53	1.90	2.33	2.97	0.48
14	42	59	0.00	0.69	1.92	3.18	4.41	5.57	6.83	7.95	9.14	10.73	2.18
15	46	51	0.00	0.01	0.14	0.36	0.59	0.81	1.07	1.31	1.59	2.00	0.62
16	51	49	0.00	0.00	0.05	0.19	0.36	0.52	0.70	0.87	1.06	1.36	0.41
17	53	42	0.00	0.00	0.03	0.12	0.24	0.36	0.49	0.62	0.76	0.97	0.45
18	55	48	0.00	0.00	0.04	0.16	0.31	0.45	0.62	0.77	0.96	1.23	0.26
19	58	43	0.00	0.00	0.03	0.13	0.25	0.37	0.51	0.64	0.78	1.00	1.46
20	60	49	0.00	0.00	0.04	0.17	0.33	0.48	0.64	0.80	0.98	1.24	0.45
21	65	57	0.00	0.00	0.03	0.10	0.19	0.27	0.37	0.47	0.60	0.79	0.38
22	69	52	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.08	0.11	0.15	0.22	0.08
23	69	56	0.00	0.00	0.01	0.06	0.11	0.18	0.25	0.33	0.43	0.59	0.10
24	73	47	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.06	0.08	0.11	0.07
25	73	52	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.18	0.01
26	73	56	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.13	0.20	0.26	0.34	0.48	0.04
27	77	52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.07	0.10	0.15	0.01
28	77	56	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.11	0.17	0.23	0.30	0.43	0.00
29	79	48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.05	0.08	0.10	0.14	0.05
30	83	62	0.00	0.02	0.10	0.22	0.38	0.55	0.74	0.94	1.17	1.52	0.00
ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ			0	1	5	8	10	15	19	21	22	23	10



Εικόνα 6.12: Κατανομή πιεζομετρικού φορτίου για τη 2^η περίπτωση, στο 1^ο επίπεδο, σε κάτοψη για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (38%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (66%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (90%).



Εικόνα 6.13: Κατανομή συγκέντρωσης για τη 2^η περίπτωση, στο 1^ο επίπεδο, σε κάτοψη για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (38%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (66%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (90%). Απεικονίζεται η ισοϋψής των 0.5 kg/m³



Εικόνα 6.14: Κατανομή συγκέντρωσης για τη 2^η περίπτωση, στη 16^η γραμμή, σε τομή για α) παροχή άντλησης 12 m³/d (10%), β) παροχή άντλησης 47 m³/d (38%), γ) παροχή άντλησης 81 m³/d (66%), δ) παροχή άντλησης 110 m³/d (90%).

6.5 Διαχείριση υδροφορέα

6.5.1 Μεταβολή αντλήσεων 8 πηγαδιών

Στο κεφάλαιο αυτό, έγινε μία προσπάθεια διαχείρισης του υδροφορέα. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, τόσο της περίπτωσης 1 όσο και της 2 είναι φανερό ότι ο υδροφορέας είναι επιρρεπής σε υφαλμύριση. Επίσης, είναι φανερό ότι ορισμένα πηγάδια είναι πιο ευαίσθητα καθώς υφαλμυρίζονται με χαμηλότερες παροχές άντλησης από άλλα. Έτσι, αναμένεται ότι εάν εφαρμοστούν οι κατάλληλες, διαφορετικές τιμές άντλησης σε κάθε πηγάδι, μπορεί να επιτευχθεί ένα καλύτερο αποτέλεσμα δηλαδή μια υψηλότερη συνολική ποσότητα αντλούμενου νερού, χωρίς υφαλμύριση των πηγαδιών.

Για την πρώτη προσπάθεια διαχείρισης επιλέχθηκε μία τυχαία παροχή άντλησης που δεν ήταν ούτε πολύ μικρή, ούτε πολύ μεγάλη. Αυτή ήταν η παροχή άντλησης $41 \text{ m}^3/\text{d}$ (35%). Με αυτή την τιμή, όπως φαίνεται στον πίνακα 6.1, μετά το 2^ο στάδιο προσομοίωσης, υφαλμυρίστηκαν 12 πηγάδια. Επιλέχθηκαν τα 4 που είχαν μεγαλύτερη τιμή συγκέντρωσης (τα πηγάδια με αριθμό 5, 7, 14 και 30) και μηδενίστηκε η παροχή άντλησής τους. Προκειμένου να διατηρηθεί η συνολική αντλούμενη ποσότητα σταθερή, εντοπίστηκαν τα 4 απομακρυσμένα από τη θάλασσα πηγάδια που έχουν την μικρότερη συγκέντρωση (τα πηγάδια με αριθμό 19, 22, 24 και 29) και διπλασιάστηκε η παροχή άντλησής τους. Για αυτές τις τιμές αντλήσεων έγινε προσομοίωση για 50 έτη. Ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης μετά από 2000 έτη χωρίς αντλήσεις. Οι συγκεντρώσεις που προέκυψαν φαίνονται στον πίνακα 6.5:

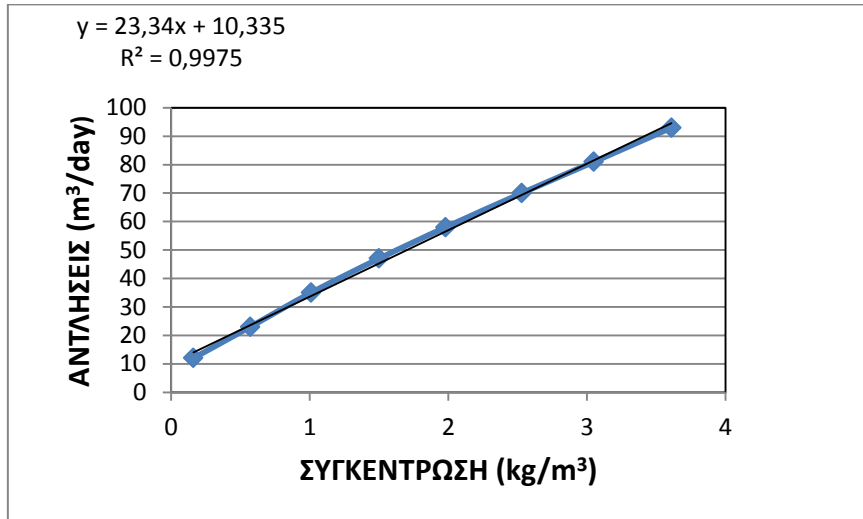
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ελαφρώς καλύτερα από ότι για προσομοίωση με ενιαίες τιμές αντλήσεων αφού υφαλμυρίζεται ένα πηγάδι λιγότερο. Παρόλα αυτά δεν ήταν όσο καλά θα ήταν επιθυμητό. Είναι λογικό ότι εάν η μείωση και η αύξηση των αντλήσεων γίνει με πιο ομαλό τρόπο και αναλογικά με την υφαλμύριση των πηγαδιών, τα αποτελέσματα μπορούν να είναι καλύτερα.

Πίνακας 6.5: 1^η προσπάθεια διαχείρισης υδροφορέα

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΝΕΕΣ ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ	ΑΡΧΙΚΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΤΟΠΙΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ (kg/m ³)
1	35	1.01	1.01
2	35	0.96	0.96
3	35	0.53	0.53
4	35	0.79	0.77
5	0	2.1	0
6	35	0.4	0.4
7	0	3.19	0
8	35	0.36	0.36
9	35	0.62	0.6
10	35	1.28	1.22
11	35	0.35	0.35
12	35	0.47	0.47
13	35	1.2	1.18
14	0	3.49	0
15	35	0.53	0.54
16	35	0.4	0.4
17	35	0.35	0.36
18	35	0.41	0.42
19	70	0.11	0.29
20	35	0.37	0.39
21	35	0.32	0.35
22	70	0.22	0.58
23	35	0.39	0.45
24	70	0.14	0.4
25	35	0.26	0.32
26	35	0.49	0.55
27	35	0.29	0.35
28	35	0.56	0.77
29	70	0.17	0.53
30	0	3.08	0.02
ΑΡΙΘΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΩΝ ΠΗΓΑΔΙΩΝ		12	11

6.5.2 Επαναληπτική μέθοδος με βάση τη γραμμική παρεμβολή

Στη συνέχεια παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση στις θέσεις των πηγαδιών αυξάνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση των αντλήσεων. Στην εικόνα 6.15 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις στο 1^ο επίπεδο και στην περίπτωση 1 συναρτήσεως των αντλήσεων για το πηγάδι με αριθμό 1. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στα υπόλοιπα πηγάδια.



Εικόνα 6.15: Μεταβολή συγκεντρώσεων με τη μεταβολή της αντλούμενης ποσότητας για το 1^ο πηγάδι του υδροφορέα.

Έτσι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, για να βρεθεί για κάθε πηγάδι η τιμή των αντλήσεων που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση $0,5 \text{ kg/m}^3$. Μία τέτοια προσέγγιση παίρνει ως δεδομένο ότι η άντληση του ενός πηγαδιού δεν επηρεάζει τη συγκέντρωση αλάτων στα άλλα πηγάδια. Δηλαδή ότι οι ακτίνες επιρροής των πηγαδιών δεν τέμνονται μεταξύ τους. Στην πραγματικότητα όμως, τα πηγάδια δεν λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, ακολουθήθηκε η παρακάτω επαναληπτική διαδικασία: αρχικά έγινε γραμμική παρεμβολή για κάθε πηγάδι, θεωρώντας ότι τα πηγάδια λειτουργούν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και βρέθηκε η τιμή άντλησης που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση $0,5 \text{ kg/m}^3$ για κάθε πηγάδι. Στη συνέχεια ο υδροφορέας προσομοιώθηκε για 50 έτη για αυτές τις τιμές των αντλήσεων κάθε πηγαδιού. Τα αποτελέσματα συγκέντρωσης που προέκυψαν δεν ήταν ακριβώς $0,5 \text{ kg/m}^3$ για κάθε θέση πηγαδιού, ήταν όμως αρκετά κοντά σε αυτήν την τιμή. Έτσι, έγινε νέα γραμμική παρεμβολή διατηρώντας την κλίση της ευθείας και χρησιμοποιώντας όμως την τιμή της συγκέντρωσης και την αντίστοιχη άντληση από την τελευταία προσομοίωση. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν νέες τιμές αντλήσεων για κάθε πηγάδι και χρησιμοποιούνται για νέα προσομοίωση κοκ. Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής ενώ ακολουθεί παράδειγμα που επεξηγεί ακριβώς τον τρόπο που γίνεται η γραμμική παρεμβολή και την υπόλοιπη διαδικασία.

Για να γίνει η 1^η γραμμική παρεμβολή για το πηγάδι με αριθμό 30, εντοπίζεται από τον πίνακα 6.1 η κοντινότερη τιμή συγκέντρωσης στο 0,5 η οποία είναι η τιμή 0,9 και

αντιστοιχεί σε ομοιόμορφη άντληση $12 \text{ m}^3/\text{d}$. Η τιμή 0.9 αναγράφεται στη 2^η στήλη του πίνακα 6.6 και η τιμή 12 στην τέταρτη. Στη συνέχεια, εντοπίζεται η 2^η κοντινότερη στο 0.5 τιμή συγκέντρωσης που είναι η τιμή 1.9 και αντιστοιχεί σε συγκέντρωση $23 \text{ m}^3/\text{d}$. Εκτελείται η πράξη: $12+(23-12)\cdot(0.5-0.9)/(1.9-0.9)=7.6$. Η τιμή αυτή είναι το αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής για το πηγάδι 30 και αναγράφεται στη στήλη 6 του πίνακα 6.6. Υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές άντλησης για όλα τα πηγάδια και εισάγονται στο πρόγραμμα. Αφού γίνει η προσομοίωση του υδροφορέα για 50 έτη, λαμβάνονται από το πρόγραμμα οι τιμές συγκέντρωσης και αναγράφονται στη στήλη 7. Για το πηγάδι 30 η τιμή συγκέντρωσης που αντιστοιχεί σε άντληση $7.6 \text{ m}^3/\text{d}$ είναι $0.72 \text{ kg}/\text{m}^3$. Στη συνέχεια εκτελείται η πράξη: $7.6+(23-12)\cdot(0.5-0.72)/(1.9-0.9)=5.2$. Το ίδιο γίνεται για όλα τα πηγάδια και με τις νέες αυτές τιμές άντλησης ξαναγίνεται προσομοίωση του υδροφορέα κοκ.

Από τα αποτελέσματα της μεθόδου, διαπιστώνεται ότι σε περίπου 3 επαναλήψεις έχει προκύψει από την προσομοίωση συγκέντρωση περίπου $0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ για κάθε πηγάδι. Η συνολική τιμή άντλησης από όλα τα πηγάδια είναι $1107 \text{ m}^3/\text{d}$ χωρίς να υφαλμυρίζεται κανένα πηγάδι αφού όλα είναι περίπου στο όριο αλατότητας για το πόσιμο νερό. Η αντίστοιχη τιμή για ομοιόμορφη άντληση $12 \text{ m}^3/\text{d}$ από κάθε πηγάδι είναι $360 \text{ m}^3/\text{d}$ και υφαλμυρίζονται 3 πηγάδια (πίνακας 6.1). Δηλαδή η μέθοδος οδηγεί σε 67% μεγαλύτερη βιώσιμη απόδοση χωρίς υφαλμύριση κανενός πηγαδιού. Για ομοιόμορφη άντληση $23 \text{ m}^3/\text{d}$ από κάθε πηγάδι είναι $690 \text{ m}^3/\text{d}$ και υφαλμυρίζονται 8 πηγάδια. Δηλαδή η μέθοδος οδηγεί σε 38% μεγαλύτερη βιώσιμη απόδοση. Για ομοιόμορφη άντληση $35 \text{ m}^3/\text{d}$ από κάθε πηγάδι είναι $1050 \text{ m}^3/\text{d}$ και υφαλμυρίζονται 12 πηγάδια. Δηλαδή, η μέθοδος οδηγεί σε 5% μεγαλύτερη βιώσιμη απόδοση. Για ακόμα μεγαλύτερη ομοιόμορφη άντληση, προκύπτουν τιμές μεγαλύτερες από την τιμή που προκύπτει από την παραπάνω μέθοδο αλλά υφαλμυρίζονται τα 2/3 των πηγαδιών ή και όλα.

Συνεπώς, αυτή η προσπάθεια διαχείρισης του υδροφορέα οδηγεί σε τιμές αντλήσεων για κάθε πηγάδι που εξασφαλίζουν την προστασία του υδροφορέα και είναι κατά πολύ καλύτερες από ότι οι ενιαίες τιμές αντλήσεων. Παρόλα αυτά δεν μπορεί να είναι σίγουρο εάν αυτή η λύση για τη λειτουργία του υδροφορέα είναι η βέλτιστη δυνατή. Δηλαδή, είναι πιθανό να υπάρχει κάποιο σύνολο τιμών αντλήσεων που αθροιστικά θα είναι μεγαλύτερες από ότι η βιώσιμη απόδοση αυτής της λύσης και ταυτόχρονα θα οδηγούν σε συγκεντρώσεις αλάτων $0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ στις θέσεις των πηγαδιών. Για να διαπιστωθεί εάν αυτή η λύση είναι η ολική θα ήταν χρήσιμο να πραγματοποιηθούν βελτιστοποιήσεις του υδροφορέα με άλλες μεθόδους και με τις ίδιες τιμές παραμέτρων ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Πίνακας 6.6: 2^η Προσπάθεια διαχείρισης υδροφορέα

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	1η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)	2η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)	1η ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)	2η ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)	1η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ		2η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ		3η ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ	
					ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (kg/m ³)
1	0.57	1.01	23	35	21.1	0.50	21.1	0.50	21.1	0.5
2	0.53	0.96	23	35	22.2	0.52	21.6	0.50	21.6	0.5
3	0.53	0.67	35	41	33.7	0.50	33.7	0.50	33.7	0.5
4	0.42	0.79	23	35	25.6	0.52	24.9	0.50	24.9	0.5
5	0.38	1.18	12	23	13.7	0.59	12.4	0.50	12.4	0.5
6	0.51	0.4	41	35	40.5	0.51	39.9	0.49	40.5	0.51
7	0.68	1.85	12	23	10.3	0.66	8.8	0.52	8.6	0.5
8	0.45	0.55	41	47	44.0	0.50	44.0	0.50	44.0	0.5
9	0.62	0.31	35	23	30.4	0.51	30.0	0.50	30.0	0.5
10	0.69	0.18	23	12	18.9	0.55	17.8	0.50	17.8	0.5
11	0.45	0.55	41	47	44.0	0.50	44.0	0.50	44.0	0.5
12	0.47	0.6	35	41	36.4	0.50	36.4	0.50	36.4	0.5
13	0.66	0.17	23	12	19.4	0.55	18.3	0.50	18.3	0.5
14	0.89	2.18	12	23	8.7	0.63	7.6	0.51	7.5	0.5
15	0.53	0.68	35	41	33.8	0.51	33.4	0.50	33.4	0.5
16	0.52	0.4	41	35	40.0	0.50	40.0	0.50	40.0	0.5
17	0.55	0.45	47	41	44.0	0.51	43.4	0.50	43.4	0.5
18	0.53	0.41	41	35	39.5	0.52	38.5	0.50	38.5	0.5
19	0.47	0.61	93	110	96.6	0.46	101.5	0.49	102.7	0.5
20	0.47	0.57	41	47	42.8	0.52	41.6	0.51	41.0	0.5
21	0.52	0.42	47	41	45.8	0.51	45.2	0.50	45.2	0.5
22	0.52	0.37	58	47	56.5	0.47	58.7	0.49	59.5	0.5
23	0.52	0.39	41	35	40.1	0.55	37.8	0.51	37.3	0.5
24	0.45	0.57	70	81	74.6	0.44	80.1	0.48	81.9	0.49
25	0.46	0.66	47	58	49.2	0.51	48.7	0.50	48.7	0.5
26	0.49	0.65	35	41	35.4	0.59	32.0	0.52	31.3	0.5
27	0.5	0.39	47	41	47.0	0.53	45.4	0.51	44.8	0.5
28	0.56	0.26	35	23	32.6	0.60	28.6	0.50	28.6	0.5
29	0.44	0.61	58	70	62.2	0.47	64.4	0.49	65.1	0.5
30	0.9	1.9	12	23	7.6	0.72	5.2	0.49	5.3	0.5
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΠΑΡΟΧΗ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ					1116	-	1105	-	1107	-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, πραγματοποιήθηκε διαχείριση του υπόγειου, παράκτιου υδροφορέα του κεντρικού τμήματος της Σαντορίνης. Η Σαντορίνη είναι ένα νησί μικρού μήκους. Για τον λόγο αυτό, στον υδροφορέα της δεν υπάρχει αδιαπέρατο υπόβαθρο αλλά σχηματίζεται ένας φακός γλυκού νερού που επιπλέει πάνω στο αλμυρό νερό. Η ιδιαιτερότητα αυτή, κάνει τον υδροφορέα περισσότερο ευαίσθητο στην υφαλμύριση καθώς το αλμυρό νερό δεν εισέρχεται σε αυτόν μόνο από τα πλάγια αλλά και από κάτω.

Για τη διαχείριση του υδροφορέα, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα. Το πρώτο μοντέλο θεωρεί ότι το γλυκό νερό διαχωρίζεται από το αλμυρό με μια απότομη διεπιφάνεια. Με βάση αυτό το μοντέλο, πραγματοποιήθηκε μία βασική βελτιστοποίηση του υδροφορέα, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα που παραχωρήθηκε από τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. Μαντόγλου Α. καθώς και το λογισμικό Modflow. Η βελτιστοποίηση αυτή είχε ως στόχο την εύρεση της βιώσιμης απόδοσης του υδροφορέα. Της μέγιστης δηλαδή, συνολικής άντλησης που δεν οδηγεί σε υφαλμύριση του υδροφορέα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης σε δύο παραμέτρους του υδροφορέα: την τροφοδοσία και την υδραυλική αγωγιμότητα. Ακόμα, ελέγχθηκε η επίδραση της θέσης των πηγαδιών στη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Δημιουργήθηκαν τέσσερις περιπτώσεις για τις οποίες πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση. Σε κάθε περίπτωση μετακινούνταν διαφορετικός αριθμός πηγαδιών πηγαδιών ή μετακινούνταν σε διαφορετικές θέσεις. Στην μία από τις περιπτώσεις απλά θεωρήθηκε διακοπή της άντλησης από 3 πηγάδια.

Το δεύτερο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε θεωρούσε μία ζώνη μεταβλητής πυκνότητας μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού. Το μοντέλο αυτό είναι πιο περίπλοκο από το προηγούμενο αλλά περιγράφει καλύτερα τη φυσική πραγματικότητα. Με βάση αυτό το μοντέλο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας του υδροφορέα για δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Groundwater Vistas και επιλέγοντας το μοντέλο Seawat. Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν και στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη τιμή τροφοδοσίας και μικρότερη τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας. Για κάθε περίπτωση, έγινε προσομοίωση για διάφορες τιμές άντλησεων, από 10-80% της τροφοδοσίας του υδροφορέα. Κάθε πηγάδι θεωρήθηκε ότι αντλεί με την ίδια τιμή. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωση του υδροφορέα με βάση τις πραγματικές σημερινές τιμές άντλησής του αλλά και με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια διαχείρισης του υδροφορέα. Αρχικά, θεωρήθηκαν μηδενικές αντλήσεις στα πηγάδια που είχαν τις μεγαλύτερες συγκέντρωσης, με βάση τις προηγούμενες προσομοιώσεις και διπλάσια άντληση στα πηγάδια που είχαν τις ελάχιστες. Τα αποτελέσματα, δεν έδειξαν ουσιαστική βελτίωση. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι

οι συγκεντρώσεις στις θέσεις των πηγαδιών αυξάνονται περίπου γραμμικά με την αύξηση των τιμών των αντλήσεων. Έτσι θεωρώντας ότι οι ακτίνες επιρροής δεν τέμνουν η μια την άλλη, βρέθηκε με γραμμική παρεμβολή ανεξάρτητα για κάθε πηγάδι, η τιμή άντλησης που αντιστοιχεί σε συγκέντρωση 0.5 kg/m^3 . Με βάση αυτές τις τιμές, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του υδροφορέα ώστε να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ των πηγαδιών. Οι συγκεντρώσεις που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν για νέα γραμμική παρεμβολή κοκ. Η προσπάθεια αυτή οδήγησε στην εύρεση μιας συνολικής τιμής αντλήσεων που δεν υφαλμυρίζει τον υδροφορέα και είναι πολύ μεγαλύτερη από τα αποτελέσματα που έδινε η εφαρμογή ενιαίων τιμών.

Ένα πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διεκπεραίωση της εργασίας ήταν η έλλειψη δεδομένων για τον πραγματικό αριθμό και τη θέση των φρεάτων άντλησης. Επίσης, δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τον πραγματικό ρυθμό των αντλήσεων και συνεπώς και για το πιεζομετρικό φορτίο και τις συγκεντρώσεις, για το διάστημα που η Σαντορίνη αντλείται εντατικά. Επιπροσθέτως, οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν μετά από βιβλιογραφική έρευνα. Οι διάφορες εργασίες όμως, δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους ως προς αυτές τις παραμέτρους.

7.2 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή οδήγησε σε ένα σύνολο συμπερασμάτων για τον τρόπο λειτουργίας του υδροφορέα και την επιρροή των αντλήσεων σε αυτόν.

Πρώτον, τόσο οι αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν με το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας όσο και οι προσομοιώσεις για τις δύο περιπτώσεις, με το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, έδειξαν ότι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της τροφοδοσίας του υδροφορέα επηρεάζουν το βαθμό υφαλμύρισής του και συνεπώς και τη βιώσιμη απόδοσή του. Μεγαλύτερη τροφοδοσία και μικρότερη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας δυσχεραίνουν την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα και επιτρέπουν μεγαλύτερες τιμές αντλήσεων.

Δεύτερον, με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου απότομης διεπιφάνειας, η θέση των πηγαδιών επηρεάζει τη βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Τα πηγάδια της Σαντορίνης, δεν βρίσκονται στις βέλτιστες θέσεις. Με μετακίνηση των παράκτιων πηγαδιών προς το εσωτερικό του υδροφορέα και σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους, αυξάνεται η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα. Ακόμα και με διακοπή της άντλησης των τριών πηγαδιών που βρίσκονται πολύ κοντά στη θάλασσα, η βιώσιμη απόδοση του υδροφορέα παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική καθώς η λειτουργία των πηγαδιών συνεπάγεται οικονομικό κόστος.

Τρίτον, με βάση το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας διαπιστώνεται ότι αύξηση των αντλήσεων οδηγεί σε μείωση του πιεζομετρικού φορτίου στον υδροφορέα, αύξηση της συγκέντρωσης αλάτων στις θέσεις των πηγαδιών και ανύψωση της ζώνης μεταβλητής πυκνότητας προς την επιφάνεια του υδροφορέα. Επίσης, διαπιστώνεται ότι ο υδροφορέας

είναι επιρρεπής σε υφαλμύριση καθώς ειδικά στην πρώτη περίπτωση παραμέτρων, υφαλμυρίζεται ακόμα και για πολύ μικρές τιμές αντλήσεων.

Τέταρτον, μία σημαντική διαπίστωση είναι ότι τα δύο μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν δεν συμφωνούν μεταξύ τους. Η βιώσιμη απόδοση που προκύπτει με βάση το μοντέλο απότομης διεπιφάνειας, υφαλμυρίζει αρκετά πηγάδια του υδροφορέα όταν αυτός προσομοιώνεται με βάση το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας. Αυτό συμβαίνει και για την πρώτη περίπτωση, που χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές παραμέτρων με αυτές του πρώτου μοντέλου, αλλά και για τη δεύτερη που χρησιμοποιεί ευνοϊκότερες για την προστασία του υδροφορέα παραμέτρους. Θεωρείται καλύτερο ο σχεδιασμός να βασιστεί στο μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας καθώς είναι από τη μεριά της ασφάλειας και περιγράφει καλύτερα τη φυσική πραγματικότητα.

Πέμπτον, η επαναληπτική μέθοδος με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής που εφαρμόστηκε, παρότι απλοϊκή, δίνει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις ενιαίες τιμές αντλήσεων του υδροφορέα. Τα αποτελέσματα που δίνει προστατεύουν τον υδροφορέα από υφαλμύριση, εξασφαλίζοντας αρκετά μεγάλες τιμές αντλήσεων. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι δεν είναι βέβαιο εάν η λύση αυτή είναι η βέλτιστη για τον υδροφορέα που μελετάται ή μπορεί να βρεθεί μεγαλύτερη απόδοση του υδροφορέα που δεν συνεπάγεται υφαλμύριση κάποιου πηγαδιού.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Στην εργασία αυτή, τόσο στο μοντέλο απότομης διεπιφάνειας, όσο και στο μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, θεωρήθηκε ότι η τροφοδοσία και οι αντλήσεις του υδροφορέα κατανέμονται ομοιόμορφα στο χρόνο. Στην πραγματικότητα όμως, η τροφοδοσία του υδροφορέα σημειώνεται κατά κύριο λόγο τους μήνες Ιανουάριου, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Στους μήνες αυτούς, οι βροχοπτώσεις έχουν ξεκινήσει και το νερό συσσωρεύεται στην επιφάνεια του εδάφους και κατεισδύει. Αντιθέτως, οι αντλήσεις είναι πολύ εντονότερες κατά τους θερινούς μήνες (το 67% από Μάιο έως Σεπτέμβριο) που οι ανάγκες σε νερό είναι μεγαλύτερες (Στράτζαλης Κ., 2008). Αυτή η αντίθεση, οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη υφαλμύριση του υδροφορέα. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί προσομοίωση και βελτιστοποίηση του υδροφορέα, με το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας, με μεταβλητές χρονικά τιμές αντλήσεων και τροφοδοσίας.

Επίσης, είναι σημαντικό να γίνει μια συνολικότερη μελέτη διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού, που θα εξετάζει όλες τις εναλλακτικές λύσεις που υπάρχουν για την υδροδότησή του, το οικονομικό κόστος της κάθε μίας αλλά και της περιβαλλοντικές επιπτώσεις της. Επίσης, θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν όλες οι δυνατότητες που υπάρχουν για την προστασία του υδροφορέα από υφαλμύριση όπως ο τεχνητός εμπλουτισμός ή η ανάσχεση της επιφανειακής απορροής ώστε να αυξηθεί η κατείσδυση στον υδροφορέα.

Σχετικά με την επαναληπτική μέθοδο με χρήση γραμμικής παρεμβολής, που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 6.5.2, θα ήταν χρήσιμο, να πραγματοποιηθούν βελτιστοποιήσεις του υδροφορέα με άλλες μεθόδους, με βάση το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας και ακριβώς τις ίδιες τιμές παραμέτρων. Έτσι, θα καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων και η αξιολόγηση της μεθόδου. Θα ήταν χρήσιμο πριν γίνει αυτό να συγκεντρωθούν πληροφορίες για τον πραγματικό αριθμό και τη θέση των πηγαδιών στο νησί καθώς και την πραγματική σημερινή του κατάσταση ώστε τα αποτελέσματα να έχουν και πρακτική αξία. Οι πραγματικές παροχές άντλησης των τελευταίων 50 ετών θα πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο ώστε να ληφθούν ως αποτελέσματα οι πραγματικές σημερινές συνθήκες. Αυτές θα πρέπει να εισαχθούν ως αρχικές συνθήκες σε ένα τρίτο στάδιο προσομοίωσης, στο οποίο θα εκτελείται η μέθοδος που αναφέρθηκε.

Ακόμα, θα ήταν χρήσιμο να διαπιστωθεί, εάν η μέθοδος συγκλίνει εξίσου γρήγορα στην περίπτωση που ο προς μελέτη υδροφορέας διαθέτει αδιαπέρατο υπόβαθρο. Στην περίπτωση που σχηματίζεται φακός, τα πηγάδια υφαλμυρίζονται κυρίως από κάτω. Στην περίπτωση αδιαπέρατου υποβάθρου όμως, το μέτωπο του αλμυρού νερού, προσεγγίζει το πηγάδι από τα πλάγια. Συνεπώς, η αλληλεξάρτηση των πηγαδιών είναι μεγαλύτερη και η μέθοδος ενδέχεται να μη λειτουργεί ή να μη συγκλίνει σε ικανοποιητικό χρόνο. Επίσης, η μηχανική διασπορά του υδροφορέα διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην υφαλμύρισή του. Για μεγάλες τιμές μηχανικής διασποράς, η εξάπλωση των αλάτων διευκολύνεται και έτσι ενδέχεται οι ακτίνες επιρροής των πηγαδιών να συμπίπτουν περισσότερο μεταξύ τους και κατά συνέπεια η μέθοδος να μην είναι αποτελεσματική.

Τέλος, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί εάν εφαρμόζοντας αντί για γραμμική παρεμβολή ($R^2 = 0.9975$) πολυωνυμική παρεμβολή δευτέρου βαθμού ($R^2 = 0,9998$) ή τρίτου βαθμού ($R^2 = 1$) θα μεταβαλλόταν η ταχύτητα σύγκλισης ή τα τελικά αποτελέσματα της μεθόδου.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Ακύλας, Ε., Λυκούδης, Σ. & Λάλας, Δ. (2005). Κλιματική Αλλαγή στον Ελλαδικό Χώρο Ανάλυση Παρατηρήσεων: Τάσεις των Τελευταίων 100 ετών, Παρατηρητήριο Κλιματικών Αλλαγών, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.
- 2 Αποστολάκη, Μ., (2007), Δίκτυο Αειφόρων Νήσων Δάφνη, Σαντορίνη (Θήρα), Διεπιστημονικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 3 Γαλαζούλας, Ε. Χ. και Πεταλάς, Χ. Π. (2014). Περιοχές με Πρόβλημα Υφαλμύρωσης εντός του Εθνικού Πάρκου Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Ημερίδα Υγρότοποι και Γεωργία, Κομοτηνή.
- 4 Γιαννουλόπουλος, Π. Κ. (2000). Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο, Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Αθήνα.
- 5 Γιούργα, Χ. (1991). Η αλλαγή του παραδοσιακού προτύπου διαχείρισης της γης στο αρχιπέλαγος του Αιγαίου: Επιπτώσεις στα νησιωτικά οικοσυστήματα, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- 6 Δρόσου, Κ., (2005), Παρόν και μέλλον της αμπελοκαλλιέργειας στη Σαντορίνη, Διαχείριση και Προοπτικές, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- 7 Ελληνική Στατιστική Αρχή, διαθέσιμο στο: <<http://www.statistics.gr/>> τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 8 Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Δήμου Θήρας 2013-2014, Δήμος Θήρας, διαθέσιμο στο: <<http://www.thira.gr/epixeirisiako-programma.html>>, τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 9 ΙΤΙΑ, Ερευνητική Ομάδα, διαθέσιμο στο <http://www.itia.ntua.gr>, τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 10 Καρρά, Θ. (2011). Προσομοίωση Παράκτιου Υδροφορέα Σαντορίνης με το Seawat, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 11 Κουράκος, Γ. (2009). Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων με Περιβαλλοντικά και Οικονομικά Κριτήρια, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

- 12 Λατινόπουλος, Π. Δ. (1986). Υδραυλική των Υπογείων Ροών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.
- 13 Μαντόγλου, Α. και Γιαννουλόπουλος, Π. Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων για Πρόληψη Υφαλμύρωσης, διαθέσιμο στο: <http://www.waterinfo.gr/eedyp/Paros_papers/mantoglou_a.pdf>, τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 14 Μαντόγλου, Α. (2014). Διερεύνηση των Δυνατοτήτων Άντλησης του Παράκτιου Υδροφορέα Βουρβούλου-Καμαρίου της Ν. Θήρας με Χρήση Μοντέλων Προσομοίωσης, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 15 Μαντόγλου, Α. και Κουράκος, Γ. (2005). Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων (ΑΛΣ), Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ), Ανάδοχος: ΝΑΜΑ Σύμβουλοι Μηχανικοί και Μελετητές Α.Ε., Τεύχος 4β, 38 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων- Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 16 Μαντόγλου, Α. (2009). Μηχανική Ρευστών Εφαρμοσμένη Υδραυλική, Διδακτικές Σημειώσεις, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 17 Μαντόγλου, Α. Προσομοίωση και Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων, διαθέσιμο στο: <http://library.tee.gr/digital/m2300/m2300_mantoglou.pdf>, τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 18 Ναλμπάντης, Ι. (2007). Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων, Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 19 Νάνου-Γιάνναρου, Α. (1999). Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 20 Νάνου-Γιάνναρου, Α. (2001). Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων, Συμπόσιο Αιγαίο-Νερό-Βιώσιμη Ανάπτυξη, Πάρος.
- 21 Ξενοδοχειακό Επιμελητήριο Ελλάδος, διαθέσιμο στο: <<http://www.grhotels.gr/>> τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 22 Παπαντωνίου, Μ. (2003). Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων- Βελτιστοποίηση Αντλήσεων, Διπλωματική Εργασία, Διεπιστημονικό - Διατμητικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών πόρων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 23 Ρούση, Ε., Τολικά, Κ., Αναγνωστοπούλου, Χ., & Μαχαίρας, Π. (2010). Ανάλυση συχνότητας των ημερήσιων βροχοπτώσεων και των αντίστοιχων υψών τους στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του 21ου αιώνα: Μελλοντικά σενάρια από ένα σύγχρονο

περιοχικό κλιματικό μοντέλο (RCM), πανελλήνια γεωγραφικά συνέδρια, συλλογή πρακτικών, 25-32.

- 24 Στράτζαλης, Κ. (2008). Προσδιορισμός Υδατικού Ισοζυγίου Υπογείου Παράκτιου Υδροφορέα της Ν. Θήρας υπό την Επίδραση Έτονων Κλιματικών Αλλαγών, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- 25 Τουριστική Πύλη Δήμου Θήρας, διαθέσιμο στο: <<http://www.santorini.gr/>>, τελευταία προσπέλαση 1/7/2016.
- 26 Τσακίρης, Γ. (1995).Υδάτινοι Πόροι: Τόμος Ι. Τεχνική Υδρολογία, Τομέας Υδάτινων Πόρων, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 Chiang, W. H., & Kinzelbach, W. (1998). Processing MODFLOW: a simulation system for modeling groundwater flow and pollution. Software instruction book, Hamburg-Zurich.
- 2 Dumas, C. (1980). Santorini A Guide to the Island and its Archaeological Treasures, Ekdotike Athenon S. A.
- 3 U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2003, Drinking Water Regulations and Contaminants, available at: <<https://www.epa.gov/dwregdev/drinking-water-regulations-and-contaminants>>, accessed on 1/7/2016.
- 4 Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). User's guide to SEAWAT; a computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow.
- 5 Kourakos, G., & Mantoglou, A. (2011). Simulation and multi-objective management of coastal aquifers in semi-arid regions. Water resources management, 25(4), 1063-1074.
- 6 Mcdonald, M. G., & Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model, Chapter A1, Book 6, USGS 1988.
- 7 Mantoglou, A. (2003). Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion. Water resources research, 39(12).
- 8 Mantoglou, A., & Giannouloupoulos, P. (2004). Sustainable yield of coastal aquifers using simulation and optimization: application to Santorini Island. In International Conference, Protection and Restoration of the Environment VII, Mykonos, Greece.
- 9 Santorini Guide to the Volcano, Institute for the Study and Monitoring of the Santorini Volcano, I.S.MO.SA.V.
- 10 Lyles, J. R. (2000). Is seawater intrusion affecting ground water on Lopez Island, Washington? (No. 057-00). US Geological Survey.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μόνιμος πληθυσμός Δήμου Θήρας (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2001)

ΔΗΜΟΣ ΘΗΡΑΣ	12453	Δ. Δ. Έξω Γωνιάς	370
Δ. Δ. Θήρας	2353	Έξω Γωνιά, η	326
Θήρα, η	2164	Περιβόλια, τα	44
Άνυδρος, ο (νησίς)	0	Δ. Δ. Επισκοπής Γωνιάς	1459
Ασκανιά, τα (νησίς)	0	Επισκοπή Γωνιάς, η	80
Ασπρονήσι, το (νησίς)	0	Καμάριον, το	1379
Έξω Γιαλός, ο (Δ. Δ. Θήρας)	57	Δ. Δ. Ημεροβιγλίου	500
Έξω Κατοικίες, οι	19	Ημεροβίγλιον, το	464
Εσχάτη, η (νησίς)	0	Παναγία Καλού, η	36
Μέσα Κατοικίες, οι	102	Δ. Δ. Καρτεράδου	1110
Νέα Καμένη, η	0	Καρτεράδος, ο	1090
Όρμος Φηρών, ο	11	Έξω Γιαλός, ο (Δ. Δ. Καρτεράδου)	20
Παλαιά Καμένη, η	0	Δ. Δ. Μεγαλοχωρίου	457
Χριστιανά, τα	0	Μεγαλοχώριον, το	457
Χριστιανή, η (νησίς)	0	Δ. Δ. Μεσαριάς	1461
Δ. Δ. Ακρωτηρίου	419	Μεσαριά, η	1089
Ακρωτήριον, το	419	Μονόλιθος, ο	372
Δ. Δ. Βόθωνος	676	Δ. Δ. Πύργου Καλλίστης	734
Βόθων, ο	609	Πύργος Καλλίστης, ο	734
Αγία Παρασκευή, η	67	Μονή Προφήτου Ηλιού, η	0
Δ. Δ. Βουρβούλου	464	Όρμος Αθηνιός, ο	0
Βουρβούλος, ο	464		
Δ. Δ. Εμπορείου	2450		
Εμπορείον, το	1775		
Άγιος Γεώργιος, ο	65		
Εξωμύτης, ο	132		
Πέρισσα, η	478		

Πίνακας 2: Μόνιμος πληθυσμός Δήμου Οίας (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2001)

ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΙΑΣ	1272
Κ. Δ.Οίας	994
Οία, η	796
Θόλος, ο	64
Κολούμπος, ο	20
Όρμος Αμμουδιού, ο	7
Όρμος Αρμένης, ο	3
Παράδεισος, ο	48
Φοινικιά, η	56
Κ. Δ.Θηρασίας	278
Θηρασία, η	158
Αγία Ειρήνη, η	86
Αγριλιά, η	2
Όρμος Κόρφου, ο	2
Ποταμός, ο	30

Πίνακας 3: Αφίξεις αλλοδαπών τουριστών στη Σαντορίνης (Ξενοδοχειακό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2006-2013)

ΕΤΟΣ	ΑΦΙΞΕΙΣ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ
2013	240773	20.4
2012	200052	-0.3
2011	200576	10.6
2010	181352	11.7
2009	162414	-10.7
2008	181780	-5.3
2007	192042	7.5
2006	178689	-

Πίνακας 4: Ξενοδοχειακό δυναμικό Σαντορίνης (Ξενοδοχειακό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2005-2015)

ΕΤΟΣ	ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ
2015	16260	28.0
2014	1205	1.1
2013	1262	3.6
2012	12123	2.4
2011	11838	4.8
2010	1196	10.9
2009	1084	0.1
2008	1069	3.2
2007	955	0.7
2006	989	3.6
2005	952	-

Πίνακας 5: Οικονομικώς ενεργός και μη ενεργός πληθυσμός το έτος 2001 (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2001)

Δήμος / κοινότητα και δημοτικό / κοινοτικό διαμέρισμα	Οικονομικώς ενεργοί							Οικονομικώς μη ενεργοί
	Σύνολο	Απασχολούμενοι					Άνεργοι	
		Σύνολο	Πρωτογενής Τομέας	Δευτερογενής Τομέας	Τριτογενής Τομέας	Δεδήλωσαν κλάδο		
ΔΗΜΟΣ ΘΗΡΑΣ	5563	4828	276	1290	3077	185	735	5203
Δ. Δ. Θήρας	1139	975	37	199	692	47	164	959
Δ. Δ. Ακρωτηρίου	151	142	18	30	85	9	9	196
Δ. Δ. Βόθωνος	307	255	21	59	164	11	52	267
Δ. Δ. Βουρβούλου	182	152	7	38	93	14	30	219
Δ. Δ. Εμπορείου	1.022	902	105	299	475	23	120	1.068
Δ. Δ. Έξω Γωνιάς	157	141	0	36	100	5	16	161
Δ. Δ. Επισκοπής Γωνιάς	688	578	25	158	380	15	110	584
Δ. Δ. Ημεροβιγλίου	227	173	3	48	106	16	54	220
Δ. Δ. Καρτεράδου	503	429	12	121	286	10	74	456
Δ. Δ. Μεγαλοχωρίου	198	181	20	56	88	17	17	199
Δ. Δ. Μεσαριάς	675	611	9	165	424	13	64	555
Δ. Δ. Πύργου Καλλίστης	314	289	19	81	184	5	25	319
ΚΟΙΝΟΤΗΤΑ ΟΙΑΣ	537	434	25	106	264	39	103	622
Κ. Δ.Οίας	470	376	13	104	222	37	94	437
Κ. Δ.Θηρασίας	67	58	12	2	42	2	9	185

Πίνακας 6: Ποσοστό απασχόλησης σε κάθε κλάδο οικονομικής δραστηριότητας (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 1991, 2001)

Κλάδος οικονομικής δραστηριότητας	Ποσοστό (%) 1991	Ποσοστό (%) 2001
1. Γεωργία, κτηνοτροφία, δασοκομεία, αλιεία	7.5	5
2. Μεταποιητικές βιομηχανίες	5.4	4.7
3. Ορυχεία και λατομεία	0.5	0.2
4. Παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, και φυσικού αερίου και νερού	1.6	1.3
5. Κατασκευές	26.3	17.6
6. Χονδρικό και λιανικό εμπόριο, επισκευή αυτοκινήτων, οχημάτων, μοτοσικλετών και ειδών προσωπικής και οικιακής χρήσης	12.2	15.1
7. Ξενοδοχεία και εστιατόρια	11.7	18.5
8. Μεταφορές, αποθήκευσης και επικοινωνίας	8.5	8.3
9. Ενδιάμεσοι χρηματοπιστωτικοί οργανισμοί, διαχείριση ακίνητης περιουσίας	3.8	5.2
10. Δημόσια διοίκηση και άμυνα. Υποχρεωτική κοινωνική ασφάλιση	6.2	5.4
11. Εκπαίδευση	3.3	3.6
12. Υγεία και κοινωνική μέριμνα	1	1.1
13. Λοιπές υπηρεσίες	3.7	5.8
14. Νέοι, μη δυνάμενοι να καταταγούν κατά κλάδο	8.3	8.2

Πίνακας 7: Βιώσιμη απόδοση των πηγαδιών (m³/d) για κάθε τιμή κατείδουσης (m/d)

N well	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.00009	0.00008	0.00007	0.00006	0.00005	0.00004	0.00003	0.00002
1	149.981	149.979	149.879	87.716	79.117	70.468	61.825	53.172	44.526	35.903	29.304	0.000
2	149.980	149.978	132.406	61.471	54.914	48.313	41.705	35.120	28.529	21.976	20.934	0.000
3	149.978	149.977	142.211	67.133	60.151	53.179	46.214	39.179	32.183	25.298	26.464	0.000
4	149.976	149.966	78.521	36.848	32.970	28.862	24.946	20.921	16.941	13.159	0.085	0.000
5	149.973	81.235	43.602	18.788	16.342	13.857	11.415	8.984	6.523	4.223	17.093	0.000
6	149.976	149.972	122.440	55.608	50.075	44.247	38.372	32.851	27.233	21.778	0.044	0.000
7	116.006	54.768	31.379	12.115	10.204	8.265	6.338	4.468	2.570	0.748	11.314	0.000
8	149.977	149.975	149.732	87.100	78.075	69.108	60.325	51.345	42.430	34.142	0.034	0.000
9	149.976	142.225	66.897	31.789	28.530	25.418	22.131	18.849	15.441	11.567	0.025	0.000
10	149.973	91.051	51.148	23.863	21.224	18.546	15.954	13.253	10.528	8.200	0.036	0.000
11	149.976	149.960	126.329	59.751	53.034	47.741	41.219	35.421	29.760	24.931	0.014	0.000
12	149.976	149.936	89.192	42.647	38.603	33.921	29.913	25.245	20.955	17.227	0.013	0.000
13	149.977	119.518	65.670	30.535	27.052	23.661	20.158	16.884	13.537	10.511	0.024	0.000
14	149.979	101.906	58.201	24.059	20.696	17.356	14.026	10.723	7.459	4.626	8.095	0.000
15	149.976	149.953	101.970	48.655	43.852	38.668	33.838	28.695	23.852	20.360	0.009	0.000
16	149.977	149.970	108.445	50.114	44.615	39.808	35.046	30.116	25.750	23.551	0.005	0.000
17	149.979	149.975	149.667	65.094	56.963	50.932	45.037	39.231	33.664	37.934	0.004	0.000
18	149.979	149.974	103.224	42.141	37.009	33.269	29.030	25.867	22.696	28.424	0.003	0.000
19	149.980	149.975	149.708	149.563	145.488	132.436	120.618	109.491	99.720	33.783	0.003	0.000
20	149.980	149.975	139.167	54.870	48.464	44.502	41.832	39.505	39.445	21.181	0.002	0.000
21	149.981	149.976	149.627	76.738	68.564	62.778	59.734	59.639	72.670	19.120	0.002	0.000
22	149.981	149.975	145.176	71.858	65.052	66.189	54.782	39.885	1.650	0.102	0.002	0.000
23	149.981	149.975	108.548	41.514	38.763	41.163	49.745	49.849	12.207	0.135	0.002	0.000

Πίνακας 7 (συνέχεια): Βιώσιμη απόδοση των πηγαδιών (m³/d) για κάθε τιμή κατείδυσης (m/d)

24	149.981	149.975	149.682	97.237	87.425	72.772	54.098	32.749	2.994	0.068	0.002	0.000
25	149.981	149.974	114.566	35.664	43.186	35.294	18.829	0.359	0.417	0.050	0.001	0.000
26	149.981	149.974	72.093	31.803	31.968	25.781	7.939	0.226	0.381	0.039	0.001	0.000
27	149.981	149.973	96.243	36.735	20.668	0.385	1.181	0.146	0.149	0.031	0.001	0.000
28	149.981	149.975	72.380	19.815	0.132	0.177	0.292	0.088	0.078	0.020	0.001	0.000
29	149.981	149.974	135.560	72.417	59.998	38.075	17.704	0.294	0.420	0.046	0.001	0.000
30	149.981	104.048	31.061	0.062	0.009	0.009	0.011	0.008	0.006	0.003	0.000	0.000
ΣΥΝΟΛΟ	4465	4144	3135	1534	1363	1185	1004	823	635	419	114	0

Πίνακας 8: Βιώσιμη απόδοση των πηγαδιών (m³/d) για κάθε τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας (m²/d)

K well	1	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
1	87.582	88.351	89.622	90.874	92.206	93.587	95.154	96.789	98.675
2	64.950	62.285	57.806	53.362	49.061	44.869	41.033	37.242	34.158
3	70.966	69.207	66.255	63.442	61.088	59.041	58.166	57.356	59.555
4	40.222	38.367	35.340	32.801	33.683	35.065	40.406	44.719	45.378
5	22.625	19.175	13.357	8.425	7.560	6.357	7.803	7.568	9.239
6	61.860	61.018	59.304	57.858	58.761	61.501	68.888	77.353	68.922
7	16.550	12.366	5.301	0.007	0.023	0.054	0.764	0.236	0.069
8	101.455	99.717	96.742	93.987	92.940	94.181	101.768	110.114	121.692
9	35.741	35.259	34.001	29.163	14.021	14.202	0.009	1.950	0.042
10	26.616	24.932	21.952	12.467	1.644	2.111	0.791	1.538	0.014
11	72.179	71.277	69.917	69.875	74.304	67.066	49.356	22.494	0.024
12	48.905	47.865	47.467	46.831	24.865	0.639	1.319	0.850	0.014
13	34.477	32.211	28.224	25.770	9.449	0.305	0.150	0.208	0.006
14	31.306	25.513	15.838	6.292	0.007	0.009	0.011	0.014	0.001
15	55.046	53.866	51.557	49.904	45.372	0.218	0.144	0.194	0.006
16	60.656	59.664	58.499	57.340	60.136	18.700	0.240	0.441	0.009
17	102.134	101.248	99.827	98.424	101.870	112.334	78.815	30.359	0.017
18	59.753	59.182	57.544	56.323	58.511	73.617	35.548	1.466	0.014
19	108.242	107.315	105.839	104.575	107.994	123.517	93.347	51.036	0.025
20	81.047	80.396	79.115	77.476	80.727	97.328	71.430	23.021	0.024
21	57.414	55.097	51.120	47.165	47.030	57.540	97.536	136.500	0.066
22	57.320	56.875	56.135	55.547	70.500	63.042	35.156	0.242	0.060
23	37.779	36.528	34.232	31.940	39.794	71.004	62.465	34.202	8.198
24	78.783	77.832	76.838	75.416	73.803	52.697	11.548	0.188	0.091
25	38.762	38.446	37.750	37.003	38.790	10.007	0.401	0.200	0.113
26	31.515	29.997	28.274	26.379	36.177	2.896	3.496	0.184	10.993
27	35.891	36.137	35.699	35.697	0.043	0.451	0.296	0.129	0.371
28	34.294	33.125	30.850	28.385	0.079	0.182	0.185	0.084	8.295
29	68.440	67.588	66.652	66.078	39.984	3.116	0.381	0.190	0.071
30	24.340	18.865	9.741	0.604	0.005	0.011	0.018	0.011	0.024
ΣΥΝΟΛΟ	1647	1600	1521	1439	1320	1166	957	737	466

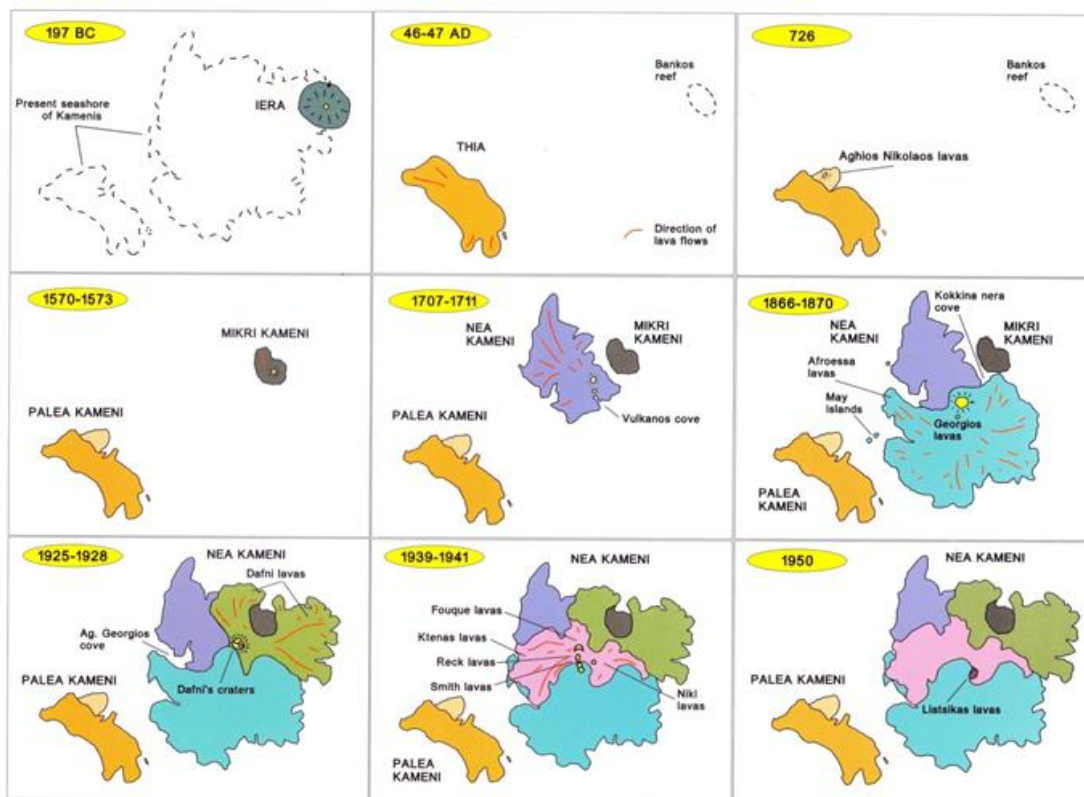
Πίνακας 9: Μεταβολή των θέσεων και του αριθμού των φρεάτων

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1				
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ
30	83	62	67	48
7	34	49	39	35
5	32	45	25	30
28	77	56	63	45
10	38	49	41	46
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2				
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ
30	83	62	67	48
7	34	49	39	35
5	32	45	25	30
28	77	56	63	45
10	38	49	41	46
29	79	48	16	28
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3				
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ		ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ
30	83	62	66	43
7	34	49	33	43
5	32	45	16	28
28	77	56	48	38
10	38	49	29	25
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4				
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ			
	ΓΡΑΜΜΗ	ΣΤΗΛΗ		
30	83	62		
7	34	49		
28	77	56		

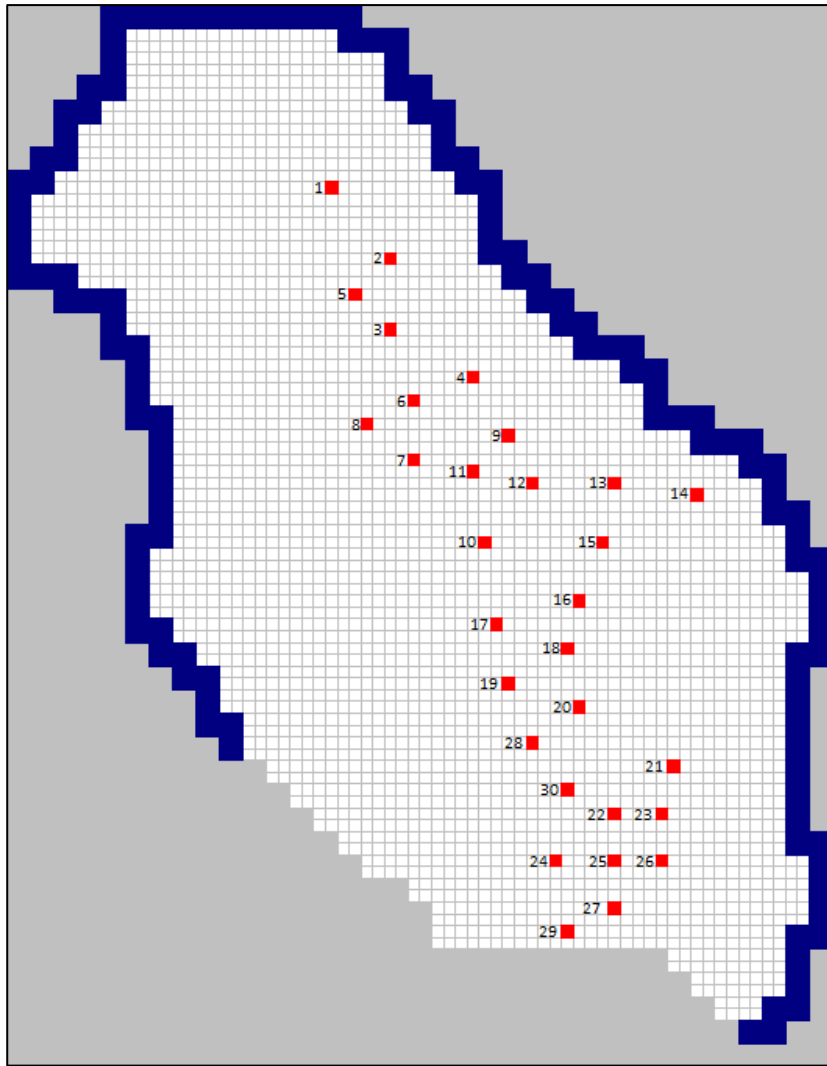
Πίνακας 10: Βιώσιμη απόδοση φρεάτων για τις βελτιωμένες θέσεις τους

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΗΓΑΔΙΟΥ	ΒΑΣΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4
1	87.716	81.480	65.796	64.352	87.757
2	61.470	45.793	43.864	44.366	61.505
3	67.133	50.150	49.851	50.323	67.239
4	36.848	35.934	36.003	37.210	37.029
5	18.788	65.202	63.686	56.332	20.310
6	55.608	43.085	42.347	46.328	55.484
7	12.115	55.564	55.793	69.351	-
8	87.100	70.349	70.277	68.360	87.157
9	31.789	33.347	33.579	34.942	33.284
10	23.863	56.765	57.114	69.349	26.030
11	59.750	40.271	39.748	42.972	59.992
12	42.647	38.214	38.183	41.263	42.937
13	30.535	34.571	34.580	35.217	30.961
14	24.059	24.123	24.136	24.292	24.123
15	48.654	46.046	46.069	46.924	48.903
16	50.114	44.861	44.642	45.969	49.793
17	65.094	51.281	51.431	47.099	65.022
18	42.141	35.270	35.733	37.214	42.481
19	149.563	117.919	120.343	120.506	149.795
20	54.870	34.295	34.789	42.741	54.841
21	76.738	64.788	65.146	69.789	76.812
22	71.858	40.409	47.343	52.550	71.708
23	41.514	35.611	36.841	37.810	42.253
24	97.237	76.349	87.378	83.630	100.287
25	35.664	27.133	25.369	34.375	33.879
26	31.803	33.825	38.218	33.159	36.515
27	36.735	40.887	66.909	38.641	44.973
28	19.815	100.239	102.681	59.930	-
29	72.417	64.628	56.806	60.083	73.853
30	0.062	72.263	76.498	124.479	-
ΣΥΝΟΛΟ	1534	1561	1591	1620	1525

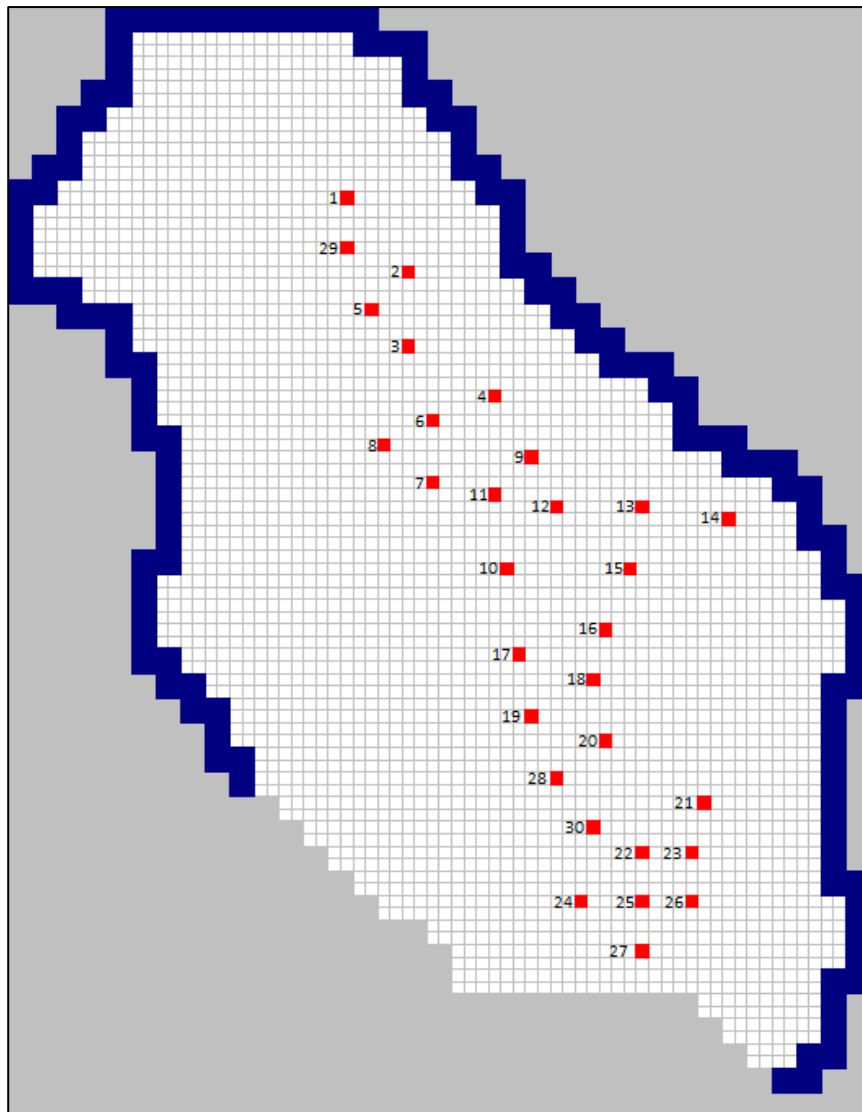
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ



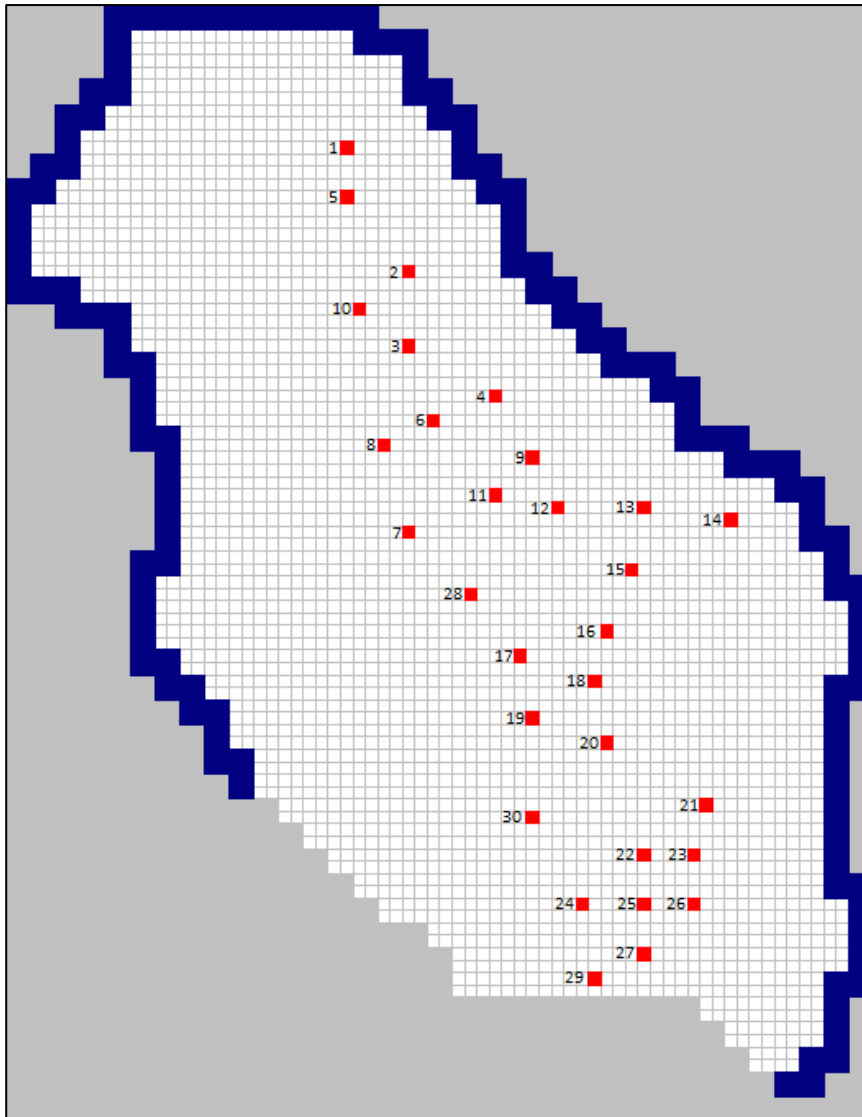
Εικόνα 1: Η δημιουργία της Παλιάς και της Νέας Καμένης (Santorini Guide to the Volcano)



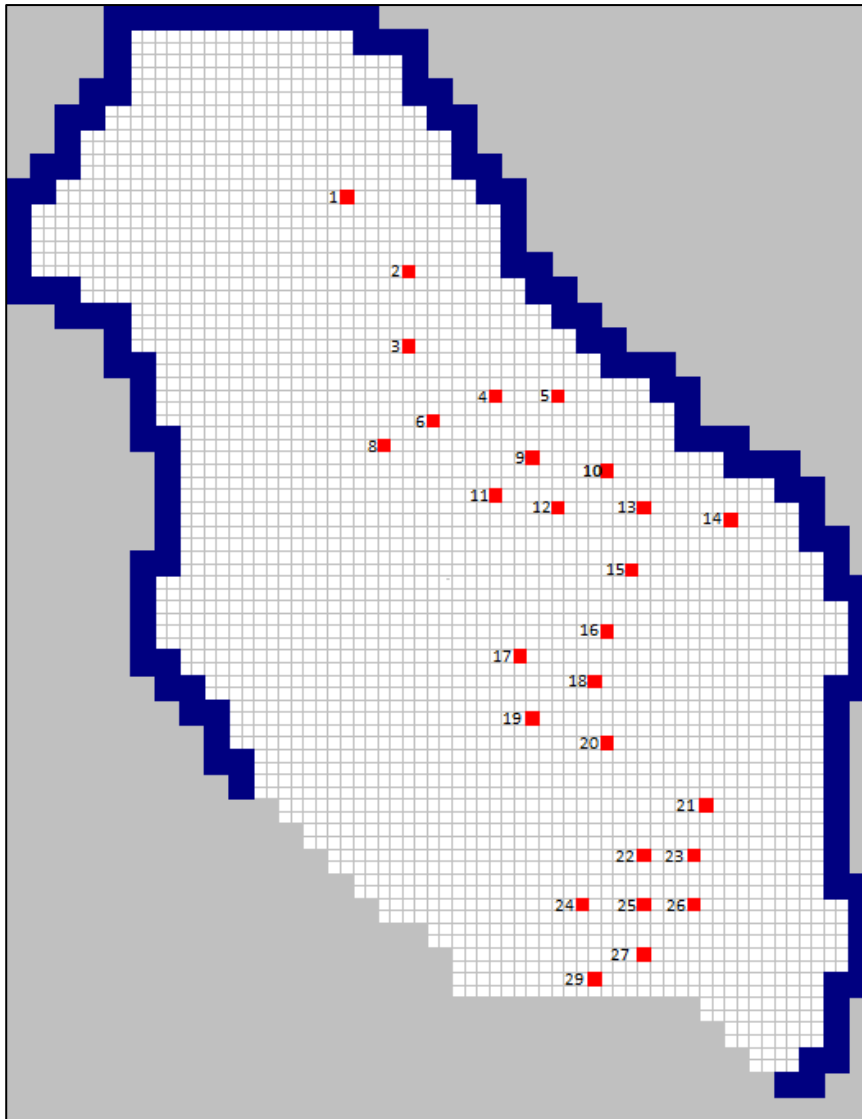
Εικόνα 2: Μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών - Περίπτωση 1.



Εικόνα 3: Μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών - Περίπτωση 2.



Εικόνα 4: Μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών - Περίπτωση 3.



Εικόνα 5: Μεταβολή των θέσεων των πηγαδιών - Περίπτωση 4.

