



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



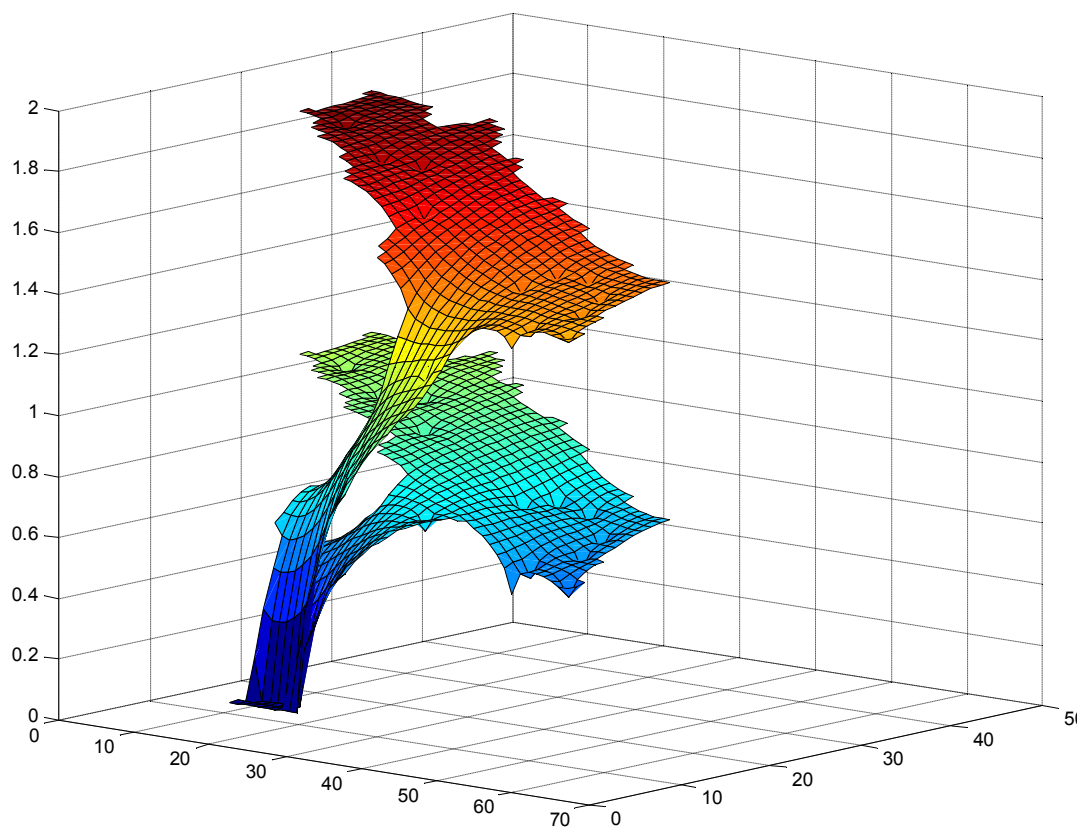
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ «ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Προσομοίωση Παράκτιου Υπόγειου Υδροφορέα Ζεφυρίας Μήλου»



Εκπόνηση: Στάμος Κωνσταντίνος
Επιβλέπων Καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2010

Το διάγραμμα του εξώφυλλου προέκυψε από τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων στον παράκτιο υδροφορέα της λεκάνης Ζεφυρίας στη Μήλο, μετά από επεξεργασία με τη γλώσσα τεχνικού προγραμματισμού MATLAB.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία δεν θα είχε επιτευχθεί χωρίς την σημαντική καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια του Επιβλέποντα Καθηγητή, κου Μαντόγλου Αριστοτέλη, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για την συνεργασία μας. Η εργασία στα πλαίσια της εμβάθυνσης της Διαχείριση Υδατικών Πόρων του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την αμέριστη συμπαράσταση, τη διαρκή καθοδήγηση και στήριξη στα επιμέρους στάδια της εργασίας, ώστε να παρουσιαστεί άρτια, ολοκληρωμένη και γεμάτη χρήσιμα συμπεράσματα για τη βιωσιμότητα του φυσικού συστήματος που εξετάστηκε.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Κοψιάτη Γιώργο για την πολύτιμη βοήθειά του που προσέφερε μέσω των γνώσεων και των συμβουλών τους στα διάφορα λογισμικά προγράμματα και τις υδρολογικές έννοιες, δίνοντας μου τη δυνατότητα κατανόησης και αφομοίωσής τους αλλά και για την υπομονή, τη διάθεση που επέδειξε καθώς και το χρόνο που αφιέρωσε.

Κλείνοντας, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Στέργιο και Ευγενία, τον αδελφό μου Τάσο και την Κωνσταντίνα για την ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την απεριόριστη στήριξη και υπομονή που έδειξαν ο καθένας με τον δικό του τρόπο όλο αυτόν τον καιρό στον πενταετή κύκλο σπουδών μου, που κλείνει αισίως με την παρουσίαση της παρούσας εργασίας.

Περίληψη	7
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Περιοχή μελέτης	9
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	10
1.3 Φάσεις της Διπλωματικής Εργασίας	10
1.3.1 Καθορισμός του αντικειμένου	10
1.3.2 Συλλογή στοιχείων	10
1.3.3 Επεξεργασία στοιχείων	11
1.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις	11
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ	12
2.1 Γεωγραφία της Νήσου	12
2.2 Διοικητική Διαίρεση	14
2.3 Ανθρωπογενή Στοιχεία	16
2.3.1 Πληθυσμιακά στοιχεία	16
2.3.2 Παραγωγικοί τομείς	19
2.4 Κλίμα - Έδαφος	21
2.5 Ορυκτός Πλούτος	22
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ Η ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ	23
3.1 Στρωματογραφία	27
3.2 Η νεότερη ηφαιστειότητα στις περιοχές: Φυριπλάκα και Τράχηλας	32
3.3 Υδρολιθοστρωματογραφία	39
3.3.1 Υδροπερατοί έως ημιπερατοί σχηματισμοί	39
3.3.2 Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί	39
3.4 Τεκτονική	41
3.5 Υδροφόροι Σχηματισμοί της Νήσου Μήλου	44
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ	45
4.1 Ο υδροφορέας της Ζεφυρίας	45
4.2 Πιεζομετρία Υδροφορέα	45
4.3 Πιεζομετρικοί Χάρτες	46
4.4 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα	50
4.4.1 Βάσει φυσικών ορίων	50
4.4.2 Βάσει υδραυλικών ορίων	50
4.5 Κατακόρυφη Οριοθέτηση Υδροφορέα	51
4.6 Πιεζομετρία του Υδροφορέα στην Περιοχή Μελέτης	52
4.7 Υπολογισμός Υδραυλικής Αγωγιμότητας	63
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	66
5.1 Η σπουδαιότητα των υδατικών πόρων (επιφανειακοί και υπόγειοι)	66
5.2 Υπόγεια νερά και υδροφορείς	72
5.2.1 Υδροφορείς	77
5.2.2 Υδραυλική θεώρηση υπόγειων ροών	79
5.2.3 Πορώδες και ειδική απόδοση	79
5.2.4 Αποθηκευτικότητα	82
5.2.5 Ανομοιογένεια και ανισοτροπία	83
5.3. Νόμος Darcy	84
5.3.1 Παραδοχή του συνεχούς μέσου	84
5.3.2 Νόμος Darcy	84
5.3.3 Πεδίο ισχύος Νόμου Darcy	87
5.4 Θεωρία αστρόβιλου πεδίου	88
5.5 Υπόθεση Dupuit	92
5.6 Αρχικές και οριακές συνθήκες	94
5.7 Μοντέλα προσομοίωσης κίνησης υπογείων υδάτων	96
5.7.1 Προσομοίωση - Γενικά	96

5.7.2	Εξίσωση συνέχειας.....	96
5.7.3	Αριθμητικά μοντέλα υπόγειων υδάτων.....	100
6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ.....	101
6.1	Ο υδρολογικός κύκλος του νερού στη φύση.....	101
6.2	Έντονες Κλιματικές αλλαγές - Ξηρασία.....	103
6.2.1	Η αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος.....	103
6.2.2	Η αλλαγή κλίματος στην Ελλάδα και τα νησιά της.....	104
6.2.3	Επιπτώσεις κλιματολογικών αλλαγών Οι παγκόσμιες επιπτώσεις.....	105
6.3	Το πρόβλημα της υπαλμύρωσης.....	107
6.3.1	Γενικά.....	107
6.3.2	Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων- Πολυπλοκότητα προβλήματος.....	111
6.3.3	Κατηγορίες υφάλμυρων υπογείων νερών.....	113
6.3.4	Ευαισθησία Ελλάδας στη θαλάσσια διείσδυση.....	113
6.3.5	Αίτια υπαλμύρωσης των υπόγειων νερών.....	114
6.3.6	Επιπτώσεις της υπαλμύρωσης.....	115
6.3.7	Μέτρα προστασίας - Αντιμετώπισης της υπαλμύρωσης.....	119
6.3.8	Τεχνητός εμπλουτισμός Γενικά.....	121
6.4	Οι υφάλμυρες περιοχές στην Ελλάδα.....	123
6.4.1	Υφάλμυρες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας.....	123
6.4.2	Υφάλμυρες περιοχές της νησιωτικής Ελλάδας.....	127
6.4.3	Επισκόπηση προβλήματος υπαλμύρωσης στην Ελλάδα.....	128
6.5	Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού.....	131
6.5.1	Προσέγγιση Ghyben-Herzberg.....	132
6.5.2	Λύση Strack.....	136
6.5.3	Μεθοδολογία Προσομοίωσης Παράκτιων Φρεάτιων Υδροφορέων: Μοντέλο Mantoglou et al (2004).....	139
7.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.....	142
7.1	Γενικά.....	142
7.1.1	Η συνθήκη της διακριτοποίησης.....	144
7.1.2	Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών.....	148
7.1.3	Επίλυση με το SEAWAT.....	159
7.2	Εφαρμογή.....	165
7.3	Εξαγόμενα προσομοίωσης.....	174
7.4	Προσομοίωση υδροφορέα με παροχές άντλησης.....	177
7.4.1	Ισοκατανομημένη άντληση.....	177
7.4.2	Αφαίρεση άντλησης νερού από το φρέαρ Φ14.....	190
7.4.3	Δοκιμαστικές αντλήσεις νερού στο φρέαρ Φ14.....	195
7.5	Εκτίμηση Αναγκών σε Νερό.....	204
8.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	209
8.1	Σύνοψη.....	209
8.2	Συμπεράσματα.....	210
8.2.1	Συμπεράσματα από την πιεζομετρία του υδροφορέα.....	210
8.2.2	Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροφόρου σχηματισμού.....	210
8.3	Προτάσεις – Μέτρα Προστασίας.....	212
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	215
	1.ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	215
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	244
	2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ.....	244
	Βιβλιογραφία.....	248

Περίληψη

Ο παράκτιος υδροφορέας της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο, με έκταση 7,8 km² αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Λόγω των ολοένα αυξανόμενων υδατικών απαιτήσεων του νησιού, εξ' αιτίας της τουριστικής ανάπτυξης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, κρίνεται αναγκαία η μελέτη του σημαντικού αυτού υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Συγκεκριμένα γίνεται προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την υπάρχουσα κατάσταση και να προταθούν μέτρα για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των υδάτινων συστημάτων γενικά αλλά και βελτίωση της επιβαρυμένης εικόνας που παρουσιάζει ο παράκτιος υδροφορέας.

Αρχικά εξετάζεται το γεωλογικό και υδρογεωλογικό πλαίσιο του νησιού που παρουσιάζει μια σύνθετη εικόνα και ερευνώνται οι διάφορες υδροφορίες που παρουσιάζονται στα εδάφη του. Στην περιοχή που βρίσκεται ο παράκτιος υδροφορέας που εξετάζεται, υπάρχει ομοιομορφία αφού αποτελείται στο σύνολο της από παράκτιες και αλλουβιακές αποθέσεις. Επίσης από τις τιμές του υδραυλικού φορτίου των γεωτρήσεων σχεδιάστηκαν οι ισοσταθμικές καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν την στάθμη των υπογείων νερών του παράκτιου υδροφορέα με τη βοήθεια του λογισμικού Surfer Golden Software 9.

Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της ροής του παράκτιου υδροφορέα με ένα μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας. Τα μοντέλα μεταβλητής πυκνότητας βασίζονται στην ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας και τη μεταφορά διαλυμένης μάζας σε πορώδες μέσο. Η προσομοίωση γίνεται με την εφαρμογή του προγράμματος SEAWAT στο GROUNDWATER VISTAS που είναι ένας συνδυασμός του MODFLOW και του MT3DMS και επιλύει ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφορά διαλυμένης μάζας. Το SEAWAT βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια συνήθης μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρις ορθογώνιο πλέγμα χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελιά. Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές επομένως εφαρμόζεται στον διακριτοποιημένο χώρο με βάση την υπόθεση ότι κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς. Έπειτα σε περιβάλλον MATLAB υπολογίζονται τα υδραυλικά φορτία hf και η θέση της αλάτινης σφήνας στον υπό μελέτη υδροφορέα.

Καταλήγοντας δίνονται μερικές προτάσεις για κατασκευή ενός ακριβέστερου μοντέλου προσομοίωσης και κάποιες γενικές αλλά και ειδικότερες επισημάνσεις, για τη σταδιακή επαναφορά του υδροφορέα που εξετάστηκε αλλά και τη συνδιαχείριση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων για την προστασία των υδατικών πόρων γενικά, την άνοδο της στάθμης των υδροφόρων και τη σταδιακή αποκατάσταση της υφαλμύρινσης. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία, ιδιαίτερα στα νησιά που ανήκουν στις ελλειμματικές περιοχές υδατικών αποθεμάτων.

Abstract

The coastal aquifer of the sedimentary basin of Zefyria on Milos' island, covering an area of 7.8 km², is the main source of water supply in the area. On account of the increasingly water needs, due to the consecutive tourist development of the island during the last years, the study of this important underground of water wagon system becomes necessary. Specifically a simulation of flow of underground water are made so that useful conclusions are inferred on the existing situation and measures for the guarantee of viability of aquatic systems generally are proposed and also the improvement of the overloaded picture that the coastal aquifer presents.

Initially the geological and hydro geological frame of island that presents a complex picture is examined and the various aquifers that are developed in its grounds are investigated. Uniformity exists in the region where the coastal aquifer which is examined, is found since this region is constituted in its entirety by coastal and alluvial depositions and a first estimate of the hydraulic conductivity of the ground is made.

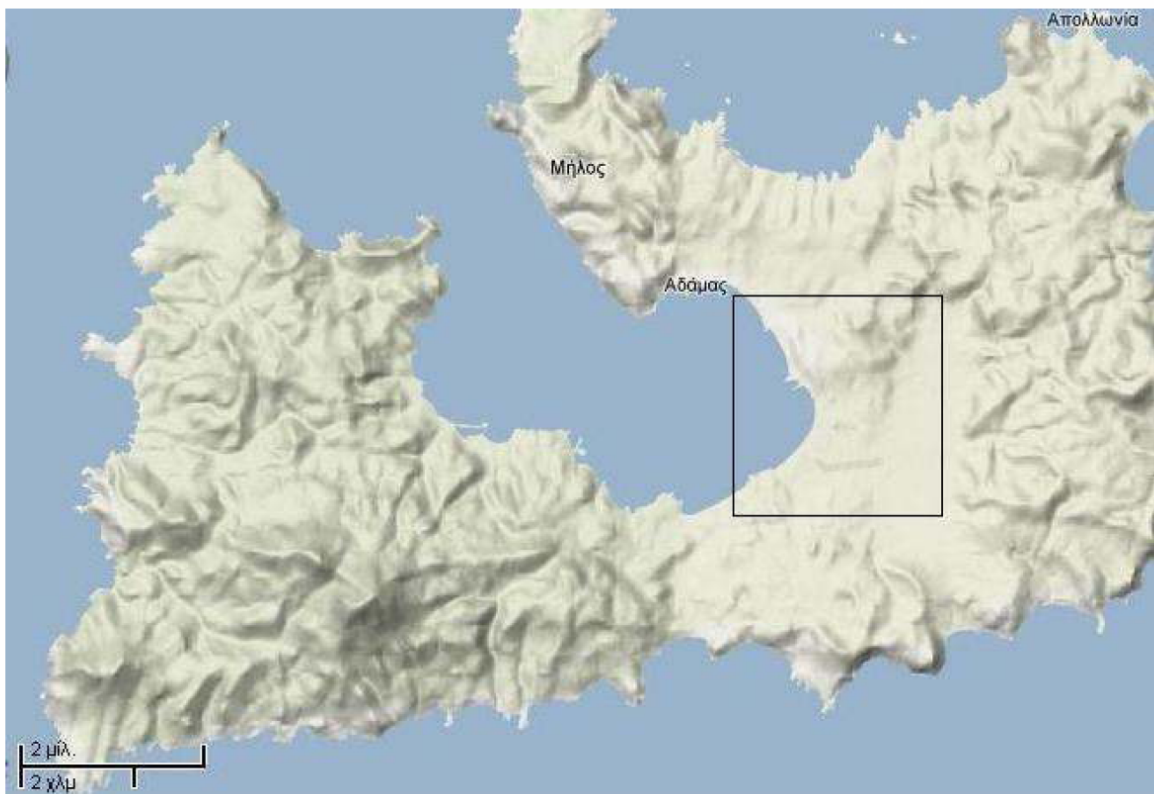
Thereafter, the simulation of flow in coastal aquifer with a variable density model. The variable density models based on solving simultaneous equations describing the movement of groundwater of variable density and transport of dissolved mass in porous media. The simulation is done by applying to the program SEAWAT in GROUNDWATER VISTAS which is a combination of MODFLOW and MT3DMS and simultaneously solves the problem of motion of underground water and dissolved mass transport. The SEAWAT based on the numerical solution of differential equations with finite differences. The method of finite differences is a standard method for solving differential equations in the space is discretized by a rectangular grid trillion thus splitting the space into cells. The approach with finite differences is therefore applicable to the discrete space with the assumption that each cell corresponds to a representative volume reference. Then in MATLAB environment the hydraulic heads "hf" and the position of the saline wedge in the aquifer are calculated.

Concluding a few proposals for manufacturing a more precise model of simulation are given and also some general and some more specific pointings out are made, for the progressive reintroduction of the aquifer that was examined and the simultaneous management of the surface and underground waters for the protection of water resources in general, the rise of level water wagon and the progressive re-establishment of salinity. This acquires special importance, particularly for the islands that belong in regions with deficit water surplus.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιοχή μελέτης

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αποτελεί ένας υπόγειος, παράκτιος υδροφόρας που βρίσκεται στην προσχωματική λεκάνη Ζεφυρίας, στη νήσο Μήλο, και εκτείνεται σε μια περιοχή περίπου 7,8 km² στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφόρα δεν είναι κάτι απλό, διότι πρέπει απαραίτητως κατά την εφαρμογή του μοντέλου να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη της θάλασσας, η οποία αποτελεί ταμειυτήρα αλμυρού νερού, που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος από ότι το γλυκό νερό του υδροφόρα.



Περιοχή μελέτης (Ανάγλυφος χάρτης – Πηγή Google Maps)

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιούνται διαφορετικές προσομοιώσεις κυρίως όσον αφορά στον προσδιορισμό της αλάτινης σφήνας. Επίσης, πραγματοποιείται μία αδρομερής προσπάθεια εκτίμησης της μέγιστης ποσότητας νερού, που μπορεί να αποληφθεί μέσω αντλήσεων από τον υδροφόρα, χωρίς να παρουσιαστεί εισχώρηση υφάλμυρου νερού.

Απαραίτητο στάδιο σε μία εφαρμογή προσομοίωσης αποτελεί η κατανόηση των γεωλογικών και κυρίως υδρογεωλογικών–υδρολιθολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα που εξετάζεται. Έτσι, της εφαρμογής της προσομοίωσης προηγείται μία διαδικασία συλλογής, αξιολόγησης και επεξεργασίας δεδομένων σχετικών με την περιοχή μελέτης, έτσι ώστε τελικά να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και τιμές μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια στο ‘στήσιμο’ του εννοιολογικού μοντέλου, το οποίο άλλωστε αποτελεί το βασικότερο στάδιο της προσομοίωσης.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο καθορισμός των υδρολογικών παραμέτρων για την προσομοίωση του υδροφορέα με κατάλληλο μοντέλο προσομοίωσης ώστε να παρουσιαστεί η εφαρμογή και τα αποτελέσματα του μοντέλου και να οδηγηθούμε στα απαραίτητα συμπεράσματα.

1.3 Φάσεις της Διπλωματικής Εργασίας

1.3.1 Καθορισμός του αντικειμένου

Η πρώτη φάση περιλαμβάνει τον καθορισμό του αντικειμένου και του σκοπού της εργασίας με σαφήνεια έτσι ώστε να είναι κατανοητά τα στοιχεία που είναι αναγκαία για την εξέλιξή της.

1.3.2 Συλλογή στοιχείων

Στη φάση αυτή πραγματοποιείται η συλλογή των στοιχείων εκείνων, που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση και τον υπολογισμό των παραμέτρων εκείνων που αποτελούν τα κριτήρια αξιολόγησης των υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης. Τα στοιχεία αυτά είναι τα στοιχεία που παραχωρήθηκαν από τον συνεργάτη του ΓΠΑ Δρ. Υδρογεωλόγο Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο. Επίσης αρκετά στοιχεία, καθώς και αντίστοιχη βιβλιογραφία συλλέχθηκαν από την κεντρική βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π. καθώς και από διαδικτυακούς τόπους ενώ συγχρόνως αρκετά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν από προηγούμενη διπλωματική για τη συγκεκριμένη περιοχή(Διπλωματική Θεοδωρακόπουλος 2009 Υπεύθυνος Καθηγητής κ .Μαντόγλου).

1.3.3 Επεξεργασία στοιχείων

Για τον υπολογισμό του πιεζομετρικού φορτίου και τη κατασκευή του αντίστοιχου πιεζομετρικού χάρτη χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Surfer 9, ενώ η προσομοίωση του υδροφορέα έγινε με τη βοήθεια του κώδικα SEAWAT, χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού GROUNDWATER VISTAS.

1.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στο στάδιο της αξιολόγησης των στοιχείων γίνεται προσπάθεια αποτίμησης των εκτιμήσεων και υπολογισμών που προκύπτουν από το στάδιο της επεξεργασίας των στοιχείων και αφορούν την περιοχή μελέτης. Στη φάση αυτή γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για την κατάσταση και συμπεριφορά του υδροφορέα στο χρονικό διάστημα που εξετάζεται και προτείνονται κάποιες εναλλακτικές λύσεις με σκοπό να γίνει πλήρως εκμεταλλεύσιμος αποφεύγοντας την ποσοτική και ποιοτική κυρίως υποβάθμιση των υδάτων του.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

2.1 Γεωγραφία της Νήσου

Η νήσος Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικότερο άκρο του συμπλέγματος των Κυκλάδων, 120 χλμ ανατολικά των ακτών της Λακωνίας, με έκταση 150,6 τ. χλμ. Και με πληθυσμό 4736 κατοίκων σύμφωνα με την απογραφή της Ε.Σ.Υ.Ε για το έτος 2001. Η Μήλος είναι ένα νησί με ισχυρό διαμελισμό, έχει σχήμα πετάλου, στο εσωτερικό του οποίου σχηματίζεται ο βαθύς όρμος της Λήμνου, όπου βρίσκεται το επίνειο της πρωτεύουσας, Αδάμας.

Το έδαφος της νήσου είναι γενικά λοφώδες και η ψηλότερη κορυφή είναι αυτή του Προφήτη Ηλία που βρίσκεται στο δυτικό τμήμα, και έχει υψόμετρο 751 μ. Στη Μήλο υπάγονται οι νησίδες Ακράθιο, οι Ανάνες, η Αντίμηλος (Ερημόμηλος), οι Ακραδιές, το Παξιμάδι, το Πηλονήσι (Πολύαιγος) και το Πρασονήσι, ενώ το κοντινότερο νησί των κυκλάδων είναι η Κίμωλος η οποία βρίσκεται μόλις 1,6 χλμ βορειοανατολικά του νησιού. Η Αντίμηλος, που ονομάζεται και Ερημόμηλος από τους κατοίκους της Μήλου, είναι ένα μικρό απόκρυμνο και ακατοίκητο νησί με θαμνώδη βλάστηση δυτικά της Μήλου, στο Μυρτώο πέλαγος, έκτασης μόλις 8 τετρ. χλμ.

Η Πολύαιγος βρίσκεται 6,2 χλμ ανατολικά της Μήλου έχει έκταση 17,2 τετρ. χλμ και είναι ακατοίκητη, αλλά χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος λόγω της θαμνώδους βλάστησής της. Από το 1898 υπάρχει στο νησί φάρος στο ακρωτήριο Μάσκουλα, σε ύψος 138μ στην ανατολική πλευρά του νησιού. Η Ελλάδα έχει περιλάβει την Πολύαιγο στο πρόγραμμα Natura 2000 της Ευρωπαϊκής Ένωσης, θεωρώντας την σημαντικό βιότοπο. Στο νησί γεννά τα μικρά της η μεσογειακή φώκια Monachus-Monachus.



Εικόνα 2.1 Η νήσος Μήλος όπως φαίνεται από δορυφόρο

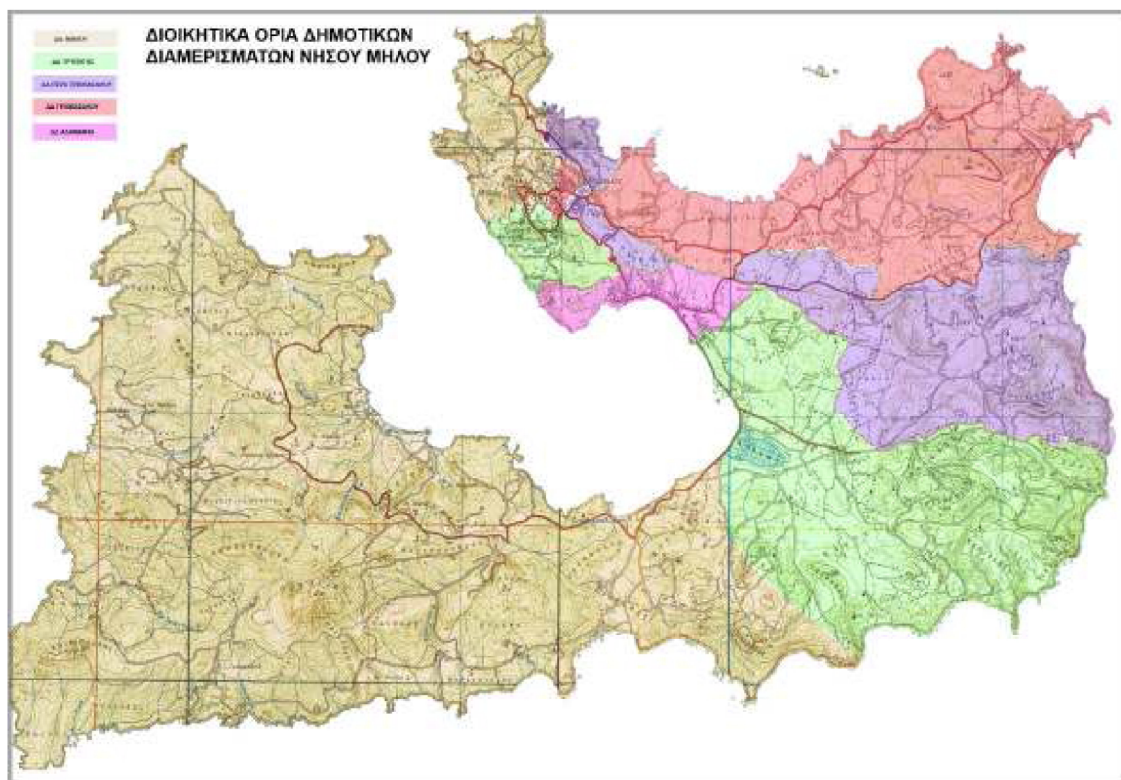
2.2 Διοικητική Διάρθρωση

Η Μήλος στη δωρική διάλεκτο ονομαζόταν Μάλος. Με το ίδιο όνομα στα ιστορικά χρόνια αναφέρεται και το νησί και η πόλη. Μεταγενέστερες παραδόσεις αποδίδουν το όνομα στο σχήμα του νησιού. Στα νομίσματα της πόλης απεικονίζεται το μήλο που αποτελεί το σήμα κατατεθέν του νησιού στα ιστορικά χρόνια. (Ιστορικά στοιχεία για την περιοχή υπάρχουν στο Παράρτημα Ι)

Η Μήλος διοικητικά ανήκει στο νομό Κυκλάδων, του οποίου αποτελεί επαρχία μαζί με τη Σίφνο, τη Σίκινο, την Κίμωλο και τη Φολέγανδρο. Πρωτεύουσα του νησιού και της επαρχίας είναι η κωμόπολη Μήλος, που βρίσκεται σε υψόμετρο 200μ και αριθμεί 877 κάτοικους. Η κωμόπολη είναι έδρα ομώνυμης κοινότητας στην οποία υπάγονται και χωριά κυριότερα των οποίων είναι τα Παλάκι Χάλακα, Φυροπόταμος και Φουρκοβούνι καθώς και ο οικισμός Ακράθι που βρίσκεται στο ομώνυμο μικρό νησί. Η Μήλος γενικά χωρίζεται σε πέντε Δημοτικά Διαμερίσματα, της Μήλου, του Αδάμαντος, Τριοβασάλου και Πέραν Τριοβασάλου και της Τρυπητής.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	
Δ.Δ.	Πληθυσμός
Μήλου	919
Αδάμαντα	1391
Πέραν Τριοβασάλου	644
Τριοβασάλου	1029
Τρυπητής	788

Πίνακας 2.1 Πληθυσμός Ν.Μήλου ανά Δ.Δ. (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)



Εικόνα 2.2 Διοικητική διαίρεση νήσου Μήλου

2.3 Ανθρωπογενή Στοιχεία

2.3.1 Πληθυσμιακά στοιχεία

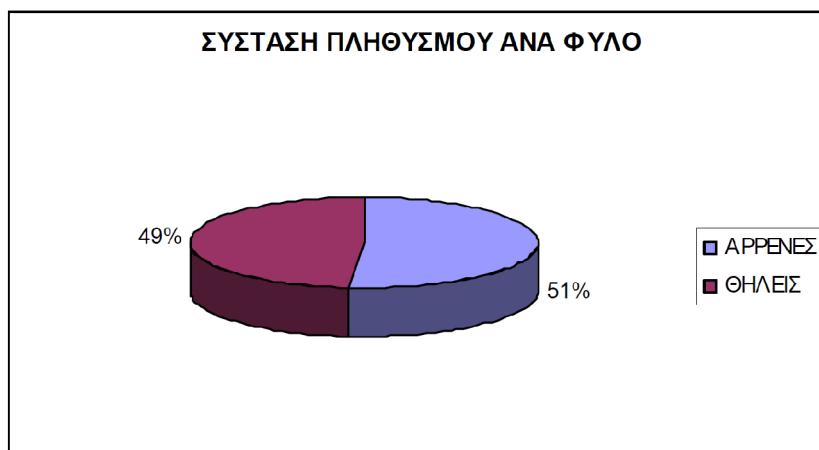
Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, ο μόνιμος πληθυσμός του συνόλου της Νήσου ανέρχεται σε 4771 κατοίκους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα στοιχεία της απογραφής ανά δημοτικό και κοινοτικό διαμέρισμα, κοινότητα και οικισμό.

	ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	4.736
	Δ.Δ.Μήλου	919
01	Μήλος,η	792
02	Ακράθιον,το (νησίς)	0
03	Ανάρες, οι (νησίς)	0
04	Αντίμηλος,η (νησίς)	0
05	Αρετή,η	0
06	Αρκάδιο, το (νησίς)	0
07	Εμπορειός,ο (Εμπορειός,ο)	52
08	Ξυλοκερατιά,η	6
09	Παξιμάδι, το (νησίς)	0
10	Πηλονήσιο, το (νησίς)	0
11	Πρασονήσι,το (νησίς)	0
12	Ραλάκιον Χάλακος,το	11
13	Φουρκοβούνι,το	2
14	Φυροπόταμος,ο	12
15	Ψαθάδικα,τα	44
	Δ.Δ.Αδάμαντος	1.391
01	Αδάμας,ο	1.391
	Δ.Δ.Πέραν Τριοβασάλου	644
01	Πέραν Τριοβασάλος,ο	583
02	Κατσαρώνας,ο	37
03	Κόμια,τα	24

Δ.Δ. Τριοβασάλου		1.029
01	Τριοβασάλος,ο	705
02	Άγιοι Ανάργυροι,οι	4
03	Άγιος Γεράσιμος,ο	17
04	Απολλώνια,τα	257
05	Βούδια,τα	2
06	Γλαρονήσια,τα	0
07	Μανδράκια,τα	2
08	Μύτικας, ο	20
09	Πάχαινα,η	18
10	Φυλακωπή,η	4
Δ.Δ. Τρυπητής		788
01	Τρυπητή,η	485
02	Ζεφυρία,η	224
03	Θειωρυχείο,το (τ.Θειωρυχεία Μήλου,τα)	0
04	Κάναβα,η	65
05	Κλήμα,το	12
06	Σχινωπή,η	2

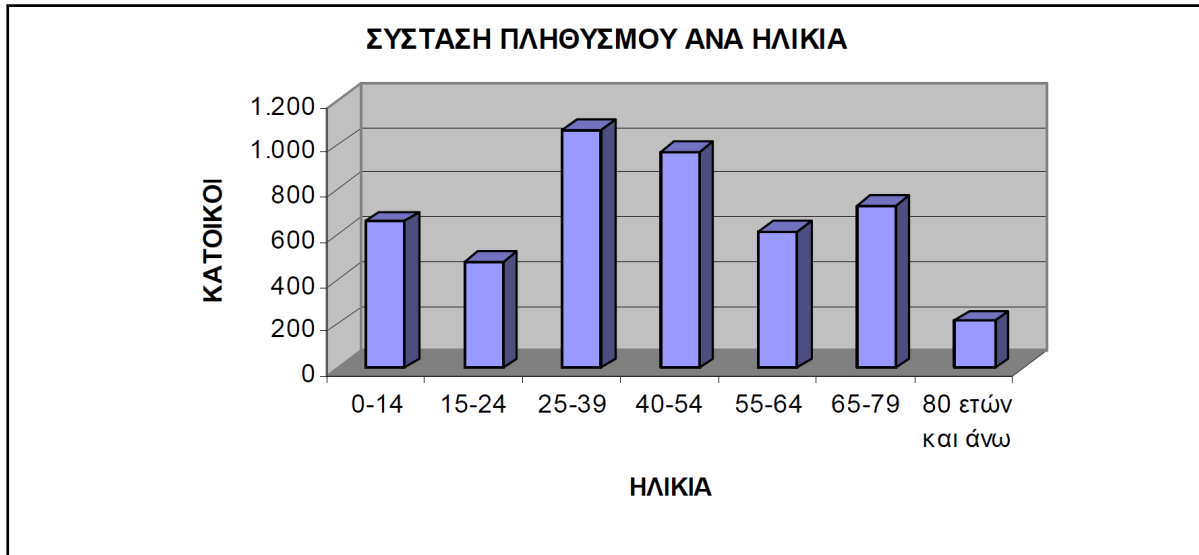
Πίνακας 2.2 Μόνιμος πληθυσμός, δήμοι, κοινότητες, δημοτικά και κοινοτικά διαμερίσματα(Πηγή:Ε.Σ.ΥΕ. 2001)

Σύμφωνα πάντα με τα στοιχεία της Ε.Σ.Υ.Ε. για το 2001, παρατηρείται μία ισοκατανομή ανά φύλο στη σύσταση του πληθυσμού όπως φαίνεται και από το γράφημα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 1 Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά φύλο (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)

Επίσης παρατηρούμε πως η πλειοψηφία του πληθυσμού ανήκει στη μέση ηλικία, ενώ μικρή πληθυσμιακή συγκέντρωση παρουσιάζουν οι μικρότερες ηλικίες, στοιχείο αρκετά ανησυχητικό όσο αφορά τη γήρανση του πληθυσμού.



Διάγραμμα 2 Σύσταση πληθυσμού ν. Μήλου ανά ηλικία (Ε.Σ.Υ.Ε. 2001)

2.3.2 Παραγωγικοί τομείς

Η πλειοψηφία του πληθυσμού της Μήλου ασχολείται με τον τουρισμό και το εμπόριο αφού λόγω της εδαφικής μορφολογίας του νησιού, η ενασχόληση με τη γεωργία καθίσταται δύσκολη. Το ανησυχητικό δεδομένο για τους μόνιμους κατοίκους ωστόσο είναι η αύξηση του οικονομικά ανενεργού πληθυσμού, το ποσοστό του οποίου πλέον υπερτερεί σε σχέση με αυτό του οικονομικά ενεργού σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία της απογραφής του 2001. Ωστόσο η ανεργία παρά το γεγονός ότι έχει αυξηθεί λίγο σε σχέση με την απογραφή του 1991, παραμένει ακόμα σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτά που αντιστοιχούν στο μέσο όρο του ελλαδικού χώρου.

Γεωγραφικά διαμερίσματα, νομοί, δήμοι / κοινότητες, δημοτικά / κοινοτικά διαμερίσματα, φύλο, ομάδες ηλικιών	Αστικά (ΑΣ) και αγροτικά (ΑΓ) Δ.Δ ή Κ.Δ	Πεδινά (Π), ημιορεινά (Η) και ορεινά (Ο) Δ.Δ ή Κ.Δ	Οικονομικώς ενεργοί				Οικονομικώς μη ενεργοί
			Σύνολο	Απασχολούμενοι	Ανεργοί		
					Σύνολο	Από αυτούς "νέοι"	
ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ			1.846	1.711	135	48	2.460
10-14			1	1	0	0	227
15-19			30	22	8	6	166
20-24			220	181	39	25	64
25-29			280	256	24	10	88
30-34			289	260	29	6	89
35-39			230	223	7	0	95
40-44			215	209	6	0	111
45-49			187	179	8	0	95
50-54			191	182	9	1	170
55-59			123	119	4	0	204
60-64			52	51	1	0	234
65-69			22	22	0	0	269
70-74			5	5	0	0	258
75+			1	1	0	0	390

Εικόνα 2.3 Οικονομικά ενεργός και μη ενεργός πληθυσμός ν. Μήλου ανά ηλικία (Πηγή:Ε.Σ.ΥΕ. 2001)

Όπως προαναφέρθηκε η μορφολογία του εδάφους της Μήλου, δεν αφήνει πολλά περιθώρια στους κατοίκους να ασχοληθούν με τη γεωργία, κάτι που φαίνεται και από τις μόνιμες καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε ποσοστό μικρότερο του 1% της αντίστοιχης έκτασης του νησιού. Έτσι από 167700 στρέμματα της συνολικής έκτασης του νησιού τα 26800 αντιστοιχούν σε αρόσιμη γη και τα μόλις τα 1300 σε μόνιμες καλλιέργειες. Εξάλλου οι μικρές ποσότητες χερσαίων υδάτων καθιστούν ανέφικτη την περεταίρω ενασχόληση με τη γεωργία.

Ωστόσο τα κηπευτικά και τα φρούτα καλλιεργούνται σε άνυδρα εδάφη και χωρίς λιπάσματα. Το καλοκαίρι δε, από τη ντόπια παραγωγή τροφοδοτούνται και τα γειτονικά νησιά Σίφνος και Κίμωλος. Τα κυριότερα γεωργικά προϊόντα που κύρια καλλιεργούνται είναι ντομάτες, πεπόνια, καρπούζια, ελιές (λάδι), πορτοκάλια, μανταρίνια, σταφύλια από όπου βγαίνει το περίφημο μηλίτικο κρασί κ.ά. Οι καλλιέργειες των σκόρδων, του σιταριού και του κριθαριού σιγά - σιγά εγκαταλείπονται, ενώ οργανωμένες γεωργικές καλλιέργειες υπό μορφή θερμοκηπίων αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια.

Η κτηνοτροφία δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, μερικοί όμως ασχολούνται μ' αυτήν έχοντας κυρίως αιγοπρόβατα ελεύθερης βοσκής. Το κρέας τους είναι νοστιμότατο, όπως επίσης και τα τυροκομικά προϊόντα που παράγονται. Ο αλιευτικός στόλος του νησιού είναι αρκετά μεγάλος, για να καλύψει τις ανάγκες του την περίοδο του χειμώνα με φρέσκα ψάρια και αστακούς, αποδεικνύεται όμως μικρός κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, που οι επισκέπτες και οι τουρίστες κατακλύζουν το νησί. Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατοίκων του νησιού, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η Μήλος είναι ένας από τους δημοφιλέστερους καλοκαιρινούς προορισμούς και ως εκ τούτου ασχολείται με τον τριτογενή παραγωγικό τομέα, αξιοποιώντας τα πολλά τουριστικά καταλύματα, καθώς επίσης και με τον τομέα του εμπορίου (λιανικό εμπόριο, εστιατόρια, ενοικιάσεις αυτοκινήτων κ.α.). Σύμφωνα με την Ε.Σ.Υ.Ε. στη Μήλο απαριθμούνται 9192 ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις και τουριστικά καταλύματα, εκ των οποίων τα 8983 μόνο στο Δημοτικό Διαμέρισμα Αδάμαντα, αριθμός εξαιρετικά μεγάλος, αφού υπερβαίνει κατά πολύ ακόμα και αυτόν των μόνιμων κατοίκων του νησιού.

Ο μεγαλύτερος αριθμός των επιχειρήσεων στεγάζονται στα Δημοτικά Διαμερίσματα Μήλου και Αδάμαντα, ασχολούνται κυρίως με τον τουρισμό και αφορούν ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις, εστιατόρια, λιανικό εμπόριο και εκμίσθωση οχημάτων και μηχανημάτων. Για τη ακρίβεια αριθμούνται 27 τέτοιες επιχειρήσεις στο Δ.Δ. Μήλου και 636 στο αντίστοιχο του Αδάμαντα, με συνολικό ετήσιο τζίρο που ξεπερνά τα 60 εκατομμύρια ευρώ.

2.4 Κλίμα - Έδαφος

Το κλίμα της Μήλου είναι ήπιο μεσογειακό και τις περισσότερες μέρες του χρόνου επικρατεί ηλιοφάνεια. Πιο συγκεκριμένα το κλίμα είναι αρκετά στεγνό αλλά και δροσερό, καθώς όπως και στα υπόλοιπα νησιά των Κυκλάδων, έχει αρκετά μελέμια (βόρειοι περιοδικοί άνεμοι), τα οποία πνέουν σχεδόν καθημερινά από τα μέσα Ιουλίου μέχρι και τα μέσα Αυγούστου. Ο χειμώνας είναι γενικά ήπιος αλλά με αρκετές έντονες βροχοπτώσεις.

Η Μήλος ξεχωρίζει τόσο για το ηφαιστειογενές έδαφος της όσο και για το πλούσιο σε ορυκτά και κοιτάσματα υπέδαφος. Η γεωλογική της σύσταση αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από ηφαιστειογενή πετρώματα εξαιτίας της δράσης των ηφαιστειών. Αυτά έδρασαν κατά την διάρκεια των τελευταίων 3.000.000 χρόνων και σήμερα θεωρούνται σβησμένα. Αποτέλεσμα αυτής της δράσης είναι η ύπαρξη ποικίλων και ωραιότατων γεωμορφολογικών σχημάτων, καθώς και το πλήθος των παραλιών με τις λευκόχρυσες αμμουδιές. Από τις πιο γνωστές παραλίες της Μήλου είναι το Σαρακίνικο, το οποίο χαρακτηρίζεται από τους Μήλιους ως “σεληνιακό τοπίο”, που αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα της ηφαιστειακής δράσης στο νησί.



Εικόνα 2.4 Ηφαιστειακός σχηματισμός στην παραλία του Σαρακίνικου

Εξ' αιτίας της ηφαιστειακής δράσης στη Μήλο θα συναντήσουμε διάφορες θερμές πηγές, κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, μερικές από τις οποίες είναι ιαματικές. Οι πηγές αυτές όμως δυστυχώς δεν έχουν αξιοποιηθεί κατάλληλα. Τα λουτρά αυτά του νησιού είναι γνωστά από την αρχαιότητα και ο Ιπποκράτης τα αναφέρει στο Ε' Βιβλίο του «Περί επιδημιών».

Όλες αυτές οι πηγές θεωρούνται κατάλληλες για ρευματοειδής αρθρίτιδες, παθήσεις των περιφερειακών νεύρων, γυναικολογικές, δερματικές και άλλες. Σύμφωνα με μελέτες έχει παρατηρηθεί, ότι στις περιοχές εκείνες υπάρχουν και υψηλές θερμοκρασίες στο έδαφος. Όλες αυτές λοιπόν οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με το πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων έχουν αλλοιώσει το έδαφος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται και τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα.

2.5 Ορυκτός Πλούτος

Η Μήλος, ξερή και άγονη γενικά, έχει υπέδαφος με αξιόλογο ορυκτό πλούτο. Είναι ηφαιστειογενές νησί, με όχι πολύ παλιά ηφαιστειότητα, που εκδηλώνεται με ατμίδες και θερμές ιαματικές πηγές. Στον Αδάμαντα και στην Αλυκή υπάρχουν χλωριονατριούχες πηγές. Οι ατμίδες που εμφανίζονται σε αρκετά σημεία του νησιού, δίνουν θείο. Τα ηφαιστειακά πετρώματα της Μήλου είναι κατάλληλα συνήθως για δομικά υλικά όπως η ελαφρόπετρα και η ζαχαρόπετρα. Υπάρχουν ακόμα ορυχεία οψιδιανού (μαύρου υελώδους), που στην αρχαιότητα τον χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή όπλων και εργαλείων, πηλού και επίσης ορυχεία από τα οποία βγαίνουν οι μολόπετρες.

Η έντονη υδροθερμική δραστηριότητα δημιούργησε μία μεγάλη ποικιλία χρήσιμων ορυκτών όπως ο μπετονίτης, ο βαρύτης, καολίνη, αλουμίτης, πυριτικό, θειάφι, μαγγάνιο, ανυδρίτης-γύψος, ασήμι και χρυσός. Στη Μήλο υπάρχει ακόμα και γαληνίτης μαζί με άλλα μικτά θειούχα μεταλλικά ορυκτά. Η εξόρυξη ωστόσο των περισσότερων από αυτών ορυκτών έχει σταματήσει από τα μέσα περίπου του 20ου αιώνα. Ακόμα έχει αποδειχθεί από διάφορους επιστήμονες ότι υπάρχει ατμός σε μεγάλο βάθος (1100 μέτρα περίπου). Η πλούσιες γεωθερμικές πηγές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης χώρων ή και άλλων παραγωγικών δραστηριοτήτων.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ Η ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

Το κεφάλαιο αυτό είναι απόσπασμα της Διπλωματικής εργασίας Πασσά, (2007).

Η Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιωτικού συμπλέγματος των Κυκλάδων, το οποίο ανήκει γεωλογικά στην Πελαγονική ζώνη. Η Πελαγονική ζώνη, από το Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό μέχρι και το Ανώτερο Ιουρασικό, αποτελούσε ένα εκτεταμένο υποθαλάσσιο ύβωμα, στο οποίο γινόταν ανθρακική ιζηματογένεση. Στη συνέχεια, στο τέλος του Ανώτερου Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού, το ύβωμα αυτό τεκτονίστηκε από δύο ορογενετικές φάσεις και δέχθηκε τεράστιες οφιολιθικές μάζες, που προήλθαν τόσο από τον ωκεανό της Αλμωπίας, που βρισκόταν ανατολικά του πελαγονικού αυτού υβώματος, όσο και από τον Μαλιακό ωκεανό, που βρισκόταν δυτικά του (Κατσικάτσος, 1992).

Το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων, στο οποίο ανήκει η Μήλος, μαζί με την Αττική και τη νότια Εύβοια αποτελούν την κρυσταλλική Αττικοκυκλαδική μάζα. Μέχρι την δεκαετία του '60 η Αττικοκυκλαδική μάζα θεωρείτο από πολλούς ερευνητές ως το προ-αλπικό υπόβαθρο της Πελαγονικής μάζας. Σήμερα, θεωρείται ως μία ετερογενής κρυσταλλική μάζα που αποτελείται από μία πολύπλοκη σειρά, διακριτών, κυρίως Μεσοζωϊκών, τεκτονικών καλυμμάτων. Η ακολουθία των καλυμμάτων είναι γνωστή σε μερικά νησιά, λόγω όμως του νησιωτικού χαρακτήρα της μάζας και της αποσπασματικής παρουσίας των καλυμμάτων, συχνά η συσχέτιση τους είναι δύσκολο να θεμελιωθεί (Καταγάς, 2001).

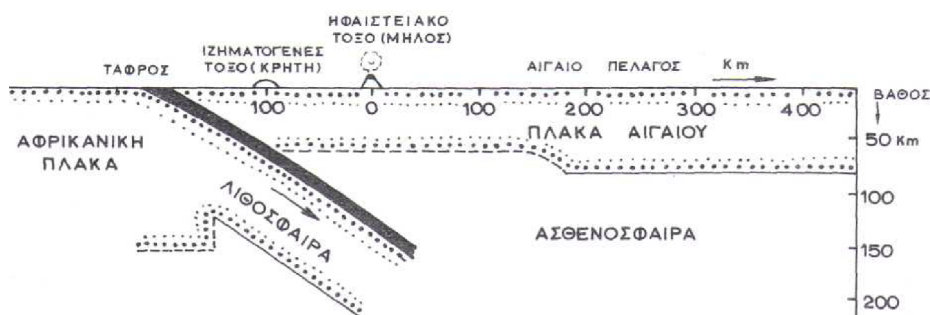
Στην Αττικοκυκλαδική μάζα διακρίνονται δύο κύριες ομάδες τεκτονικών ενοτήτων, η κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από αρκετές υποενοότητες. Η κατώτερη ομάδα ενοτήτων αποτελείται από μία ακολουθία καλυμμάτων προ-αλπικού υποβάθρου, Μεσοζωϊκών νηριτικών ανθρακικών, ψαμμιτικών και πηλιτικών μεταιζημάτων, βασικών και όξινων μεταφαιστεϊτών και μεταοφιολίθων. Οφθαλμογενέσιοι, μεταμορφωμένοι γρανίτες και σχιστόλιθοι σχετικά υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης που απαντώνται στην βάση της ακολουθίας των ενοτήτων των νησιών Ίου, Σικίνου και Νάξου, καθώς επίσης και των νησιών Πάρου, Μυκόνου, Σερίφου και Άνδρου, θεωρούνται, σύμφωνα με ραδιοχρονολογικά στοιχεία, ως υπολείμματα προαλπικού υποβάθρου, που υπέστησαν Ερκύνια, μετρίων πιέσεων, μεταμόρφωση (Καταγάς, 2001).

Η ανώτερη ομάδα τεκτονικών ενοτήτων έχει περιορισμένη μόνο εξάπλωση (π.χ. Πάρος, Νάξος, Μύκονος, Σάμος) και αποτελείται από υπολείμματα ενός οφιολιθικού καλύμματος, το οποίο επικλυσίγενώς καλύπτεται από Κρητιδικούς ασβεστόλιθους και Ολιγοκαινικά Μειοκαινικά μολασσικά ιζήματα. Στη βάση του οφιολιθικού καλύμματος απαντώνται συχνά, υπό μορφή οφιολιθικής melange, Περμο-τριαδικά ιζήματα, Ανωκρητιδικοί μεταμορφίτες μετρίων πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών με

διδυσίδεις γρανιτοειδών και πρασινοσχιστόλιθοι άγνωστης ηλικίας (Καταγάς, 2001).

Στην κατώτερη τεκτονική ενότητα εμφανίζονται τυπικές παραγενέσεις εκλογιτικής και κυανοσχιστολιθικής φάσης, η δημιουργία των οποίων, σύμφωνα με την θεωρία των τεκτονικών πλακών, συνδέεται άμεσα με ζώνες καταδύσεως της λιθόσφαιρας. Στην αναγνώριση των φάσεων αυτών έχει συμβάλλει σημαντικά κατά πρώτον το γεγονός, της συμμετοχής του τυπικού ορυκτού της κυανοσχιστολιθικής φάσης, του γλαυκοφανούς, ο οποίος αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά ως νέο ορυκτό στη Σύρο, από τον Hausamh το 1845 και κατά δεύτερον το ανάλογο συμπέρασμα στο οποίο οδήγησε η περιγραφή της συνύπαρξης γλαυκοφανιτικών σχιστολίθων και ιαδειτικών πετρωμάτων στη Σύρο και τη Σίφνο, από τις αρχές του αιώνα (Κτενάς, 1907). Μεταπηλιτικά και μεταβασικά πετρώματα με παραγενέσεις χαρακτηριστικές της πρασινοσχιστολιθικής και γλαυκοφανιτικής φάσεως περιγράφηκαν από τα περισσότερα νησιά, όπως είναι η Άνδρος, η Ίος, η Κύθνος, η Νάξος, η Φολέγανδρος, η Σεριφος, η Σίκινος και η Τήνος. Σε μερικά νησιά εμφανίζονται και παραγενέσεις της εκλογιτικής φάσης, όπως στη Μήλο, τη Σίφνο, τη Σύρο, την Τήνο και τη Γυάρο, ενώ σε άλλα, όπως η Πάρος και η Ικαρία, δεν εμφανίζονται μεν παραγενέσεις της σειράς των φάσεων υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών, εμφανίζονται όμως μεταπηλιτικά και μεταβασικά πετρώματα με παραγενέσεις έως και της αμφιβολιτικής φάσης (Ηλιόπουλος, 2005). Εξάλλου σε κάποια νησιά, όπως στη Νάξο, την Πάρο, τη Σέριφο, τη Μύκονο και την Τήνο, εμφανίζονται και παραγενέσεις χαρακτηριστικές της σειράς των φάσεων χαμηλών πιέσεων και υψηλών θερμοκρασιών (Καταγάς, 2001).

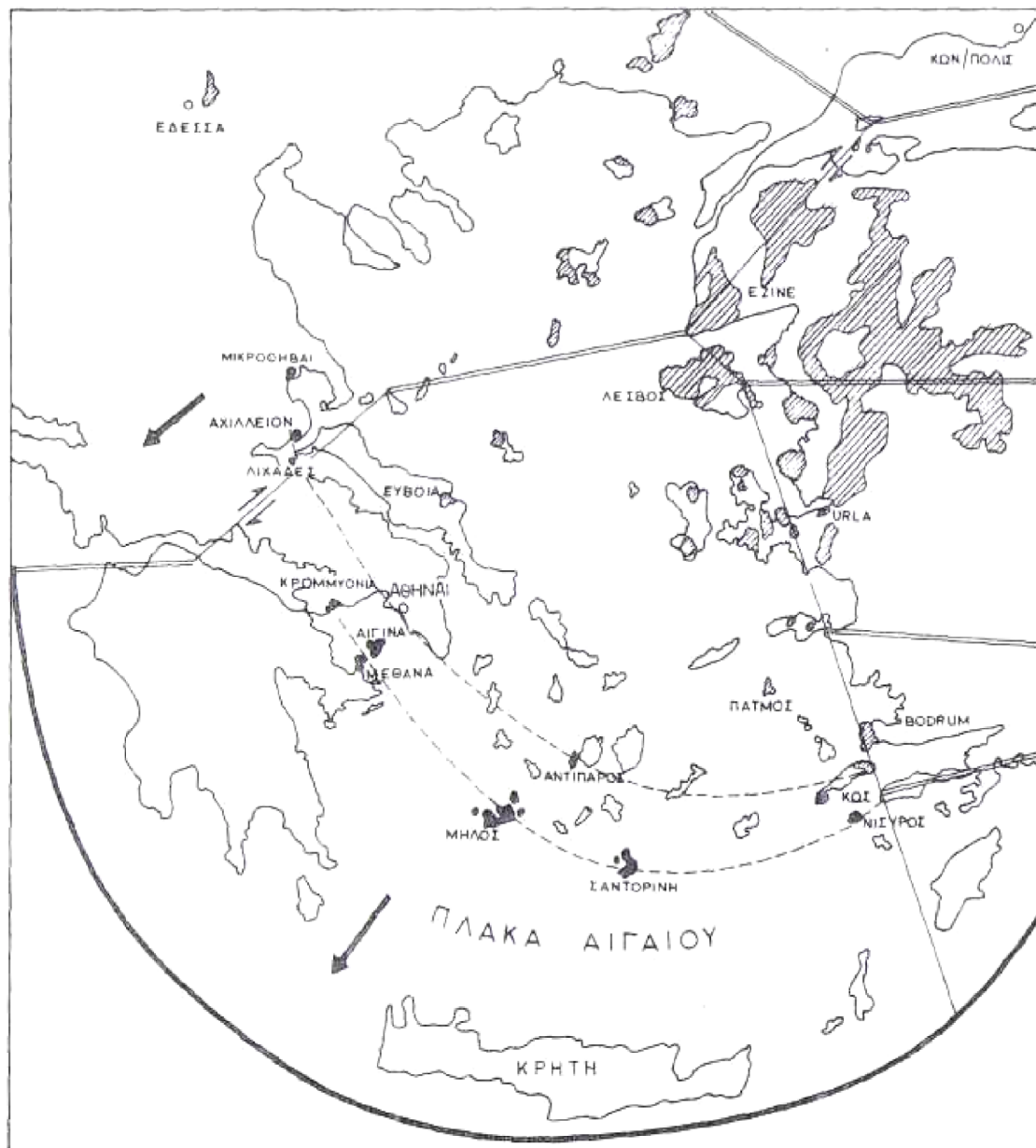
Επιπλέον, κύριο γεωλογικό χαρακτηριστικό για τη νήσο Μήλο είναι το ότι αποτελεί τμήμα του εξωτερικού μετώπου του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του νοτίου Αιγαίου και διέπεται από ασβεσταλκαλικού τύπου ηφαιστειότητα (εικόνα 3.2). Το τόξο αυτό είναι παράλληλο με το όριο των δύο λιθοσφαιρικών πλακών που συγκλίνουν: της Αφρικανικής και της μικροπλάκας του Αιγαίου.









Εικόνα 3.1 Αναπαράσταση της σημερινής κατάστασης μεταξύ των πλακών Αφρικής και Αιγαίου. Με μαύρο χρώμα σημειώνεται ο ωκεάνιος φλοιός που ήδη εξαφανίστηκε και περιορίζεται μόνο κατά μήκος του επιπέδου καταβύθισης (Papazachos, 1973).

Η Αφρικανική πλάκα βυθίζεται κάτω από την μικροπλάκα του Αιγαίου (εικόνα 3.1), έχοντας σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη στην περιοχή της σύγκλισης του συστήματος τόξου-τάφρου. Η τάφρος αντιπροσωπεύει τη γραμμή επαφής των δύο πλακών, ενώ το τόξο σχηματίζεται στην πλάκα που δεν βυθίζεται και σε απόσταση που μεταβάλλεται ανάλογα την ηλικία του συστήματος. Η ζώνη επαφής στη σύγκλιση των πλακών στον ελλαδικό χώρο είναι η ελληνική τάφρος, η οποία αναπτύσσεται παράλληλα και σε μήκος 1500 km, δυτικά και νότια του ελληνικού ιζηματογενούς τόξου.

Το ηφαιστειακό μέτωπο του ενεργού τόξου του νοτίου Αιγαίου, που σχηματίζεται από την προαναφερθείσα γεωδυναμική κατάσταση, έχει τη μορφή μεγάλου ημικυκλίου, το οποίο απέχει κατά μέσο όρο 220 km από την ελληνική τάφρο και εντοπίζεται κατά μήκος της καμπύλης γραμμής: Κρομμυωνίας (Κορίνθου), Μεθάνων, Μήλου, Σαντορίνης και Νισύρου. Εσωτερικά αυτού παρατηρείται και μία δεύτερη ηφαιστειακή γραμμή, η οποία περιλαμβάνει τα ηφαιστειακά κέντρα: Μικροθηβών (Μαγνησίας), Αχιλλείου (Φθιώτιδος), Λιχάδων (Εύβοιας), Αντιπάρου και Κω (δυτικό τμήμα). Το ηφαιστειακό μέτωπο του ενεργού τόξου του νοτίου Αιγαίου θεωρείται Τεταρτογενούς ηλικίας, σύμφωνα με γεωχρονολογικά στοιχεία ηφαιστιτών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Fytikas et al., 1976).



Υ Π Ο Μ Ν Η Μ Α

- 
 Άσβεστοαλκαλική (ΚΑ/κή ΕΥΒΟΙΑ) λωσωνιτική (ΕΔΕΣΣΙΑ, ΛΕΣΒΟΣ, ΠΑΤΜΟΣ, ΒΟΔΡΥΜ) και άλκαλο-βασαλτική (ΕΖΙΝΕ, URLΑ) ήφαιστειότητα, τριτογενούς ηλικίας.
- 
 Άσβεστοαλκαλική ήφαιστειότητα του ένεογνού τόξου (οί διακεκομμένες γραμμές προσδιορίζουν τα δύο μέτωπα).
- 
 Κύρια συστήματα διαρρήξεων διατάσεως (distension fractures)
- 
 Ρήγματα μετασχηματισμού (transcurrent lines).
- 
 Διεύθυνση σχετικής κινήσεως των πλακών Αφρικής και Αιγαίου.
- 
 Όρια μεταξύ πλακών.

Εικόνα 3.2 Σκαρίφημα της ευρείας περιοχής του Αιγαίου, με την κατανομή των Τριτογενών και Τεταρτογενών ηφαιστειακών πετρωμάτων και τις κύριες τεκτονικές γραμμές (Fytikas et al., 1976).

3.1 Στρωματογραφία

Στρωματογραφικά (εικόνα 3.3, 3.4, 3.5), το κρυσταλλικό υπόβαθρο του νησιού αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα, τα οποία είναι και τα αρχαιότερα. Η εμφάνιση του υποβάθρου είναι περιορισμένη, τόσο σε έκταση όσο και σε πάχος. Απαντάται κυρίως στις νοτιοανατολικές ακτές του νησιού, ενώ τεμάχια του βρίσκονται και ως ξενόλιθοι μέσα σε ηφαιστειακά πετρώματα σε ολόκληρο το νησί. Η περιορισμένη επιφανειακή εξάπλωση του οφείλεται στη κάλυψη του από ηφαιστειογενείς σχηματισμούς ή και από νεογενή ιζήματα.

Η γένεση των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του κρυσταλλικού υποβάθρου της Μήλου θεωρείται ότι έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια δυο μεταμορφικών γεγονότων. Το παλαιότερο, ηλικίας 64 Ma, στο όριο του Ανώτερου Κρητιδικού και Παλαιογενούς, χαρακτηρίζεται από συνθήκες υψηλής πίεσης και εκπροσωπείται κυρίως από γλαυκοφανιτικούς σχιστόλιθους, ενώ το νεότερο, ηλικίας 33 Ma, μεταξύ κατώτερου και Μέσου Ολιγοκαίνου, χαρακτηρίζεται από συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας ανάλογες της πρασινοσχιστολιθικής φάσης (Fytikas et al., 1976). Μία τρίτη κατηγορία μεταμορφωμένων πετρωμάτων, που απαντάται, είναι οι εκλογίτες, οι οποίοι εντοπίστηκαν στη περιοχή της Παλαιοχώρας ως ξενόλιθοι (Korhprobst et al., 1979) και στη περιοχή Νύχια ΒΔ του Αδάμαντα (Liakopoulos, 1978).

Επάνω από το πτυχωμένο και έντονα διαβρωμένο κρυσταλλικό υπόβαθρο απαντώνται, επικλυσιγενώς τοποθετημένα, τα θαλάσσια ιζήματα του Μειόκαινου, του Πλειόκαινου και του Κατώτερου Πλειστοκαίνου, με πάχος περίπου 180 m (εικόνα 2.3). Η κύρια εμφάνισή τους παρατηρείται στο νότιο και το νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Τα ιζήματα, αυτά, στη βάση τους συνίστανται από κροκαλοπαγές της επίκλυσης, ενώ τα ανώτερα μέλη αποτελούνται από στρωμένους απολιθωματοφόρους ασβεστόλιθους, οι οποίοι είναι αλλού αμιγείς και αλλού ψαμμιτικοί. Η σειρά δεν παρατηρείται συνεχής σε ολόκληρο το νησί (Φυτίκας, 1977).

Τα θαλάσσια ιζήματα ακολουθούνται από την παρουσία των προϊόντων της ηφαιστειακής δράσης, η οποία άρχισε στο Ανώτερο Πλειόκαινο και έλαβε τέλος κατά το πέρας του Τεταρτογενούς. Έχουν αναγνωρισθεί οι ακόλουθες ηφαιστειακές ενότητες (Φυτίκας, 1977):

- Η βασική πυροκλαστική σειρά απαντάται κύρια στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Η ενότητα, αυτή, αποτελείται κατά το πλείστον από υποθαλάσσιες εκχύσεις, ενώ τοπικά παρατηρούνται και απολιθωματοφόρες ιζηματογενείς στρώσεις. Περιλαμβάνει πυροκλαστικές ροές, υποθαλάσσιους τόφφους, τέφρες, ροές

κισσήρεως και κατά δεύτερο λόγο μαξιλαροειδείς λάβες και λατυποπαγή. Η ηλικία της έχει προσδιοριστεί σε 3,4-3 Ma, δηλαδή τοποθετείται στο Μέσο-Ανώτερο Πλειόκαινο. Το ολικό πάχος της ποικίλει και φθάνει μέγιστο στα 120 m στον κόλπο του Κλέφτικου.

- Μετά την υποθαλάσσια εκρηκτική δραστηριότητα το δυτικό τμήμα της Μήλου επηρεάστηκε από μία φάση υποαέριας ηφαιστειότητας, που χαρακτηρίζεται από την δημιουργία διαφόρων δόμων και ροών λάβας που έχουν καλύψει σχεδόν εξ' ολοκλήρου τα προηγούμενα προϊόντα, δημιουργώντας την ενότητα δόμων και ροών λάβας. Υπήρξαν, επίσης, εκρήξεις από μικρά ηφαιστειακά κέντρα τα οποία τοπικά δημιούργησαν πυροκλαστικές ροές, ηφαιστειακά λατυποπαγή και διάπυρα νέφη. Οι μεγαλύτεροι δόμοι απαντώνται κατά μήκος των ρηγμάτων BBA ή BA διεύθυνσης και η ηλικία τους έχει προσδιορισθεί στα 2,4-2 Ma, δηλαδή στο Ανώτερο Πλειόκαινο.

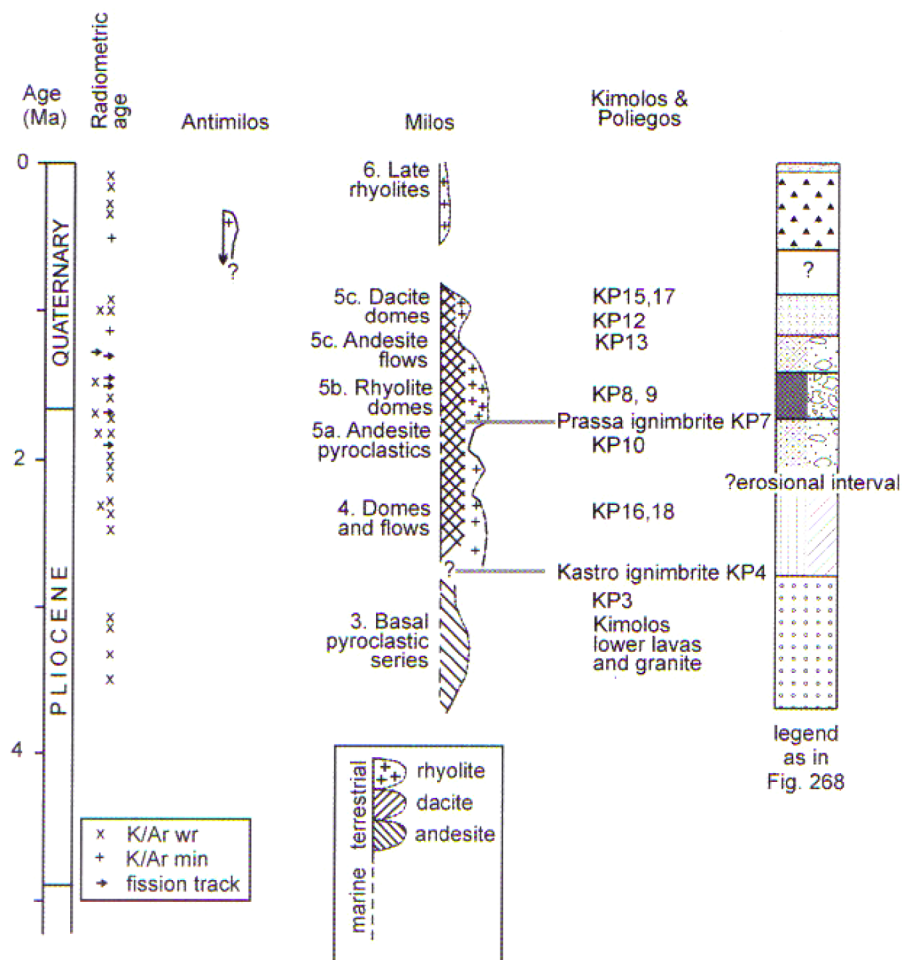
- Στο τέλος του Πλειόκαινου και στην αρχή του Πλειστόκαινου δημιουργήθηκε μία ενότητα από υποθαλάσσια πυροκλαστικά και ρυολιθικούς δόμους, στα ανατολικά και βόρεια τμήματα του νησιού, δίνοντας την ενότητα των πυροκλαστικών σειρών και δόμων λάβας. Ο ηφαιστειακός κύκλος ολοκληρώθηκε με τον σχηματισμό μιας μεγάλης ενότητας από δόμους και όξινες ροές λάβας στο κεντρικό τμήμα του νησιού (περιοχές Χαλεπτά και Πλάκα). Στη περιοχή της Φυλακωτής, οι πυροκλαστικές σειρές καλύπτονται από υαλοκλαστικές εναποθέσεις ανδεσιτικής σύστασης που περιλαμβάνουν μαξιλαροειδείς λάβες και τεμάχη τους. Η ηλικία τους έχει υπολογιστεί σε 2-0,85 Ma, δηλαδή στο Κατώτερο Πλειστόκαινο.

- Η νεότερη ηφαιστειακή δραστηριότητα, η οποία είναι ηλικίας 0,38-0,09 Ma, τοποθετείται δηλαδή στο Ανώτερο Πλειστόκαινο, συγκεντρώνεται σε δύο ηφαιστειακά κέντρα: του Τράχηλα, στο βόρειο τμήμα του νησιού και της Φυριπλάκας, στο νότιο.

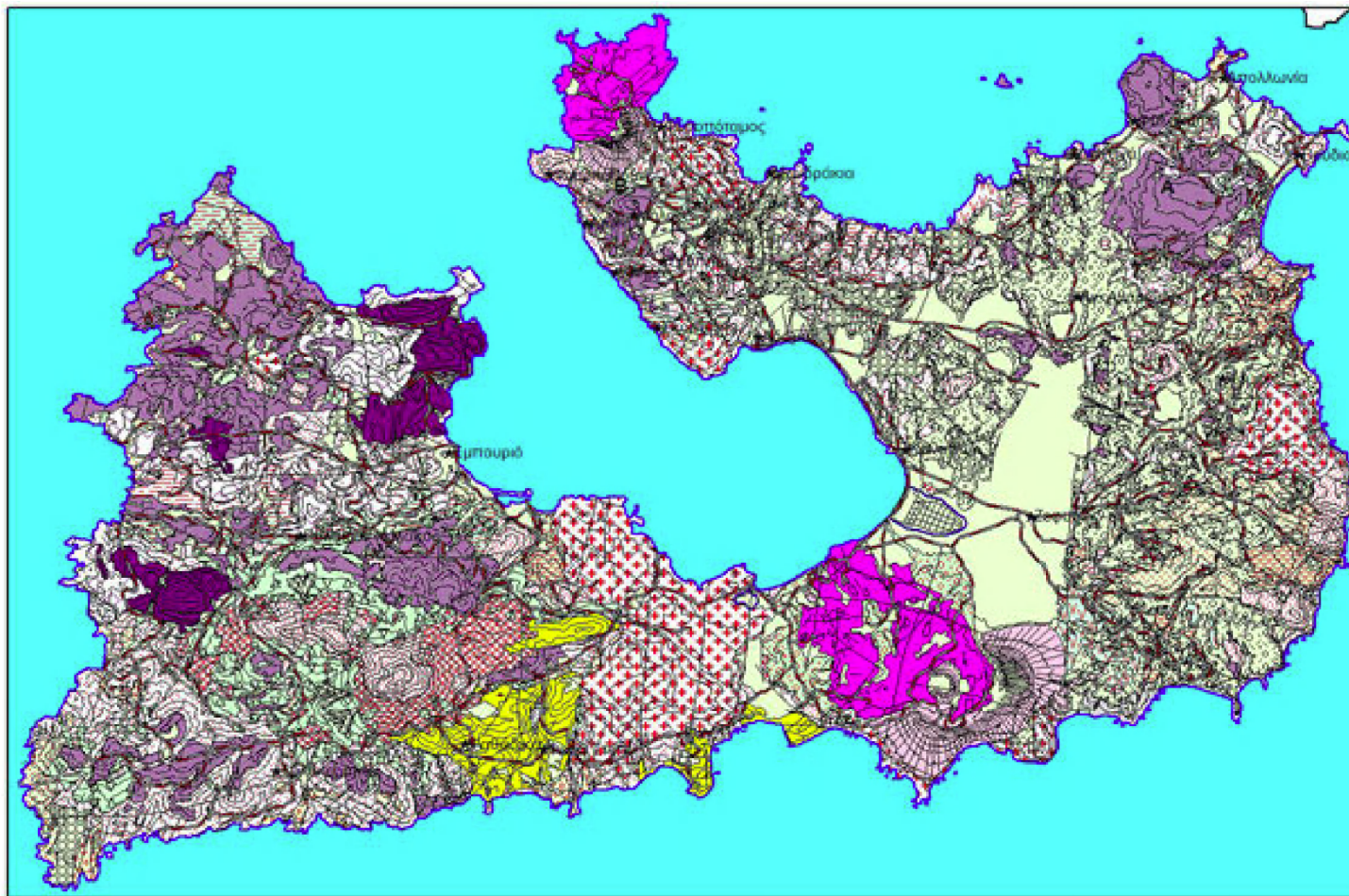
- Τέλος, απαντώνται και προϊόντα φρεατικών δραστηριοτήτων (Fytikas and Marinelli, 1976, Traineau and Dalabakis, 1989). Πρόκειται για τις νεότερες αποθέσεις, από το Πλειστόκαινο έως σήμερα και παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα του νησιού, όπου υπάρχουν αρκετοί κρατήρες φρεατικών εκρήξεων, κυρίως βόρεια από την περιοχή Ζεφύρια. Στις βορειότερες εμφανίσεις κυριαρχούν τεμάχη από πυροκλαστικά υλικά, ενώ στις νοτιοανατολικές κυριαρχούν τα μεταμορφικά τεμάχη. Το πράσινο λαχάρ (Φυτίκας, 1977) αποτελεί, επίσης, προϊόν της φρεατικής δραστηριότητας και αποκτά μεγαλύτερο πάχος στις παρυφές των εκρηκτικών κέντρων. Η φρεατική τους προέλευση αποδεικνύεται και από τα εκρηκτικά προϊόντα του συστήματος της Φυριπλάκας. Τα τελευταία, αποτελούνται κυρίως από μεταμορφωμένα πετρώματα παρόμοιας λιθολογίας και μεγέθους κόκκων με εκείνα που σχηματίζουν το πράσινο

λαχάρ. Αυτή η δραστηριότητα είναι σίγουρα Τεταρτογενούς ηλικίας διότι τα προϊόντα της καλύπτουν εκείνα του Πλειόκαινου και του κατώτερου Πλειστοκαινού, ενώ τα ίδια με τη σειρά τους καλύπτονται από πολύ πρόσφατα αιολικά ιζήματα (Fytikas et al., 1976).

Την στρωματογραφική διάρθρωση της νήσου Μήλου ολοκληρώνουν με ασυμφωνία οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες όμως απαντώνται σε πολύ περιορισμένη έκταση (εικόνα 3.3). Οι σπουδαιότερες συγκεντρώσεις βρίσκονται στη κοιλάδα της Ζεφύριας με πάχος, περίπου, 80 m (Φυτίκας, 1977). Ακόμη, αλλουβιακοί σχηματισμοί συναντώνται στον Αδάμαντα και τον Πρόβατα. Τα αλλούβια αποτελούνται κύρια από ηφαιστειακό υλικό, το οποίο στη συνέχεια μετατράπηκε σε αργιλικό.



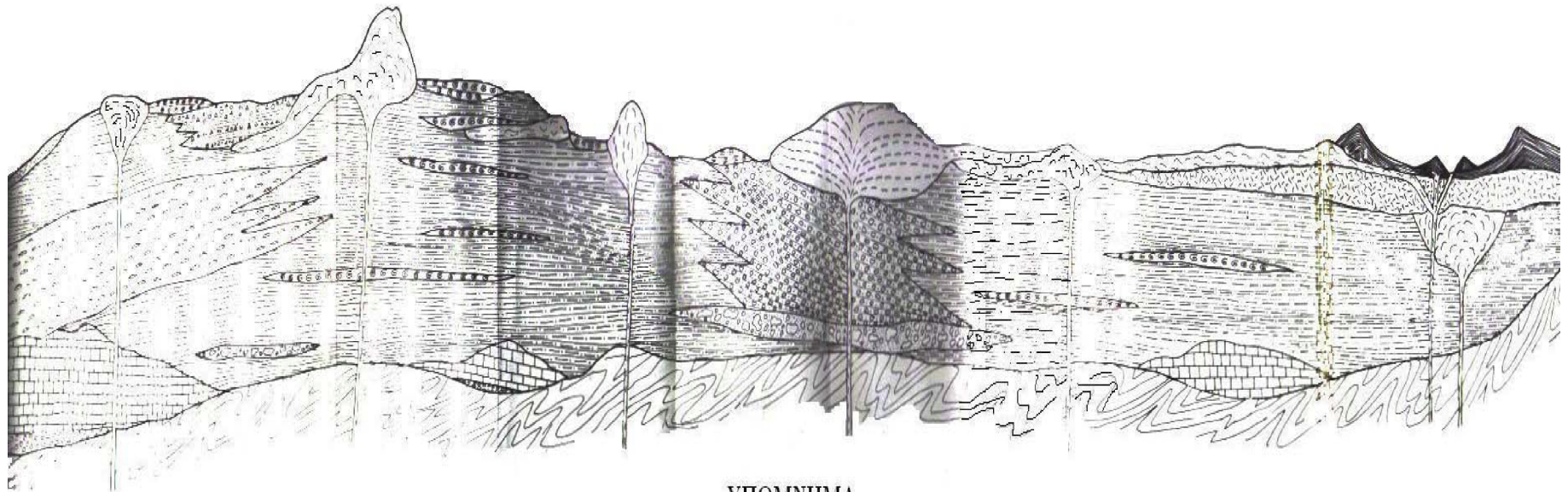
Εικόνα 3.3 Συνοπτική στρωματογραφική στήλη των ηφαιστειακών πετρωμάτων της



ΥΠΟΜΝΗΜΑ

	Θάλασσα
	ai Αλλουβιακές αποθέσεις
	H.eδ Παράκτιες αποθέσεις
	Q.es Κώνιοι κορημάτων
	Q.se Πλευρικά Κορηματο
	Q.1 Ποταμοχημάρες αποθέσεις
	Q.ih2 Λαγάρ Φυρπιλάκας
	Q.p2 Ρυολθικές Λάβες
	Q.ih2 Πυροκλαστικά υικά Φυρπιλάκας
	Q.p1 Πυροκλαστικοί κώνιοι
	Q.ih1 Πράσινο Λαγάρ
	Q.ih Διάφορα Λαγάρ
	Q.ih Νέοι Τοφίτες
	Q.ih1 Πυροκλαστικές Αποθέσεις
	Q.(a,da)2 Λάβες Ανθεστικές και Διαστικές
	Q.br2 Πυροκλαστικά ρεύματα
	Q.ig ηνυβρίτες Αγκαθός
	Q.(a,da)1 Λάβες Ανθεστικές ως Ρυολθικές
	Q.br1 Πυροκλαστικός σχηματισμός Βουδίων
	Q.p.p.da Λάβες Ρυολθικές Ρυολθικές
	Q.la Λάβες υδροθερμικά εξαλλοιωμένοι
	Ne.ig ηνυβρίτες Νδικής Μήλου
	Ne.ih Παλαιοί τοφίτες
	Ne.ih Παλαιοί τόφφοι
	Ne.ih Αποθέσεις ρευμάτων κίσησης
	t Τόφφοι παλά εξαλλοιωμένοι
	νoι Ηφαιστίτες Υδροθερμικά εξαλλοιωμένοι
	Ms-Pi Επικλυσηγή κροκαλοποίηση και Ασβεστόλιθοι
	Mz.sch Κρυσταλλικό υπόβαθρο

Εικόνα 3.4 Γεωλογικός χάρτης της νήσου Μήλου (IGME, 1977).



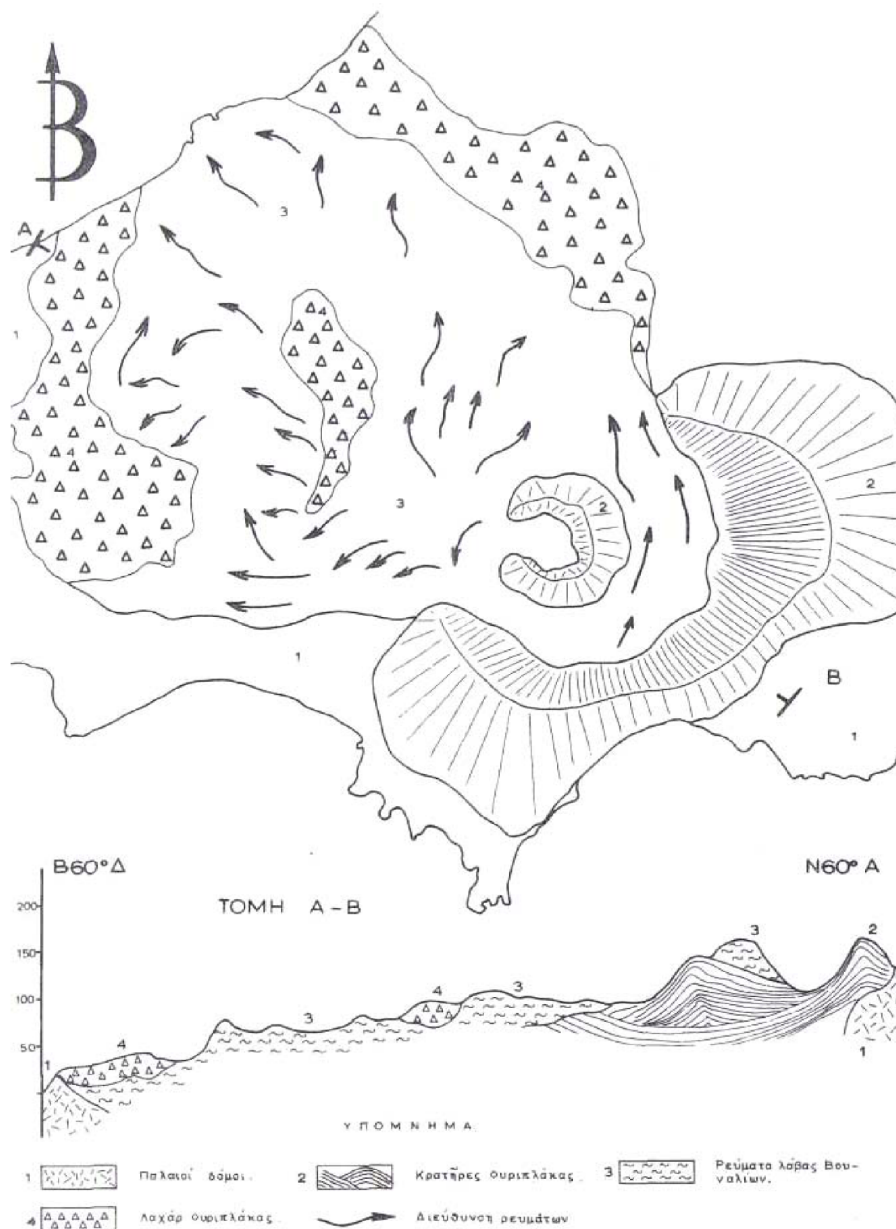
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- | | | | |
|--|---|--|---|
|  <p>Πυροκλαστικοί, ρυολιθικοί προϊόντα της γότρης ηφαιστειότητας, τα οποία σχηματίζουν ιακκίτες με μεγάλη διάμετρο.</p> |  <p>Πυροκλαστική σύννεφα ή σπασφύδες (nuées ardentes) που ενυλλίσσονται με στρώματα τούφου.</p> |  <p>Ίσως τοπικής σημασίας, σχεδόν σύγγρατοι με τους μεγαλύτερους τούφους.</p> |  <p>Πλάσι τούφου, κυρίως με κίσιους (trunice falls), ηφαιστειακή τέφρα, λίθους κ.τ.λ.</p> |
|  <p>"Πρέσνο" και άλλα λαγχο (φρέματα λάσπης).</p> |  <p>Δέφες σφειτατάς, δεκατάς και ρυολιθιάς, υπό μορφή δόμων (εξοθήσεις ή εκροής) και ρευμάτων.</p> |  <p>Γρηψίτες αμμογεις από συγκολλημένο θροσώματε τίλου κασήρεας και ξενολίθων, με χαρακτηριστικά 'βλόγες' στα κατώτερα μέρη τους.</p> |  <p>Κροκωλαπηγή και σφειστόλιθοι επιδοσιγενείς, νεογενούς ηλικίας.</p> |
|  <p>Νεότεροι τοφίτες με θέλίσους απολθόμετα.</p> |  <p>Παλιότεροι θέλίσους τοφίτες (Λνο-Παλαιονοικοί), σε εντροσάς μέσα στους παλιούς τούφους.</p> |  <p>Αποθέσεις ρευμάτων κίσιους (trunice flow deposits).</p> |  <p>Μεταμορφωμένο υποβόθρο, πευζωμένο και διεφρομένο, από άνωφρον πύων σφαιτολίθους, προσιάντες κ.λ.π.</p> |

Εικόνα 3.5 Σχηματική γεωλογική τομή της νήσου Μήλου (Φυτίκας, 1977).

3.2 Η νεότερη ηφαιστειότητα στις περιοχές: Φυριπλάκα και Τράχηλας

Η πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα στη Μήλο δημιούργησε πολλούς μεγάλους και μικρούς κρατήρες και δόμους, με ρεύματα λάβας ρυολιθικής έως ρυοδακτιλικής σύστασης (Φυτίκας, 1977). Τα ηφαιστειακά, αυτά, οικοδομήματα διατηρούνται σε πολύ καλή κατάσταση.



Εικόνα 3.6 Γεωλογικό σκαρίφημα και γεωλογική τομή της περιοχής πρόσφατης ηφαιστειότητας της νήσου Μήλου (Φυτίκας, 1977).

Η Φυριπλάκα βρίσκεται στο νότιο τμήμα της Μήλου και ο κρατήρας του ηφαιστείου απαντάται κοντά στη κεντρομεσημβρινή ακτή του νησιού. Έχει εσωτερική διάμετρο 1700 m και μέγιστο υψόμετρο 200 m. Το ηφαίστειο έχει σχηματισθεί από την συσσώρευση περλιτικής τέφρας και άμμου, αναμιγμένης με μικρά θραύσματα λάβας, περλιτικής υφής, με μέγεθος ηφαιστειακών λιθαριών ή και μεγαλύτερα. Στρωματογραφικά, βρίσκεται επάνω από τον σχηματισμό του πράσινου λαχάρ με την παρεμβολή ενός ασυνεχούς και πολύ λεπτού ορίζοντα αργίλου, θαλάσσιας προέλευσης (Λιάτσικας, 1949).

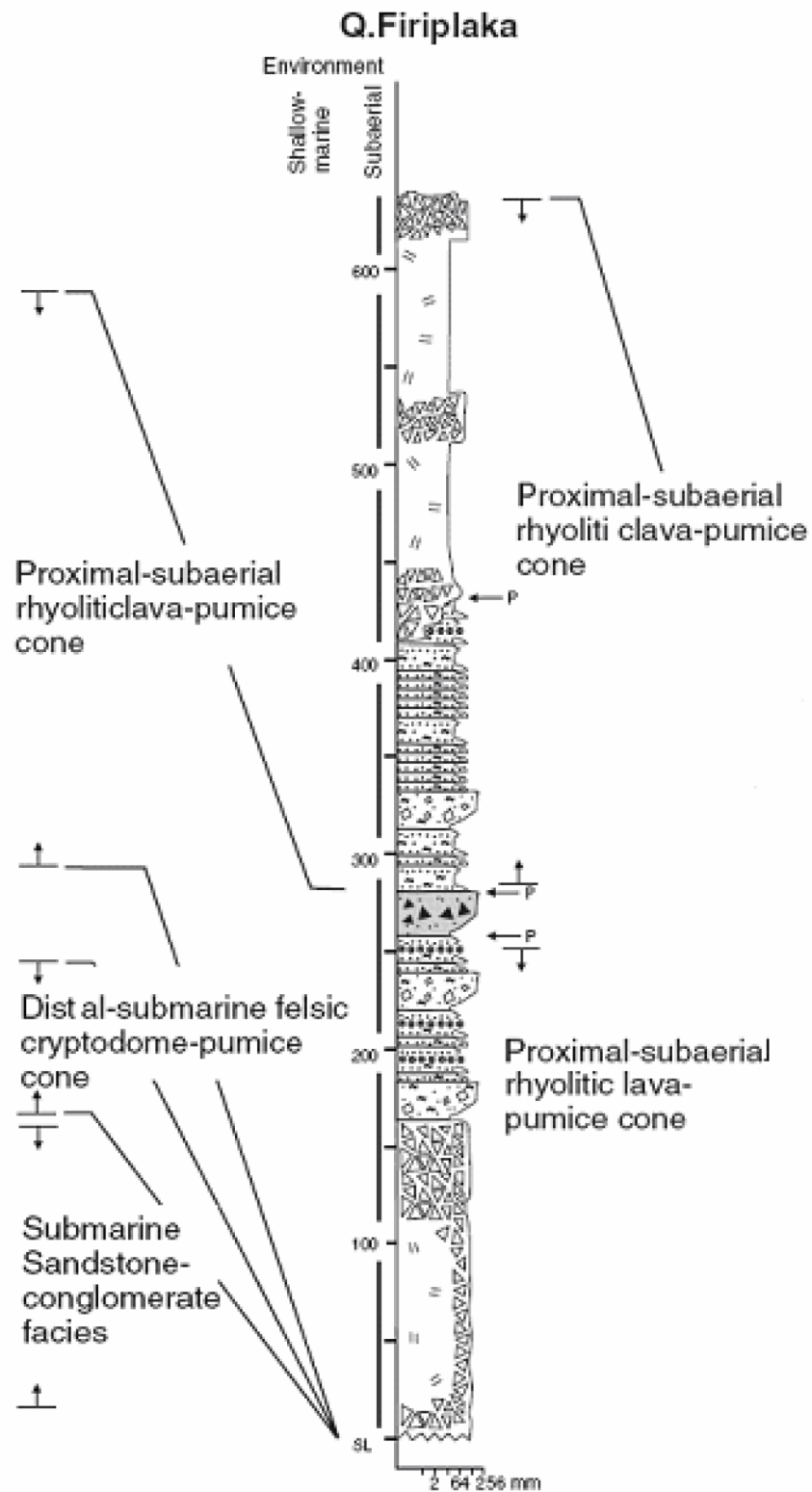
Ο κύριος κρατήρας του ηφαιστείου της Φυριπλάκας (εικόνα 3.8) περιλαμβάνει δύο, ανεξάρτητα από αυτόν, ηφαιστειακά οικοδομήματα. Το πρώτο αποτελείται από ένα πολύ μικρότερο κώνο, όμοιο με τον κύριο κρατήρα, διαμέτρου 400 m και ύψους του χείλους του 50 m. Το δεύτερο οικοδόμημα είναι πιο περίπλοκο και πιο ασαφές, διότι τα προϊόντα του είναι εξαλλοιωμένα από την μακρόχρονη δράση των υδροθερμικών μετα-ηφαιστειακών ρευστών. Πρόκειται για ρεύματα λάβας κατακερματισμένα, τα οποία εξαπλώνονται προς τα βόρεια.

Τα υλικά που αρχικά δημιουργήθηκαν, από το ηφαίστειο της Φυριπλάκας, απαντώνται σε απόσταση 4 km βορειοανατολικά και ανατολικά του κύριου κρατήρα. Στις μικρές ποσότητες των υλικών αυτών επέδρασε το θαλασσινό νερό και εν συνεχεία συμπαγοποιήθηκαν (ποζολανιτίωση), σε πολύ μικρό πάχος, όταν ολόκληρη η περιοχή του ηφαιστείου ή τμήμα αυτής βρέθηκε έξω από το νερό (Φυτίκας, 1977).

Τα χαρακτηριστικά προϊόντα του ηφαιστείου της Φυριπλάκας σχημάτισαν αμέσως μετά τις εκρήξεις ένα μεγάλο λαχάρ, το οποίο κινήθηκε με σημαντικό μέτωπο προς τη νότια και νοτιοανατολική πλευρά του κόλπου της Μήλου, καλύπτοντας τις εμφανίσεις μικρού πάχους του πράσινου λαχάρ που υπάρχουν στην περιοχή. Αυτό το λαχάρ, ρυολιθικού τύπου, το εξορύσσουν και το εκμεταλλεύονται για την περλιτική υφή των προϊόντων του.

Το ηφαιστειακό συγκρότημα της Φυριπλάκας υπολογίζεται να είναι πολύ νεαρής ηλικίας, όμοιας με αυτή του κοντινού και ιδίου ακριβώς λιθολογικού τύπου προϊόντων σχηματισμού των ρευμάτων των Βουναλίων, η οποία έχει προσδιορισθεί σε 0,48 Ma (Φυτίκας, 1977). Πιο συγκεκριμένα, ραδιοχρονολογήσεις σε ρυολιθικές ροές λάβας του ηφαιστείου της Φυριπλάκας έχουν δώσει ηλικίες της τάξης των 0,48, 0,14 και 0,9 Ma (Fytikas et al., 1976, Fytikas et al., 1986). Παρά το νεαρό της ηλικίας του, το ηφαιστειακό αυτό συγκρότημα προσβάλλεται από δύο ακόμη νεότερα συστήματα ρηγμάτων, τα οποία έχουν διευθύνσεις ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΒΑ-ΝΝΔ, αντίστοιχα. Πιθανά, τα ρήγματα αυτά είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του μικρού εσωτερικού κώνου, καθώς και των ρευμάτων

λάβας, που εξαπλώθηκαν στα βόρεια και βορειοανατολικά, ενώ κατέστρεψαν και μικρό τμήμα του κύριου κρατήρα (Φυτίκας, 1977).



Εικόνα 3.7 Στρωματογραφική στήλη από την περιοχή της Φυριπλάκας στη νήσο Μήλο (Stewart and McPhie, 2006).

Τα προϊόντα του κύριου κρατήρα είναι, από πετρολογικής απόψεως, ρυόλιθοι περλιτικής υφής, με θεμελιώδη μάζα εντελώς υαλώδη, πολύ όξινη και με φαινοκρυστάλλους πλαγιοκλάστων, χαλαζία, σανίδιου, βιοτίτη και σπάνια πυρόξενων, ενώ συχνή είναι και η παρουσία σιδηρούχων ορυκτών. Οι ηφαιστίτες των εσωτερικών ρευμάτων λάβας, πετρολογικά, δεν διαφέρουν από τους ρυόλιθους περλιτικής υφής, του κύριου κρατήρα. Μερικές φορές οι περλιτικές λάβες, μικροσκοπικά, μοιάζουν κατακερματισμένες και επανασυνδεδεμένες με ύαλο (Φυτίκας, 1977).



Εικόνα 3.8 Πανοραμική όψη του μεγάλου κρατήρα της Φυριπλάκας. Δεξιά διακρίνονται τα ρεύματα της λάβας των Βουνάλιων και ο μικρός εσωτερικός κώνος (Φυτίκας,1977).

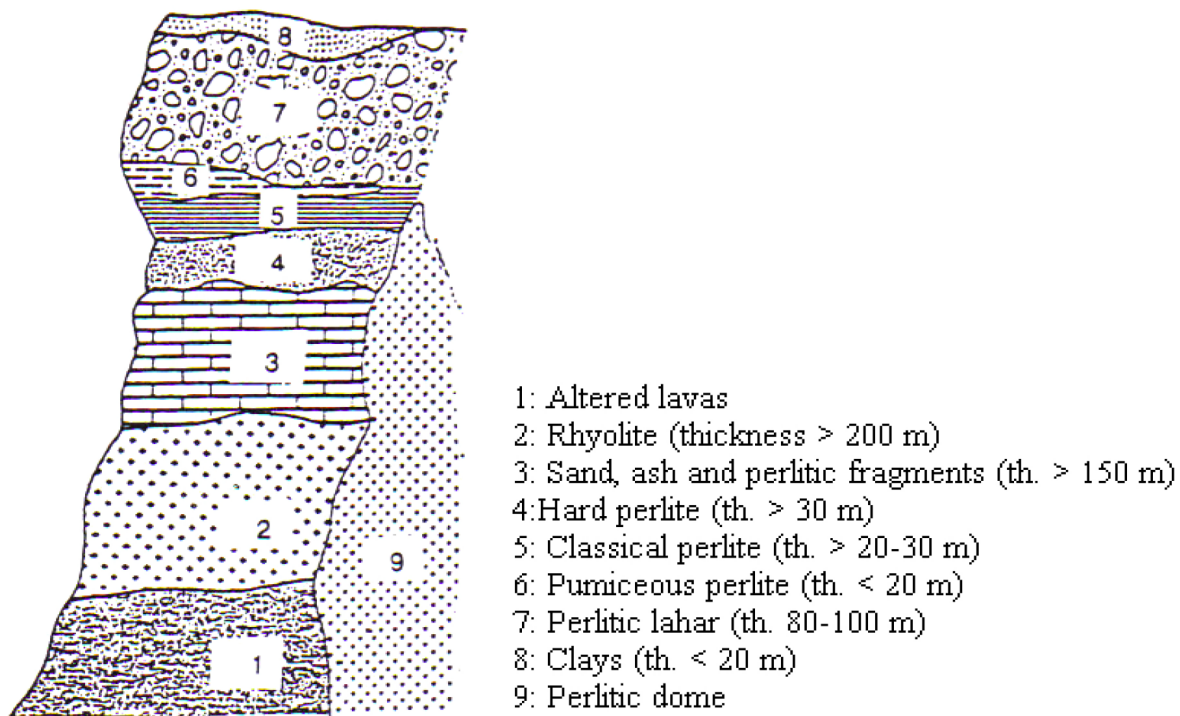
Μία χαρακτηριστική πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα και σχεδόν σύγχρονη με αυτή του συγκροτήματος της Φυριπλάκας, όπως προαναφέρθηκε, έχει εκδηλωθεί στα βορειοδυτικά αυτού με τον σχηματισμό ρευμάτων λάβας, τα οποία είχαν μεγάλο ιξώδες και έλαβαν σημαντική έκταση. Οι σχηματισμοί, αυτοί, παρουσιάζουν χαρακτηριστική μορφολογία λοφίσκων και καλούνται Βουνάλια (εικόνα 3.8).

Παρ' ότι η μορφολογία των πολυάριθμων λοφίσκων παραπέμπει στη παρουσία μικρών δόμων, η παρουσία πολύ πυκνών επιφανειών ροής, η σχεδόν κισσηρώδης υφή των λαβών, που οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού φυσαλίδων, καθώς και η ευθυγράμμιση στη διεύθυνση της φυσικής κλίσης (διεύθυνση ροής του ρεύματος) οδηγούν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για περισσότερα από ένα ρεύματα λάβας, τα οποία εξήλθαν από τη Φυριπλάκα μετά το σχηματισμό του κύριου κρατήρα (Φυτίκας, 1977).

Από πετρολογικής άποψης, πρόκειται για λάβες όμοιες με αυτές του συγκροτήματος της Φυριπλάκας. Είναι ρυόλιθοι με περλιτική υφή, δηλαδή με υαλώδη θεμελιώδη μάζα και φαινοκρυστάλλους χαλαζία, πλαγιοκλάστων και βιοτίτη.

Όμοιο με το ηφαιστείο της Φυριπλάκας, είναι το ηφαιστείο του Τράχηλα, που βρίσκεται βορειοδυτικά από την Πλάκα, την πρωτεύουσα της νήσου Μήλου, στο βόρειο τμήμα του νησιού. Το πραγματικό ύψος του κώνου του ηφαιστείου είναι μικρότερο από 100 m και το μεγαλύτερο υψόμετρό του αγγίζει, περίπου, τα 140 m, ενώ η διάμετρός του υπολογίζεται ότι ήταν 900 m. Το μόνο τμήμα του ηφαιστείου που διασώζεται είναι το μεσημβρινό. Τα υπόλοιπα τμήματα καταστράφηκαν από την πορεία των ρευμάτων λάβας, τα οποία κλείνουν τη δραστηριότητα του ηφαιστείου κατά τρόπο όχι εκρηκτικό. Σημειώνεται ότι, ραδιοχρονολόγηση σε ρυολιθική ροή λάβας από την περιοχή του Τράχηλα έδωσε ηλικία της τάξης των 0,37 Ma (Fytikas et al., 1986).

Στο ηφαιστείο του Τράχηλα (εικόνα 3.9), διακρίνεται μικρότερη διαλογή των εκρηκτικών προϊόντων του, με μεγαλύτερη συχνότητα μεγάλων τεμαχών μέσα στο λεπτομερές υλικό και πολυάριθμα θραύσματα από περισσότερο βασικές λάβες, οι οποίες ανήκουν σε προηγούμενες ηφαιστειακές δραστηριότητες. Στο υψηλότερο τμήμα του ηφαιστείου απαντώνται τέφρες κοκκινωπού χρώματος, οι οποίες έχουν αποτεθεί σε χερσαίο περιβάλλον (Φυτίκας, 1977).



Εικόνα 3.9 Στρωματογραφική στήλη από την περιοχή του Τράχηλα στη νήσο Μήλο (Koukouzas, 1997, Koukouzas and Dunham, 1994).

Από πετρολογικής απόψεως, τα προϊόντα του ηφαιστείου του Τράχηλα έχουν θεμελιώδη

μάζα υαλώδη, με όξινη, διαυγή ύαλο και είναι πλούσια σε μικρούς, γενικά, φαινοκρυστάλλους χαλαζία, βιοτίτη και υδροξειδίων του σιδήρου.

Η S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε. έχει πραγματοποιήσει γεωχημικές αναλύσεις σε δείγματα περλίτη από την περιοχή του Τράχηλα και της Χιβαδόλιμνης (περιοχή στη Φυριπλάκα) από τις οποίες προέκυψαν τα στοιχεία του πίνακα 2.1 (από προσωπική επικοινωνία με S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε.).

Ιχνοστοιχεία (gr/t)	ΤΡΑΧΗΛΑΣ	ΧΙΒΑΔΟΛΙΜΝΗ
Li	25	15
Rb	160	80
Sr	30	70

Πίνακας 3.1 Στοιχεία γεωχημικών αναλύσεων από δείγματα περλίτη των περιοχών Τράχηλα και Χιβαδόλιμνης στη νήσο Μήλο (από προσωπική επικοινωνία με S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε.).

Ο περλίτης είναι ένα όξινο, ενυδατωμένο ηφαιστειακό γυαλί ρυολιθικής σύστασης το οποίο σύμφωνα με την θερμοδυναμική τείνει, με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου, να αφυδατωθεί και να οδηγηθεί προς πιο κρυσταλλικές συνθήκες. Η ενυδάτωση προκαλεί οξειδωση του σιδήρου, απώλεια νατρίου και αύξηση του καλίου (Lipman, 1965, Aramaki and Lipman, 1965, Truesdell, 1966, Noble, 1967). Κάποια ιχνοστοιχεία παρουσιάζουν υψηλή κινητικότητα στο στάδιο της ενυδάτωσης ή της κρυστάλλωσης. Ιχνοστοιχεία όπως τα αλογόνα (Noble et al., 1967, Lipman et al., 1969), το λίθιο (Zielinski et al., 1977), το ρουβίδιο (Zielinski et al., 1977), το ουράνιο (Rosholt and Noble, 1969, Rosholt et al., 1971, Shatkov et al., 1970), το μολυβδαίνιο (Haffty and Noble, 1972), το κέσιο (Shatkov, 1971) και το βηρύλλιο (Shatkov et al., 1970, Steven et al., 1973) παρουσιάζουν μειωμένες συγκεντρώσεις στους πιο κρυσταλλικούς ρυόλιθους. Το στρόντιο έχει από την άλλη καταγραφεί να αυξάνεται στους πιο κρυσταλλικούς ρυόλιθους εν αντιθέσει με τους πιο υαλώδεις (Noble and Hedge, 1969).

Συμπερασματικά, οι τιμές που αναφέρονται από την S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε. για τις γεωχημικές αναλύσεις σε δείγματα περλίτη από τη νήσο Μήλο (πίνακας 3.1) υποδεικνύουν ότι ο περλίτης του Τράχηλα παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις σε λίθιο και ρουβίδιο και μειωμένες σε στρόντιο σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν για τον περλίτη από την περιοχή της Χιβαδόλιμνης. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, ο περλίτης που απαντάται στην περιοχή του Τράχηλα είναι λιγότερο

κρυσταλλωμένος από αυτόν της Χιβαδόλιμνης και ως εκ τούτου και νεότερος ηλικιακά.

3.3 Υδρολιθοστρωματογραφία

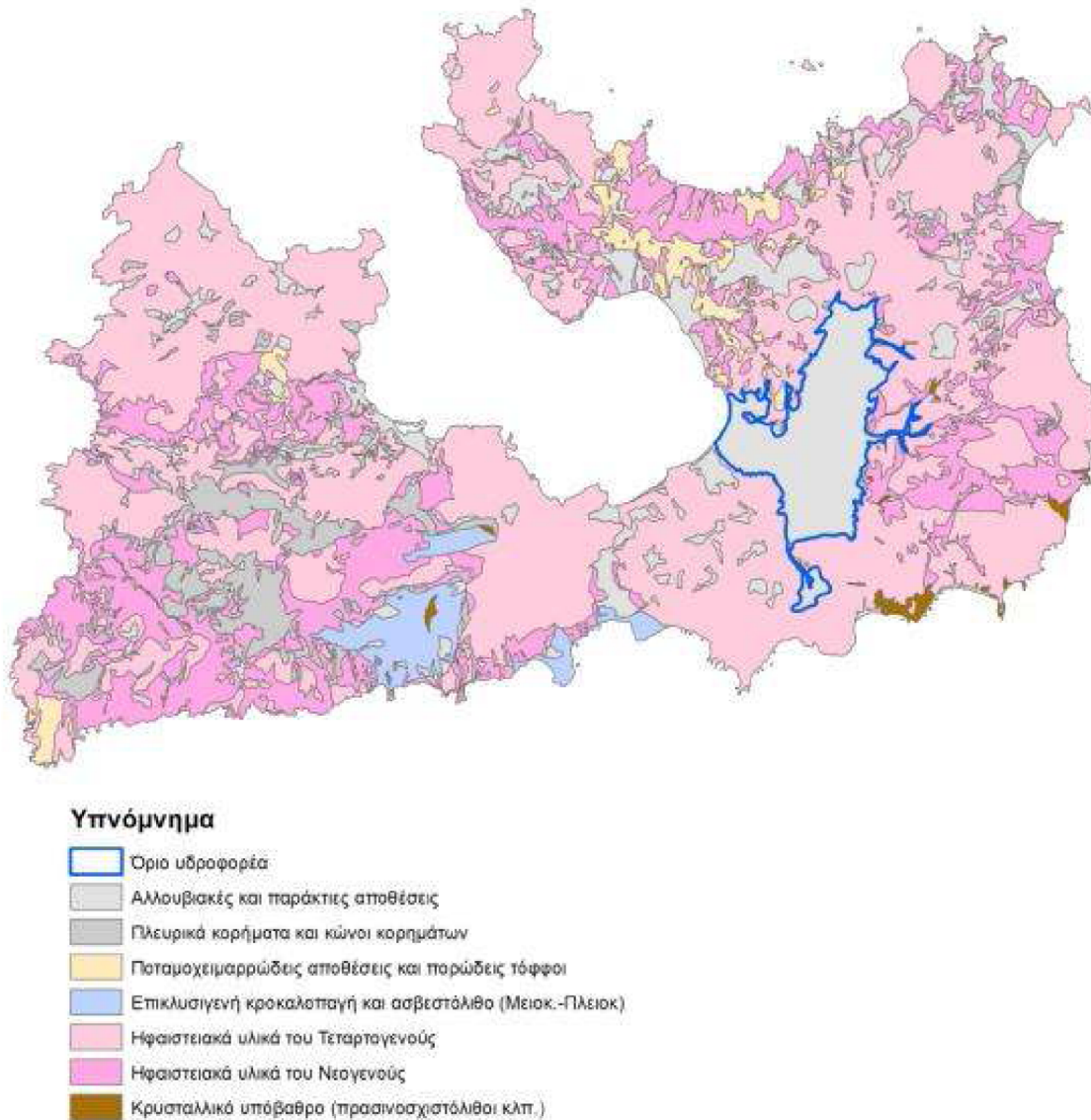
Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που παρουσιάστηκαν, σε ότι αφορά τα υδρολιθολογικά τους χαρακτηριστικά, ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) υδροπερατοί έως ημιπερατοί και (β) πρακτικά αδιαπέρατοι, βάσει αδημοσίευτων στοιχείων που συνέλεξε το Ι.Γ.Μ.Ε. με την εποπτεία του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου.

3.3.1 Υδροπερατοί έως ημιπερατοί σχηματισμοί

Πρόκειται για τα κροκαλοπαγή, τις αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις, με πάχος μέχρι 100m στην περιοχή της Ζεφυρίας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πλευρικά κορήματα και οι κώννοι κορημάτων, καθώς και παλαιότερες ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, στα οποία παρεμβάλλονται στρώματα άμμου και ερυθρής αργίλου και απαντούν στις απολήξεις των κοιλάδων, όπως είναι οι όρμοι της Φυλακωπής, της Πάχαινας, του Αδάμαντα, του Προβατά κ.α. Οι υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται εντός των προσχωματικών αποθεμάτων και των ηφαιστειακών αναβλημάτων και προέρχονται από αποσάθρωση ηφαιστειακών ταφρων, οι οποίοι καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του νησιού. Ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε άργιλο παρουσιάζουν διακύμανση στην υδροπερατότητά τους, γεγονός που τα καθιστά ενίοτε ημιπερατά, ενώ η υδροδυναμικότητα των σχηματισμών αυτών έγκειται στην έκταση, το πάχος και την κοκκομετρική τους σύνθεση.

3.3.2 Πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι λάβες (ρυολιθικές, δακιτικές, ανδεσιτικές), οι τόφφοι, οι ιγνιμβρίτες, οι ηφαιστίτες και το κρυσταλλικό υπόβαθρο, δηλαδή οι σχιστόλιθοι, οι φυλλίτες και οι μεταβασάλτες. Όπου κατά θέσεις εμφανίζονται έντονα αποσαθρωμένοι, ρηγματωμένοι (συστήματα διακλάσεων και ασυνεχειών) και πολυπτυχωμένοι, διαμορφώνεται υδροφορία τοπικής σημασίας και μέτριας υδροδυναμικότητας.



Εικόνα 3.10 Γεωλογικός χάρτης νήσου Μήλου (Στοιχεία Ι.Γ.Μ.Ε.)

Ο υδροφορέας ο οποίος εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις και βρίσκεται στην προσχωματική λεκάνη Ζεφυρίας, ανατολικά της νήσου. Τα όρια του υδροφορέα παρουσιάζονται στον παραπάνω χάρτη.

3.4 Τεκτονική

Από υπαίθριες παρατηρήσεις γίνεται σαφής η παρουσία της έντονης ρηξιγενούς τεκτονικής που έχει επιδράσει στη Μήλο. Αναγνωρίζονται τα ακόλουθα κύρια συστήματα ρηγμάτων (Φυτίκας, 1977):

- Το σύστημα ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης, το οποίο διατάσσεται παράλληλα προς τη διεύθυνση του ηφαιστειακού τόξου. Το σύστημα αυτό είναι ευδιάκριτο στο νότιο τμήμα, κοντά στην εμφάνιση των ασβεστόλιθων και πιθανά να είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία της τεκτονικής 'ρηξιγενών τεμαχών' (Block tectonics), λόγω της οποίας σχηματίζεται ένα σύνολο τεκτονικών κεράτων (Horsts) και τάφρων (Grabens) στο υποβάθρο. Ο τεκτονικός, αυτός, τύπος επηρεάζει και τα υπερκείμενα ηφαιστειακά πετρώματα.
- Το σύστημα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης, που φαίνεται να συντέλεσε ουσιαστικά στον σχηματισμό του μεγάλου κόλπου της Μήλου, του Αδάμαντα.
- Το σύστημα Α-Δ διεύθυνσης, που παρατηρείται στο τεκτονικό κέρασ της Κουτσουνόραχης. Το σύστημα αυτό είναι πολύ πιθανό να υπήρχε κατά την περίοδο έναρξης της ηφαιστειακής δράσης.
- Το σύστημα Β-Ν διεύθυνσης, με αποκλίσεις έως και Β20Α-Ν20Δ, περίπου. Αυτό είναι πολύ διαδεδομένο και πιθανά επέτρεψε την έξοδο των μαγμάτων και την εκδήλωση στη συνέχεια του μεγαλύτερου μέρους της ηφαιστειακής δραστηριότητας, γεγονός που επεξηγείται παρατηρώντας τον προσανατολισμό πολλών δόμων και σημείων εξόδου λάβας. Τα ρήγματα αυτά είναι επικρατέστερα στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού.
- Το σύστημα ΑΒΑ-ΔΝΔ διεύθυνσης, με τοπική, όμως, σημασία. Η ανύψωση τμήματος του υπόβαθρου στη θέση βόρεια της Λαγκάδας (ΑΒΑ της Ζεφύριας), δημιουργήθηκε για παράδειγμα από την επίδραση αυτού του συστήματος.

Το ρηξιγενές σύστημα Β-Ν διεύθυνσης, σχημάτισε τις δύο τεκτονικές τάφρους του νησιού: τη μεγαλύτερη της πεδιάδας της Ζεφύριας, στην οποία εμφανίζεται μόνο το ηφαιστειακό κάλυμμα και τη μικρότερη όπου δημιουργήθηκε ο ισθμός Προβατά-Χιβαδολίμνης. Αντίθετα, τα τεκτονικά κέρατα είναι πολυάριθμα και δημιουργήθηκαν από ρήγματα με διάφορες διευθύνσεις, με επικρατέστερη τη διεύθυνση Α-Δ (κέρασ Κουτσουνόραχης).

Στη Μήλο αναγνωρίζονται τρεις τεκτονικές φάσεις. Η πρώτη είναι σύγχρονη με την αλπική ορογένεση και έχει ολιγοκαινική ηλικία (Φυτίκας, 1977). Ο Λιάτσικας (1949) υποστηρίζει ότι η φάση αυτή είχε μικρή ένταση λόγω του ότι έχει επηρεάσει τους ασβεστόλιθους του νησιού σε μικρό βαθμό. Σύμφωνα με τον Φυτίκα (1977), οι ασβεστόλιθοι είναι μετά-αλπικής ηλικίας. Στη δεύτερη φάση, στην αρχή του Τεταρτογενούς, λαμβάνει χώρα έντονη ρηξιγενής τεκτονική (Βαλαχική φάση). Οι ασβεστόλιθοι και οι ηφαιστειακοί

τόφοι δεν εμφανίζουν ίχνη πτύχωσης. Κατά τον Λιάτσικα (1949), η φάση αυτή επηρέασε τους τόφους αλλά όχι τους δόμους της Μήλου. Κατά τον Φυτίκα (1977), η άκαμπτη αυτή τεκτονική συνεχίστηκε ή τουλάχιστον επαναδραστηριοποιήθηκε και μετά την Βαλαχική ορογένεση, δίνοντας την τρίτη τεκτονική φάση. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τη παρουσία των ρηγμάτων που τέμνουν όχι μόνο το πράσινο λαχάρ αλλά και τα πυροκλαστικά προϊόντα του κρατήρα της Φυριπλάκας. Η δεύτερη περίοδος (Βαλαχική φάση) χαρακτηρίζεται από συνεχείς εναλλαγές αποθέσεων χερσαίων και θαλάσσιων τόφων, ενώ η τελευταία περίοδος (μετά την απόθεση του πράσινου λαχάρ) είναι κυρίως τεκτονική καταβυθίσεων, που εξαφάνισε τα κρυσταλλικά υψώματα στα ανατολικά και τα νότια του νησιού (Φυτίκας, 1977). Η τεκτονική αυτή είναι υπεύθυνη για το σημερινό σχήμα της Μήλου αλλά και για την καταβύθισή της που συνεχίζεται.

Σε νεοτεκτονική μελέτη για το νησιώτικο σύμπλεγμα της Μήλου έχει προταθεί (Σημιαϊκής, 1985):

- Μία περίοδος εφελκυσμού κατά το Πλειόκαινο, η οποία χαρακτηρίζεται από διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και συνδέεται με ένα μεγάλο σύστημα ρηγμάτων.
- Ενδείξεις για μια μετα-Πλειοκαινική φάση συμπίεσης (που αναφέρεται επίσης από διάφορους ερευνητές σε πολλές περιοχές του Αιγαίου) με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ.
- Μία περίοδο εφελκυσμού, που επικρατεί σε όλο το Τεταρτογενές και χαρακτηρίζεται από διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Η περιοχή της Μήλου αντανakλά την τεκτονική του ευρύτερου Αιγιακού χώρου, ο οποίος βρίσκεται υπό την επίδραση εκτεταμένου εφελκυστικού πεδίου που λαμβάνει χώρα από το Μέσο-Ανώτερο Μειόκαινο μέχρι σήμερα (Mercier et al., 1976, Mercier, 1977).

Από τη στατιστική ανάλυση των γραμμικών τεκτονικών στοιχείων προκύπτει ότι, όλες οι σύγχρονες τεκτονικές γραμμές ακολουθούν προϋπάρχουσες γεωλογικές δομές. Ο συνδυασμός των δυο κυριοτέρων εφελκυστικών φάσεων, Πλειόκαινου και Τεταρτογενούς, έπαιξε ουσιαστικό ρόλο τόσο στην εξέλιξη της ηφαιστειότητας όσο και στην διαμόρφωση της περιοχής σε συστήματα κεράτων και τάφρων. Η εξέλιξη της ηφαιστειότητας μπορεί να περιγραφθεί ως εξής (Σημιαϊάκης, 1985):

- Στην πρώτη περίοδο εφελκυσμού, κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο, αντιστοιχεί η πρώτη φάση ηφαιστειότητας με ρουλιθικές λάβες.
- Το τέλος της πρώτης ηφαιστειότητας συμπίπτει με τη φάση συμπίεσης του Κατώτερου Τεταρτογενούς και με την έναρξη μιας δεύτερης φάσης ηφαιστειότητας με ασβεσταλκαλικές λάβες. Η φάση συμπίεσης και ο τύπος των λαβών που τη συνόδευαν υποδεικνύουν μία επιτάχυνση στη σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών (McKenzie, 1970).
- Με το τέλος της φάσης συμπίεσης του Κατώτερου Τεταρτογενούς αρχίζει η διαφοροποίηση των ανδεσιτικών μαγμάτων σε διαφορετικά βάθη, ενώ οι κατακόρυφες κινήσεις και μετατοπίσεις που συνοδεύουν την επανάληψη του εφελκυσμού από το μέσο Τεταρτογενές μέχρι σήμερα ευνοούν την άνοδο και την επακόλουθη εναπόθεση των διαφοροποιημένων ηφαιστειακών προϊόντων της τελευταίας ηφαιστειακής δραστηριότητας (ρουλιθικές λάβες του Τεταρτογενούς) (Angelier et al., 1977).

3.5 Υδροφόροι Σχηματισμοί της Νήσου Μήλου

Η παρουσία υδροφόρων οριζόντων στη Μήλο επηρεάζεται από το γεωθερμικό πεδίο και ειδικότερα από την παρουσία διαλυμάτων υψηλών θερμοκρασιών. Σημαντική υδροφορία αναπτύσσεται κατά μήκος των ρηξιγενών ζωνών, όπου δε γίνεται μόνο η κυκλοφορία των μετεωρικών νερών που κατεισδύουν, αλλά και των γεωθερμικών ρευστών υψηλών θερμοκρασιών (απαντούν πολυάριθμες πηγές με θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 35 – 45 °C).

Στη Μήλο βάσει των παραπάνω διαμορφώνονται έξι υδρογεωλογικές ενότητες, οι οποίες εξυπηρετούν τις ανάγκες της. Αυτές καλύπτονται κυρίως από τις υδρογεωλογικές ενότητες Αδάμαντα , Απολλωνίας και Ζεφυρίου, ενώ ελάχιστη είναι η συνεισφορά των υδρογεωλογικών λεκανών Χονδροβουνίου και Δυτικής Μήλου.

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

4.1 Ο υδροφορέας της Ζεφυρίας

Ο υδροφορέας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει τα χαρακτηριστικά ενός φρεάτιου προσχωματικού υδροφορέα, με επιπλέον χαρακτηριστικό ότι είναι παράκτιος. Το τελευταίο χαρακτηριστικό είναι και το σημαντικότερο, αφού τέτοιοι υδροφορείς αντιμετωπίζουν προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης των υδάτων τους λόγω υπεράντλησης και κατ' επέκταση της εισχώρησης του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο.

4.2 Πιεζομετρία Υδροφορέα

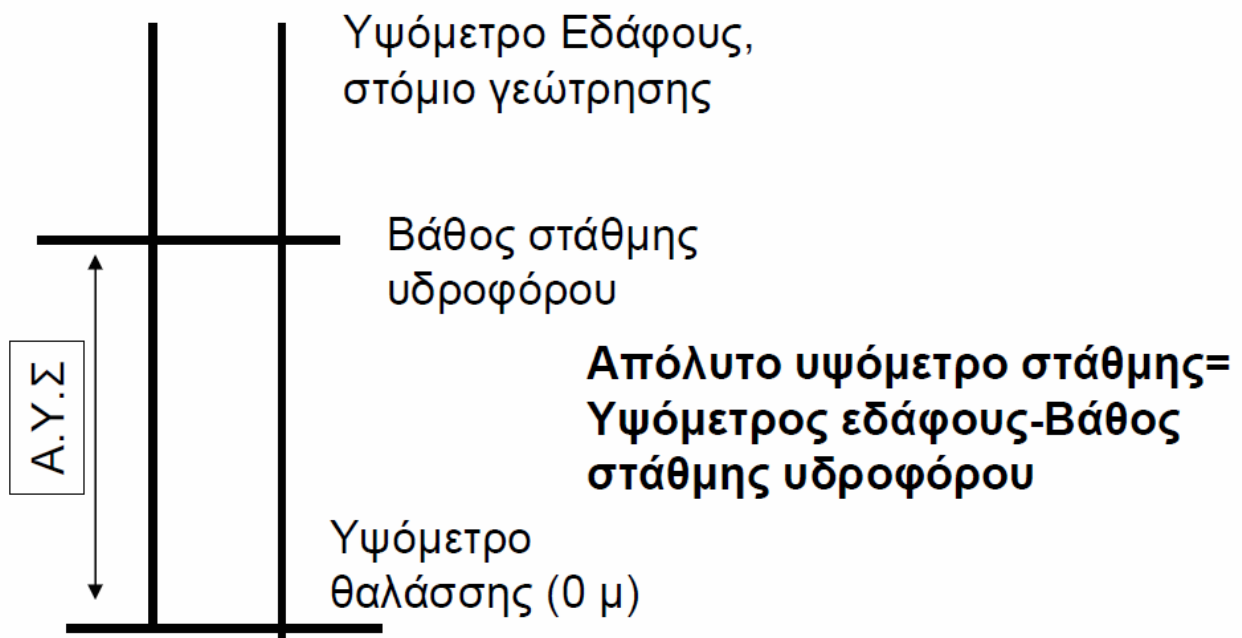
Οι διακυμάνσεις της πιεζομετρικής στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων που μετρούνται στους σωλήνες των γεωτρήσεων κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού εξαμήνου και ενός υδρολογικού έτους είναι ενδεικτικές του ρυθμού φυσικής αποστράγγισης και επαναπλήρωσης του υδροφόρου ορίζοντα, όπως και ενδεικτικές του ρυθμού της εκμετάλλευσης αυτών από ανθρωπογενείς ενέργειες. Μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης κατά τη διάρκεια των θερινών υδρολογικών εξαμήνων δηλώνουν και υπέρμετρο βαθμό εκμετάλλευσης των υδροφορέων, πέρα από αυτόν που επιτρέπουν τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζει συνεχή ταπείνωση της πιεζομετρικής τους στάθμης στη διάρκεια συνεχών υδρολογικών ετών, δηλωτική της αυξημένης εκμετάλλευσης και εκκένωσης του υδροφορέα σε σχέση με τη φυσική του επαναπλήρωση από τις βροχοπτώσεις. Υπάρχουν διάφορες αιτίες που προκαλούν διακυμάνσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας, είτε αυτές είναι φυσικές είτε είναι τεχνητές.

Οι φυσικές διακυμάνσεις προκαλούν είτε τυχαία αποτελέσματα, αν για παράδειγμα προκύψουν από μία φυσική καταστροφή, όπως σεισμό ή κατάρρευση ενός μεγάλου γεωλογικού σχηματισμού, είτε επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις συνηθισμένες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου (βροχόπτωση, εξάτμιση, μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης κ.α.) Αντίθετα οι τεχνητές διακυμάνσεις προκύπτουν από ανθρωπογενείς επεμβάσεις όπως είναι η διάνοιξη γεωτρήσεων για την άντληση των υδάτων ή η κατασκευή αποστραγγιστικών και εγγειοβελτιωτικών έργων.

4.3 Πιεζομετρικοί Χάρτες

Οι πιεζομετρικοί χάρτες , μέσω των ισοπιεζομετρικών καμπυλών τους, απεικονίζουν την μορφολογία της πιεζομετρικής επιφάνειας, όπως ακριβώς οι τοπογραφικοί χάρτες με τις ισοϋψείς καμπύλες που απεικονίζουν την μορφολογία της επιφάνειας του εδάφους.

Το ρόλο των ισοϋψών στους τοπογραφικούς χάρτες παίζουν παίζουν οι ισοπιεζομετρικές ή ισοδυναμικές καμπύλες στους πιεζομετρικούς χάρτες. Κάθε μια πιεζομετρική καμπύλη ενώνει όλα τα σημεία που έχουν το ίδιο υδραυλικό φορτίο (Α.Υ.Σ)



Η πιεζομετρική επιφάνεια των υπογείων υδροφόρων προσδιορίζεται από τους χαρακτήρες της ροής που πραγματοποιείται μέσα σε αυτούς. Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται είναι οι εξής:

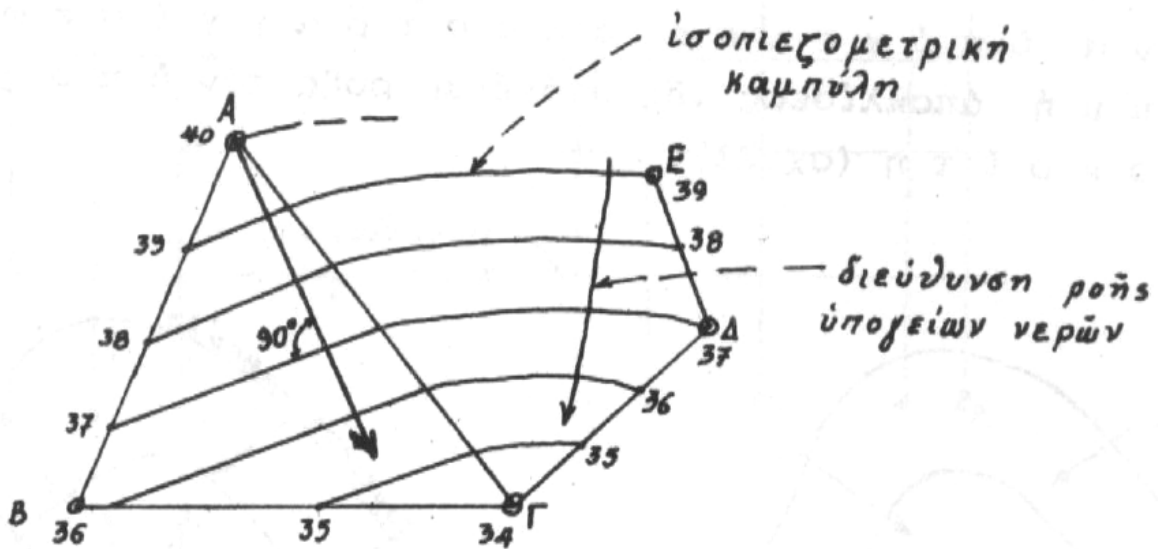
- Γεωμορφολογικές και τεκτονικές συνθήκες που καθορίζουν τη στάθμη και την πιεζομετρική πίεση, τον τύπο του υδροφόρου και το προφίλ ταπεινώσεως.
- Χαρακτηριστικά του υδροφορέα (λιθολογία, στεγανό υπόβαθρο)
- Συνθήκες τροφοδοσίας και αποστράγγισης

Πιεζομετρικές μετρήσεις

- Πραγματοποιούνται με σταθμήμετρο και πρέπει να γίνονται τουλάχιστον δύο φορές το χρόνο.
- Περίοδος χαμηλών νερών (Οκτώβριος-Σεπτέμβριος)
- Περίοδος υψηλών νερών (Μάιος –Ιούνιος)
- Υπολογισμός πάντα του Α.Υ.Σ
- Η μορφολογία της πιεζομετρικής επιφάνειας αφορά πάντα τη χρονική στιγμή που έγιναν οι μετρήσεις

Κατασκευή πιεζομετρικών χαρτών

Αποτυπώνουμε όλα τα σημεία υδροληψίας πάνω σε ένα κάρναβο και στη συνέχεια ενώνουμε όλα τα γειτονικά σημεία μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Χωρίζουμε τα ευθύγραμμα τμήματα σε τόσα ίσα κομμάτια όσα είναι η διαφορά των πιεζομετρικών μετρήσεων μεταξύ των δύο σημείων. Στη συνέχεια ενώνουμε όλα τα ισοδυναμικά σημεία.



Ερμηνεία πιεζομετρικών καμπυλών

- Υπολογισμός του βάθους, κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, της πιεζομετρικής επιφάνειας, σε συνδυασμό με τοπογραφικό χάρτη
- Σχεδίαση γραμμών ροής και τον προσδιορισμό της διεύθυνσης υπόγειας ροής και αποστράγγισης
- Εντοπισμός υπόγειου υδροκρίτη
- Προσδιορισμός υδραυλικής κλίσης
- Σχέση τροφοδοσίας ποταμών λιμνών με τους υδροφόρους
- Οι ισοπιεζομετρικές καμπύλες δεν πρέπει να τέμνονται μεταξύ τους
- Αν η απόσταση μεταξύ των καμπυλών μεταβάλλεται από θέση σε θέση αυτό δηλώνει αυξομείωση της υδραυλικής κλίσης
- Πυκνή διάταξη σημαίνει μεγάλη υδραυλική κλίση, που οφείλεται σε μεγάλη υπόγεια παροχή, ή σε μικρή υδροπερατότητα του υδροφορέα.
- Αραιή διάταξη σημαίνει μικρή υδραυλική κλίση, μικρή υπόγεια παροχή ή μεγάλη υδροπερατότητα

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρικής κατάστασης των εκμεταλλεόμενων υδροφόρων στρωμάτων στο χώρο της έρευνας, αξιοποιούμε τις μετρήσεις απόλυτης στάθμης των γεωτρήσεων που έχουμε στη διάθεσή μας, έτσι ώστε να πάρουμε μια όσο το δυνατόν ακριβέστερη εικόνα της κατανομής των ισοδυναμικών γραμμών της πιεζομετρικής επιφάνειας και να εντοπίσουμε τις διευθύνσεις των δρόμων της υπόγειας ροής του νερού και τις υδραυλικές της κλίσεις. Οι μετρήσεις της πιεζομετρικής επιφάνειας στις γεωτρήσεις παρατήρησης, θα πρέπει να αναφέρονται στο ίδιο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η εικόνα του πιεζομετρικού χάρτη που θα πάρουμε να χαρακτηρίζει και να αντιπροσωπεύει την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων σε όλη την επιφάνεια του χώρου έρευνας για την ίδια χρονική περίοδο. Η αξιοποίηση των τιμών της πιεζομετρικής στάθμης που παίρνονται στις γεωτρήσεις μπορεί να γίνει για τη θέση της στην αρχή και το τέλος καθενός υδρολογικού εξαμήνου ή ακόμη στο τέλος κάθε υδρολογικού έτους ή σειράς ετών. Η θέση των ισοδυναμικών γραμμών των πιεζομετρικών χαρτών που κατασκευάζουμε μας δίνει και την υδραυλική κατάσταση των υδροφορέων που εκμεταλλεόμαστε (Δημόπουλος, www.geo.auth.gr).

Γενικά, από ένα πιεζομετρικό χάρτη μπορούμε να:

- προσδιορίσουμε το βάθος που βρίσκεται η στάθμη των υπόγειων νερών,
- σχεδιάσουμε τις γραμμές υπόγειας ροής και τη διεύθυνση της ροής,
- σχεδιάσουμε τους άξονες υπόγειας αποστράγγισης και τον υπόγειο υδροκρίτη,
- υπολογίσουμε την υδραυλική κλίση,
- κατασκευάσουμε το προφίλ ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας,
- κατασκευάσουμε το χάρτη των ισοπαχών καμπύλων του υδροφορέα,
- υπολογίσουμε την αποθηκευτική ικανότητα του υδροφορέα (συνδυασμός δύο πιεζομετρικών χαρτών για δύο διαφορετικές περιόδους), πάρουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ή όχι πλευρικής τροφοδοσίας, για τις περιοχές εκτόνωσης του υδροφορέα, για την τροφοδοσία από ποτάμια, λίμνες κλπ. και
- να αντλήσουμε πληροφορίες για την υδροπερατότητα, την παροχή και τον τύπο του υδροφορέα.

4.4 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα

Γενικά ένας υδροφορέας οριοθετείται βάση των γεωλογικών σχηματισμών που αποτελούν τα φυσικά εξωτερικά όρια. Τα όρια αυτά αποτελούνται από πρακτικά αδιαπέρατες γεωλογικές και υδρογεωλογικές δομές, οι οποίες επηρεάζουν μόνιμα την υπόγεια ροή. Η οριοθέτηση του υδροφορέα της περιοχής μελέτης, πραγματοποιήθηκε με βάση τα παρακάτω κριτήρια.

4.4.1 Βάσει φυσικών ορίων

Για τον υπόγειο και παράκτιο υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας, οι αδιαπέρατοι σχηματισμοί που πρακτικά τον οριοθετούν, είναι κατά κύριο λόγο ηφαιστειακά υλικά. Πιο συγκεκριμένα στο βόρειο και νότιο τμήμα του υδροφορέα, οι γεωλογικοί σχηματισμοί αποτελούνται από ηφαιστειακά υλικά του Τεταρτογενούς και κυρίως πορώδεις τόφφοι, λεπτά στρώματα από πυροκλαστικά υλικά και ρυολιθικοί ιγνιμβρίτες στο ΒΔ τμήμα. Στο ανατολικό τμήμα συναντάμε κατά κύριο λόγο ηφαιστειακά υλικά του Νεογενούς όπως ιγνιμβρίτες, παλαιούς τοφφίτες, ηφαιστίτες και αποθέσεις ρευμάτων κίσηρης. Στο δυτικό τμήμα η οριοθέτηση του υδροφορέα γίνεται από τη θαλάσσια επιφάνεια. Γενικά εκτιμάται ότι εισροές ή εκροές δε λαμβάνουν χώρα, ακόμα και σε κάποια λεπτά τμήματα του υδροφορέα, στο νότιο και ανατολικό του τμήμα, που πιθανώς να προέκυψαν από αλλουβιακές προσχώσεις στους αδιαπέρατους σχηματισμούς. Οι θέσεις αυτές είναι περιορισμένης έκτασης και η τροφοδοσία θεωρείται ελάχιστη και αμελείται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης που θα εφαρμοστεί στη συνέχεια.

4.4.2 Βάσει υδραυλικών ορίων

Τα υδραυλικά όρια προκύπτουν από το δίκτυο ροής και μπορούν να τοποθετηθούν είτε κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών ροής είτε κατά μήκος ισοδυναμικών - πιεζομετρικών γραμμών (όρια γνωστού υδραυλικού φορτίου). Ως εκ τούτου τα υδραυλικά όρια δεν αποτελούν μόνιμες δομές και μπορούν να μεταβληθούν χρονικά. Η θέση τους, αν και καθοδηγείται από τα δίκτυα ροής, τοποθετείται τεχνητά από τον ερευνητή και έτσι αποτελεί υποκειμενικό στοιχείο.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι κατανοητό ότι τα φυσικά όρια γενικά προτιμώνται σε σχέση με τα υδραυλικά. Στις περιπτώσεις όμως που φυσικά όρια δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν για τις ανάγκες μιας μελέτης, τότε τα υδραυλικά όρια μπορούν να δώσουν τη λύση στην πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα. Στην περίπτωση που εξετάζεται η οριοθέτηση έγινε βάσει των φυσικών ορίων.

4.5 Κατακόρυφη Οριοθέτηση Υδροφορέα

Μετά την πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα, σημαντικό είναι να εκτιμηθεί το πάχος αυτού. Ο παράκτιος υδροφορέας της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας είναι φρεάτιος και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ως οροφή του η επιφάνεια του εδάφους. Η τρίτη διάσταση δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί και βασίζεται σε σημειακές πληροφορίες, όπως το βάθος των υδρογεωτρήσεων και απλή περιγραφή της λιθολογίας, διότι κατά την ανόρυξη γεωτρήσεων δεν λαμβάνεται δείγμα εδάφους και η λιθολογία που συναντάται περιγράφεται επιτόπου από τον επιβλέποντα γεωλόγο, με κατανοητή την υποκειμενικότητα της διαδικασίας. Στοιχεία σχετικά με την εκτίμηση της βάσης του υδροφορέα για την περίπτωση που εξετάζουμε, όπως γεωλογικές τομές, δεν υπάρχουν, οπότε θα λάβουμε υπόψη τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στην περιοχή και το βάθος των υδρογεωτρήσεων. Βάσει των γεωλογικών σχηματισμών το πάχος του υδροφορέα μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 75m. Για την απλοποίηση των υπολογισμών που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια, το πάχος του υδροφόρου ορίστηκε 50m, τιμή που ούτως ή άλλως είναι απλά προσεγγιστική.

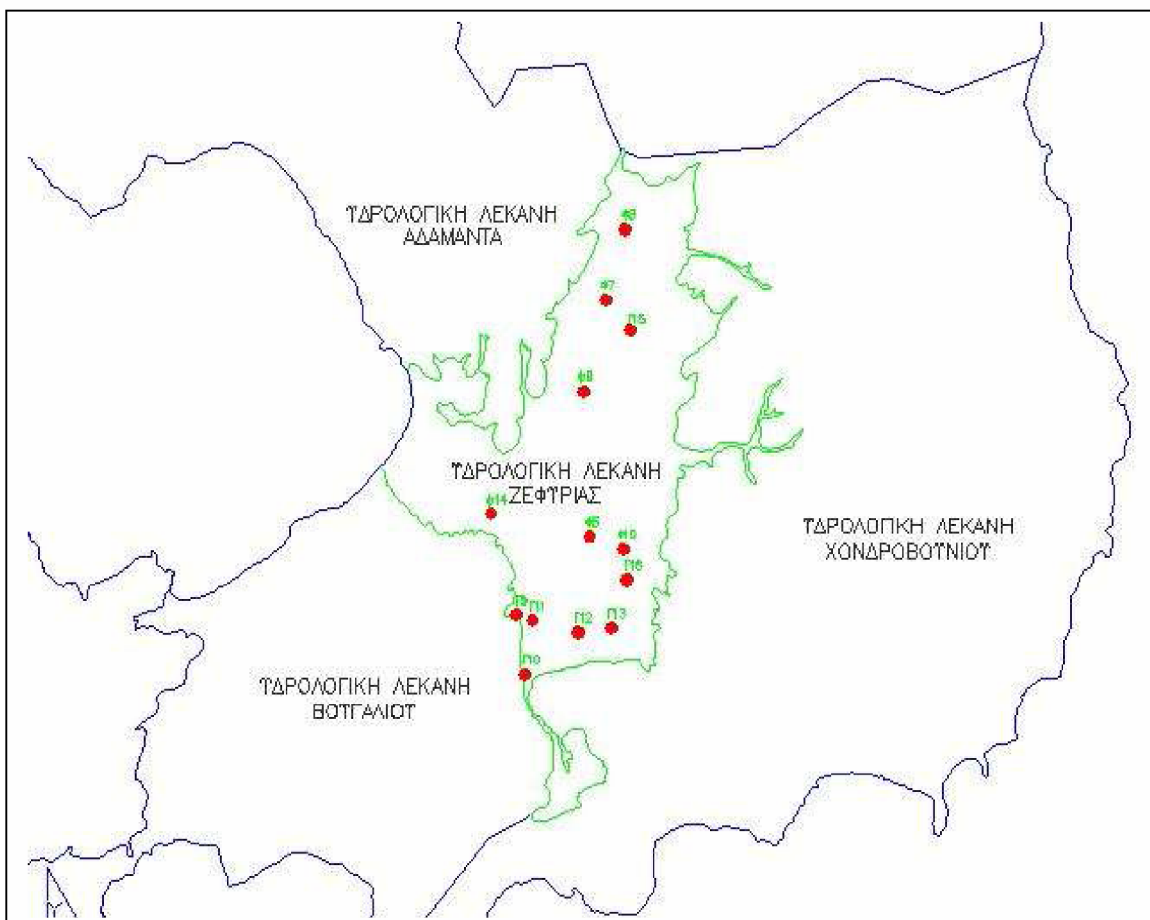
4.6 Πιεζομετρία του Υδροφορέα στην Περιοχή Μελέτης

Για τη διερεύνηση της πιεζομετρίας ενός υδροφορέα χρειάζονται στοιχεία που αφορούν στάθμες των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής σε διάφορες χρονικές περιόδους. Για τον υδροφορέα που εξετάζουμε δεν υπήρχαν μελέτες που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση τέτοιας πληροφορίας. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω, αφορούν μετρήσεις στατικής στάθμης σε φρέατα και γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν υπό την εποπτεία του Δρ. Υδρογεωλόγου Παναγιώτη Γιαννουλόπουλου και πρόκειται για αδημοσίευτα στοιχεία που παραχωρήθηκαν αποκλειστικά και μόνο για τη σύνταξη της διπλωματικής εργασίας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν τις γεωτρήσεις Γ10, έως Γ13, Γ15, Γ16 και τα φρέατα Φ5 και Φ7 έως Φ10 σύμφωνα με την κωδικοποίηση του Υπουργείου Γεωργίας, η θέση των οποίων εντοπίζεται μέσα στα όρια του υδροφορέα.

Κωδική ονομασία	X	Y	Z	M_Στάθμη
Φ14	542592	4060941	6.60	7,1
Φ9	543490	4062040	8.40	5,7
Γ15	543950	4062553	9.30	7,7
Φ7	543701	4062864	11.20	10,3
Φ5	543546	4060751	11,8	11,6
Φ8	543885	4063499	13.50	12
Φ10	543870	4060637	18.00	17,5
Γ11	542994	4059999	22.30	21,3
Γ12	543434	4059895	20,7	22,5
Γ16	543907	4060364	24.20	22,7
Γ9	542838	4060051	23.80	23,3
Γ13	543760	4059933	29.70	27,9
Γ10	542921	4059513	39.90	39,4

Πίνακας 4.1 Θέση και μέση στάθμη φρεάτων και γεωτρήσεων στον υδροφορέα

Η καταγραφή των τιμών της μέσης στάθμης στις γεωτρήσεις αναφέρονται στην περίοδο Μάιος - Σεπτέμβριος του έτους 2007 και επομένως μπορούν να θεωρηθούν επιβαρυνμένες. Τα ύψη Z έχουν ως σημείο αναφοράς τη στάθμη της θάλασσας και υπολογίσθηκαν από τα φύλλα χάρτη 7572_8 και 7582_2 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:5000, με εκτίμηση από τις ισούψεις καμπύλες αφού πρώτα έγινε γεωαναφορά των χαρτών στο Ελληνικό γεωδαιτικό Σύστημα Ε.Γ.Σ.Α. '87. Η εκτίμηση των υψομέτρων ελέγχεται για την ακρίβειά της, αλλά λόγω έλλειψης υψομετρικών δεδομένων θεωρήθηκε η πιο ενδεδειγμένη. Μετρήθηκε η υψομετρική διαφορά της ανώτερης επιφάνειας του νερού των γεωτρήσεων (Γ) και των πηγαδιών παρατήρησης (Φ) και του υψομέτρου αυτών (Z), γνωστό από μετρήσεις GPS, τα οποία είχαν γνωστές συντεταγμένες από παλιότερες τοπογραφικές μετρήσεις στην περιοχή. Έπειτα αφαιρώντας από το γνωστό υψόμετρο της κάθε γεώτρησης ή πηγαδιού τη μετρημένη υψομετρική διαφορά, υπολογίσαμε την απόλυτη στάθμη της επιφάνειας του νερού σε κάθε γεώτρηση – πηγάδι (Από τη διαφορά του ύψους Z του φρέατος ή της γεώτρησης με τη μέση στάθμη προκύπτει το μέσο υδραυλικό φορτίο ως προς την επιφάνεια της θάλασσας). Παρακάτω παρατίθεται ο χάρτης με τις ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων και των πηγαδιών της περιοχής για τις οποίες διαθέτουμε στοιχεία.



Εικόνα 4.1 Ακριβείς θέσεις γεωτρήσεων και πηγαδιών

Κωδική Ονομασία	Μέσο Υδραυλικό Φορτίο
Φ14	-0,50
Φ9	2.70
Γ15	1,60
Φ7	0,90
Φ5	0,20
Φ8	1.50
Φ10	0,50
Γ11	1.00
Γ12	-1,80
Γ16	1.50
Γ9	0,50
Γ13	1,80
Γ10	0,50

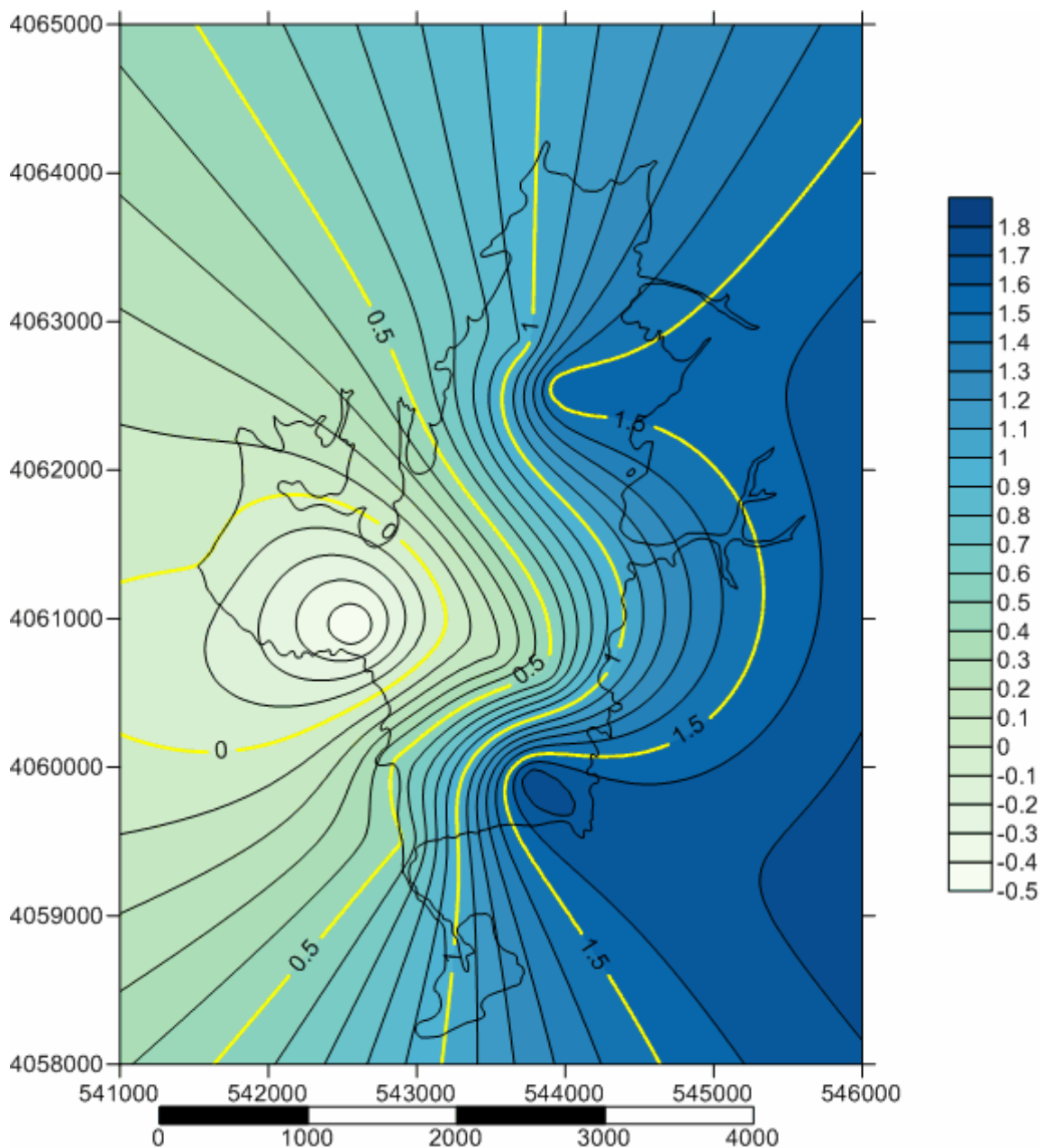
Εικόνα 4.2 Μέσο υδραυλικό φορτίο γεωτρήσεων

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε πως μόνο σε ένα φρέαρ και σε μία γεώτρηση παρατηρείται αρνητική τιμή του υδραυλικού φορτίου και συγκεκριμένα στο Φ14 όπου καταγράφεται τιμή -0,50m και στη Γ12 με -1,80m αντίστοιχα. Αντίθετα στο φρέαρ Φ9 καταγράφεται η μέγιστη θετική τιμή υδραυλικού φορτίου που φτάνει τα 2,70m. Η τιμή ωστόσο του μέσου υδραυλικού φορτίου που καταγράφεται στη γεώτρηση Γ12 δεν συνάδει με τις τιμές των γειτονικών Γ13 και Γ11 που είναι αρκετά υψηλές και επομένως δεν συμπεριλήφθηκε στον προσδιορισμό της πιεζομετρίας του υδροφορέα.

Με τη χρήση των παραπάνω δεδομένων και τη βοήθεια του λογισμικού Surfer Golden Software 9, σχεδιάστηκαν οι ισοσταθμικές καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν την στάθμη των υπογείων νερών του παράκτιου υδροφορέα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου του έτους 2007 καθώς και η τρισδιάστατη απεικόνιση όπως και οι αντίστοιχοι vector χάρτες. Επειδή οι τιμές για τις στάθμες είναι σημειακές αρχικά χρησιμοποιήθηκε η γεωστατιστική μέθοδος Kriging στην κατασκευή του κανάβου όμως στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Radial Basis Function Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πιεζομετρικός χάρτης της περιοχής του υδροφορέα με τη μέθοδο Kriging, που δεν είναι άλλο από τη δισδιάστατη απεικόνιση της κατανομής του υδραυλικού φορτίου και της ροής του.

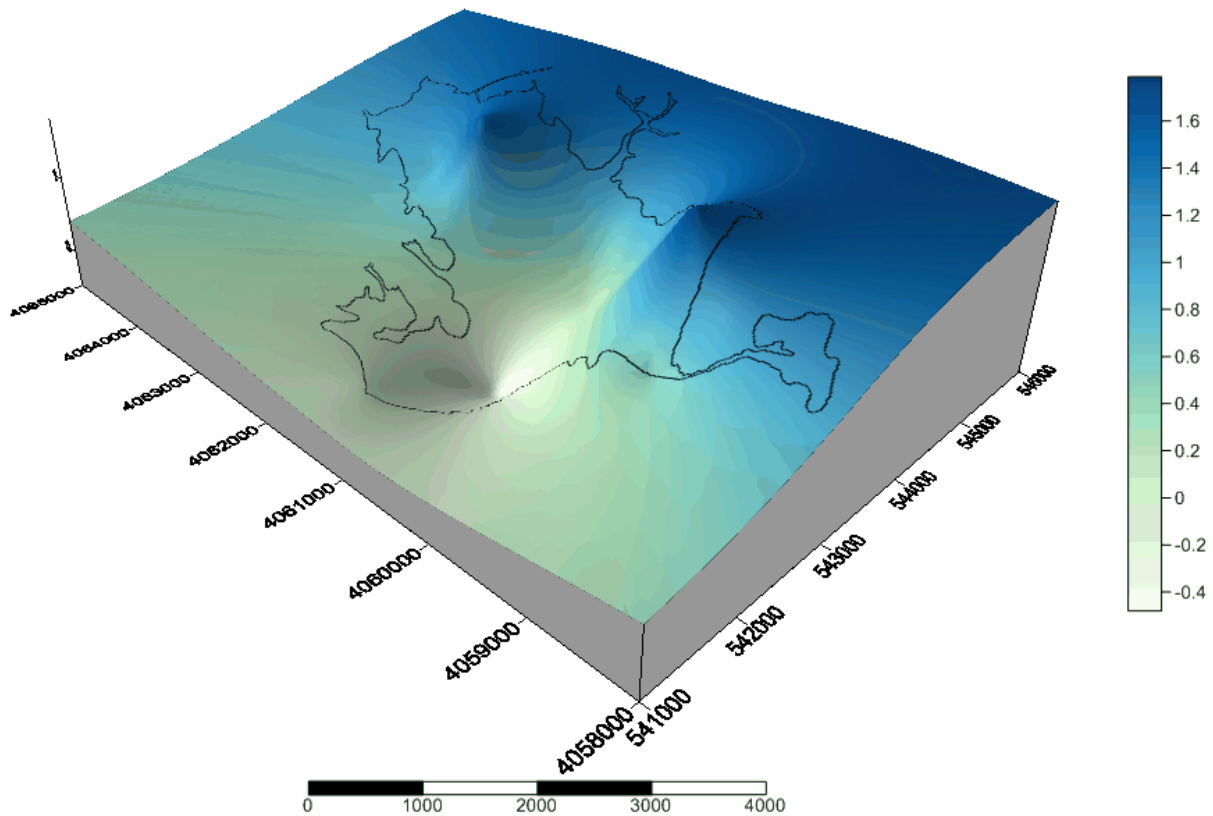
Η μέθοδος Kriging αποτελεί την πλέον σύγχρονη και ακριβή τεχνική παρεμβολής, που επιπλέον παρέχει και τη δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης στη δομή της χωρικής μεταβολής της μελετώμενης μεταβλητής. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ιδιότητα της ανισοτροπίας. Στη γενική της μορφή, η μέθοδος αυτή, αποτελεί μια τεχνική που στηρίζεται στη θεωρία των περιοχοποιημένων μεταβλητών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μιας ευρύτερης επιστημονικής περιοχής, της Γεωστατιστικής (Π. Λατινόπουλος, Τεχνική Υδρολογία 1995).

Ισοσταθμικές καμπύλες



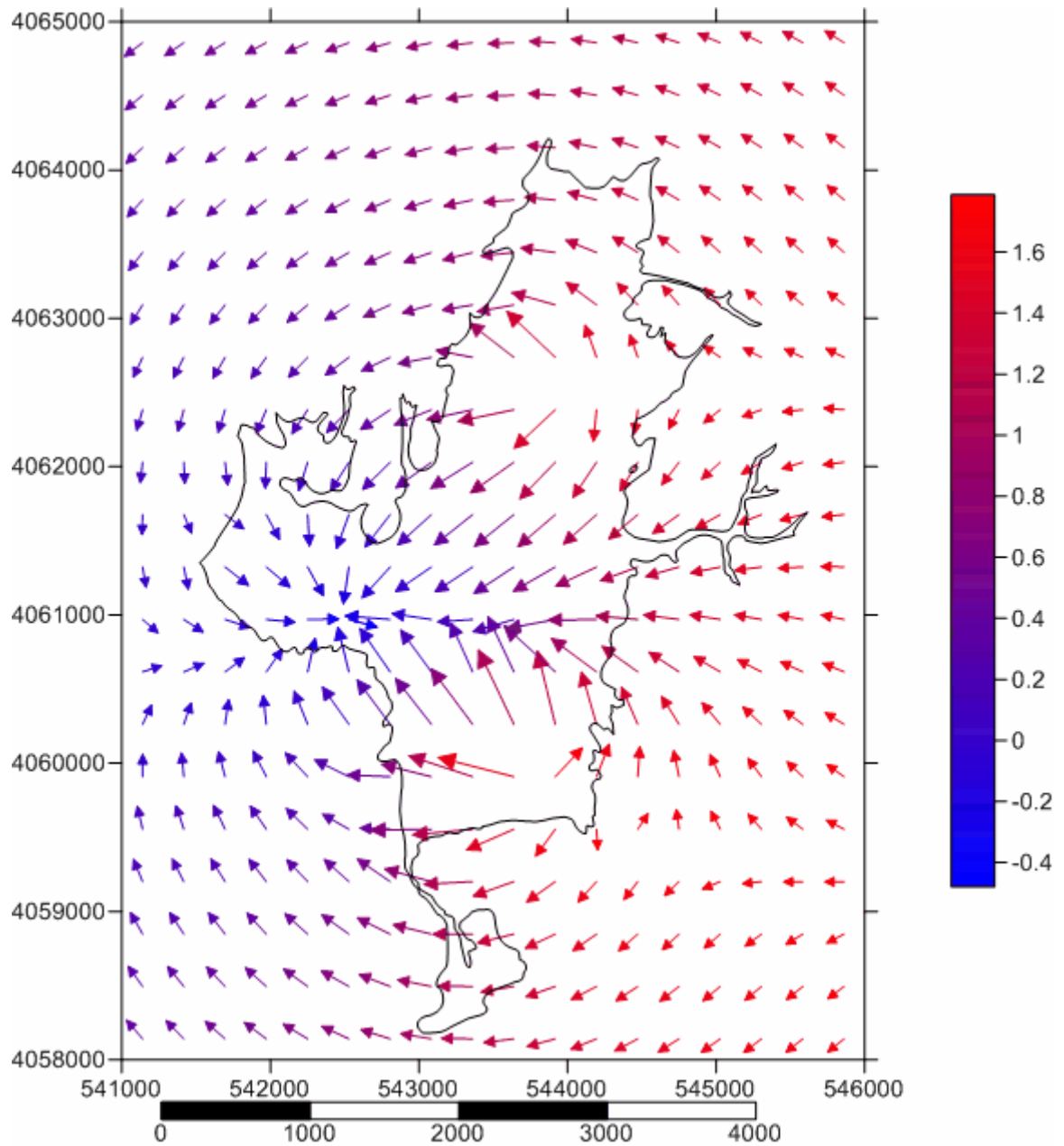
Εικόνα 4.3 Ισοσταθμικές καμπύλες υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Kriging

Τρισδιάστατη απεικόνιση



Εικόνα 4.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Kriging

Οι Vector χάρτες μας δείχνουν την κατεύθυνση και το μέγεθος των δεδομένων χρησιμοποιώντας προσανατολισμένα βέλη. Για παράδειγμα, σε κάθε κόμβο του δικτύου στο χάρτη, το βέλος δείχνει προς την κατεύθυνση της απότομης καθόδου ("κατηφόρα") και το μήκος του βέλους είναι ανάλογο με το μέγεθος της κλίσης.

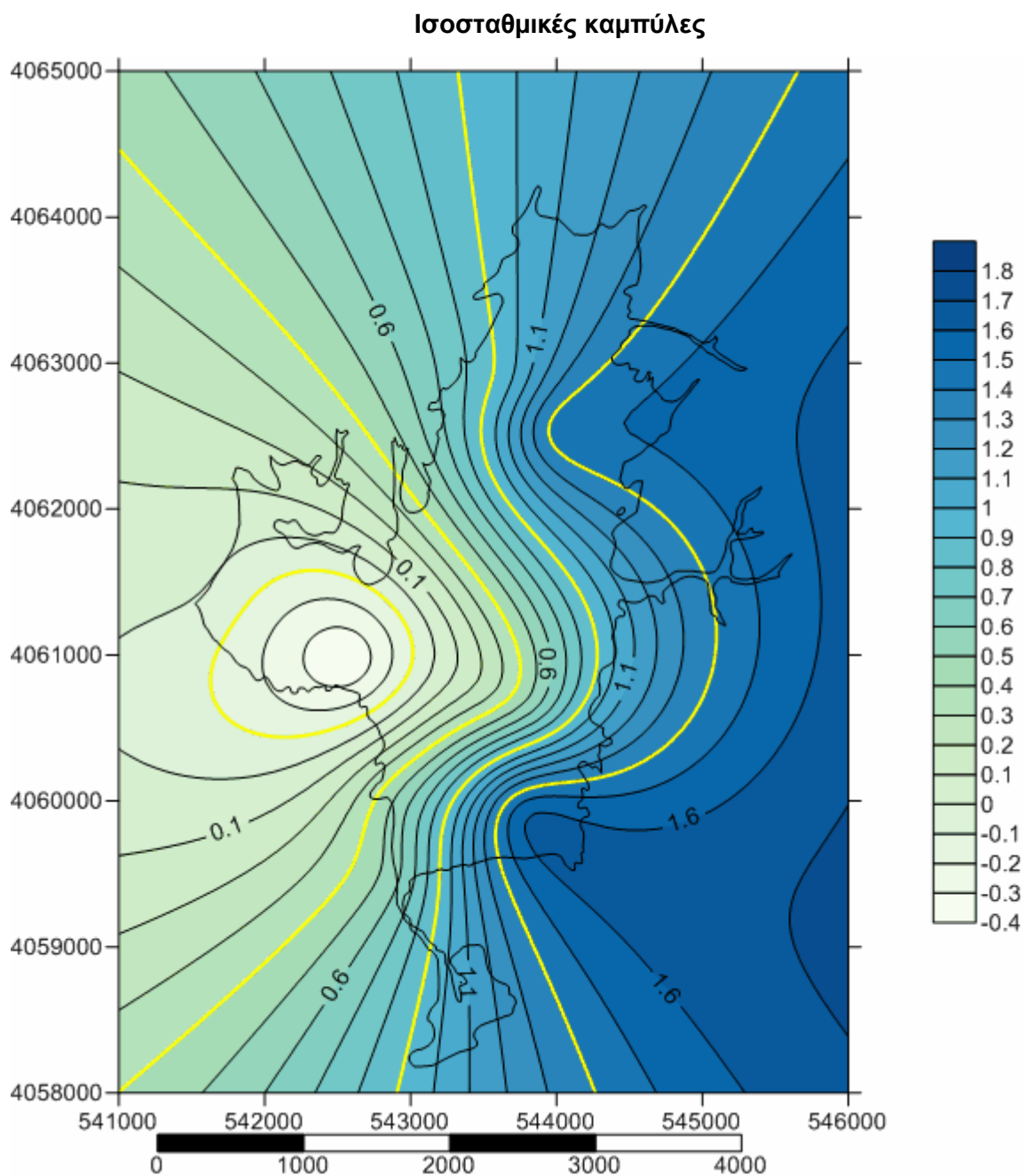


Εικόνα 4.5 Vector χάρτης υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Kriging

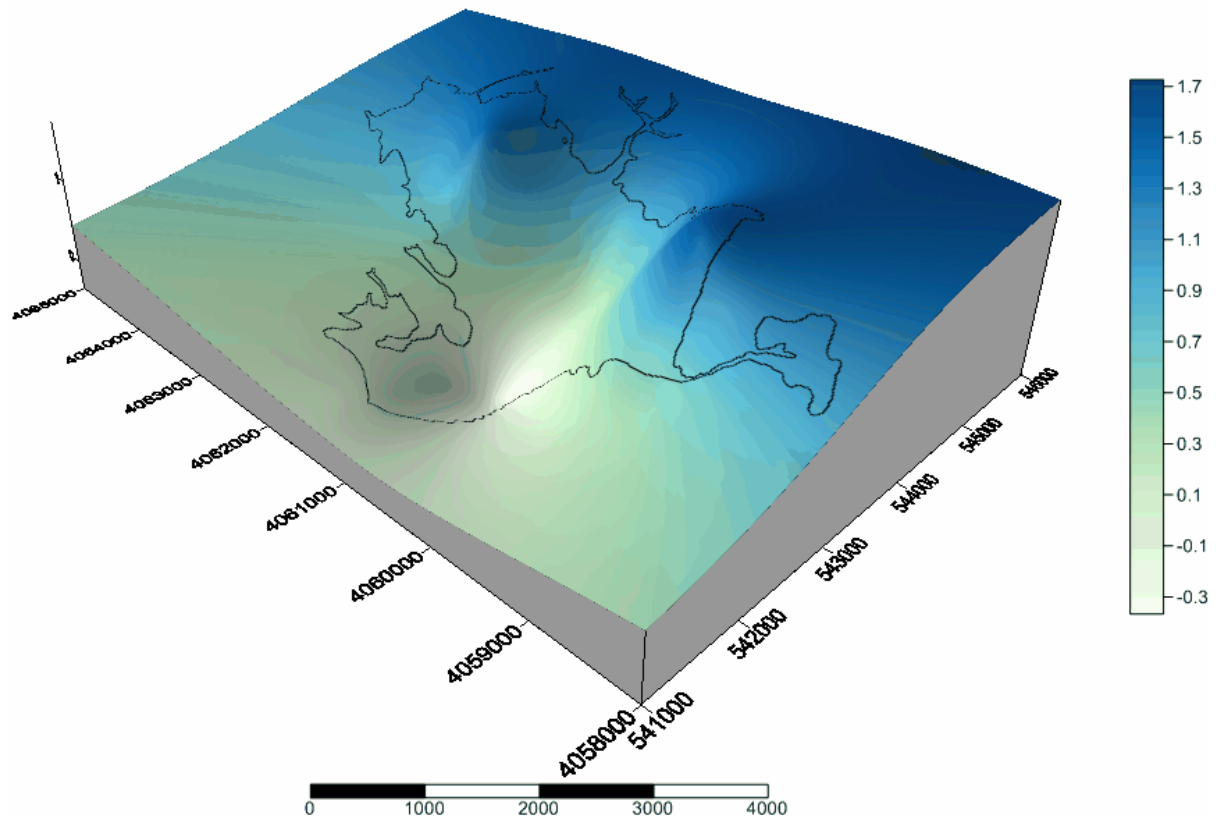
Η μέθοδος Kriging παρέχει τη δυνατότητα περαιτέρω εμβάθυνσης στη δομή της χωρικής μεταβολής της μελετώμενης μεταβλητής. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι έχει την ιδιότητα της ανισοτροπίας. Στη γενική της μορφή, η μέθοδος αυτή, αποτελεί μία τεχνική που στηρίζεται στη θεωρία των περιοχοποιημένων μεταβλητών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μιας ευρύτερης επιστημονικής περιοχής, της Γεωστατιστικής (Λατινόπουλος, 1995).

Από τους παραπάνω χάρτες παρατηρούμε πως οι αρνητικές στάθμες είναι ελάχιστες και τοποθετούνται κυρίως στο δυτικό και παράκτιο τμήμα του υδροφορέα. Εξάλλου το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο εφόσον η μοναδική αρνητική στάθμη που χρησιμοποιήθηκε, παρατηρήθηκε στο φρέαρ Φ14, το οποίο βρίσκεται δυτικά στον υδροφορέα μας, και είναι το πλησιέστερο στην ακτογραμμή.

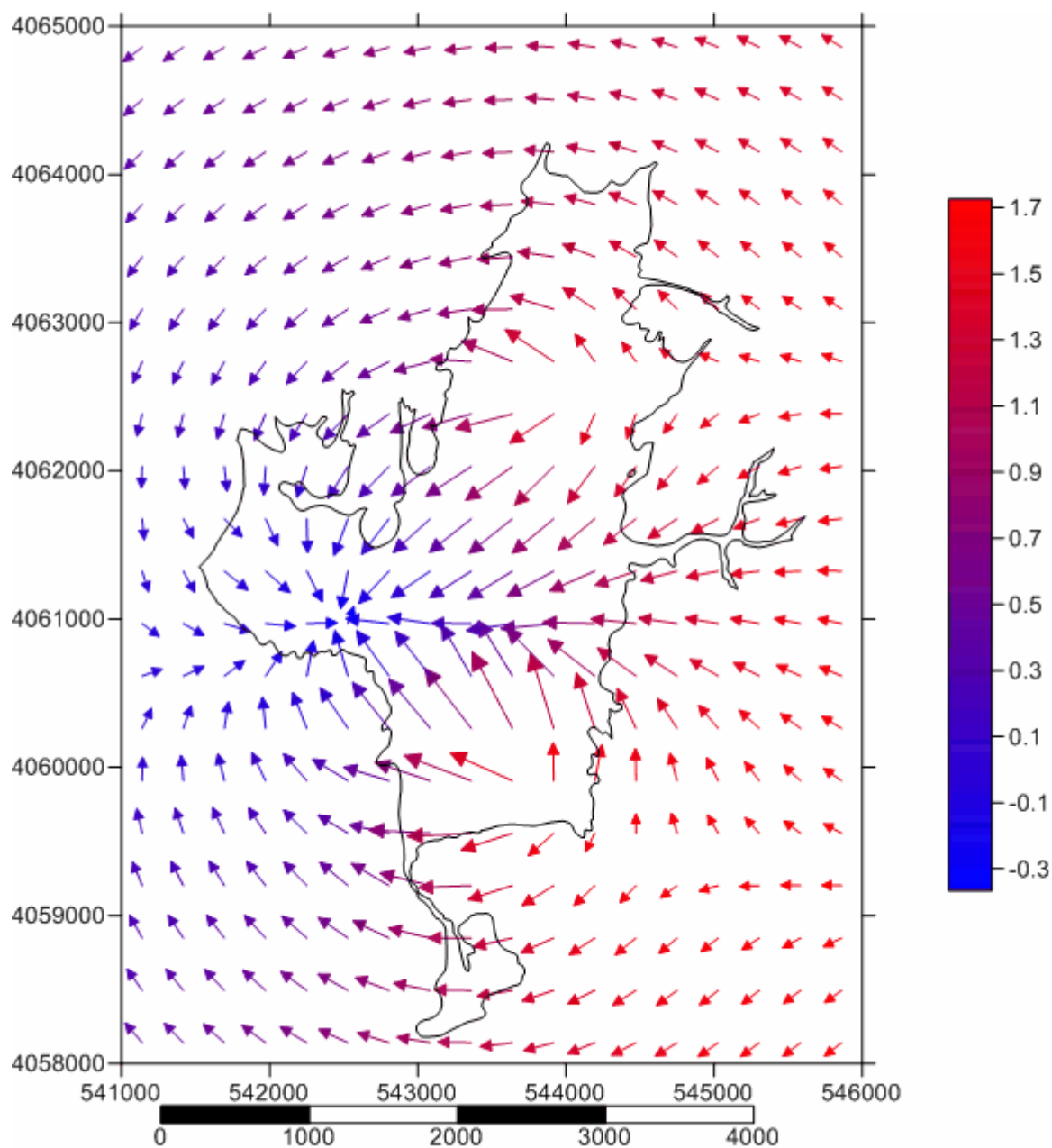
Οι διαφορές μεταξύ των γεωστατιστικών μεθόδων είναι στους μαθηματικούς αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για υπολογιστεί το βάρος κατά τη διάρκεια της παρεμβολής ενός κόμβου στο δίκτυο. Κάθε μέθοδος μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική αναπαράσταση των δεδομένων. Στη συνέχεια έγινε η εφαρμογή της μεθόδου Radial Basis Function στα δεδομένα μας.



Εικόνα 4.6 Ισοσταθμικές καμπύλες υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Radial Basis Function



Εικόνα 4.7 Τρισδιάστατη απεικόνιση υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Radial Basis Function



Εικόνα 4.8 Vector χάρτης υπόγειου υδροφορέα προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας μέθοδος Radial Basis Function

Από τους παραπάνω χάρτες παρατηρούμε πως και εδώ οι αρνητικές στάθμες είναι ελάχιστες και τοποθετούνται κυρίως στο δυτικό και παράκτιο τμήμα του υδροφορέα όπως και στην εφαρμογή της μεθόδου Kriging.

Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών σε προσिता βάθη χρονολογείται ιστορικά από αρχαιότατων χρόνων, κυρίως μέσω φρεάτων. Ειδικά στις μέρες μας, με την ύπαρξη των Η/Υ και εξειδικευμένου προσωπικού (το αντικείμενο των υπόγειων νερών είναι σήμερα ενταγμένο στα εκπαιδευτικά προγράμματα των Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, των Πολιτικών Μηχανικών και των Υδρολόγων όλων σχεδόν των ακαδημαϊκών ιδρυμάτων) έχει ξεπεραστεί η απροθυμία που υπήρχε κάποτε στην εκμετάλλευση των υπόγειων νερών. Αντίθετα μάλιστα, η αλόγιστη άντληση υπόγειων νερών είναι κάτι που χαρακτηρίζει περισσότερο την τάση σήμερα.

Η ανεξέλεγκτη αύξηση της εκμετάλλευσης των υπόγειων αποθεμάτων που παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό στη χώρα μας - και ιδιαίτερα στα νησιά των Κυκλάδων - μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις. Υπάρχει επομένως κάποιο όριο ασφαλείας, το οποίο καλείται ασφαλής απόδοση και ορίζεται ως η ετήσια ποσότητα νερού που μπορεί να απολειφθεί χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα (Todd, 1959).

Ο όρος "ανεπιθύμητα αποτελέσματα" είναι βέβαια ασαφής και πολύ γενικός. Τα παρακάτω σημεία διευκρινίζουν το περιεχόμενο αυτού του όρου:

- Η υπεράντληση υπόγειου νερού προκαλεί καθιζήσεις εδαφών: η ταπείνωση της στάθμης των φρεατίων υδροφορέων και η αφαίρεση σημαντικών ποσοτήτων νερού από περιορισμένους υδροφορείς μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις των εδαφών, δεδομένου ότι το βάρος των υπερκείμενων υλικών εξισορροπείται σε μεγαλύτερο βαθμό από δυνάμεις που αναπτύσσονται στο στερεό ιστό του εδαφικού υλικού, αφού η υδραυλική πίεση μειώνεται.

- Η ταπείνωση της στάθμης των φρεατίων οριζόντων ή της πίεσης των περιορισμένων υδροφορέων αυξάνει το κόστος άντλησης σε γραμμική αναλογία.

- Η ταπείνωση ενός φρεατίου υδροφορέα από έναν κάτοχο γεώτρησης μπορεί να οδηγήσει γειτονικές αβαθέστερες γεωτρήσεις σε αστοχία, δημιουργώντας ουσιαστικά και νομικά προβλήματα.

- Η μείωση της επιφανειακής απορροής των ποταμών μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις απολήψεις επιφανειακού νερού.

- Η μείωση της επιφανειακής ή υπόγειας τροφοδοσίας των λιμνών και των υγροτόπων οδηγεί σε μείωση της στάθμης και της έκτασης τους, πράγμα που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις τυχόν απολήψεις νερού από αυτά τα υδάτινα σώματα.

- Η μείωση της εκροής υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στα παράκτια οικοσυστήματα.

- Η υπεράντληση νερού σε παράκτιες περιοχές προκαλεί εισχώρηση του θαλασσινού νερού: η άντληση υπόγειου νερού σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές μετακινεί τη διεπιφάνεια (ή μεταβατική ζώνη) που σχηματίζεται ανάμεσα στο υπόγειο γλυκό νερό και το νερό της θάλασσας. Το υπόγειο μέτωπο του θαλασσινού νερού προωθείται προς την ξηρά (εισχώρηση θαλασσινού νερού) και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό (μύρωση) ή ακόμη και θαλασσινό νερό. Αυτή η επίπτωση μπορεί να είναι μερικώς μη αντιστρεπτή, αφού η επαναφορά στην προϋπάρχουσα φυσική κατάσταση μπορεί να διαρκέσει πάρα πολλά χρόνια.

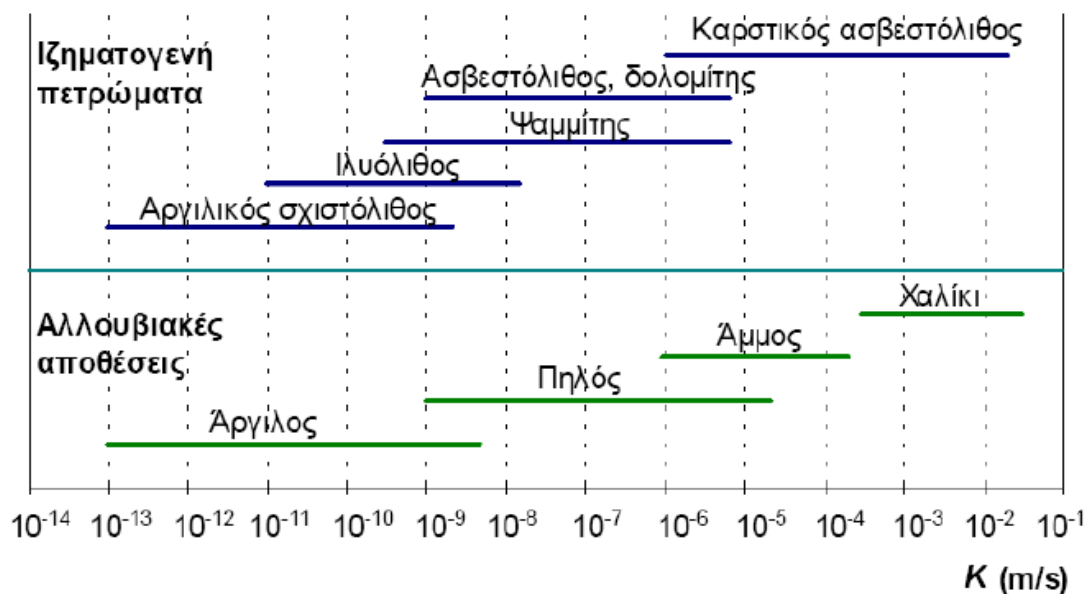
Πολλές περιοχές της Ελλάδας αλλά και της υδρογείου έχουν υποστεί τις παραπάνω συνέπειες από την κακή εκμετάλλευση των υπόγειων νερών. Ωστόσο οι παραπάνω υδρολογικές επιπτώσεις και οι οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές και νομικές συνέπειές τους δεν είναι τόσο εύκολο να εκτιμηθούν σε μια "εφάπαξ" μελέτη, εξαιτίας της εμφανούς πολυπλοκότητας του όλου θέματος. Έτσι, η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών απαιτεί συνεχή επιστημονική και τεχνική παρακολούθηση και διαρκή επανεκτίμηση των όρων, συνθηκών και έργων εκμετάλλευσης. Άλλωστε και το ίδιο το μέγεθος της ασφαλούς απόδοσης δεν μπορεί να είναι εξ αρχής γνωστό, αλλά η εκτίμησή του διαρκώς βελτιώνεται, παράλληλα με την αξιοποίηση των υπόγειων νερών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

4.7 Υπολογισμός Υδραυλικής Αγωγιμότητας

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) είναι η παράμετρος του πορώδους μέσου που αποτελεί το μέτρο της ικανότητας του νερού να μετακινείται μέσω των διάκενων του πορώδους μέσου. Πρόκειται δηλαδή για μία παράμετρο που χαρακτηρίζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου. Ο συντελεστής K έχει διαστάσεις ταχύτητας $[L/T]$. Στο Σχήμα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για το νερό που κινείται σε διάφορα γεωλογικά μέσα. Αξίζει να επισημανθεί το κατά πολλές τάξεις μεγέθους εύρος διακύμανσης της τιμής του K στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς.

Σε ανισότροπους υδροφορείς η περιγραφή της υδραυλικής αγωγιμότητας απαιτεί τουλάχιστον τρεις παραμέτρους, τις υδραυλικές αγωγιμότητες στις τρεις κύριες διευθύνσεις. Στους ετερογενείς υδροφορείς που αποτελούν τον κανόνα, η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει από θέση σε θέση.

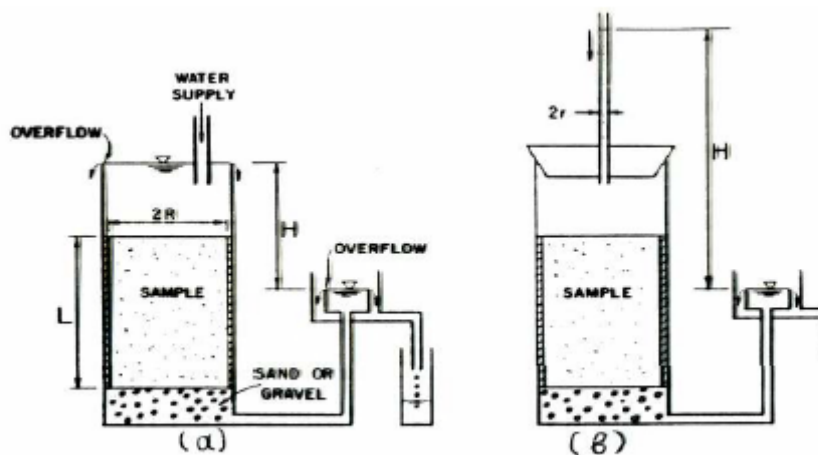
Ωστόσο, πολύ συχνά χρησιμοποιείται η ιδιότητα της ομοιογένειας ως μία απλουστευτική προσέγγιση, η οποία γενικά είναι επαρκής για μία συγκεκριμένη, κατά περίπτωση χωρική κλίμακα.



Σχήμα 4.1 Διαστήματα μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα γεωλογικά μέσα, με βάση στοιχεία των Domenico and Swartz, 1990 (Πηγή: Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, 1999)

Σε περίπτωση οριζόντιας μονοδιάστατης ή διδιάστατης ροής σε ένα ομογενές και ισότροπο στρώμα με δεδομένο πάχος b , χρησιμοποιείται πολύ συχνά η παράμετρος της μεταφορικότητας (T), η οποία προσδιορίζει την ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει νερό και ορίζεται από τη σχέση $T = K \cdot b$. Η μεταφορικότητα έχει διαστάσεις $[L^2/T]$ (Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, 1999)

Η παράμετρος υδραυλική αγωγιμότητα είναι πολύ κρίσιμη και ταυτόχρονα πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω του ότι μεταβάλλεται εύκολα. Για πιο ακριβή αποτελέσματα ο προσδιορισμός της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται με εργαστηριακές μεθόδους.



Σχήμα 4.2 Διαπερατότητα σταθερού (α) και μεταβλητού (β) υδραυλικού φορτίου

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests), αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του K και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάρκειας, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τις δοκιμές αυτές, είτε εισάγεται μέσα στη δειγματοληπτική γεώτρηση ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από δεδομένη πίεση, είτε η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στη πρώτη περίπτωση πρόκειται για δοκιμές σταθερού φορτίου (Constanthead test), ενώ στη δεύτερη για δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test).

Γενικά υπάρχουν οι εξής κατηγορίες δοκιμών:

- Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου για αδρόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LUGEON (για βραχώδεις σχηματισμούς)

Βάσει βιβλιογραφίας η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας χαρακτηρίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Υδραυλική Αγωγιμότητα K (m/sec)	Χαρακτηρισμός
$10^{-3} \leq K$	ΥΨΗΛΗ
$10^{-5} \leq K < 10^{-3}$	ΜΕΤΡΙΑ
$10^{-7} \leq K < 10^{-5}$	ΧΑΜΗΛΗ
$10^{-9} \leq K < 10^{-7}$	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ
$K < 10^{-9}$	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

**Πίνακας 4.2 Χαρακτηρισμός τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας
(Terzaghi & Peck-1967)**

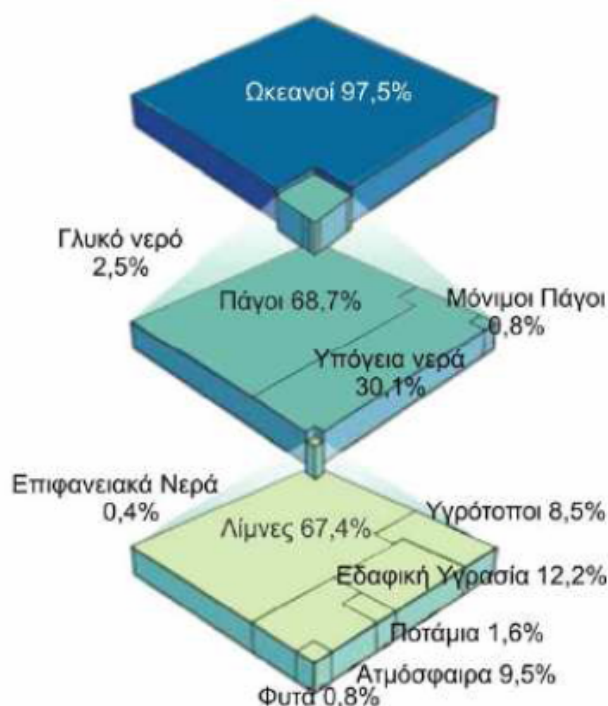
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

5.1 Η σπουδαιότητα των υδατικών πόρων (επιφανειακοί και υπόγειοι)

Το νερό είναι ένα από τα μεγαλύτερα αγαθά που προσφέρει η φύση και είναι απαραίτητο στοιχείο ζωής στον άνθρωπο, τα ζώα και τα φυτά. Οι χρήσεις του είναι πολλαπλές, μερικές απ'τις οποίες είναι : ύδρευση πόλεων και γενικά οικισμών, άρδευση καλλιεργούμενων εδαφών, χρήση στη βιομηχανία. Στη φύση το νερό συναντάται ως επιφανειακό και υπόγειο. Επιφανειακό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ υπόγειο νερό είναι αυτό που κινείται και αποθηκεύεται μέσα στο έδαφος και ειδικότερα στους πόρους των εδαφών, που για το λόγο αυτό λέγονται υδροφορείς.

Παρά το γεγονός ότι το νερό εντοπίζεται άφθονο στη γη ($1405 \times 10^{15} \text{ m}^3$) μόλις το 2,5% αντιστοιχεί σε γλυκό νερό, καθώς το υπόλοιπο 97,5% αναλογεί σε ωκεάνιες – θαλάσσιες μάζες και στοιχειοθετεί το αλμυρό νερό, το οποίο και χαρακτηρίζεται ακατάλληλο για οποιαδήποτε χρήση (οικιακή, αγροτική, βιομηχανική). Το ισχνό αυτό ποσοστό του γλυκού νερού δεν είναι διαθέσιμο όλο στον άνθρωπο, εφόσον το μεγαλύτερο μέρος του υφίσταται υπό μορφή πάγου (ποσοστό 1,9% του συνόλου). Επομένως, αφαιρώντας και ένα πολύ μικρό ποσοστό νερού που υπάρχει με μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα, καταλήγει κανείς σε ένα τελικό ποσό $8,2 \times 10^{15} \text{ m}^3$, περίπου 0,6% του συνόλου, που αποτελεί τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση (Λατινόπουλος, 1998).

Αν, τώρα, αναλογιστεί κανείς το γεγονός ότι το 98% της ποσότητας αυτής ($8 \times 10^{15} \text{ m}^3$) συνθέτει το υπόγειο νερό, καθίσταται άμεσα εμφανής ο κυρίαρχος ρόλος των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων στη διασφάλιση της ζωής και την οικονομική ανάπτυξη. Κατά τρόπο ανάλογο ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τόσο η σωστή διαχείριση τους όσο και η αποτελεσματική προστασία τους έναντι διαφόρων μορφής υποβάθμισης τους (ποσοτικής και ποιοτικής). Παρόλα αυτά, άξιο αναφοράς θεωρείται το γεγονός ότι η μισή ποσότητα των αποθεμάτων αυτών βρίσκεται αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης ($> 800 \text{ m}$), όπου η περιεκτικότητα τους σε άλατα εμφανίζεται αρκετά υψηλή και η απόληψη τους σχεδόν πάντα υπερβολικά δαπανηρή (Θεοδοσίου, 1994). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται παραστατικά οι παραπάνω προσεγγιστικές συσχετίσεις.



Σχήμα 5.1 Κατανομή του νερού σε παγκόσμιο επίπεδο (Shiklomanov & Rodda, 2003)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα επιπλέον στοιχεία που αναφέρονται στην καλυπτόμενη επιφάνεια και τον καταλαμβανόμενο όγκο των διαφόρων μορφών του νερού.

Μορφή νερού	Επιφάνεια (10^6 km^2)	Όγκος (10^6 km^3)	Όγκος (%)
Ωκεανοί και θάλασσες	361	1.370	97,5
Υπόγεια νερά	130	8	0,59
Παγόβουνα και παγετώνες	17,8	27	1,9
Λίμνες	1,55	0,13	<0,01
Εδαφική υγρασία	130	0,07	<0,01
Ατμοσφαιρικοί υδρατμοί	504	0,01	<0,01
Έλη	<0,1	<0,01	<0,01
Ποτάμια	<0,1	<0,01	<0,01

Πίνακας 5.1 Το εκτιμώμενο υδατικό ισοζύγιο σε παγκόσμιο επίπεδο (UNESCO, 1999)

Ενώ φαίνεται από τους παραπάνω ορισμούς σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, στην πραγματικότητα υπάρχει επικοινωνία μεταξύ τους. Ως παραδείγματα μπορούν να αναφερθούν τα εξής :

- Η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ λίμνης ή ποταμού με υποκείμενο υδροφορέα, που έχει σαν συνέπεια ροή από ή προς τον υδροφορέα. Με ανθρώπινες επεμβάσεις μπορεί να ελεγχθεί και να αξιοποιηθεί η ροή αυτή για διάφορους σκοπούς.
- Τα νερά των πηγών, τα οποία αναβλύζουν από το έδαφος αλλά κατόπιν ρέουν επιφανειακά. Οποιαδήποτε μεταβολή στη στάθμη των υπόγειων νερών επηρεάζει άμεσα και την παροχή των πηγών.

Τα υπόγεια νερά έχουν ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από τα επιφανειακά νερά :

α. Κατανομή στο χώρο : Τα επιφανειακά νερά εμφανίζονται σημειακά (πηγές -λίμνες) ή ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία (ποταμοί). Επομένως η αξιοποίησή τους απαιτεί υδραυλικά έργα μεγάλου κόστους (π.χ. φράγματα), η κατασκευή των οποίων συνήθως είναι χρονοβόρα και μεγάλου κόστους. Σ'αυτά πρέπει να προστεθεί και το γεγονός ότι με την κατασκευή υδραυλικών έργων η δυνατότητα χρήσης του νερού περιορίζεται μόνο σε συγκεκριμένα τμήματα των υδάτινων δρόμων. Τα υπόγεια νερά απ'την άλλη μεριά καταλαμβάνουν τεράστιες εκτάσεις, γεγονός που τα κάνει πιο εύκολα διαθέσιμα προς χρήση (αρκεί μια σειρά γεωτρήσεων και απευθείας άντληση απ'τον υπόγειο υδροφορέα, κάτι που γίνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα).

β. Μεταβολές στο χρόνο: Στα επιφανειακά νερά οι μεταβολές είναι πολύ έντονες και άρα η ρύθμιση τους απαιτεί υψηλού κόστους υδραυλικά έργα. Αντίθετα, οι εποχιακές μεταβολές ελάχιστα επηρεάζουν τις στάθμες των υπόγειων νερών σε σύγκριση πάντα με το κορεσμένο σε νερό πάχος του υδροφορέα. Έτσι, η ρύθμιση των υπόγειων νερών γίνεται χωρίς ιδιαίτερο κόστος.

γ. Κόστος εγκαταστάσεων και λειτουργίας : Τα έργα συλλογής και εκμετάλλευσης επιφανειακών νερών έχουν τεράστιο κόστος κατασκευής (φράγματα, ταμιευτήρες, αγωγοί μεταφοράς κλπ.), ενώ το κόστος λειτουργίας τους είναι συνήθως μικρό. Αντίθετα, το κόστος κατασκευής εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης υπόγειων νερών (γεωτρήσεις, αντλιοστάσια κλπ.) είναι πολύ χαμηλό, ενώ το κόστος της λειτουργίας και συντήρησής τους είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα.

δ. Ζήτηση και εκμετάλλευση: Η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών γίνεται συνήθως μέσω φρεάτων, οπότε ανάλογα με τη ζήτηση, η αξιοποίησή τους μπορεί να γίνει κλιμακωτά. Στα έργα διαχείρισης επιφανειακών νερών όμως, λαμβάνονται υπόψη οι τελικές απαιτήσεις, οπότε δε μπορεί να προβεί κανείς σε κλιμακωτή κατασκευή και αξιοποίηση.

ε. Ποιότητα νερού : Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό θέμα στην εκμετάλλευση και διαχείριση υδατικών πόρων. Γενικά, τα υπόγεια νερά είναι λιγότερο εκτεθειμένα σε ρύπανση ή μόλυνση σε σχέση με τα επιφανειακά. Ωστόσο, η ρύπανση ή μόλυνση υπόγειων νερών οδηγεί συχνά σε σχεδόν μη αντιστρεπτή κατάσταση. Δηλαδή ο καθαρισμός των υπόγειων νερών είναι συνήθως δυσχερές. Τα υπόγεια νερά πρέπει να θεωρούνται ένας από τους σημαντικότερους εθνικούς πόρους και να διεκδικείται γι'αυτά η απόλυτη προστασία. Η απειλή της ποιοτικής υποβάθμισης των νερών και της ποσοτικής μείωσής τους αποτελεί ένα από τα προβλήματα που όλοι αντιλαμβάνονται εύκολα και αυτό που χρειάζεται να συνειδητοποιήσουν είναι : το μέγεθός του, το επείγον στη μεθόδευση για τη λύση του και οι τρόποι και παρεμβάσεις που θα οδηγήσουν σ'αυτή. Η υποβάθμιση της φυσικής ποιότητας των υπόγειων νερών οφείλεται στο μεγαλύτερο μέρος σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Σε συγκεκριμένες μόνο περιπτώσεις αποδίδεται σε φυσικά αίτια, δηλαδή στην επίδραση των πετρωμάτων με τα οποία το νερό έρχεται σε επαφή κατά την υπόγεια κίνησή του. Γίνεται λοιπόν φανερό το πόσο σημαντικό είναι το θέμα της προστασίας των υπόγειων νερών, και πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα από όλους τους αρμόδιους φορείς όσον αφορά στο συγκεκριμένο ζήτημα.

στ. Καθίζηση εδαφών : Η άντληση νερού από έναν υδροφόρα όπου το υπόγειο νερό βρίσκεται σε πίεση αυξάνει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων. Έτσι, όταν στον υδροφόρα υπάρχουν αργιλλικά ή ιλυώδη στρώματα, η συμπίεσή τους γίνεται αισθητά μεγάλη και πολλές φορές προκαλεί καθίζηση του συγκεκριμένου εδάφους. Όταν δημιουργούνται προβλήματα π.χ. στην ασφάλεια υπερκείμενων κατασκευών, τότε πρέπει να διακόπτονται τελείως οι αντλήσεις.

ζ. Νομικό πλαίσιο : Όπως για τα επιφανειακά, έτσι και για τα υπόγεια νερά είναι αναγκαία η διαμόρφωση ειδικού νομοθετικού πλαισίου, με βάση το οποίο θα καθορίζεται η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών. Πρέπει να δοθεί έμφαση στο

ισοζύγιο των υπόγειων νερών και στην απαγόρευση άντλησης αυτών πάνω από κάποιο συγκεκριμένο όριο. Ένα άλλο σημείο που πρέπει να δοθεί έμφαση σε επίπεδο νομοθεσίας είναι η προστασία των υπόγειων νερών από ρύπανση - μόλυνση. Η ρύπανση σε έναν υπόγειο υδροφόρα μπορεί να εξαπλωθεί πολύ γρήγορα (ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υδροφόρα αλλά και του ρυπαντή), οπότε πρέπει να θεσπιστούν νόμοι που να απαγορεύουν τη ρύπανση-μόλυνση υπογείων νερών από οποιονδήποτε. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω τόσο ο αγγλικός, όσο και ο αμερικανικός νόμος που θεσπίστηκαν για την εκμετάλλευση και προστασία των υπόγειων νερών :

Αγγλικός νόμος : Βασίζεται στο «απόλυτο δίκαιο» στο νερό που βρίσκεται κάτω από την ιδιοκτησία ενός μεμονωμένου κατόχου γής, κατ'αναλογία με το νόμο περί ορυχείων.

Αμερικανικός νόμος : Αποτελεί εξέλιξη του αγγλικού νόμου και είναι ο κανόνας της «λογικής χρήσης». Αν και αποτελεί ορθότερη αντιμετώπιση, σημαντικά προβλήματα έχουν ανακύψει από τη συνδυασμένη χρήση, π.χ. φρέαρ τροφοδοτούμενο από έναν ποταμό.

Εκτός από το να αποτελεί μια πηγή παροχής νερού, ένας υδροφόρας εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς. Οι πολλαπλές λειτουργίες ενός υδροφόρα είναι οι εξής :

1. Πηγή παροχής νερού: Είναι η πιο βασική λειτουργία. Τα υπόγεια νερά μπορούν να θεωρηθούν ανανεώσιμοι πόροι, λόγω της επαναπλήρωσης των αποθεμάτων με τις κατακρημνίσεις. Η επαναπλήρωση μπορεί να γίνει και από γειτονικά επιφανειακά νερά ποταμών ή λιμνών.
2. Δεξαμενή αποθήκευσης: Οι φρεάτιοι υδροφορείς, λόγω της μεγάλης τους έκτασης και των τεράστιων όγκων τους, μπορούν να αποθηκεύσουν πολύ μεγάλες ποσότητες νερού. Η αποθηκευτική ικανότητα των υδροφορέων αυξάνεται ακόμα περισσότερο με την τεχνική του τεχνητού εμπλουτισμού.
3. Ο υδροφόρας ως αγωγός μεταφοράς: Η λειτουργία αυτή είναι δυνατή μόνο με την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα αφού προϋποθέτει τον έλεγχο της κίνησης του νερού με μεταβολή των υδραυλικών κλίσεων στον υδροφόρα. (π.χ. εισαγωγή νερού με φρέατα φόρτισης).
4. Ο υδροφόρας ως φίλτρο καθαρισμού : Με διάφορες τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού, ακάθαρτα επιφανειακά νερά μπορούν να διηθηθούν στο έδαφος για μερικό ή πλήρη καθαρισμό τους. Το κοινό στοιχείο κάθε χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας είναι ότι χρησιμοποιούνται οι σχετικές

ιδιότητες καθαρισμού που έχουν οι υδροφορείς και που οφείλονται τόσο στη στερεά φάση (προσρόφηση κλπ.) όσο και στις πολύ μικρές ταχύτητες ροής των μολυσμένων νερών.

5. Έλεγχος ροής υδατορευμάτων: Η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο στα ποτάμια όσο και στις πηγές, με τη ρύθμιση της στάθμης των υπόγειων νερών στους υδροφορείς που επικοινωνούν υδραυλικά μαζί τους.

5.2 Υπόγεια νερά και υδροφορείς

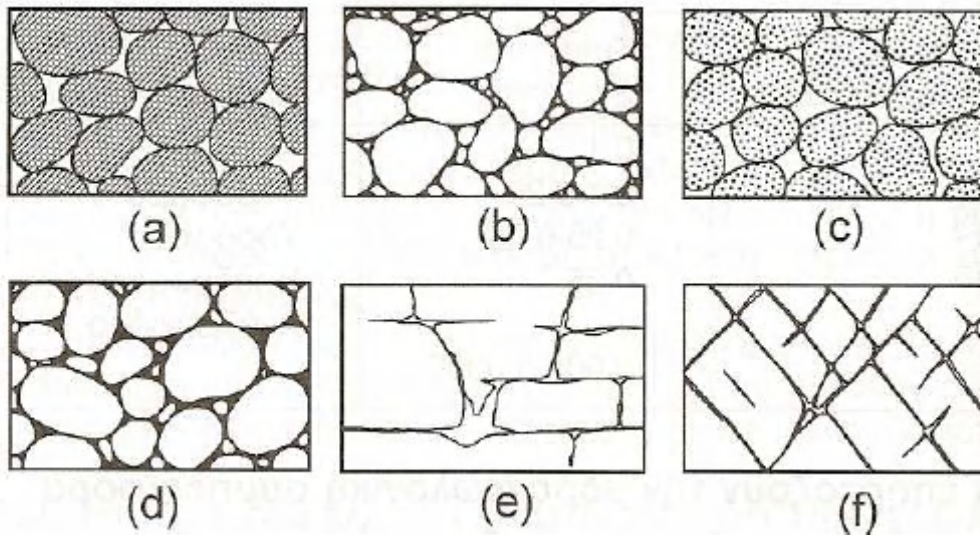
Τα υπόγεια νερά αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό γλυκού νερού που υφίσταται στον πλανήτη. Το 97,2% περίπου της συνολικής ποσότητας νερού του πλανήτη είναι αλμυρό νερό, δηλαδή νερό ακατάλληλο για χρήσεις όπως οικιακή, αγροτική και βιομηχανική. Το 2,15% περίπου της συνολικής ποσότητας αποτελούν τα χιόνια και οι πάγοι και αφαιρώντας ένα πολύ μικρό ποσοστό που αποτελούν οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα, καταλήγει κανείς σε ένα ποσοστό γύρω στο 0,6% της συνολικής ποσότητας νερών που αποτελούν τον εκμεταλλεύσιμο πόρο σε υγρή κατάσταση. Δηλαδή τα επιφανειακά και υπόγεια νερά που είναι κατάλληλα προς διάφορες χρήσεις. Απ'αυτό το σύνολο εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων το 98% αφορά στα υπόγεια νερά. Παραπάνω από τη μισή ποσότητα όμως των υπογείων νερών είναι αποθηκευμένη σε πολύ μεγάλα βάθη κάτω από την επιφάνεια της γής (της τάξης των 800m κάτω από την επιφάνεια της γής), όπου η ποσότητα αλάτων είναι αυξημένη αλλά και η εκμετάλλευσή τους είναι πολύ δύσκολη, ή, αν γίνεται, εξαιρετικά δαπανηρή. Σε αυτά προσθέτουμε και την υφιστάμενη κατάσταση της χωροχρονικής ανομοιογένειας όσον αφορά στους υδατικούς πόρους. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το κατάλληλο νερό για εκμετάλλευση αποτελεί πολύτιμο αγαθό και πρέπει να τυγχάνει ιδιαίτερης επιμέλειας.

Τα υπόγεια νερά αποτελούν τμήμα μιας τεράστιας ποσότητας νερού σε διάφορες καταστάσεις, που βρίσκεται σε διαρκή κυκλοφορία, γνωστή ως υδρολογικός κύκλος. Ένας σημαντικός κρίκος της αλυσίδας που λέγεται υδρολογικός κύκλος, είναι τα υπόγεια νερά. Η κατακόρυφη διήθηση επιφανειακών νερών από την επιφάνεια του εδάφους προς τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα, η κίνηση λόγω βαρύτητας του υπόγειου νερού στην κατεύθυνση των φυσικών κλίσεων και η έξοδος του νερού και πάλι στην επιφάνεια του εδάφους αποτελούν συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου.

Η ροή του νερού στους υπόγειους υδροφορείς αναφέρεται συνήθως ως «ροή σε πορώδη μέσα», εφόσον η συγκεκριμένη ορολογία αποδίδεται σε όλα τα εδάφη και τα πετρώματα που απαρτίζονται από ένα στερεό σκελετό με τη μορφή συνάθροισης στερεών κόκκων, οι οποίοι διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα, δηλαδή πόρους ή ρωγμές. Κατά τη μελέτη της κίνησης του υπόγειου νερού, ειδικά η περίπτωση των γεωλογικών σχηματισμών, όπου εντοπίζονται ρηγματώσεις σημαντικών διαστάσεων, αντιμετωπίζεται ως ιδιαίτερη κατηγορία φαινομένου, η οποία και χαρακτηρίζεται ως «ροή σε ρηγματωμένα μέσα». Από τη διάταξη, λοιπόν, του στερεού σκελετού και των διακένων εξαρτάται η ικανότητα του μέσου να μεταφέρει νερό (Λατινόπουλος, 2008).

Τυπικές περιπτώσεις διατάξεων περιγράφονται στο σχήμα, όπου για την κάθε μία ισχύουν τα εξής χαρακτηριστικά γνωρίσματα: (α) αποθέσεις με ομοιόμορφη τοποθέτηση

των κόκκων και μεγάλο όγκο διακένων, (β) χαμηλής ποιότητας αποθέσεις με μικρά ποσοστά διακένων, (γ) αποθέσεις με ομοιόμορφη τοποθέτηση των κόκκων που οι ίδιοι είναι πορώδεις και μεγάλο όγκο διακένων, (δ) αποθέσεις με ομοιόμορφη τοποθέτηση των κόκκων και μικρό όγκο διακένων λόγω της παράλληλης εναπόθεσης οργανικής ύλης που καλύπτει τα κενά, (ε) πέτρωμα με σχισμές λόγω διάλυσης, (στ) ρηγματωμένο πέτρωμα λόγω θραύσης.



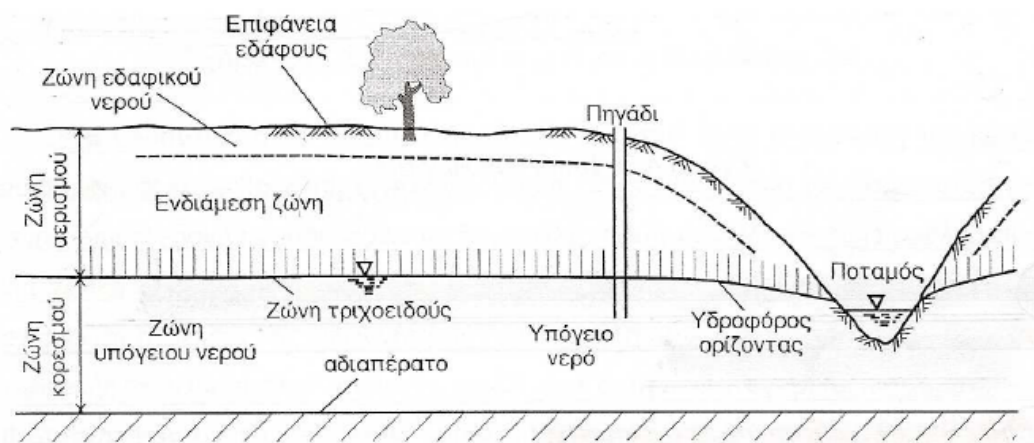
Σχήμα 5.2 Διάφοροι τύποι διάταξης κόκκων και διακένων (Meinzer, 1923)

Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν νερό. Έτσι σχηματίζονται μέσα σ'αυτούς υπόγειες δεξαμενές, επιτρέποντας όμως και την κίνηση του νερού. Ανάλογα με το αν ευνοείται η κίνηση του νερού στους υπόγειους υδροφορείς μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες :

- Διαπερατοί: Γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν την κίνηση του νερού (π.χ. αλλουβιακές αποθέσεις, άμμος, χαλίκια)
- Αδιαπέρατοι: Γεωλογικοί σχηματισμοί που παρόλο ορισμένες φορές έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης νερού, δεν έχουν όμως την ικανότητα μεταφοράς του (π.χ. άργιλος)
- Ημιπερατοί: Ενδιάμεση κατηγορία γεωλογικών σχηματισμών που επιτρέπουν σε κάποιο βαθμό την κίνηση νερού σ'αυτούς, η οποία όμως γίνεται με πολύ μικρές ταχύτητες (π.χ. φακοί αργίλου σε εναλλαγή με αμμώδη εδάφη).

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί (εδάφη - πετρώματα), μέσα στα οποία αποθηκεύεται και κινείται το νερό μπορούν να θεωρηθούν πορώδη μέσα. Διακρίνονται κατακόρυφα σε διάφορες οριζόντιες ζώνες, ανάλογα με το ποσοστό των πόρων του εδάφους που πληρούνται με νερό. Ουσιαστικό κριτήριο για την ταξινόμηση των διαφόρων μορφών υδροφορέων σε κύριες κατηγορίες στοιχειοθετεί η θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος. Θεωρώντας μια τυχαία κατακόρυφη τομή του εδάφους, όπως αυτή που καταδεικνύεται στο σχήμα, διακρίνονται δύο ζώνες στις οποίες διαφοροποιούνται τόσο οι διάφορες φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που αναπτύσσονται όσο και οι φυσικοί νόμοι που προδιαγράφουν την κίνηση του νερού (Αντωνόπουλος, 1999, Καλλέργης, 1999, Λατινόπουλος, 2008): Συγκεκριμένα:

- Ζώνη κορεσμού, στην οποία όλα τα διάκενα είναι γεμάτα με νερό κάτω από συνθήκες υδροστατικής πίεσης (μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής εξαιτίας του βάρους του υπερκείμενου νερού). Η ροή στη ζώνη κορεσμού ή κορεσμένη ζώνη (ζώνη υπόγειου νερού), χαρακτηρίζεται ως μονοφασική. Όσον αφορά την κίνηση του νερού, αυτή εκπηγάει από τους νόμους που διέπουν την υπόγεια υδραυλική.
- Ζώνη αερισμού, υπερκείμενη της ζώνης κορεσμού, στην οποία οι εδαφικοί πόροι περιέχουν και αέρια, κυρίως αέρα και υδρατμούς και νερό. Η ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη, η οποία αποτελείται από διάκενα που κατέχονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα, δηλαδή επικρατούν συνθήκες διφασικής ροής, ενώ υποδιαιρείται σε τρεις επιμέρους υποζώνες: την υποζώνη του εδαφικού νερού, την ενδιάμεση ζώνη και την τριχοειδή υποζώνη. Στην ακόρεστη ζώνη το νερό συγκρατείται εξαιτίας των δυνάμεων που αναπτύσσονται από τα στερεά συστατικά του εδάφους, ενώ η πίεση του είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Επιπλέον, η κατάσταση και η δυναμική του νερού εξαρτώνται από τη διήθηση του νερού της βροχής και της άρδευσης, από την εξατμισοδιαπνοή που συμβαίνει στη ζώνη του ριζοστρώματος και από τις επικρατούσες υδροδυναμικές συνθήκες. Εν τέλει, η κίνηση του νερού στη ζώνη αυτή επηρεάζεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις και τις δυνάμεις βαρύτητας.



Σχήμα 5.3 Η κατανομή του υπόγειου νερού κατά βάθος (Λατινόπουλος, 2008)

Θεωρώντας το έδαφος ομογενές η κίνηση του νερού γίνεται ως εξής :

Επιφανειακό νερό π.χ. από βροχοπτώσεις ή αρδεύσεις διηθείται από την επιφάνεια του εδάφους και κινείται κυρίως εξαιτίας της βαρύτητας προς τα κάτω. Βρίσκοντας ένα αδιαπέρατο πέτρωμα σε κάποιο βάθος συσσωρεύεται γεμίζοντας όλα τα διάκενα του γεωλογικού σχηματισμού μέχρι μια ανώτατη επιφάνεια που αποτελεί το πάνω όριο της ζώνης κορεσμού και που ονομάζεται ελεύθερη επιφάνεια ή υδροφόρος ορίζοντας. Στην πραγματικότητα η έννοια της ελεύθερης επιφάνειας όπως ορίζεται, δηλαδή ότι πάνω απ'αυτή δεν υπάρχει νερό στα διάκενα του εδάφους δεν υφίσταται, παρα μόνο σαν ορισμός, γιατί στην ζώνη αερισμού υπάρχει πάντα νερό που όμως δεν καλύπτει όλο τον όγκο των διακενων. Ο ορισμός της ιδεατής αυτής ελεύθερης επιφάνειας συμπίπτει με το σύνολο των σημείων εκείνων όπου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική και που για ευκολία θεωρείται σαν πίεση αναφοράς ($p = 0$). Η θέση αυτής της επιφάνειας θα μπορούσε να βρεθεί αν σε διάφορα σημεία ανοίγονταν πηγάδια που καταλήγαν στο υδροφόρο στρώμα.

Η ζώνη αερισμού καλύπτει το χώρο από την ελεύθερη επιφάνεια ως την επιφάνεια του εδάφους και χωρίζεται σε τρεις επιμέρους ζώνες :

- (i) Ζώνη εδαφικού νερού
- (ii) Ενδιάμεση ζώνη ή ζώνη Vadose
- (iii) Ζώνη τριχοειδούς

Η ροή νερού σ'αυτή την ακόρεστη ζώνη (στις τρεις παραπάνω επιμέρους ζώνες) έχει ενδιαφέρον όσον αφορά προβλήματα αρδεύσεων και στραγγίσεων. Σε προβλήματα όμως διαχείρισης υπόγειων υδατικών πόρων, όπου συνήθως το πάχος των υδροφορέων είναι σημαντικό, οι μεταβολές που συμβαίνουν στη ζώνη αερισμού θεωρούνται αμελητέες και προσεγγιστικά σαν υπόγεια νερά σε τέτοια προβλήματα θεωρούνται τα νερά που βρίσκονται και κινούνται στη ζώνη κορεσμού.

Ο μηχανισμός φόρτισης των υπόγειων υδροφορέων έχει να κάνει με την κίνηση των νερών που συσσωρεύονται στο έδαφος και εφόσον τα ανώτερα στρώματά του είναι διαπερατά, το νερό κινείται, κίνηση που όμως εξαρτάται από τρεις παράγοντες : (i) την ικανότητα απορρόφησης νερού απ'το έδαφος, (ii) την ικανότητα κατακόρυφης διήθησης νερού στο έδαφος και (iii) την ικανότητα οριζόντιας κίνησης του νερού στη ζώνη κορεσμού.

Η ικανότητα κατακόρυφης διήθησης του νερού είναι η διηθητικότητα και αφορά στο ρυθμό με τον οποίο το νερό απορροφάται από το έδαφος. Η τιμή της είναι σταθερή για κάθε έδαφος και ίση με τη μέγιστη ροή που μπορεί να απορροφηθεί από το εδαφικό προφίλ όταν στην επιφάνεια το νερό βρίσκεται σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική. Η ικανότητα του εδάφους για κατακόρυφη διήθηση χαρακτηρίζεται από τη διαπερατότητά του.

Ο ρυθμός απορρόφησης νερού από την επιφάνεια του εδάφους εξαρτάται από το χρόνο της διήθησης και μειώνεται με το χρόνο. Η ένταση της φόρτισης (όταν

γίνεται μεγάλη), η απόθεση στο έδαφος αιωρούμενων υλικών, η διόγκωση του εδάφους είναι ορισμένοι παράγοντες που συντελούν στη μείωση του ρυθμού απορρόφησης νερού απ'το έδαφος.

Η ικανότητα οριζόντιας κίνησης του εδάφους εξαρτάται από τη διαπερατότητά του, από το πάχος του υδροφορέα αλλά και από το ισχύον πεδίο ροής.

5.2.1 Υδροφορείς

Γίνεται διάκριση των υπόγειων υδροφορέων με βάση το αν εμφανίζεται ή όχι ελεύθερη επιφάνεια σ'αυτόν. Έτσι :

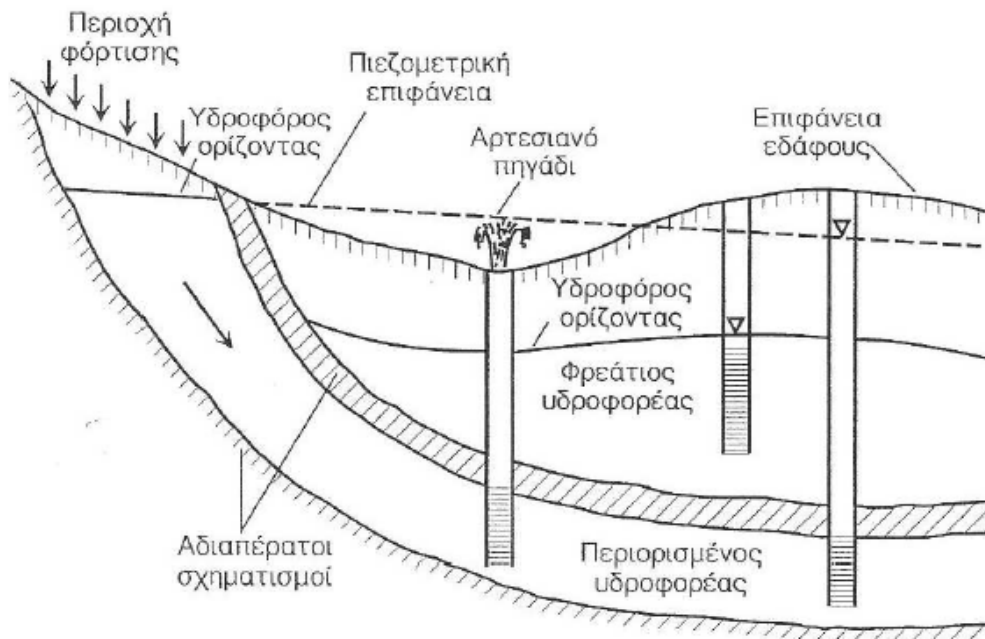
(i) Περιορισμένος ή υπο πίεση υδροφορέας λέγεται ο υδροφορέας που περιορίζεται από πάνω και από κάτω από αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς. Χαρακτηριστικό του υπό πίεση υδροφορέα είναι αν ανοιχτεί ένα πηγάδι μέσα σ'αυτόν τότε η στάθμη του νερού θα ανέβει ψηλότερα από το αδιαπέρατο στρώμα και ίσως φτάσει ως την επιφάνεια του εδάφους. Αν τοποθετηθεί σωστά ένα φρέαρ παρατήρησης ή πιεζόμετρο, όπως λέγεται, η στάθμη του νερού σ'αυτό θα δείχνει το πιεζομετρικό φορτίο στη συγκεκριμένη θέση. Επομένως, πιεζομετρική επιφάνεια είναι η ιδεατή εκείνη επιφάνεια που θα ορίζονταν από τις στάθμες πιεζομέτρων σε διάφορα σημεία κατά την οριζόντια έκταση του υπόγειου υδροφορέα.

Ένας περιορισμένος υδροφορέας λέγεται αρτεσιανός όταν η στάθμη της πιεζομετρικής επιφάνειάς του βρίσκεται ψηλότερα από τη στάθμη εδάφους. Αν ανοιχτεί φρέαρ σε τέτοιο υδροφορέα, το νερό θα παρουσιάζει ελεύθερη ροή χωρίς να χρειάζεται άντληση.

Περιοχή επανατροφοδότησης περιορισμένου υδροφορέα λέγεται η περιοχή, συνήθως κοντά στα όρια, η οποία παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια και δέχεται τα νερά της βροχής ή υπερκείμενων στρώσεων.

(ii) Φρεάτιοι ή υδροφορείς με ελεύθερη επιφάνεια λέγονται οι υδροφορείς που ενώ το κάτω όριό τους συμπίπτει με αδιαπέρατο σχηματισμό, το πάνω όριό τους είναι η ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι τροφοδοτούνται απευθείας με διηθούμενο από την επιφάνεια νερό εκτός αν περιορίζονται και από πάνω με αδιαπέρατη στρώση, η οποία βέβαια βρίσκεται ψηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

(iii) Ημιπερατοί : Είναι περιπτώσεις υδροφορέων (υπό πίεση ή ελεύθεροι) στους οποίους τα τυχόν αδιαπέρατα στρώματα δεν είναι τελείως αδιαπέρατα αλλά παρόλη τη μεγάλη αντίσταση που προβάλλουν στην κίνηση του νερού, όταν πρόκειται για μεγάλης έκτασης υδροφορείς, η ποσότητα νερού που μπορεί να μπει στον υδροφορέα είναι σημαντική. Σ'αυτή την περίπτωση οι υδροφορείς λέγονται υπό πίεση με διαρροή υδροφορείς ή φρεάτιοι με διαρροή υδροφορείς (ανάλογα αν είναι φρεάτιοι ή υπο πίεση).



Σχήμα 5.4 Σχηματική παράσταση βασικών τύπων υδροφορέων (Λατινόπουλος, 2008)

Εν κατακλείδι, αναφέρεται ότι ένας υδροφορέας αποτελεί ένα σύστημα που μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει και να το διαχειριστεί σαν μία ενότητα προκειμένου να επιτύχει διάφορους στόχους, πέρα από την αξιοποίηση του ως πηγή νερού. Μερικές από τις λειτουργίες που επιτελεί ένας υδροφορέας απαριθμούνται παρακάτω (Λατινόπουλος, 1998):

- Πηγή παροχής νερού
- Δεξαμενή αποθήκευσης
- Αγωγός μεταφοράς
- Φίλτρο καθαρισμού
- Έλεγχος ροών υδατορευμάτων

5.2.2 Υδραυλική θεώρηση υπόγειων ροών

Η κίνηση του υπόγειου νερού γίνεται σε χώρο τριών διαστάσεων. Εξαιτίας όμως της ειδικής γεωμετρίας που συναντάμε στους υπόγειους υδροφορείς είναι δυνατό η κίνηση των υπόγειων νερών με πολύ καλή προσέγγιση να αντιμετωπίζεται σε χώρο δύο διαστάσεων x και y . Το γεγονός ότι στην πραγματικότητα το πάχος των υπόγειων υδροφορέων είναι κατά πολύ μικρότερο από τις οριζόντιες διαστάσεις τους ευνοεί τη θεώρηση του η κίνηση των υπογείων νερών να αντιμετωπίζεται ως δισδιάστατη. Γίνεται η υπόθεση δηλαδή ότι η ροή του νερού γίνεται παντού παράλληλα με το οριζόντιο επίπεδο, αγνοούνται επομένως οι κατακόρυφες συνιστώσες της. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται με ολοκλήρωση των εξισώσεων ροής κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, ως προς το πάχος του υδροφορέα δηλαδή. Τυπική περίπτωση απόλυτης ισχύος της υπόθεσης είναι η ροή σε οριζόντιους περιορισμένους υδροφορείς, ενώ περιπτώσεις σημαντικής απόκλισης από την παραδοχή οριζόντιας ροής εμφανίζονται κυρίως σε τοπικά φαινόμενα, π.χ. σε πηγάδια, πηγές κλπ. Και σ'αυτές τις περιπτώσεις γίνεται η εκτίμηση ότι η παράλειψη της κατακόρυφης συνιστώσας της ροής δεν προκαλεί ουσιαστικά λάθη σε αποστάσεις από τα σημεία αυτά μεγαλύτερες από το διπλάσιο του πάχους του υδροφορέα.

5.2.3 Πορώδες και ειδική απόδοση

Ολικό πορώδες ή πορώδες ενός υδροφορέα είναι το μέγεθος που μετράει τον όγκο των διάκενων ή πόρων που υπάρχουν σε ένα συνολικό όγκο και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών V_n προς το συνολικό όγκο του δείγματος (εδάφους ή πετρώματος) V . Δηλαδή $n = V_n / V$

Ο δείκτης πόρων e μετρά το ποσοστό των διάκενων V_n ως προς το συνολικό όγκο του στερεού υλικού V_s και ορίζεται ως εξής : $e = V_n / V_s$

Επομένως πορώδες και δείκτης πόρων συνδέονται σύμφωνα με τη σχέση :

$$e = n / (1-n)$$

Στον πίνακα δίνονται αντιπροσωπευτικές τιμές (εύρος διακύμανσης) του ενεργού πορώδους (το οποίο εμπεριέχεται και στις σχέσεις υπολογισμού των ζωνών προστασίας) για διάφορους τύπους εδαφών.

Έδαφος	Ενεργό πορώδες
Άργιλος	0 - 0,05
Αμμώδης άργιλος	0,03 - 0,12
Ιλύς	0,03 - 0,19
Λεπτόκοκκη άμμος	0,10 - 0,28
Μεσόκοκκη άμμος	0,15 - 0,32
Χονδροκόκκη άμμος	0,20 - 0,35
Άμμος με χαλίκι	0,20 - 0,35
Λεπτόκοκκα χαλίκια	0,21 - 0,35
Μεσόκοκκα χαλίκια	0,13 - 0,26
Χονδροκόκκα χαλίκια	0,12 - 0,26

Πίνακας 5.2 Τιμές ενεργού πορώδους για διάφορους τύπους εδαφών(www.scisoftware.com)

Η ειδική απόδοση S_y ενός εδάφους ή πετρώματος είναι ο λόγος του όγκου του νερού V_y , που στη φάση του κορεσμού μπορεί να κινηθεί μέσα στα διάκενα του μέσου εξαιτίας των δυνάμεων βαρύτητας, προς το συνολικό όγκο, δηλαδή:

$$S_y = V_y / V$$

Η ειδική απόδοση συνεπώς έχει νόημα ορισμού σε μη περιορισμένους υδροφορείς. Είναι γενικότερη έννοια με ιδιαίτερη σημασία στην ακόρεστη ροή. Για κορεσμένους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες.

Στον Πίνακα παρατίθενται χαρακτηριστικές τιμές του πορώδους και της ειδικής απόδοσης

Γεωλογικό μέσο	Πορώδες			Ειδική απόδοση		
	Ελάχ.	Μεσ.	Μέγ.	Ελάχ.	Μεσ.	Μέγ.
Αλλουβιακές αποθέσεις						
Άργιλος	0,34	0,42	0,57	0,01	0,06	0,18
Πηλός	0,34	0,46	0,51	0,01	0,20	0,39
Λεπτόκοκκη άμμος	0,26	0,43	0,53	0,01	0,33	0,46
Μέση άμμος	0,29	0,39	0,49	0,16	0,32	0,46
Χονδρόκοκκη άμμος	0,31	0,39	0,46	0,18	0,30	0,43
Λεπτόκοκκο χαλίκι	0,25	0,34	0,39	0,13	0,28	0,40
Μέσο χαλίκι	0,24	0,32	0,44	0,17	0,24	0,44
Χονδρόκοκκο χαλίκι	0,24	0,28	0,37	0,13	0,21	0,25
Ιζηματογενή πετρώματα						
Ψαμμίτης	0,14	0,36	0,49	0,02	0,24	0,41
Ιλυόλιθος	0,29	0,35	0,48	0,01	0,12	0,33
Αργιλικός σχιστόλιθος	0,01	0,06	0,10			
Ασβεστόλιθος	0,07	0,30	0,56	0,02	0,14	0,36
Δολομίτης	0,19	0,26	0,33			

Εκρηξιγενή πετρώματα						
Γρανίτης (εξαλλοιωμένος μανδύας)	0,34	0,45	0,57			
Γάβρος (εξαλλοιωμένος μανδύας)	0,42	0,43	0,45			
Βασάλτης	0,03	0,17	0,35			
Ηφαιστειακός τόφος	0,07	0,31	0,55	0,02	0,21	0,47

Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικές τιμές πορώδους και ειδική παόδοσης για διάφορα γεωλογικά μέσα(Πηγή:Δ.Κουτσογιάννης & Θ.Ξανθόπουλος,1999)

Η διαφορά μεταξύ πορώδους και ειδικής απόδοσης αποτελεί την ειδική κατακράτηση S_r και την ποσότητα του υπόγειου νερού V_r που κατακρατείται από το έδαφος λόγω υγροσκοπικότητας και τριχοειδούς φαινομένου.

$$S_r = V_r / V$$

Σε μή συνεκτικά εδάφη οι τιμές του πορώδους και ενεργού πορώδους σχεδόν συμπίπτουν, αφού η ειδική κατακράτηση είναι αμελητέα. Το ίδιο δεν συμβαίνει στα συνεκτικά εδάφη, που παρόλο που η τιμή του πορώδους τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των μη συνεκτικών, οι τιμές του ενεργού πορώδους είναι κατά πολύ μικρότερες. Επομένως, οι υδροφορείς που αποτελούνται από συνεκτικά εδάφη δεν είναι εκμεταλλεύσιμοι ως προς το υδατικό δυναμικό.

5.2.4 Αποθηκευτικότητα

Η αποθηκευτικότητα S , ενός περιορισμένου υδροφορέα ορίζεται ως ο όγκος ΔV του νερού που απομακρύνεται (ή προστίθεται) ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A του υδροφορέα εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης $\Delta\phi$ (ή αύξησης) του πιεζομετρικού φορτίου. Είναι αδιάστατο μέγεθος. Σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$S = \Delta V / A \cdot \Delta\phi$$

Είναι φανερό ότι στους περιορισμένους υδροφορείς η αποθηκευτικότητα εξαρτάται από την συμπιεστικότητα του νερού καθώς και από την ελαστικότητα του στερεού σκελετού του πετρώματος που το περικλείει. Μεγάλη τιμή της αποθηκευτικότητας σημαίνει μεγαλύτερη ικανότητα απόδοσης ή παραλαβής νερού στο συγκεκριμένο όγκο αναφοράς και κατά συνέπεια μεγαλύτερη δυνατότητα εκμετάλλευσης του υδροφορέα.

Στην περίπτωση του φρεάτιου υδροφορέα η αποθηκευτικότητα ορίζεται ως ο όγκος ΔV του νερού που απομακρύνεται ανά μονάδα επιφάνειας φρεάτιου υδροφορέα εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης στάθμης Δh .

$$S = \Delta V / A \cdot \Delta h$$

Η διαφορά του ορισμού της αποθηκευτικότητας στο φρεάτιο και υπό πίεση υδροφορείς δεν βρίσκεται μόνο στο γεγονός ότι στους μεν έχουμε πτώση στάθμης ενώ στους δε πτώση πιεζομετρικού φορτίου. Στον υπό πίεση υδροφορέα η απομάκρυνση του νερού οφείλεται στην συμπιεστικότητα στερεού σκελετού και ρευστού ενώ στο φρεάτιο υδροφορέα μείωση της στάθμης σημαίνει απομάκρυνση ή μεταφορά νερού με βαρύτητα από τον όγκο των διάκενων της συγκεκριμένης έκτασης σε μια άλλη θέση. Η αποθηκευτικότητα λοιπόν στους φρεάτιους υδροφορείς, δεν είναι τίποτα άλλο παρά το ενεργό τους πορώδες, και φυσικά από άποψη μεγέθους είναι πολύ μεγαλύτερη από την αποθηκευτικότητα των ίδιων γεωλογικών σχηματισμών κάτω από συνθήκες ροής υπό πίεση.

5.2.5 Ανομοιογένεια και ανισοτροπία

Για την υδραυλική των υπογείων ροών, η έννοια της ομογένειας ανομογένειας και ισοτροπίας - ανισοτροπίας συνδέονται άμεσα με την υδραυλική αγωγιμότητα K και τη μεταφορικότητα T , βασικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.

Ένα πορώδες μέσο καλείται ομογενές αν η διαπερατότητα είναι ίδια σε όλα τα σημεία του. Διαφορετικά, δηλαδή αν η τιμή της διαπερατότητας μεταβάλλεται στο χώρο, καλείται ανομοιογενές.

Ένα πορώδες μέσο καλείται ισότροπο αν σε κάθε περίπτωση η διαπερατότητα είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση της ροής. Διαφορετικά καλείται ανισότροπο. Η ύπαρξη ανομοιογένειαι ή ανισοτροπίας σε έναν υδροφορέα καθιστά το πρόβλημα ιδιαίτερα σύνθετο. Είναι δυνατή η ύπαρξη βαθμιαίας μεταβολής της τιμής των μεγεθών αυτών ή απότομη αλλαγή τους. Κατα περίπτωση και ανάλογα με την κλίμακα του προβλήματος είναι δυνατή η απλοποίηση του προβλήματος και η θεώρηση ομογενούς, είτε ισότροπου υδροφορέα.

5.3. Νόμος Darcy

5.3.1 Παραδοχή του συνεχούς μέσου

Οι γενικές εξισώσεις κίνησης των ρευστών, δηλαδή οι εξισώσεις Navier-Stokes, δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον στη μικροκλίμακα του διάκενου, γιατί εξαιτίας του πολύπλοκου σχήματος των ορίων, είναι αδύνατη η επίλυση ακόμα και των στοιχειοδέστερων περιπτώσεων ροής. Φαίνεται λοιπόν αναγκαία η αντικατάσταση της πολύπλοκης μορφής της πραγματικής επιφάνειας των διάκενων με μια άλλη συμβατική μορφή, που η αναλυτική εξίσωσή της επιτρέπει την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης στις συνήθεις απλές περιπτώσεις. Οι διάφορες συμβατικές μορφές που αναπτύχθηκαν έχουν μόνο σχετική αξία, γιατί δίνουν μια πρώτη εικόνα των νόμων που διέπουν τις ροές σε πορώδες μέσο. Δεν μπορούν να δώσουν όμως τη διανομή των σημειακών ταχυτήτων στη μικροκλίμακα των διάκενων και επί πλέον οδηγούν σε αποτελέσματα δυσεφάρμοστα, ακόμα και σε απλές περιπτώσεις ροής.

Φαίνεται λοιπόν ότι τα προβλήματα της υπόγειας υδραυλικής πρέπει να εξεταστούν μακροσκοπικά με βάση τα μέσα μεγέθη ροής. Δεν υπολογίζονται δηλαδή οι διανομές των ταχυτήτων, των πιέσεων και των αντιστάσεων μέσα στα διάκενα του πορώδους υλικού, αλλά προσδιορίζονται μόνο οι μέσες ταχύτητες, μέσες πιέσεις και μέσες αντιστάσεις κατά τη ροή. Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται παραδοχή του συνεχούς μέσου.

5.3.2 Νόμος Darcy

Ο Henry Darcy, Γάλλος υδραυλικός μηχανικός, διερεύνησε το 1856 τη ροή μέσα από στρώματα άμμου που χρησιμοποιούνταν για φίλτρα νερού και τελικά διατύπωσε μια σχέση που επρόκειτο να αποτελέσει θεμελιώδη νόμο της υδραυλικής υπόγειων ροών, ο οποίος διατυπώνεται ως εξής :

«Η παροχή της ροής που περνάει από μια διατομή ενός πορώδους μέσου είναι ανάλογη του εμβαδού της διατομής αυτής, ανάλογη της διαφοράς πίεσης μεταξύ δύο θέσεων που ελέγχεται η ροή και αντίστροφα ανάλογη της απόστασης μεταξύ αυτών των δύο θέσεων».

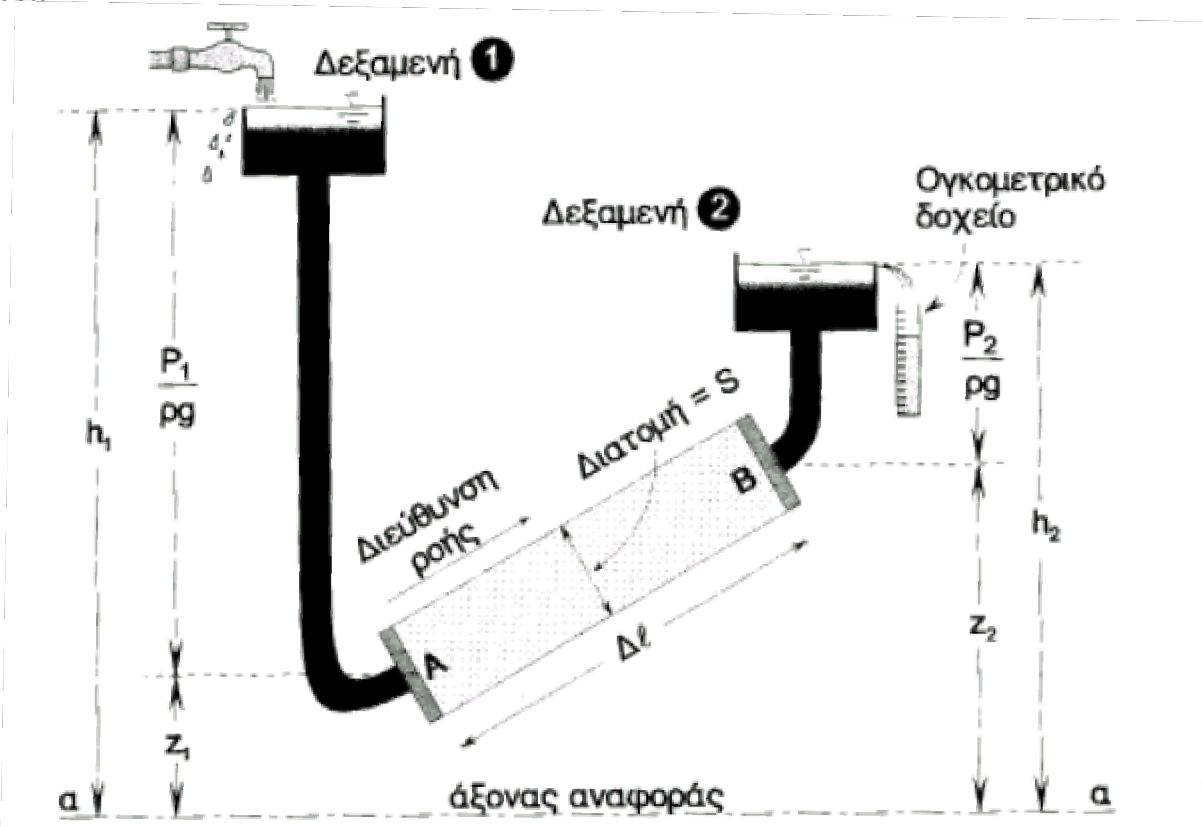
Η μαθηματική διατύπωση αυτού είναι :

$$Q = KA(h_1-h_2) / L$$

Όπου K ο συντελεστής αναλογίας που εκφράζει τη διαπερατότητα του πορώδους μέσου και λέγεται υδραυλική αγωγιμότητα,

A = εμβαδό διατομής,

h_1-h_2 = ύψος απώλειας ενέργειας μεταξύ των δύο θέσεων L = απόσταση μεταξύ των δύο θέσεων



Σχήμα 5.5 Πείραμα Darcy

Η κίνηση του νερού γίνεται από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο πιεζομετρικό φορτίο και όχι από τη μεγαλύτερη προς τη μικρότερη πίεση. Έτσι, καθώς ο λόγος $(h_1-h_2) / L = J$ είναι η υδραυλική κλίση και ορίζοντας την ειδική παροχή ή ταχύτητα Darcy q τον όγκο του ρευστού ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας κάθετης προς τη διεύθυνση της ροής Q/A , ο νόμος Darcy

γράφεται :

$$q = KJ$$

Τόσο η ειδική παροχή όσο και η υδραυλική αγωγιμότητα έχουν διαστάσεις ταχύτητας. Κάνοντας την υπόθεση ότι το πορώδες του εδάφους παραμένει σταθερό, το τμήμα της διατομής A που αποτελείται από νερό θα είναι nA και τελικά η πραγματική υδροδυναμική ταχύτητα ή ταχύτητα ροής θα είναι : $\mathbf{V} = \mathbf{Q} / n\mathbf{A} = \mathbf{q} / n$.

Για τρισδιάστατο πεδίο ροής και ομογενές και ισότροπο μέσο η σχέση Darcy γράφεται ως εξής : $\mathbf{q} = K\mathbf{J} = -K\mathbf{grad}\phi$ $\mathbf{V} = \mathbf{q} / n$.

Όπου \mathbf{V} = το διάνυσμα της μέσης πραγματικής υδροδυναμικής ταχύτητας με συνιστώσες V_x, V_y, V_z , q είναι η ειδική παροχή με συνιστώσες q_x, q_y, q_z κατά τις διευθύνσεις των αξόνων x, y, z και J είναι η υδραυλική κλίση : $J = -grad\phi = -\nabla\phi$.

$$q_x = KJ_x = -K \frac{\partial\phi}{\partial x} = nV_x$$

$$q_y = KJ_y = -K \frac{\partial\phi}{\partial y} = nV_y$$

$$q_z = KJ_z = -K \frac{\partial\phi}{\partial z} = nV_z$$

$$\text{Εάν } K = \text{σταθερό} \Rightarrow \mathbf{q} = -\mathbf{grad}(K\phi) = -\mathbf{grad}\Phi, \quad \Phi = K\phi$$

Εξίσωση 1 Εξίσωση Νόμου Darcy

Από τις τελευταίες σχέσεις αποδεικνύεται ότι σε ομογενές και ισότροπο μέσο υπάρχει μια συνάρτηση δυναμικού Φ της ειδικής παροχής q .

5.3.3 Πεδίο ισχύος Νόμου Darcy

Ο νόμος του Darcy, ως εμπειρικός νόμος, δεν έχει απεριόριστα όρια εφαρμογής. Ισχύει μόνο, όταν ο αριθμός Reynolds στις ροές σε πορώδες υλικό που ορίζεται από τη σχέση : $Re = qd / \nu$, είναι ιδιαίτερα μικρός, της τάξης $1/10$, όπου q = ταχύτητα Darcy, d μια αντιπροσωπευτική διάσταση των κόκκων του εδάφους. Συνήθως παίρνουμε $d = d_{10}$, όπου d_{10} είναι η διάμετρος εκείνη των κόκκων, όπου το 10% σε βάρος του πορώδους υλικού αποτελείται από κόκκους με διάμετρο μικρότερη του d_{10} ενώ το υπόλοιπο 90% αποτελείται από κόκκους μεγαλύτερης διαμέτρου. Η χαρακτηριστική αυτή διάμετρος κόκκου υπολογίζεται από την κοκκομετρική καμπύλη του υλικού.

Ο νόμος του Darcy ισχύει μέχρι την τιμή $Re = 1$. Πολλοί συγγραφείς δίνουν διάφορες άλλες κρίσιμες τιμές μεγαλύτερες της μονάδας και μικρότερες του 10. Πάντως, για τις πρακτικές εφαρμογές, ο νόμος του Darcy δίνει αποτελέσματα με ικανοποιητική προσέγγιση, όταν $Re < 10$. Εξάλλου, στις συνηθισμένες πρακτικές εφαρμογές της Υπόγειας Υδραυλικής, οι παροχές είναι τόσο μικρές, ώστε να μπορεί να εφαρμόζεται πάντα ο νόμος του Darcy. Εξαίρεση αποτελούν οι ροές σε χοντρόκοκκα πορώδη υλικά ή σε ρωγματωμένα ή καρστικά πετρώματα.

5.4 Θεωρία αστρόβιλου πεδίου

Η επίλυση προβλήματος ροής ρευστού σε ομογενές ισότροπο πορώδες μέσο καταλήγει στην επίλυση ροής ιδεατού ρευστού. Μέσω των εξισώσεων Darcy λαμβάνονται έμμεσα υπόψη οι απώλειες ενέργειας και οι τριβές. Το πεδίο των ειδικών παροχών είναι αστρόβιλο. Κλασική μέθοδος επίλυσης ενός αστρόβιλου πεδίου είναι η μέθοδος του δικτύου ροής. Η εξίσωση συνέχειας για μόνιμη ροή ασυμπίεστου ρευστού δίνεται από τη σχέση :

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

όπου u, v, w είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά τους άξονες x, y, z .

Οι εξισώσεις Darcy, όπως αυτές γράφονται για ομογενές και ισότροπο πορώδες μέσο και υγρό σταθερής πυκνότητας είναι :

$$u = qx = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

$$v = qy = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$$

$$w = qz = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

Το δυναμικό της ταχύτητας Darcy Φ σε σχέση με το πιεζομετρικό φορτίο ϕ εκφράζεται ως εξής :

$$\Phi = -K\phi + c = -K\left(\frac{p}{\gamma} + z\right) + c$$

Συνδυασμός των δύο παραπάνω εξισώσεων δίνει την ακόλουθη εξίσωση Laplace ως προς Φ :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \nabla^2 \Phi = 0$$

Η επίλυση του προβλήματος ανάγεται επομένως στην επίλυση εξίσωσης Laplace, για την επίλυση της οποίας υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αναλυτικές ή προσεγγιστικές. Παρά το γεγονός ότι η εξίσωση είναι γραμμική, η πολύπλοκη γεωμετρία των πεδίων ροής και η μη γραμμικότητα κάποιων οριακών συνθηκών, καθιστούν αδύνατες τις ακριβείς ολοκληρώσεις. Οι προσεγγιστικές λύσεις δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Χρήσιμη επίσης είναι και η γραφική επίλυση της εξίσωσης Laplace διά κατασκευής δικτύου ροής, που έχει εφαρμογή σε επίπεδα προβλήματα. Η παραπάνω εξίσωση για διδιάστατη ροή γράφεται :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \nabla^2 \Phi = 0$$

Το δυναμικό Φ είναι μονοσήμαντη συνάρτηση, δηλαδή έχει μια τιμή σε κάθε σημείο του πεδίου ροής. Επομένως η $\Phi(x,y)$ μπορεί να απεικονισθεί γραφικά στο επίπεδο x,y με γραμμές σταθερού Φ . Οι γραμμές εκείνες του επιπέδου $x-y$ για τις οποίες η συνάρτηση δυναμικού Φ έχει σταθερή τιμή ονομάζονται ισοδυναμικές γραμμές. Είναι φανερό ότι κάθε ισοδυναμική γραμμή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, στα οποία το πιεζομετρικό φορτίο έχει μια συγκεκριμένη σταθερή τιμή. Έτσι για ένα περιορισμένο υδροφορέα οι ισοδυναμικές γραμμές στο οριζόντιο επίπεδο παριστάνουν την αντίστοιχη πιεζομετρική επιφάνεια, ενώ για ένα φρεάτιο υδροφορέα την τοπογραφική κατανομή της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου νερού. Οι αριθμητικές τιμές διαδοχικών γραμμών με σταθερό Φ απέχουν ίση απόσταση μεταξύ τους : $\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_2 - \Phi_3 = \dots = \Delta\Phi$

Από τη σχέση $q = -\text{grad}\Phi$ είναι φανερό ότι το διάνυσμα της ειδικής παροχής (ταχύτητα Darcy) σε κάθε σημείο μιας ισοδυναμικής γραμμής είναι κάθετο στην καμπύλη αυτή.

Οι καμπύλες εκείνες του οριζόντιου επιπέδου x-y που ορίζονται έτσι ώστε σε κάθε σημείο τους να έχουν εφαπτόμενη το διάνυσμα της ειδικής παροχής q, λέγονται γραμμές ροής. Από τον ορισμό της λοιπόν μια γραμμή ροής έχει εξίσωση που

ορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο : $\vec{q} \times d\vec{s} = 0$

όπου ds είναι ένα στοιχειώδες μήκος της γραμμής ροής. Γράφοντας την παραπάνω σχέση σε σύστημα συντεταγμένων : $q_y dx - q_x dy = 0$

Συνάρτηση ροής Ψ ή ροϊκή συνάρτηση, είναι η συνάρτηση εκείνη του επιπέδου x-y, η οποία διατηρεί σταθερή τιμή κατά μήκος των γραμμών ροής, δηλαδή $d\Psi = 0$,

για κάθε γραμμή ροής. Έτσι :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy = 0$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις :

$$q_x = -\frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad , \quad q_y = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Οι γραμμές ροής και οι ισοδυναμικές γραμμές τέμνονται κάθετα και αποδεικνύεται:

Για ισότροπα μέσα :

$$q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}$$

$$q_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

Οι παραπάνω αποτελούν τις συνθήκες Cauchy - Riemann.

Πολλαπλασιάζοντας τις εξισώσεις αυτές κατά μέλη και προσθέτοντας καταλήγουμε στη συνθήκη καθετότητας των δύο οικογενειών καμπυλών, δηλαδή γραμμών ροής

και δυναμικού :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \Psi}{\partial y} = 0$$

Για ανισότροπα μέσα οι καμπύλες αυτές δεν είναι ορθογώνιες.

Παραγωγίζοντας το πρώτο μέλος της σχέσης ως προς y και το δεύτερο ως προς x και

αφαιρώντας προκύπτει :

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

Επομένως και η συνάρτηση ροής είναι αρμονική, επαληθεύει δηλαδή την εξίσωση Laplace, για ομογενή και ισότροπα μέσα. Όπως η συνάρτηση δυναμικού Φ , έτσι και η συνάρτηση ροής Ψ έχει διαστάσεις L^2 / T .

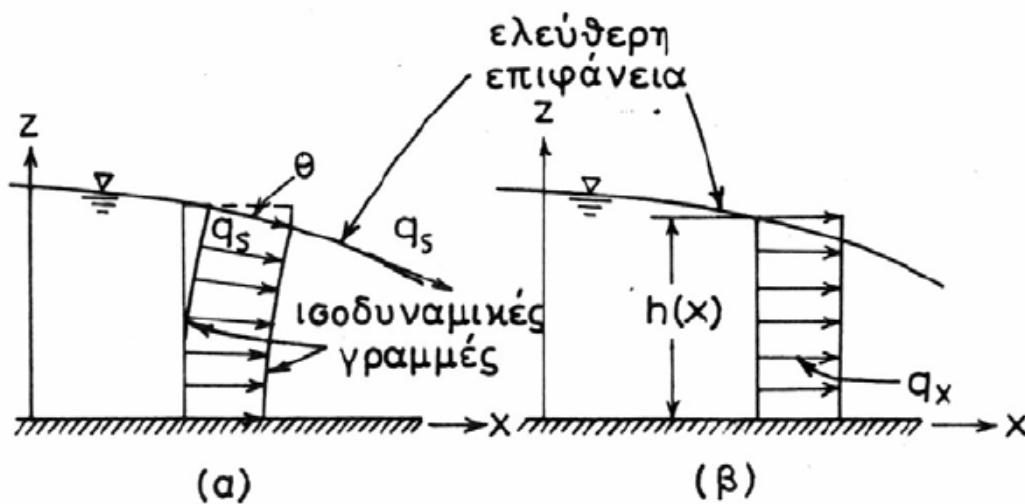
Όταν στο πεδίο δεν υπάρχουν πηγές ή πηγάδια, δηλαδή σημειακές αντλήσεις ή φορτίσεις, τότε μπορεί να αποδειχθεί ότι το δίκτυο γραμμών ροής ορίζει τη διηθούμενη παροχή. Για ασυμπύεστο λοιπόν ρευστό, υπόθεση που ισοδυναμεί με μόνιμη ροή, η παροχή Q' που διηθείται μεταξύ δύο γραμμών ροής Ψ_1 και Ψ_2 αποδεικνύεται ότι ισούται με τη διαφορά των αριθμητικών τους τιμών, δηλαδή :

$$Q' = Q_{AB} = \Psi_B - \Psi_A = \Psi_2 - \Psi_1$$

Η παροχή Q' μεταξύ δύο διαδοχικών γραμμών ροής παραμένει σταθερή αφού δεν υπάρχει συνιστώσα ταχύτητας κάθετη προς τις καμπύλες των γραμμών ροής.

5.5 Υπόθεση Dupuit

Η υπόθεση οριζόντιας ροής μπορεί να γίνει αποδεκτή με σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας στους περιορισμένους υδροφορείς. Στους φρεάτιους υδροφορείς όμως, η ελεύθερη επιφάνεια δεν είναι σχεδόν ποτέ οριζόντια. Το αποτέλεσμα είναι ότι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση οι ταχύτητες ροής μεταβάλλονται και για να υπολογιστούν οι μεταβολές της ταχύτητας (ειδικής παροχής) θα πρέπει να λυθεί μια διαφορική εξίσωση στο χώρο των τριών διαστάσεων για να υπολογιστεί η $\phi = \phi(x,y,z,t)$. Το πρόβλημα όμως είναι πιο πολύπλοκο απ'ότι φαίνεται γιατί στην ελεύθερη επιφάνεια ισχύει μια μη γραμμική οριακή συνθήκη και επιπλέον η θέση της δεν είναι γνωστή σε κάθε χρονική στιγμή.



Σχήμα 5.6 Η υπόθεση του Dupuit

Η υπόθεση Dupuit είναι αυτή με την οποία αντιμετωπίζονται στην πράξη τέτοιου είδους προβλήματα σε φρεάτιους υδροφορείς. Ο Dupuit βάσισε τις παραδοχές του στο γεγονός ότι η κλίση της ελεύθερης επιφάνειας στις περισσότερες υπόγειες ροές είναι πολύ μικρή. Συνηθέστερες τιμές κλίσεων που παρατηρούνται στην πράξη είναι της τάξης του $1/1000$ και $1/10000$. Επομένως θεωρεί 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. Για την περίπτωση μόνιμης ροής χωρίς κατακόρυφη διήθηση, στο επίπεδο $x-z$ ο φρεάτιος ορίζοντας αποτελεί οριακή γραμμή ροής. Σε κάθε λοιπόν σημείο αυτής της γραμμής ροής η ειδική παροχή είναι εφαπτόμενη και έτσι από το νόμο του Darcy ισχύει :

$$q_s = -K \cdot d\phi/ds = -K \cdot dz/ds = -K \cdot \sin\theta$$

αφού στην ελεύθερη επιφάνεια $p = 0$ (ατμοσφαιρική πίεση αναφοράς) και $\varphi = z$. Υποθέτοντας όμως ότι η γωνία θ όμως είναι πολύ μικρή, που σημαίνει ότι οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κατακόρυφες η υπόθεση Dupuit καταλήγει στη συνάρτηση $\varphi = \varphi(x)$ αντί της $\varphi = \varphi(x,z)$, δηλαδή σε οριζόντια ροή. Επίσης επειδή η γωνία θ είναι πολύ μικρή, το $\sin\theta$ μπορεί να αντικατασταθεί από την κλίση $\tan\theta = dh/dx$, όπου $h(x)$ το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας. Η πιεζομετρική γραμμή συμπίπτει με την ελεύθερη επιφάνεια και παραμένει αμετάβλητη με το βάθος. Έτσι σύμφωνα με τη θεωρία Dupuit, η ειδική παροχή υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$q_x = -K \cdot dh/dx, \quad h = h(x)$$

Στη γενικότερη περίπτωση που $h = h(x,y)$ είναι :

Το φυσικό νόημα της παραδοχής Dupuit συνοψίζεται στα παρακάτω :

- Αμέληση της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας

$$h = h(x, y) \Rightarrow q_z = -K \frac{dh}{dz} = 0$$

- Παραδοχή της υδροστατικής κατανομής των πιέσεων (Η υπόθεση Dupuit αποτελεί καλή προσέγγιση ροής, υπό την προϋπόθεση μικρής γωνίας θ και/ή οριζόντιας ροής).
- Ικανοποιητικός υπολογισμός παροχής
- Όχι ιδιαίτερα καλή πρόβλεψη της θέσης της ελεύθερης επιφάνειας

Τα μειονεκτήματα της παραδοχής οριζόντιας ροής είναι :

- Καθόλου δυνατότητα πρόβλεψης της επιφάνειας διήθησης
- Καθόλου δυνατότητα πρόβλεψης της κατακόρυφης λεπτομέρειας (π.χ. σε θέσεις φρεάτων, πηγών κλπ.)

Σχέση Dupuit – Forchheimer (μόνιμη ροή με ελεύθερη επιφάνεια μέσα από ένα ομογενή υδροφορέα, που περιορίζεται από δύο σταθερής στάθμης δεξαμενές) :

$$Q' = K(h_{o2} - h_{L2}) / 2L$$

5.6 Αρχικές και οριακές συνθήκες

Για την επίλυση της εξίσωσης Laplace πρέπει να οριστούν :

- Τα γεωμετρικά όρια του πεδίου ροής. Συνήθως τα φυσικά αυτά όρια καθορίζονται από το φυσικό πρόβλημα : ποτάμια, λίμνες, αδιαπέρατοι σχηματισμοί κλπ.
- Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του υδροφορέα, π.χ. K , S_s .
- Οι αρχικές συνθήκες. Καθορισμός δηλαδή της συνάρτησης δυναμικού Φ σε κάποια ορισμένη χρονική στιγμή - αφετηρία των χρόνων - που συνήθως συμβολίζεται σαν $t = 0$.
- Οι οριακές συνθήκες. Πρόκειται για μαθηματικές σχέσεις που καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας του ρευστού με το περιβάλλον του, δηλαδή με άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς ή υδάτινους όγκους.

Οριακές συνθήκες :

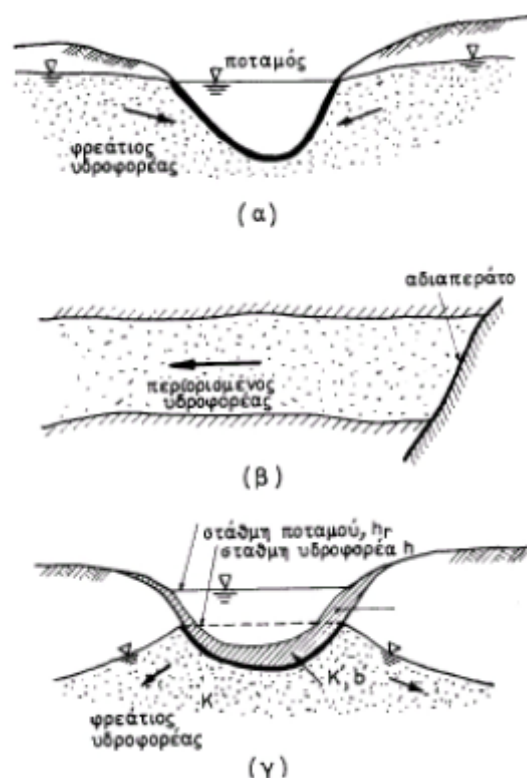
α) Όριο γνωστού φορτίου : όρια στα οποία ασκείται γνωστό πιεζομετρικό φορτίο, πιθανόν μεταβαλλόμενο χρονικά με γνωστό τρόπο. Τέτοιου είδους όρια παρατηρούνται όταν το πεδίο ροής συνορεύει με κάποιο υδάτινό δυναμικό. Ειδική περίπτωση με ιδιαίτερη πρακτική σημασία είναι όταν στο όριο το ασκούμενο πιεζομετρικό φορτίο είναι και σταθερό, οπότε το όριο αυτό αποτελεί ταυτόχρονα και ισοδυναμική γραμμή (ή ισοδυναμική επιφάνεια για τρισδιάστατο πρόβλημα). Αυτό σημαίνει ότι μόνο κάθετα προς αυτό μπορεί να υπάρξει ροή από ή προς τον υδροφορέα. Στη θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται συνθήκες Dirichlet ή οριακές συνθήκες πρώτου τύπου.

β) Όριο γνωστής παροχής : όρια στα οποία υπάρχει δεδομένη εισροή ή εκροή ρευστού από ή προς γειτονικό υδροφορέα αντίστοιχα. Ειδική περίπτωση αποτελεί η ύπαρξη αδιαπέρατου ορίου, δηλαδή μηδενικής εισροής ή εκροής. Όταν η εισροή ή εκροή είναι σταθερή, τότε το όριο αυτό αποτελεί ταυτόχρονα και γραμμή ροής, γιατί η ροϊκή συνάρτηση Ψ έχει μια σταθερή τιμή. Στη θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων τέτοιου τύπου οριακές συνθήκες ονομάζονται συνθήκες Neumann ή οριακές συνθήκες δευτέρου τύπου.

γ) Ημιπερατό όριο : όρια στα οποία συνυπάρχουν γνωστό φορτίο και γνωστή παροχή (εισροή ή εκροή). Αυτός ο τύπος οριακής παρατηρείται όταν ο υπό εξέταση υδροφορέας ή το πορώδες μέσο γενικότερα είναι σε επαφή με κάποιον ημιπερατό υδροφορέα και καλείται συνθήκη Cauchy η μικτή οριακή συνθήκη τρίτου τύπου.

δ) Ελεύθερη επιφάνεια : Είναι η γραμμή επαφής του πορώδους υλικού του κορεσμένου με ρευστό, με το πορώδες υλικό το κορεσμένο με ατμοσφαιρικό αέρα. Υποτίθεται ότι κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας, η πίεση παραμένει σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική, ενώ η ζώνη του τριχοειδούς αμελείται. Κάθε φορά πρέπει να καθορίζεται η θέση και το σχήμα της ελεύθερης επιφάνειας, των οποίων η εύρεση γίνεται συνήθως με διαδοχικές δοκιμές. Στη γενική περίπτωση στην ελεύθερη επιφάνεια μπορεί να υπάρχει επιπλέον διήθηση -λόγω βροχοπτώσης ή κατεΐσδυσης υπερκείμενου ρευστού- ή εξατμισοδιαπνοή.

ε) Επιφάνεια διήθησης : Είναι η γραμμή επαφής του πορώδους υλικού του κορεσμένου με ρευστό, με τον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα. Κατά μήκος της επιφάνειας διήθησης, η πίεση παραμένει σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική.



Εικόνα 5.1 Οριακές συνθήκες: α) γνωστού φορτίου, β) αδιαπέρατου ορίου, γ) μικτού τύπου

5.7 Μοντέλα προσομοίωσης κίνησης υπογείων υδάτων

5.7.1 Προσομοίωση - Γενικά

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

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

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

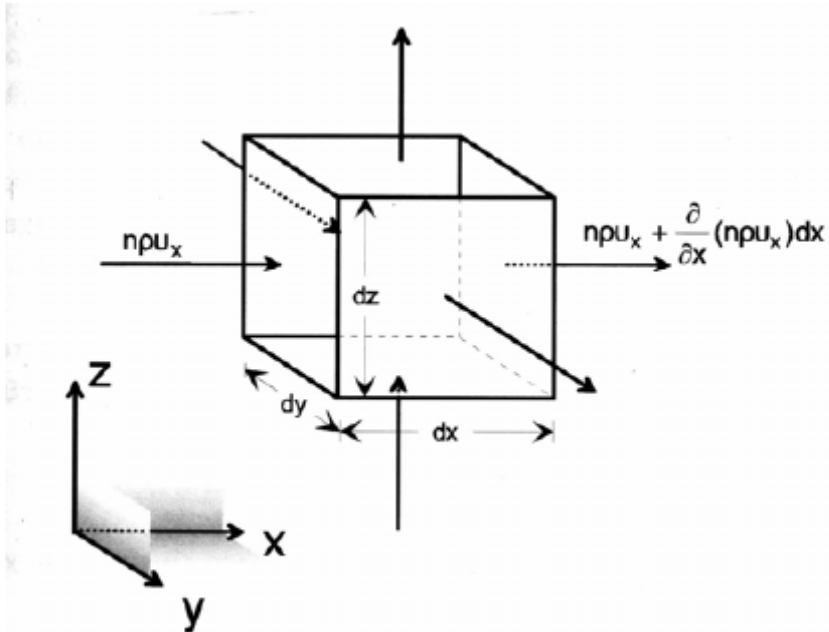
- Αναλυτικά μοντέλα (π.χ. Μονοδιάστατη ροή, υδραυλική πηγαδιών – κυκλική συμμετρία)
- Αριθμητικά μοντέλα (π.χ. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων)

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

5.7.2 Εξίσωση συνέχειας

Για την επίλυση προβλήματος υπόγειων ροών που αφορά μεταβολές πιεζομετρικού φορτίου ϕ σε πεδίο τριών διαστάσεων δεν αρκούν οι τρεις εξισώσεις κίνησης ρευστού που υποκαθίστανται από το νόμο του Darcy (μια εξίσωση για κάθε διεύθυνση) γιατί τα άγνωστα μεγέθη είναι τέσσερα (οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας διήθησης και το πιεζομετρικό φορτίο). Επομένως είναι απαραίτητη ακόμα μία εξίσωση, η εξίσωση διατήρησης μάζας, ή εξίσωση συνέχειας. Η εξίσωση συνέχειας διατυπώνεται ως εξής :

«Η μάζα του νερού σε διαφορικό όγκο διατηρείται (ανά μονάδα χρόνου δηλαδή, η διαφορά της μάζας που εισέρχεται μείον τη μάζα που εξέρχεται ισούται με τη μεταβολή μάζας στο διαφορικό όγκο». Μαθηματικά διατυπώνεται ως εξής :



Σχήμα 5.7 Στοιχειώδες παραλληλεπίπεδο πορώδους μέσου κορεσμένου με ρευστό

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

Εξίσωση 2 Εξίσωση συνέχειας

όπου

- ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, η οποία μπορεί να εμφανίζει χωροχρονικές διακυμάνσεις,
- n είναι το πορώδες του υδροφορέα και
- q η ειδική παροχή.

Συνδυάζοντας την εξίσωση συνέχειας με τον νόμο του Darcy, προκύπτει η εξίσωση ροής, η οποία στην περίπτωση ισότροπου και ανομοιογενή υδροφορέα έχει την μορφή:

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

όπου

- φ είναι το πιεζομετρικό φορτίο,
- S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα και
- K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα.

Στην περίπτωση ανισότροπου και ανομοιογενή υδροφορέα, η παραπάνω εξίσωση ροής τροποποιείται ως ακολούθως:

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

Οι παραπάνω δύο εξισώσεις ροής ισχύουν σε περιπτώσεις μη μόνιμης ροής.

Σε συνθήκες μόνιμης ροής, ο όρος $S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0$

και έτσι οι εξισώσεις γράφονται αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0$$

στην περίπτωση ισότροπου και ανομοιογενή υδροφορέα,

ενώ για ανισότροπο και ανομοιογενή υδροφορέα, η εξίσωση ροής έχει την μορφή

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0$$

5.7.3 Αριθμητικά μοντέλα υπόγειων υδάτων

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

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

Στην παρούσα μελέτη, στα πλαίσια της διπλωματικής, εφαρμόζεται το λογισμικό GROUNDWATER VISTAS, το οποίο χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές.

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

6.1 Ο υδρολογικός κύκλος του νερού στη φύση

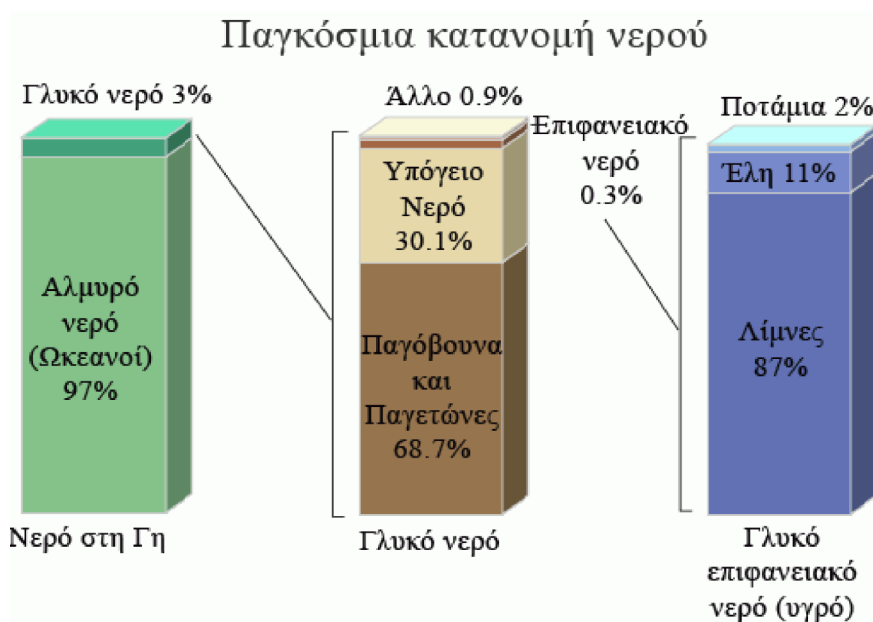
Το νερό στη φύση υπάρχει και στις τρεις καταστάσεις της ύλης, σε στερεά μορφή ως πάγος, σε υγρή μορφή αλλά και σε αέρια, που αντιπροσωπεύεται από τους υδρατμούς. Το νερό εμφανίζεται στον πλανήτη ως ένας υδρολογικός κύκλος που συνεχίζεται διαρκώς. Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας συμπυκνώνονται σε νέφη και με τη μορφή βροχόπτωσης καταλήγουν στη γη.

Το νερό της βροχής που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους ακολουθεί τρεις κατευθύνσεις. Είτε απορρέει επιφανειακά με τη μορφή ποταμών και καταλήγει στη θάλασσα, είτε κατεισδύει στο έδαφος, εισέρχεται στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και ή συνεχίζει την κίνηση του υπόγεια ή εκφορτίζεται στην επιφάνεια μέσω πηγών. Τέλος, λόγω της εξατμισοδιαπνοής μπορεί να εξατμιστεί ή με τη διαπνοή των φυτών να καταλήξει ως υδρατμός στην ατμόσφαιρα. Η εξάτμιση είναι διαδικασία που συμβαίνει και στην επιφάνεια της θάλασσας, καθώς το νερό των ωκεανών επιστρέφει με τη μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαρκή κίνηση του νερού μέσα στον υδρολογικό κύκλο.



Εικόνα 6.1 Ο υδρολογικός κύκλος του νερού στη φύση

Ο πλανήτης καλύπτεται κατά τα 2/3 του από νερό και η ποσότητα αυτή στη φύση είναι περίπου της τάξης των 1.336.800.000 km². Από αυτά το 97% είναι αλμυρό νερό (ωκεανοί) και το υπόλοιπο 3% γλυκό (Σχήμα 2.2). Σε αυτό το 3% συμπεριλαμβάνεται το νερό των παγετώνων, το υπόγειο και το επιφανειακό νερό. Από αυτό το 3% το μεγαλύτερο μέρος καλύπτει το νερό των παγετώνων, ενώ το περισσότερο από το υπόγειο νερό βρίσκεται εγκλωβισμένο σε μεγάλα βάθη και δεν είναι προσιτό. Το γλυκό νερό που μπορεί να καταναλώσει ο άνθρωπος αντιπροσωπεύεται από ένα πολύ μικρό ποσοστό, που αντιστοιχεί σε ανώτερους υδροφόρους ορίζοντες, νερό ποταμών και άλλα (Λατινόπουλος, 2007).



Εικόνα 6.2 Η παγκόσμια κατανομή του νερού

Το γλυκό νερό δεν υπάρχει σε αφθονία σε κάθε μέρος του πλανήτη, καθώς είναι εξαιρετικά άνιση η κατανομή του. Εάν σε όλα τα παραπάνω προστεθούν οι κλιματικές αλλαγές και τα έντονα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ερημοποίηση ή η υφαλμύρωση, που μειώνουν την ποσότητα και καταστρέφουν την ποιότητα των υδάτων τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, γίνεται αντιληπτό το υδατικό πρόβλημα στη σημερινή εποχή. Άλλωστε, ακόμη και στις κοινωνίες όπου το νερό είναι άφθονο, η ρύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων είναι η μεγαλύτερη απειλή για την ποιότητα του νερού. (Περισσότερα στοιχεία σχετικά με την Διαχείριση το Υδατικών Πόρων στο Παράτημα Ι).

6.2 Έντονες Κλιματικές αλλαγές - Ξηρασία

6.2.1 Η αλλαγή του παγκόσμιου κλίματος

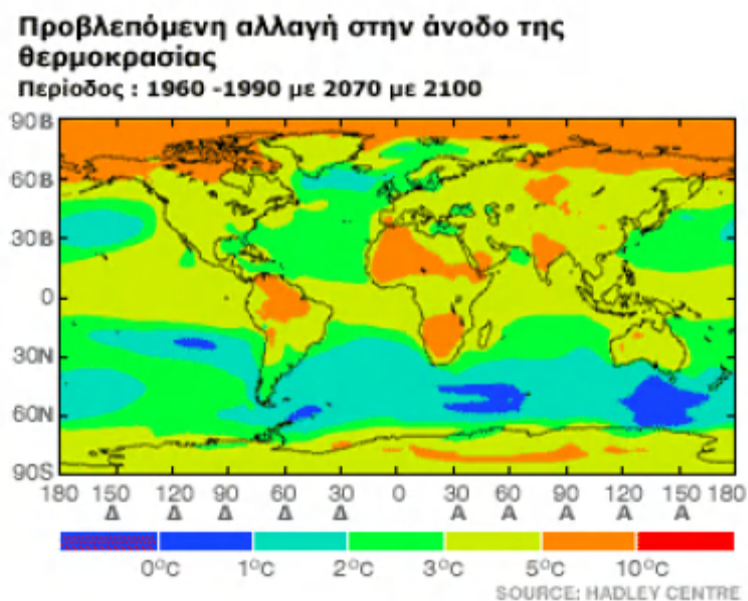
Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης, τα τελευταία 1.000 χρόνια χαρακτηρίστηκε από ακανόνιστη αλλά σταθερή ψύξη, αλλά ακολούθησε μία "έντονη" θέρμανση στη διάρκεια των τελευταίων 100 χρόνων, ίση περίπου με μισό βαθμό Κελσίου. Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε την διακύμανση της θερμοκρασίας και την συνεχώς ανοδική τάση που έχει τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 6.1 Μέση ετήσια θερμοκρασίας αέρα

- Το 2005 καταγράφηκε επίσημα ως το πιο θερμό έτος των τελευταίων εκατό ετών. Έως το 2005, το πιο θερμό έτος ήταν το 1987.
- Τον 20ο αιώνα η μέση θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 0,4 - 0,8οC κατατάσσοντας τον αιώνα ως τον θερμότερο των τελευταίων χιλίων ετών.
- Η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα αυξηθεί από 1,1 έως 6,4 βαθμούς Κελσίου έως το 2100, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, με πιθανότερη μία άνοδο κατά 1,8 έως 4 βαθμούς Κελσίου ανάλογα με τα μέτρα που θα ληφθούν. Το φαινόμενο είναι αναπόφευκτο και θα διαρκέσει έως και μία χιλιετία. (Πηγή : Το Διακυβερνητικό Σώμα για τις Κλιματικές Αλλαγές του ΟΗΕ, IPCC)
- Η μέση στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί κατά 20 εκατοστά τον 20ο αιώνα
- Η στάθμη των ωκεανών θα ανέβει έως το τέλος του αιώνα κατά 18 έως 59 εκατοστά, σε σχέση με το 1990, αν και η άνοδος θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη, σε

περίπτωση που λιώσει το κάλυμμα πάγου στην Ανταρκτική και τη Γροιλανδία.



Σχήμα 6.2 Προβλεπόμενη αλλαγή της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τα πρόσφατα (2005) αποτελέσματα του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος "Eurosion" που εκπονήθηκε για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το ένα πέμπτο των ακτών της Ευρώπης των 25, περίπου 20.0000 χιλιόμετρα, έχει επηρεασθεί ήδη σοβαρά ή αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα από τη διάβρωση, με την ακτογραμμή να υποχωρεί κατά 0,5 έως 2 μέτρα κάθε χρόνο, και σε κάποιες σοβαρές περιπτώσεις μέχρι και 15 μέτρα. Πάνω από 15 τετραγωνικά χιλιόμετρα το χρόνο χάνονται ή επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό.

6.2.2 Η αλλαγή κλίματος στην Ελλάδα και τα νησιά της

Το μέλλον μας επιφυλάσσει ζέστη και λιγότερες βροχές, σε αυτό το συμπέρασμα συγκλίνουν οι εκτιμήσεις της επιστημονικής κοινότητας για τις αλλαγές που πρόκειται να υποστεί το κλίμα της Ελλάδας, οι οποίες αναμένεται να γίνουν ορατές μέσα στις επόμενες δεκαετίες, με πιθανολογούμενη κορύφωση τους μέχρι το 2100. Το γνωστό εύκρατο μεσογειακό κλίμα της χώρας μας με τους ήπιους, βροχερούς χειμώνες και τα σχετικώς θερμά και ξηρά καλοκαίρια μετατοπίζεται προς μια θερμότερη και περισσότερο ξηρή εκδοχή. Τα τελευταία 40 χρόνια στην Ελλάδα οι βροχοπτώσεις μειώθηκαν κατά 10-30%. Οι επιστήμονες προβλέπουν γενικά αύξηση της θερμοκρασίας στην ελληνική επικράτεια μεταξύ 0.9 και 5 βαθμούς Κελσίου μέχρι το τέλος του αιώνα. Ενώ η μέση μέγιστη θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί κατά 8 °C έως το τέλος του αιώνα. (από 33 °C σε 41 °C). Στις μεσογειακές χώρες,

μέχρι το 2080 αναμένεται 20-40% χαμηλότερη βροχόπτωση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, γεγονός που θα πλήξει τη γεωργία και θα αυξήσει τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών. Οι πιο ευάλωτες περιοχές στις κλιματικές αλλαγές είναι οι Κυκλάδες, η Θεσσαλία, η Κρήτη και η Θεσσαλονίκη Όσον αφορά τη Ν. Μήλο και γενικότερα τα νησιά, αυτά από τη φύση τους είναι προβληματικά στο νερό γιατί έχουν μικρή έκταση, επομένως το νερό που μπορούν να μαζέψουν είναι λίγο, έχουν λίγες βροχοπτώσεις, έχουν μεγάλη ηλιοφάνεια και εξάτμιση, βρίσκονται σε περιοχή με ισχυρούς ανέμους, επομένως με μεγάλες εξατμίσεις, περιβάλλονται από τη θάλασσα και λόγω και των ασθενών υδραυλικών φορτίων, προσβάλλονται ευκολότερα και περισσότερο από τους παράγοντες της υφαλμυρώσεως.

6.2.3 Επιπτώσεις κλιματολογικών αλλαγών Οι παγκόσμιες επιπτώσεις

- Πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3oC θα προκαλέσει την αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 1 μέτρο.
- Προβλεπόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας της τάξης των 0,88μ μέχρι το 2100 ενδέχεται να επηρεάσει περίπου 68 εκατομμύρια ανθρώπους στις ακτές της ΕΕ, μήκους 89.000 χλμ.
- Έως και 3,1 δισεκατομμύρια άτομα ενδέχεται να έχουν πιο δύσκολη πρόσβαση στην ύδρευση.
- Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί κατά 1,4°C, 10 εκατομμύρια ακόμη άτομα θα κινδυνεύσουν από σοβαρές παράκτιες πλημύρες.
- Μία σημαντική παράμετρος της παγκόσμιας θέρμανσης αφορά στην ενδεχόμενη εξάπλωση και άνθιση επιδημιών του παρελθόντος, καθώς οι μεγάλες θερμοκρασίες και η υγρασία αποτελούν κατάλληλο υπόβαθρο για την ανάπτυξη πολλών μικροβίων. Όπως η Ελονοσία (αύξηση 2°C θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο 210 εκατομμύρια επιπλέον ανθρώπους).
- Οι καύσωνες μπορούν να αποβούν μοιραίοι για τους ηλικιωμένους: στη δυτική και νότια Ευρώπη σημειώθηκαν 20.000 περισσότεροι θάνατοι το 2003.
- Περιφερειακές συγκρούσεις, λιμός και μετανάστευση, ειδικότερα στις αναπτυσσόμενες χώρες που επηρεάζονται περισσότερο από τις κλιματικές αλλαγές.
- Μέχρι το 2050 το ένα τρίτο των ζωντανών οργανισμών πάνω στην γη θα εξαφανιστεί καθώς πολλοί από αυτούς δε θα μπορέσουν να προσαρμοστούν σε τόσο γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες
- Το λιώσιμο των πάγων θα έχει ως συνέπεια την διαταραχή της ισορροπίας του παγκόσμιου οικοσυστήματος. Ο παγετός αποτελείται από γλυκό νερό, το οποίο

όταν λιώνει προκαλεί την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Η αφαλάτωση αυτή πρόκειται να αναδιοργανώσει τα ρεύματα τα οποία ρυθμίζουν τις θερμοκρασίες.

- Η ξηρασία και η άνοδος της θερμοκρασίας θα οδηγήσουν σε προβλήματα λειψυδρίας, υποβάθμισης της ποιότητας του νερού, αλλά και στις αποδόσεις των αγροτικών καλλιεργειών. Η άνοδος του επιπέδου της θάλασσας θα επιφέρει καταστροφές στις παραγωγικές δραστηριότητες σε παράκτιες περιοχές. Και φυσικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία.

Όλες οι διεθνείς επιστημονικές εκθέσεις συμφωνούν ότι τις επόμενες δεκαετίες θα συνεχιστεί στην Ελλάδα η βαθμιαία άνοδος της θερμοκρασίας και εφιστούν την προσοχή ακόμη και στο ενδεχόμενο ερήμωσης, καθώς είναι πιθανόν η χώρα να βρεθεί σε ζώνη λειψυδρίας. Άλλωστε η Ελλάδα με το πλήθος νησιών της, διαθέτει τη μεγαλύτερη ακτογραμμή στην Ευρώπη με πλήθος οικονομικών δραστηριοτήτων, η τρωτότητα της παράκτιας ζώνης είναι ζήτημα τεράστιας περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής σημασίας.

Οι επιπτώσεις στη χώρα μας από την παρατεταμένη ανομβρία και τις αυξημένες συνθήκες εξατμίσεως αναμένονται σοβαρές, τόσο στα επιφανειακά υδατικά συστήματα, όσο, κυρίως, στα υπόγεια αντίστοιχα υδατικά σώματα. Αυτό γιατί ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων συναρτάται από τον όγκο των βροχοπτώσεων σε μια περιοχή, αλλά αυτό, μόνο του, δεν αρκεί. Ο όγκος του νερού για να εμπλουτίσει τις υπόγειες υδροφορίες πρέπει να συνοδεύεται από ορισμένα πλαίσια συνθηκών, που αφορούν την ίδια τη βροχόπτωση (διάρκεια, ένταση, ρυθμός), αλλά και άλλες κλιματικές παραμέτρους (θερμοκρασία, υγρασία, ηλιοφάνεια κλπ). Επομένως, και αν ακόμα στο υπόλοιπο της υγρής περιόδου, έχουμε, με βάση το ύψος βροχής, σημαντική προσφορά, αυτή δεν θα καλύψει την έλλειψη των υδροφόρων οριζόντων, αλλά, κατά προτεραιότητα, το έλλειμμα της εδαφικής υγρασίας (νερό κατακρατήσεως, νερό προσροφήσεως, τριχοειδές νερό). Ακραία καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, τυφώνες και καύσωνες, το λιώσιμο μεγάλου ποσοστού των αιώνιων πάγων μέσα σε μερικές δεκαετίες και η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης είναι αδιαμφισβήτητες, δυστυχώς, αποδείξεις για ένα φαινόμενο που είναι ήδη πραγματικότητα. Η ανθρωπότητα μπορεί ακόμη να αποφύγει τους χειρότερους κινδύνους και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, χωρίς υπέρμετρο κόστος αρκεί να ληφθούν επείγοντως καλώς σχεδιασμένα και συντονισμένα μέτρα σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.

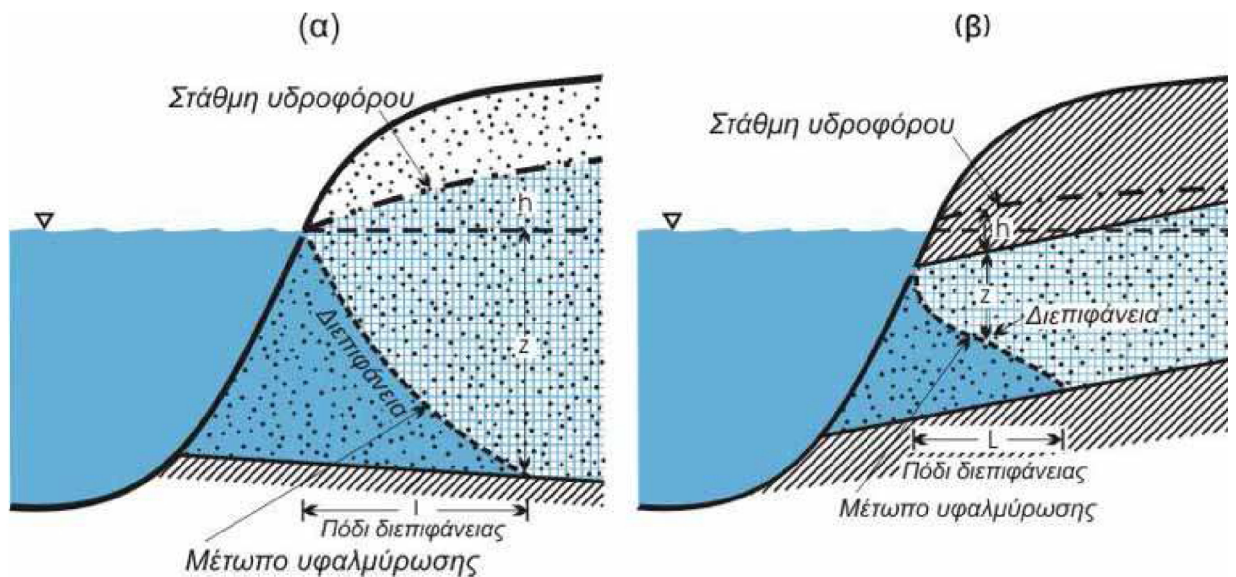
6.3 Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

6.3.1 Γενικά

Η υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την είσοδο της θάλασσας σε αυτούς λόγω διαταράξεως της υδροστατικής ισορροπίας, είναι ένα πρόβλημα όλων των χωρών που βρέχονται από θάλασσα. Η υφαλμύρωση έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού των παράκτιων υδροφορέων. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος, ποσοστό άνω του 85%, των παράκτιων υδροφόρων της χώρας έχουν γίνει ακατάλληλοι για οποιαδήποτε χρήση λόγω της υφαλμύρωσης τους.

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 $1.000 \text{ cm}^3 / \text{gr}$) που εξέρχεται προς τη θάλασσα ενώ από κάτω συναντάται το αλμυρό νερό (ειδικό βάρος περίπου $1.025 \text{ cm}^3 / \text{gr}$). Οι υδραυλικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής στη ζώνη αυτή μεταβάλλονται καθώς αλλάζει η πυκνότητα εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης άλατος. Οι Das and Data(1999)μελέτησαν τη «μικτή» αυτή ροή στη ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας μέσω κατάλληλου μοντέλου.(Πηγή: Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων,Μαντόγλου Α., Κουράκος Γ., 2005)

Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό θεωρείται ως μία ζώνη και όχι ως μία απλή επιφάνεια. Η ζώνη αυτή ονομάζεται ζώνη διεπιφάνειας καθώς ως μια νοητή επιφάνεια χωρίζει το θαλασσινό από το αλμυρό νερό. Ονομάζεται όμως επίσης και ζώνη διάφρασης ή αλλιώς ζώνη μετάβασης καθώς από τη φάση του γλυκού νερού γίνεται η μετάβαση στη φάση του θαλασσινού νερού. Τέλος έχει το όνομα ζώνη διάχυσης, καθώς από το αλμυρό νερό γίνεται μοριακή διάχυση χλωριόντων με βάση φυσικοχημικές διεργασίες. Κατά την επαφή των δύο φάσεων το θαλασσινό νερό αφήνει ίχνη στο γλυκό λόγω εμποτισμού, ιοντοανταλλαγής και εγκλωβισμού υπολειμμάτων αλμυρού νερού ως νερό κατακράτησης, τριχοειδές νερό. Οπότε δικαιολογείται η ονομασία της ζώνης και όχι της επιφάνειας μετάβασης, καθώς δημιουργείται μία ενδιάμεση ζώνη υφάλμυρου νερού.



Το γλυκό νερό για τις διάφορες χρήσεις του όπως ύδρευση, άρδευση στη βιομηχανία, πρέπει να έχει κάποιες, ορισμένες κάθε φορά, επιτρεπτές τιμές των ιόντων που περιέχει. Οι τιμές αυτές καθορίζουν την ποιότητα του υπόγειου νερού και με βάση αυτές κρίνεται κατάλληλο για κάθε χρήση. Στον Πίνακα 6.1 φαίνονται οι επιτρεπόμενες τιμές των πιο συχνά εμφανιζόμενων ιόντων του φυσικού νερού (αλλά και των προς εμπορία μεταλλικών νερών), που καθορίζουν το αν είναι κατάλληλο για πόση.

Συστατικά	Ανώτατη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (mg/l)
Κατιόντα	
Mg ²⁺	50
Na ⁺	175
Ανιόντα	
Cl ⁻	250
SO ₄ ²⁻	250
NO ³⁻	50
NO ²⁻	0,1

Πίνακας 6.1 Επιτρεπόμενα όρια πόσιμου νερού(πηγή: Λατινόπουλος ,2007)

Σύμφωνα με την Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, στο δεύτερο τεύχος με αριθμό φύλλου 887, που εκδόθηκε στις 15 Ιουνίου του 2004, στο

παράρτημα Ι καθορίζονται οι οριακές τιμές συγκέντρωσης καθώς και οι ενδείξεις για την επισήμανση των συστατικών των φυσικών μεταλλικών νερών.

Στη συνέχεια παρατίθεται ο Πίνακας 6.2, με τα μη διαδεδομένα συστατικά που είναι όμως παρόντα με φυσικό τρόπο στα φυσικά μεταλλικά νερά και με τις ανώτατες οριακές τιμές τους, των οποίων η υπέρβαση μπορεί να προκαλέσει κίνδυνο για τη δημόσια υγεία.

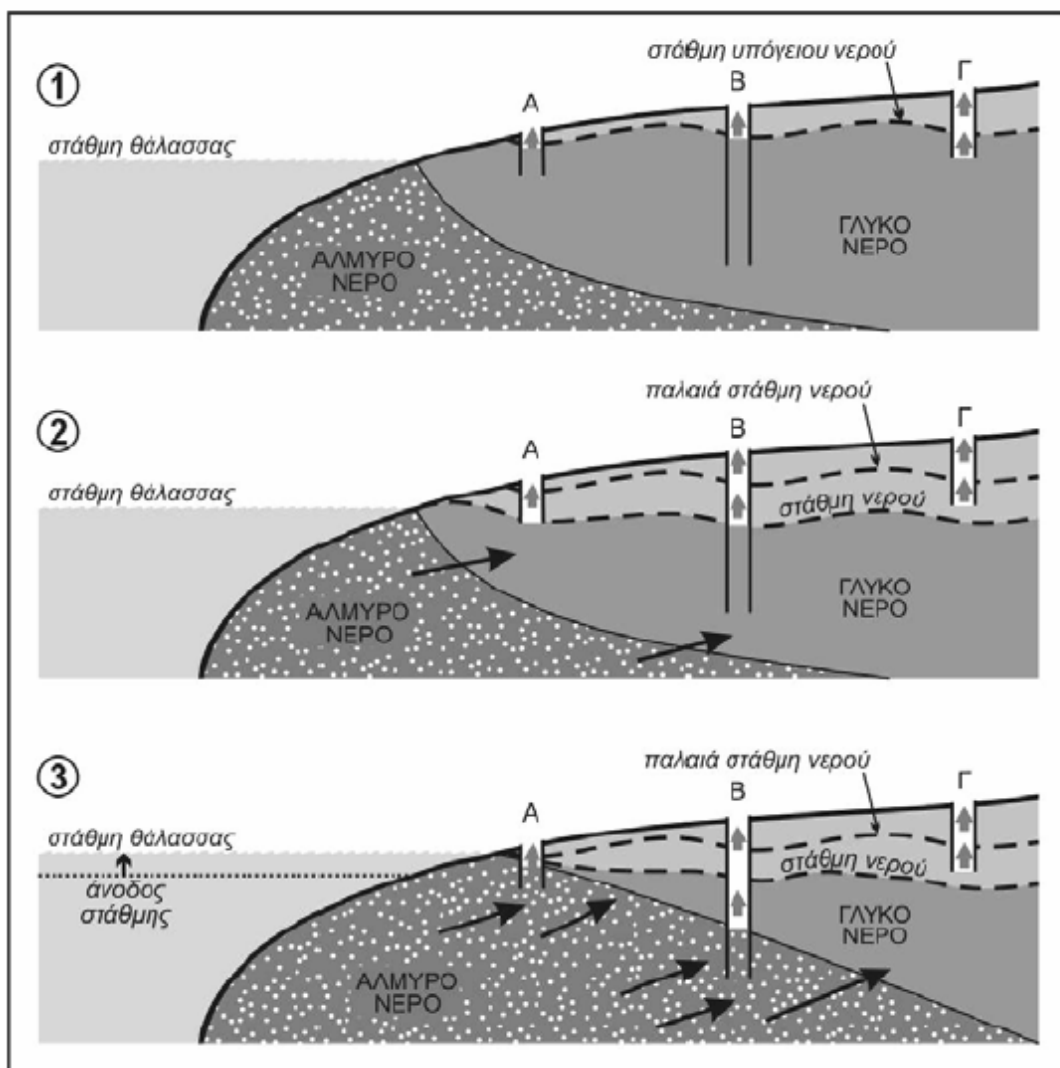
Το νερό της θάλασσας δε θεωρείται κατάλληλο ώστε να μπορεί να το χρησιμοποιήσει ο άνθρωπος. Δεν ενδείκνυται ούτε για αστική χρήση αλλά ταυτόχρονα δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ούτε και για την άρδευση των καλλιεργειών, καθώς η συσσώρευση των αλάτων καταστρέφει την παραγωγικότητα των εδαφών. Τέλος, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ούτε και στη βιομηχανία. Η μόνη χρήση η οποία αποδίδεται στο θαλασσινό νερό είναι να αποτελέσει περιβάλλον σε ιχθυοκαλλιέργειες.

Αν και όσον αφορά την περιεκτικότητα του χλωρίου δεν υπάρχουν ακριβείς τιμές, γενικά ισχύει ότι για τιμές Cl < 300 mg/l το νερό θεωρείται γλυκό, για τιμές 300 < Cl < 4.000-5.000 mg/l υφάλμυρο και για τιμές Cl > 5.000 mg/l θεωρείται αλμυρό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το πόσιμο νερό έχει περιεκτικότητα σε Cl < 150-250 mg/l, ενώ το νερό της θάλασσας περιέχει Cl σε τιμές από 18.000-34.000 mg/l (Σούλιος, 2004).

Συστατικά	Ανώτατες οριακές τιμές (mg/l) ή ppm
Αντιμόνιο	0,0050
Αρσενικό	0,010 (συνολικά)
Βάριο	1,0
Κάδμιο	0,003
Χρώμιο	0,050
Χαλκός	1,0
Κυανιούχα	0,070
Φθοριούχα	5,0
Μόλυβδος	0,010
Μαγγάνιο	0,50
Υδράργυρος	0,0010
Νικέλιο	0,020
Νιτρικά	50
Νιτρώδη	0,1
Σελήνιο	0,010

Εικόνα 6.4 Συστατικά νερού και ανώτατες τιμές τους

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η υφαλμύρωση του γλυκού νερού που οφείλεται σε υπεράντληση στη στεριά, κατά τα διάφορα στάδια. Αρχικά στο 1ο στάδιο υπάρχει ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, ενώ από τις τρεις γεωτρήσεις A, B, και Γ, που υπάρχουν στην ακτή αντλείται αποκλειστικά γλυκό νερό. Στο 2ο στάδιο η στάθμη του γλυκού νερού έχει κατέβει εξαιτίας της άντλησης από τις τρεις γεωτρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αλμυρό νερό να εισχωρεί όλο και περισσότερο στη στεριά, οπότε και σε συνδυασμό με την άνοδο της θάλασσας, στο 3ο στάδιο αντλείται αποκλειστικά αλμυρό νερό από τις γεωτρήσεις A και B.



Σχήμα 6.3 Στάδια του φαινομένου της υφαλμύρωσης λόγω υπεράντλησης(πηγή Βουδούρης κ.α. 2005)

6.3.2 Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων- Πολυπλοκότητα προβλήματος

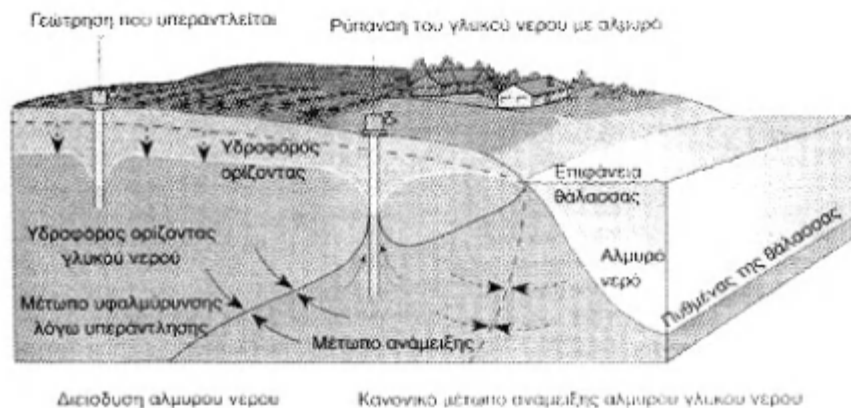
Οι ανάγκες για νερό στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά αυξάνονται συνεχώς λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού. Οι αντλήσεις των υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές, πολλές φορές πάνω από τα όρια βιωσιμότητας, με αποτέλεσμα την υπαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Επίσης η τροφοδοσία των υδροφορέων μεταβάλλεται ανάλογα με τις βροχοπτώσεις και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας δεν επαρκεί για την επαναπλήρωση τους. (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος, 2001).

Λόγω των περιορισμένων διαθεσίμων υδατικών πόρων στις παράκτιες περιοχές και τα νησιά, οι υπάρχοντες υδατικοί πόροι είναι πολύτιμοι και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό καλύτερα ώστε να προστατευτούν και να συνεχίσουν να καλύπτουν και στο μέλλον τις ανάγκες με βιώσιμο τρόπο. Η χρήση και αποκατάσταση παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί μέρος ενός γενικότερου πλαισίου ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων του νησιού ή της παράκτιας περιοχής η οποία περιλαμβάνει τα επιφανειακά καθώς και τα υπόγεια νερά, εξετάζει τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υδάτινων πόρων και θεωρώντας τις υπάρχουσες αλλά και τις μελλοντικές ανάγκες καθώς και τη μεταβλητότητα και διαρκή αύξηση των αναγκών ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Αυτού του είδους η διαχείριση απαιτεί επιστημονική έρευνα, ανάλυση, μελέτες και σχεδιασμό, κατάλληλη νομοθεσία και διατάξεις, καθώς και καλή πληροφόρηση και συνεργασία φορέων και πληθυσμού. (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος, 2001)

Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υπάρχει ανάγκη να καθοριστούν οι βέλτιστες ποσότητες που μπορούν να αντληθούν από τους υδροφορείς και να καθοριστεί η σχέση αυτή σαν συνάρτηση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων του υδροφορέα καθώς και της κατείσδυσης. (Μαντόγλου Α., 2007, Πρόληψη και διαχείριση των φυσικών καταστροφών) Δυστυχώς το σύστημα είναι πολύπλοκο και είναι πολύ δύσκολο αν όχι αδύνατο να το κατανοήσουμε πλήρως και να το περιγράψουμε επακριβώς με μαθηματικές εξισώσεις. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος υπαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες : Ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών καθώς και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης (ζώνη υπαλμύρωσης) μεταξύ των δύο υγρών φάσεων.

Η κίνηση καθώς και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στην ζώνη υπαλμύρωσης η οποία μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χώρου και χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής. Αυτή η αλληλεξάρτηση κάνει τις αντίστοιχες εξισώσεις μη γραμμικές και είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με αριθμητικές μεθόδους αφού απαιτούνται διαδοχικές προσεγγίσεις και επαναλήψεις. Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται ακόμα περισσότερο λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Ιδιαίτερα σε καρστικούς

υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι εντελώς διαφορετικής φύσης από αυτήν σε ομοιογενείς και ιστροπικούς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε καρστ συχνά δεν ακολουθεί το νόμο του Darcy αφού γίνεται σε κοιλότητες και σε ανοίγματα που είναι συχνά μεγάλων διαστάσεων με αποτέλεσμα να είναι πολύπλοκη και να μην μπορεί να περιγραφεί με γενικές διαφορικές εξισώσεις ροής αφού κάθε ιδιαίτερο σύστημα έχει τη δική του ιδιότυπη συμπεριφορά. Επομένως, εκτός από τα φυσικά μοντέλα που βασίζονται σε φυσικούς νόμους και διαφορικές εξισώσεις ροής και διασποράς, συχνά αρκούμαστε και σε εμπειρικές σχέσεις ή και σε απλά στατιστικά μοντέλα (μοντέλα μαύρου κουτιού). Είναι χρήσιμο πάντως όπου είναι δυνατόν να χρησιμοποιούμε τα φυσικά μοντέλα αφού βοηθούν να κατανοήσουμε την λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 6.5 Υφαλμύρωση παράκτιου υδροφορέα

6.3.3 Κατηγορίες υφάλμυρων υπογείων νερών

Η επιστημονική έρευνα έχει αναγνωρίσει τέσσερα είδη υφάλμυρων υπογείων νερών, με διαφορετική προέλευση όσο αφορά στη διαδικασία εναλάτωσης :

I. Υφάλμυρα νερά, οφειλόμενα σε θαλάσσια διείσδυση

II. Υφάλμυρα νερά, οφειλόμενα σε διάλυση ευδιάλυτων αλάτων που υπάρχουν στον υδροφόρο ορίζοντα

III. Υφάλμυρα νερά, οφειλόμενα στις διεργασίες δημιουργίας των πετρωμάτων (συγγενετικά ή απολιθωμένα νερά)

IV. Υφάλμυρα νερά, οφειλόμενα σε συμπύκνωση διαλυμένων αλάτων, σε περιοχές έντονης εξατμισοδιαπνοής

Είναι σαφές ότι ο κύριος προσανατολισμός των ενασχολούμενων με τους υδατικούς πόρους φορέων και επιστημόνων έχει εστιασθεί στην υφαλμύρωση που έχει σχέση με τη θαλάσσια διείσδυση γιατί στατιστικά κυριαρχεί και σχεδόν μονοπωλεί το ενδιαφέρον, τουλάχιστον για βάθη, που είναι οικονομοτεχνικά αποδεκτά για εκμετάλλευση υπογείων υδάτων.

6.3.4 Ευαισθησία Ελλάδας στη θαλάσσια διείσδυση

Η Ελλάδα, εξ αιτίας του μεγάλου μήκους των ακτών της, παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία στη θαλάσσια διείσδυση, που μπορεί να προκύπτει είτε:

α) Λόγω διαταραχών στην ισορροπία του συστήματος γλυκού –θαλασσινού νερού, που προκαλούνται από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις (υπερεκμετάλλευση υπογείων υδροφόρων οριζόντων) σε Λεκάνες κοκκωδών η καρστικών σχηματισμών, που γειτνιάζουν με τη θάλασσα είτε

β) λόγω ιδιαιτεροτήτων που σχετίζονται με τη γεωλογική δομή (καρστική διεργασία - επίπεδο βάσης του καρστ). Η πρόσφατη αλμύριση των παράκτιων καρστικών υδροφόρων οριζόντων λαμβάνει χώρα με τους εξής μηχανισμούς (Milanovic, 1981) :

- όταν καρστικοί αγωγοί βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα, σε όλο τους το μήκος.

- όταν το στεγανό διάφραγμα, ανάμεσα στο Καρστικό σύστημα και στη θάλασσα, διαταραχθεί κατά θέσεις από τη διάβρωση ή τον τεκτονισμό.

- όταν το στεγανό διάφραγμα είναι πολύ ρηχό, οπότε η κυκλοφορία γίνεται κάτω από αυτό. (Γ. Καλλέργης)

Οι προαναφερόμενοι μηχανισμοί λειτουργίας των καρστικών συστημάτων μπορούν να οδηγήσουν και σε αυτογενή υφαλμύρωση, χωρίς να παρεμβληθεί ανθρώπινη δραστηριότητα.

6.3.5 Αίτια υφαλμύρωσης των υπόγειων νερών

Οι αφορμές που συντέλεσαν στη δημιουργία της υφαλμύρωσης των υδροφόρων οριζόντων διακρίνονται σε φυσικές και ανθρωπογενείς:

Φυσικές

Κύρια αιτία υφαλμύρωσης των υπόγειων νερών και κυρίως των παραλιακών υπόγειων υδροφόρων αποτελεί η ύπαρξη χαμηλής πιεζομετρίας, δηλαδή η ανάπτυξη πολύ μικρού υδραυλικού φορτίου που αποτελεί την κινητήρια δύναμη των υπόγειων νερών προς τη θάλασσα. Έτσι η όποια φυσική ή ανθρωπογενής δράση που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση του υδραυλικού φορτίου, αποτελεί λόγω για ανύψωση της διεπιφάνειας γλυκού - αλμυρού νερού, δηλαδή αφορμή προσέγγισης της υφάλμυρης ζώνης στην επιφάνεια του εδάφους. Κύριες φυσικές δράσεις που αποτελούν αφορμές ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών είναι οι καθοδικές κινήσεις της στεριάς και άλλοι γεωλογικοί παράγοντες. Επίσης οι κλιματικές μεταβολές που προκαλούν εν μέρει την μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας που προκαλείται από τήξη παγετώνων αφού η στάθμη ανυψώνεται κατά 1m τον αιώνα και αν λάβουμε υπόψιν μας και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η άνοδος της σημερινής στάθμης της θάλασσας είναι κάτι περισσότερο από σίγουρη.

Ανθρωπογενείς

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, από το 2000 έως το 2005 οι βροχές ήταν κατά 25% περισσότερες, σε σχέση με το διάστημα 1995-2000 και κατά 62% περισσότερες, σε σχέση με το διάστημα 1990-1995. Ωστόσο, όπως διαπιστώνεται, η θάλασσα εισχωρεί με έντονους ρυθμούς και τα αποθέματα νερού μειώνονται επικίνδυνα από την αλόγιστη χρήση που γίνεται από τις ανθρώπινες δράσεις που προκαλούν ελάττωση των υδραυλικών φορτίων, και είναι κατά κύριο λόγο οι υπεραντλήσεις υπόγειων νερών, καθώς και όλα τα είδη τεχνικών έργων που λειτουργούν αποστραγγιστικά (π.χ. αποστραγγιστικό δίκτυα σε δέλτα ποταμών και σε παραθαλάσσιες πεδινές ζώνες). Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν τα αποστραγγιστικά και αντιπλημμυρικά έργα στο Δέλτα του Νέστου. Ακόμα τα οποιασδήποτε μορφής ανθρώπινα έργα που προκαλούν ελάττωση της κατείδυσης από την επιφάνεια του εδάφους, μείωση της διήθησης από τις κοίτες των ποταμών και χειμάρρων (αντιπλημμυρικά έργα, εγκιβωτισμοί υδατορευμάτων, ασφαλτοστρώσεις, φράγματα, τεχνικοί ταμιευτήρες κ.α.).

Προβλήματα δημιουργούνται από την ανάσχεση της υπόγειας ροής όπως τα τεχνικά

έργα (υπόγεια διαφράγματα, βαθιές θεμελιώσεις κ.α. Επίσης είναι γνωστό ότι ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται κατά 96 εκατομμύρια το χρόνο. Έτσι έχουν διαμορφωθεί τρεις εναλλακτικά σενάρια, σχετικά με την μελλοντική αύξηση του πληθυσμού της Γης. Η πιο πιθανή προοπτική, είναι το 2050 ο πληθυσμός της γης να φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια. Ενώ σύμφωνα με την πλέον απαισιόδοξη προοπτική θα φθάσει τα 12,5 δισεκατομμύρια. Οι αριθμοί αυτοί παίρνουν άλλες διαστάσεις όταν ληφθεί υπόψη ότι το 1930 ο πληθυσμός της Γης δεν ξεπερνούσε τα 2 δις και το 1975 τα 4 δις. Εάν στους προηγούμενους αριθμούς λάβουμε υπόψη και το φαινόμενο της αστυφιλίας, τότε γίνεται αντιληπτό ότι οι απαιτήσεις σε νερό θα είναι ακόμα μεγαλύτερες. Επίσης οι παράκτιες περιοχές παντού στον κόσμο παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού και πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες. Στην χώρα μας η άνοδος του βιοτικού επιπέδου, η ανάπτυξη και εντατικοποίηση της γεωργία σε πεδιάδες παραθαλάσσιες συνοδευόμενη από αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και γεωργικών φάρμακων που έγιναν αιτία εμφάνισης νιτρικών αλάτων και άλλων ρυπαντών καθώς και η ανάπτυξη του τουρισμού έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των υδατικών αναγκών σε υπόγειο νερό που οδηγούν σε υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων με συνέπεια τον μηδενισμό ή και την αναστροφή των υδραυλικών κλίσεων του και τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς προκαλώντας την υφαλμύρωση των αποθεμάτων που καθίστανται ακατάλληλα για οποιαδήποτε χρήση.

6.3.6 Επιπτώσεις της υφαλμύρωσης

Η άντληση υπόγειου νερού σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές μετακινεί τη διεπιφάνεια (ή μεταβατική ζώνη) που σχηματίζεται ανάμεσα στο υπόγειο γλυκό νερό και το νερό της θάλασσας. Το υπόγειο μέτωπο του θαλασσινού νερού προωθείται προς την ξηρά (εισχώρηση θαλασσινού νερού) και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό (υφαλμύριση) ή ακόμη και θαλασσινό νερό. Ανάλογα φαινόμενα παρατηρούνται σε υδροφορείς που γειτνιάζουν με άλλους υδροφορείς που περιέχουν νερό χαμηλότερης ποιότητας. Η ταπείνωση της στάθμης των φρεάτιων υδροφορέων και η αφαίρεση σημαντικών ποσοτήτων νερού από περιορισμένους υδροφορείς μπορεί να προκαλέσει καθιζήσεις των εδαφών, δεδομένου ότι το βάρος των υπερκείμενων υλικών εξισορροπείται σε μεγαλύτερο βαθμό από δυνάμεις που αναπτύσσονται στο στερεό ιστό του εδαφικού υλικού, αφού η υδραυλική πίεση μειώνεται.

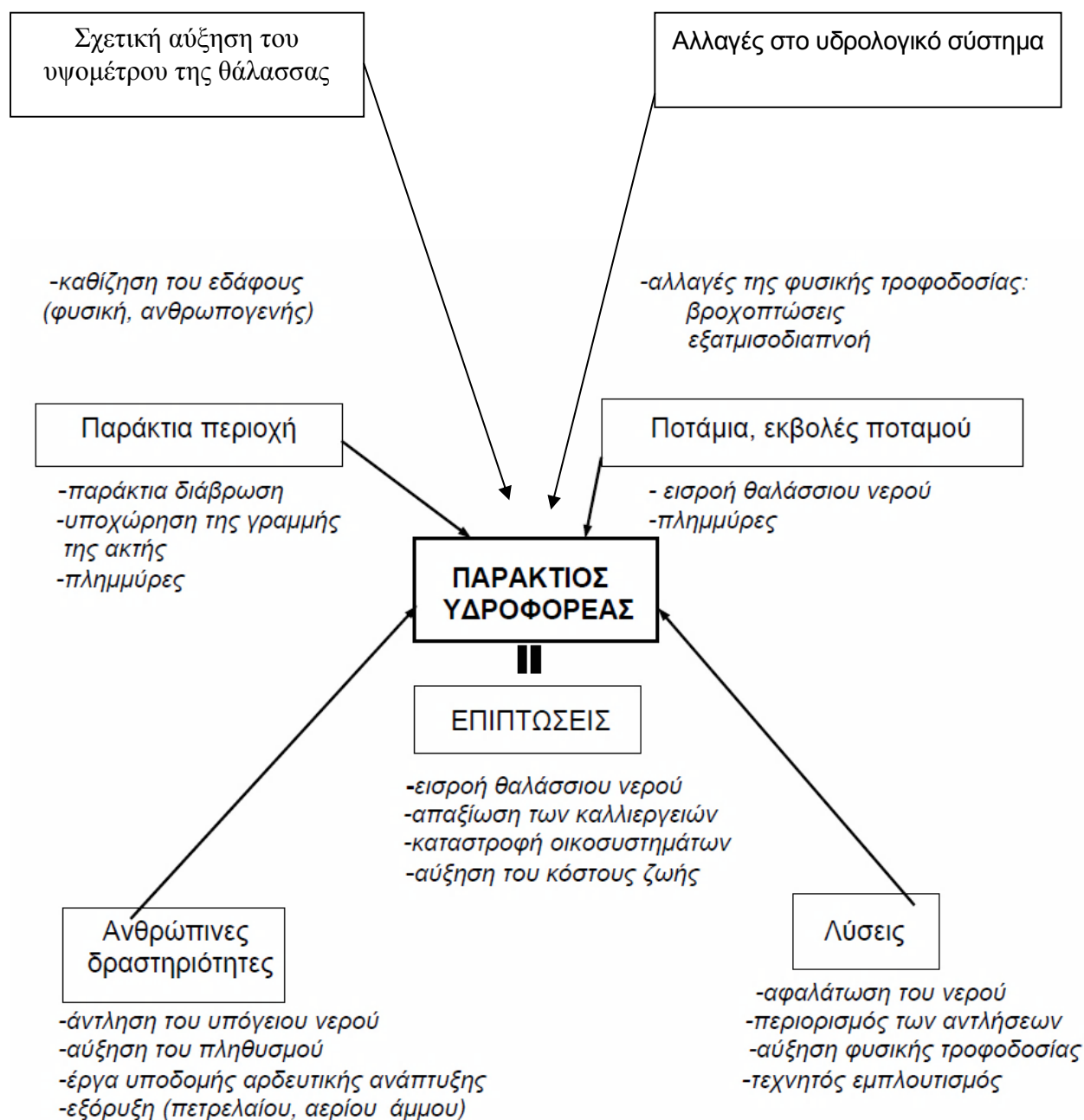
Γενικά το υφάλμυρο νερό χαρακτηρίζεται ακατάλληλο τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση ενώ οι επιπτώσεις του στην υγεία των καταναλωτών έχουν να κάνουν με την καρδιά και το κυκλοφορικό σύστημα. Από υδρευτικής απόψεως για την Μήλο που είναι τουριστική, με μεγάλο αριθμό εποχικών επισκεπτών και αυξημένες υδρευτικές απαιτήσεις που καλύπτονται από τα υπόγεια νερά, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των

υδροφορέων καθιστά προβληματική και ελλειμματική την ύδρευση. Η έλλειψη αυτή οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω των δαπανηρών λύσεων (εμφιαλωμένο νερό, έργα υδροδότησης κ.α.) ή στην υποβάθμιση του βιοτικού επιπέδου των μόνιμων κατοίκων. Αύξηση του κόστους ζωής αλλά και των ενγενών δυσκολιών παρατηρείται και για τους τουρίστες με αποτέλεσμα τη μείωση της δυναμικής οικονομικής εκμετάλλευσης της περιοχής, μείωση της εισροής νέων επενδυτικών κεφαλαίων και του αριθμού των τουριστών αφού καθίσταται λιγότερο ανταγωνιστική συγκρινόμενη με άλλες τουριστικές περιοχές εντός και εκτός της Ελληνικής επικράτειας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μείωση του εισοδήματος των κατοίκων και περαιτέρω υποβάθμιση του βιοτικού τους επιπέδου μέσα από έναν φαύλο κύκλο αύξησης του κόστους ζωής. Από αρδευτικής απόψεως τα προβλήματα που προκαλούνται είναι πολλαπλά διότι παρουσιάζεται έλλειψη ικανής ποσότητας νερού, λόγω της έλλειψης έργων υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης, όπως τα έργα εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδατικών πόρων, γεγονός που οδηγεί στην ποσοτικά ελλειμματική άρδευση και στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο ή ακάθαρτο νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητας τους, την πτώση της αξίας της γης, της αύξησης του κόστους των παραγόμενων προϊόντων, την μείωση της ανταγωνιστικότητας τους, την μείωση του όγκου των πωλήσεων, την μείωση των εισοδημάτων των αγροτών και την υποβάθμιση του βιοτικού τους επιπέδου. Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών αναγκάζει τους καλλιεργητές είτε να αντισταθμίζουν ποσοτικά (χρησιμοποιώντας περισσότερο νερό) την ποιοτική υποβάθμιση του νερού είτε να χρησιμοποιούν μεγαλύτερα και δραστικότερα βελτιωτικά (λιπάσματα). Το γεγονός της αύξησης των εξόδων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του εισοδήματος τους ή στην προσπάθεια αποκατάστασης των εσόδων τους, την αύξηση της τιμής των προϊόντων που μειώνει την ανταγωνιστικότητά τους. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να οδηγήσει τους κατοίκους να επιλέξουν για απασχόληση τους την τουριστική ανάπτυξη του τόπου τους, η οποία είναι και άμεσα αποδοτική, παρά τα προβλήματα που προαναφέρθηκαν και όχι την παραδοσιακή γεωργική ανάπτυξη, η οποία και επισφαλής είναι αλλά και απαιτεί μεγάλης κλίμακας έργα για την εξασφάλιση ικανών ποσοτήτων αρδευτικού νερού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ολοένα μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης (περίπου 15% κατά την τελευταία δεκαετία) και την επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης. Τέλος, στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο, λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας, προκαλεί σημαντικά προβλήματα στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως αύξηση των ρυθμών εμφάνισης βλαβών με επακόλουθη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής, μείωση της παροχетеυτικής ικανότητας των αγωγών, αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και του βαθμού αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας του. Υπάρχει επομένως ένα όριο ασφαλείας, το οποίο λέγεται ασφαλής απόδοση και ορίζεται ως η ετήσια ποσότητα νερού που μπορεί να αποληφθεί χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα (Todd, 1959). Άλλες επιπτώσεις είναι :

- Ταπείνωση της στάθμης των φρεάτιων οριζόντων ή της πίεσης των περιορισμένων υδροφορέων αυξάνοντας το κόστος άντλησης σε γραμμική αναλογία καθιζήσεις εδαφών, δεδομένου ότι το βάρος των υπερκείμενων υλικών εξισορροπείται σε μεγαλύτερο βαθμό από δυνάμεις που αναπτύσσονται στο στερεό ιστό του εδαφικού υλικού, αφού η υδραυλική πίεση μειώνεται.
- Ταπείνωση ενός φρεάτιου υδροφορέα από ένα κάτοχο γεώτρησης γεγονός που είναι πολύ πιθανό να οδηγήσει γειτονικές αβαθέστερες γεωτρήσεις σε αστοχία, δημιουργώντας ουσιαστικά και νομικά προβλήματα.
- Μείωση της επιφανειακής απορροής των ποταμών που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις απολήψεις επιφανειακού νερού.
- Μείωση της επιφανειακής ή υπόγειας τροφοδοσίας των λιμνών και των υγροτόπων οδηγεί σε μείωση της στάθμης και της έκτασής τους, πράγμα που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά τους και να περιορίσει τις τυχόν απολήψεις νερού από αυτά τα υδάτινα σώματα.
- Μείωση της εκροής υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα που μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς συνέπειες στα παράκτια οικοσυστήματα.
- Λόγω υπεράντλησης μετά από κάποιο χρονικό διάστημα αντλείται ποιοτικά υποβαθμισμένο νερό (υφαλμύρωση) ή ακόμα και θαλασσινό νερό.

Πολλές περιοχές της Ελλάδας αλλά και της υδρογείου έχουν υποστεί τις παραπάνω συνέπειες από την κακή εκμετάλλευση των υπόγειων νερών και η Σαντορίνη αποτελεί τυπικό παράδειγμα. Ωστόσο οι παραπάνω υδρολογικές επιπτώσεις και οι οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές και νομικές συνέπειές τους δεν είναι τόσο εύκολο να εκτιμηθούν σε μια "εφάπαξ" μελέτη, εξαιτίας της εμφανούς πολυπλοκότητας του όλου θέματος. Έτσι, η εκμετάλλευση των υπόγειων νερών απαιτεί συνεχή επιστημονική και τεχνική παρακολούθηση και διαρκή επανεκτίμηση των όρων, συνθηκών και έργων εκμετάλλευσης. Άλλωστε και το ίδιο το μέγεθος της ασφαλούς απόδοσης δεν μπορεί να είναι εξ αρχής γνωστό, αλλά η εκτίμησή του διαρκώς βελτιώνεται, παράλληλα με την αξιοποίηση των υπόγειων νερών (Κουτσογιάννης- Ξανθόπουλος,1999).

Επιπτώσεις του φαινομένου της υφαλμύρωσης



Σχήμα 6.4 Επιπτώσεις φαινομένου υφαλμύρωσης

6.3.7 Μέτρα προστασίας - Αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης

Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν προκειμένου να εξαλειφτεί ή έστω να περιοριστεί σε όσο μεγαλύτερο βαθμό γίνεται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης είναι:

- Επιβολή υδατικής πολιτικής και ορθολογικής διαχείρισης.
- Χαμηλότοκο χρηματοδοτικό πρόγραμμα και υπηρεσία διαχείρισης του, για την κάλυψη όλων των απαιτούμενων αγορών και την υλοποίηση των εγχειρημάτων στα πλαίσια της επίτευξης των στόχων.
- Για τους υπόγειους υδροφόρους που έχουν ήδη υφαλμυρωθεί κατασκευή υδραυλικών φραγμών γλυκού νερού κοντά στην ακτή και γενικότερα επιβολή σωστής διαχείρισης για την αποκατάσταση της διαταραγμένης ισορροπίας γλυκού - αλμυρού νερού.
- Την προστασία των υδατικών πόρων από την πρόωρη εξάντληση και υφαλμύριση.
- Παρακολούθηση και έλεγχος της λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων, παρέμβαση και διακοπή λειτουργίας στο καθεστώς υπερεκμετάλλευσης και στα μη εγκεκριμένα υδροληπτικά έργα καθώς και επιβολή αυστηρών κυρώσεων στους παραβάτες.
- Ένα διαχειριστικό πρόγραμμα για την συστηματική παρακολούθηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των διαθέσιμων υδατικών πόρων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.
- Σχεδιασμός και εκτέλεση έργων σύλληψης αποθήκευσης και διανομής του νερού με κύριο στόχο την αξιοποίηση των επιφανειακών απορροών
- Να απαγορευθεί η τσιμεντόστρωση και η ασφαλτόστρωση υδατορεμάτων γιατί με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η επιφανειακή απορροή σε βάρος της κατείσδυσης και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδροφόρων.
- Την προμήθεια με νερό σε επαρκή ποσότητα και όσο το δυνατόν ικανοποιητική ποιότητα, ανάλογα με τις χρήσεις (ύδρευση άρδευση, τουρισμός).
- Δημιουργία προϋποθέσεων για την αντιμετώπιση ακραίων υδρογεωλογικών φαινομένων
- Προσπάθεια ευαισθητοποίησης του κοινωνικού συνόλου με στόχο την αλλαγή στην νοοτροπία του κοινωνικού συνόλου όσον αφορά τη χρήση των υδατικών πόρων.
- Η εφαρμογή μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού με κατάκλυση ή με

γεωτρήσεις εμπλουτισμού ως μέσον ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης, έτσι έχουμε μια αύξηση της υδραυλικής κλίσης στην περιοχή εμπλουτισμού και μια αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς την κατεύθυνση της θάλασσας στην περιοχή ανάμεσα στις γεωτρήσεις άντλησης και τη θάλασσα

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που εμπλέκονται στο εφαρμόσιμο ή μη μιας μεθόδου προστατευτικής των υπόγειων νερών από τη θαλάσσια διείσδυση όπως το κόστος, η διαθεσιμότητα, το νομικό καθεστώς, οι απαιτήσεις για την ύπαρξη αποχέτευσης και ισορροπίας των αλάτων, οι δυνατότητες συντήρησης των πλημμυρικών απορροών η αποθηκευτική ικανότητα κ.α. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα πρέπει να αξιολογηθούν, όταν σκοπεύουμε να επιλέξουμε την μέθοδο που παρέχει τα περισσότερα πλεονεκτήματα για τον έλεγχο της θαλάσσιας διείσδυσης. Η μελέτη των παραγόντων αυτών (φυσικών και τεχνητών) που διαταράσσουν την υδραυλική ισορροπία της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού είναι το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό μιας επιτυχούς μεθόδου ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης. (Διαμαντής - Πεταλάς - Πλιάκας)

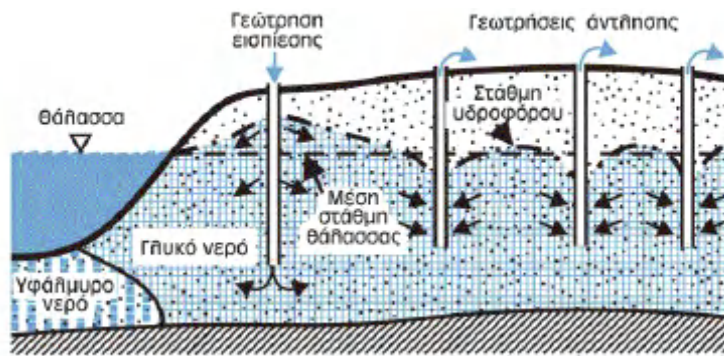
6.3.8 Τεχνητός εμπλουτισμός

Γενικά

Σε μια λεκάνη ή περιοχή, υπό φυσικές συνθήκες, χωρίς παρέμβαση του ανθρώπου, το νερό των κατακρημνισμάτων που φθάνει στα υδροφόρα στρώματα και τα τροφοδοτεί, είτε άμεσα με την κατείσδυση, είτε έμμεσα με τη διήθηση από τις κοίτες του υδρογραφικού δικτύου, είναι ο φυσικός εμπλουτισμός. Το ύψος του είναι ορισμένο κάθε υδρολογικό έτος και εξαρτάται από τη γεωλογική σύσταση, από το βροχομετρικό ύψος και το βροχομετρικό σύστημα (ετήσια κατανομή της βροχής). Ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα να αυξήσει την ποσότητα αυτή του νερού, να προκαλέσει δηλαδή «τεχνητό εμπλουτισμό». Επομένως ως τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την αύξηση των ποσοτήτων μετεωρικού νερού που εισέρχεται στα υδροφόρα στρώματα με χρήση διαδικασιών, τεχνικών, εγκαταστάσεων - διατάξεων από τον άνθρωπο. Στην πιο ευρεία έννοια θα λέγαμε ότι τεχνητός εμπλουτισμός είναι η εισαγωγή πρόσθετων ποσοτήτων νερού στα υδροφόρα στρώματα. Το πρόσθετο αυτό νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακό νερό ή από νερό από παρακείμενα υδροφόρα στρώματα.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνητού εμπλουτισμού.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός έχει πολλές θετικές επιπτώσεις καθώς συντελεί στη βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, στη προστασία της ύπαρξης και της λειτουργίας πηγών και υγροτόπων, στην αποφυγή συνίζησης και άρα ποσοτικής υποβάθμισης υδροφορέων, στην αποφυγή ή αναχαίτιση δεισδυσσης θαλασσινού νερού στα παράκτια υδροφόρα στρώματα. Επίσης οι υπόγειοι ταμιευτήρες δεν διατρέχουν τους κινδύνους φυσικών καταστροφών των επιφανειακών ταμιευτήρων (κατολισθήσεις, πλημμύρες, άμεσες μολύνσεις κλπ). Δεν αχρηστεύεται λόγω υπεράντλησης τυχόν υπάρχουσα υποδομή από γεωτρήσεις, αγωγούς κλπ. Μειώνονται οι απώλειες νερού από εξατμίσεις. Όμως εκτός από πλεονεκτήματα υπάρχουν και μειονεκτήματα, απαιτείται συνεχής και επιμελής παρακολούθηση των συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού. Υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης - ρύπανσης υπόγειου νερού, αν έστω και μια φορά, χρησιμοποιηθεί μολυσμένο-ρυπασμένο νερό. Δεν συναντώνται συχνά στη φύση κατάλληλες συνθήκες υπό οικονομικά συμφέροντες όρους για εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού. Συχνά παρατηρείται υποβάθμιση της αποδοτικότητας του εδάφους και υποβάθμιση του υπόγειου νερού, που προκαλείται από τον τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων, λόγω μεταφοράς αλάτων κατά την επέκταση προς τα πάνω της κορεσμένης ζώνης.



Σχήμα 6.5 Δημιουργία φραγμού από το τεχνητό εμπλουτισμό κοντά στην ακτή

6.4 Οι υφάλμυρες περιοχές στην Ελλάδα

Η Ελλάδα όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι μία χώρα που περιβάλλεται από θάλασσα στο μεγαλύτερο μέρος της, οπότε είναι αναμενόμενο να εμφανίζει προβλήματα με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς. Υφάλμυρες περιοχές συναντώνται στις περισσότερες ακτές και το φαινόμενο τείνει να πάρει ανησυχητικές ως δραματικές διαστάσεις.

Η ανάμιξη του αλμυρού με το γλυκό νερό οφείλεται και σε γεωλογικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η διάλυση των πετρωμάτων που φιλοξενούν το υπόγειο νερό. Κύρια όμως αιτία είναι η υπεράντληση των υδάτων στις περισσότερες παράκτιες περιοχές, οι οποίες είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένες συγκριτικά με την ενδοχώρα.

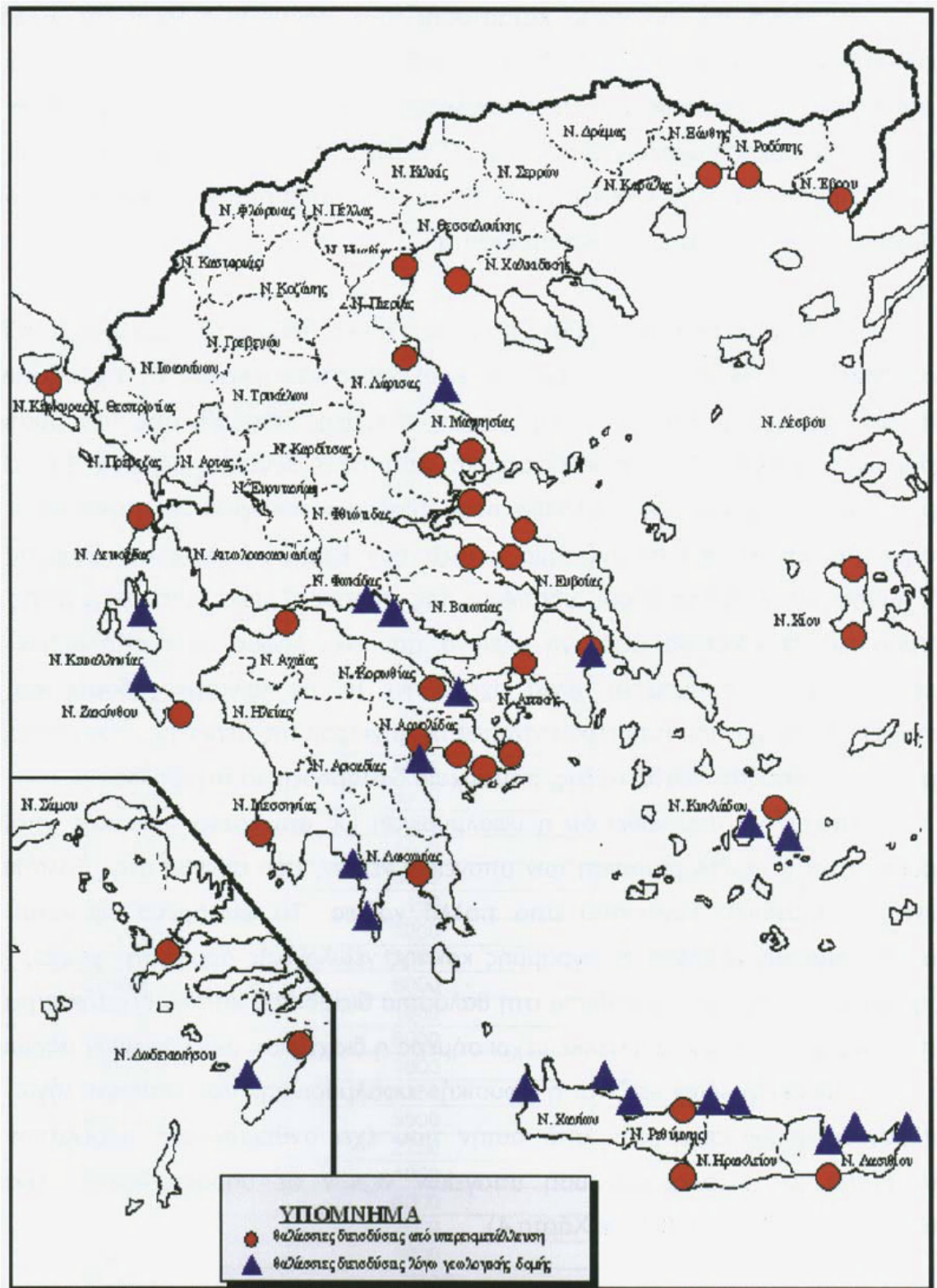
Στην Ελλάδα η υφαλμύρωση οφείλεται και στους δύο παραπάνω παράγοντες, αν και η υπεράντληση εντείνει σε μεγαλύτερο βαθμό το πρόβλημα. Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται ο χάρτης της Ελλάδας, στον οποίο έχουν σημειωθεί με κόκκινο κύκλο οι περιοχές της χώρας που παρουσιάζουν φαινόμενα υφαλμύρωσης λόγω της υπεράντλησης. Με μπλε τρίγωνο συμβολίζονται οι περιοχές, στις οποίες το φαινόμενο της υφαλμύρωσης οφείλεται σε γεωλογικά αίτια.

Όσον αφορά την καταγραφή του φαινομένου στην Ελλάδα, για λόγους εποπτικούς αναλύονται οι υφάλμυρες περιοχές της ηπειρωτικής χώρας σε ξεχωριστό κεφάλαιο από τις υφάλμυρες περιοχές στα νησιά. Επίσης ο διαχωρισμός αυτός είναι χρήσιμος, πρώτον, επειδή το υδατικό ισοζύγιο είναι διαφορετικό στις νησιωτικές περιοχές, από ότι στην υπόλοιπη χώρα και δεύτερον επειδή οι λόγοι που προκαλούν το φαινόμενο στα νησιά παρουσιάζουν συχνά κάποιες ιδιαιτερότητες.

6.4.1 Υφάλμυρες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας

Στην ηπειρωτική Ελλάδα η υφαλμύρωση των υπόγειων υδάτων διαπιστώθηκε για πρώτη φορά στο Αργολικό πεδίο στα τέλη της δεκαετίας του '50. Από τότε μέχρι και σήμερα η κατάσταση δεν έχει αντιμετωπιστεί ούτε καλύτερεύσει, καθώς το φαινόμενο αυτό συναντάται στις περισσότερες παράκτιες περιοχές της χώρας και απειλεί με ερημοποίηση την καλλιεργούμενη γη. Σε μία συνοπτική καταγραφή των υφάλμυρων περιοχών φαίνεται η πραγματική διάσταση του φαινομένου, που είναι ιδιαίτερα έντονο στις ανατολικές ακτές της Ελλάδας. Η αναφορά στις υφάλμυρες περιοχές γίνεται ξεχωριστά για κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα. Στη Θράκη και τη Μακεδονία, από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ως προβληματικές περιοχές χαρακτηρίζονται τα Δέλτα των ποταμών Έβρου, Νέστου και Λίτσου, γενικά η παράκτια περιοχή ανάμεσα στο Νέστο ως τη λίμνη Μητρικού και οι παράκτιες περιοχές της Νέας Καρβάλης, της Ελευθερούπολης και της Νέας Περάμου. Στη συνέχεια, ιδιαίτερα προβλήματα εμφανίζονται σχεδόν σε όλες τις ακτές της Χαλκιδικής, που

παρουσιάζουν έντονη τουριστική ανάπτυξη. Όσον αφορά τη λεκάνη του Ανθεμούντα, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της Αναπτυξιακής Εταιρείας Ανατολικής Θεσσαλονίκης «Ανατολική Α.Ε.» η στάθμη των υπόγειων νερών έχει κατέβει την τελευταία δεκαετία περισσότερο από δέκα μέτρα, ενώ το έλλειμμα νερού που παρουσιάζεται κάθε χρόνο είναι της τάξης των 17.400.000 m³. Σύμφωνα με έρευνες του ΙΓΜΕ η υφαλμύρωση έχει εισχωρήσει στο υπέδαφος του δρόμου Θεσσαλονίκης-Χαλκιδικής, ενώ ταυτόχρονα οι περιοχές πλησίον του δρόμου αναπτύσσονται ιδιαίτερα στο γεωργικό και τον κτηνοτροφικό τομέα και η οικιστική ανάπτυξη αυξάνεται επίσης ραγδαία. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η υπεράντληση των υδάτων, με φυσικό επακόλουθο, τα υδατικά προβλήματα, τα οποία αποτελούν τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτή. Στην Περαία, η υπεράντληση των υδάτων εικάζεται ότι επιδεινώνει τις καθιζήσεις του εδάφους που συμβαίνουν εκεί τα τελευταία χρόνια (Χαλβατζάκης, 1997, Χαλβατζάκης, 1999, Πουλόπουλος, 2000, Δεμερτζής, 2007, Κιούσης, 2007, Τσιγγανός, 2007).



Σχήμα 6.6 Υφάλμυρα υπόγεια νερά θαλάσσιας διεσόδους(πηγή:Πεγιαλιώτης και Παπαδάκου,1998)

Φαινόμενα υφαλμύρωσης των υδροφόρων στρωμάτων παρατηρούνται και στη δυτική πλευρά του Νομού Θεσσαλονίκης, στις βιομηχανικές περιοχές Σίνδου-Καλοχωρίου. Ο ποταμός Αξιός, εκτός από τη ρύπανση εξαιτίας υψηλών συγκεντρώσεων σιδήρου, ψευδαργύρου, μολύβδου, καδμίου, βαρίου, νικελίου, ουρανίου και αρσενικού εμφανίζει και ρύπανση λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αλάτων. Τέλος, προβλήματα εμφανίζονται και στην παράκτια ζώνη του Νομού Πιερίας (Μελαδιώτης, 2000, Δεμερτζής, 2007, Τσιγγανάς, 2007).

Στη Θεσσαλία, τα πλέον σοβαρά προβλήματα εμφανίζονται στο δέλτα του Πηνειού, στην περιοχή Ριζόμυλου Μαγνησίας και επεκτείνονται προς τη Λάρισα, στην πεδιάδα του Αλμυρού και στην περιοχή του Βόλου (Χαλβατζάκης, 1999, Κιούσης, 2007α, Χατζηευθυμίου, 2007, Εφημερίδα Καθημερινή της Κυριακής, 2007).

Στη Στερεά Ελλάδα, φαινόμενα υφαλμύρωσης παρατηρήθηκαν στη λεκάνη του Σπερχείου και στην περιοχή Πελασγίας στη Φθιώτιδα, ενώ σοβαρότατο πρόβλημα αντιμετωπίζει το λεκανοπέδιο της Αττικής. Στην Αττική προβληματικές περιοχές θεωρούνται οι ακόλουθες: Άγιοι Απόστολοι, Κάλαμος, κάμπος Μαραθώνα, περιοχή Μαρκόπουλου, Σπάτα, Βραυρώνα, Πόρτο Ράφτη, παραλιακή ζώνη από Σούνιο μέχρι Κορωπί, Αγία Μαρίνα, Βάρη, Βάρκιζα, Βουλιαγμένη, Βούλα. Επίσης οι περιοχές Γλυφάδα, Φάληρο, Καλλιθέα, Πειραιάς, Δραπετσώνα, Κερασίσι, Ασπρόπυργος, Ελευσίνα, Θριάσιο, Νέα Πέραμος και Μέγαρα (Χαλβατζάκης, 1997, Χαλβατζάκης, 1999, Παππά-Σουλούνια, 2005, Κιούσης, 2007β, Γεωργιοπούλου, 2007, Εφημερίδα Καθημερινή της Κυριακής, 2007).

Οι περιοχές της Πελοποννήσου που έχουν υποστεί υφαλμύρωση εκτός από το Αργολικό πεδίο είναι οι βόρειες παραλιακές ακτές της από την Κορινθία ως την Αχαΐα και ιδίως η βόρεια και βορειοανατολική Κορινθία και η βόρεια και βορειοδυτική Αχαΐα. Επίσης συναντώνται προβλήματα στην περιοχή της Ερμιόνης και το Πόρτο Χέλι. Στην Καλαμάτα το πρόβλημα είναι υπαρκτό αλλά όχι τόσο έντονο, ενώ υφαλμύρωση έχει διαπιστωθεί και στην Τριφυλία. Τέλος, ως υφάλμυρες αναφέρονται και οι περιοχές Αστέρος και Λεωνίδιο (Χαλβατζάκης, 1999, Γεωργιοπούλου, 2003, Κιούσης, 2007, Κοντοθανάσης, 2007).

Στη Δυτική Ελλάδα και κυρίως στην Ήπειρο υπαρκτό πρόβλημα υπάρχει στο Νομό Θεσπρωτίας, στις περιοχές Σαγράδα, Πλασταριά και στα Σίβα, ενώ στο Νομό Πρέβεζας υφάλμυρες ακτές συναντώνται ανάμεσα στην πόλη της Πρέβεζας και τη Νικόπολη. Αξίζει να σημειωθεί ότι υφάλμυρα υπόγεια και επιφανειακά νερά συναντώνται στις πηγές Σαντινίκου, Περάματος και Χανόπουλο και Περάνθη Άρτας, μόνο που η μεγάλη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου και νατρίου οφείλεται στην επαφή των υπόγειων υδροφορέων με δόμους ορυκτού άλατος (Νικολάου, 2005, Δεμερτζής, 2007).

Οι λόγοι που οδηγούν στην υφαλμύρωση οφείλονται περισσότερο στην εντατική καλλιέργεια των παράκτιων πεδιάδων και στην υπεράντληση των υδάτων εξαιτίας των πυκνοκατοικημένων παράκτιων περιοχών. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής δεν επηρεάζει σε τόσο μεγάλο βαθμό την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα.

6.4.2 Υφάλμυρες περιοχές της νησιωτικής Ελλάδας

Στη νησιωτική Ελλάδα η κατάσταση δεν είναι καλύτερη σε σχέση με την ηπειρωτική. Εδώ σε συνδυασμό με όλους τους παράγοντες που επιδεινώνουν την υφαλμύρωση, πρέπει να προσθεθεί το έντονο πρόβλημα επάρκειας των υδατικών πόρων που υπάρχει στα περισσότερα νησιά, ιδίως του Αιγαίου σε συνδυασμό με την έντονη τουριστική ανάπτυξη. Οι λιγοστές βροχοπτώσεις συνεπάγονται λιγοστά ανανεώσιμα αποθέματα νερού, οπότε η υπεράντληση των υδάτων αποτελεί μοναδική λύση, ειδικά στις παράκτιες περιοχές. Το αποτέλεσμα της περαιτέρω πτώσης του υδροφορέα είναι η υφαλμύρωση των λιγοστών υπόγειων νερών και το πρόβλημα κάποιες φορές αντιμετωπίζεται με αφαλάτωση του υφάλμυρου νερού.

Τα νησιά του Αιγαίου, στα οποία ανήκει και η περιοχή μελέτης μας, τα οποία εμφανίζουν εντονότερα προβλήματα με το υδατικό ισοζύγιο. Στο Αιγαίο πέλαγος γενικά το φαινόμενο παρατηρείται σχεδόν σε όλους τους κάμπους των νησιών. Από το βόρειο Αιγαίο προς τις Κυκλάδες και τα Δωδεκάνησα, η υπεράντληση των υπόγειων νερών έχει δημιουργήσει τα σοβαρότερα προβλήματα υφαλμύρωσης στα νησιά Λέσβος, Χίος, Πάρος, Νάξος, Σάμος, Κως, και Ρόδος. Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί πως το φαινόμενο παρατηρείται επίσης στις Βόρειες Σποράδες και στην Εύβοια (Εφημερίδα Ημερησία, 2001, Γεωργιοπούλου, 2003).

Ανάλογα προβλήματα εμφανίζονται και στο Ιόνιο πέλαγος, όπου τα νησιά με υφάλμυρες περιοχές είναι η Κεφαλονιά με έμφαση στις περιοχές του Αργοστολίου και της Σάμης, η Ιθάκη, η Ζάκυνθος και η Κέρκυρα (Χαλβατζάκης, 1997).

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και το νησί της Κρήτης, στο οποίο παρουσιάζονται σοβαρά προβλήματα υφαλμύρωσης, κυρίως στο βόρειο τμήμα του νησιού. Σε κάποιες από τις περιοχές της Κρήτης, η υφαλμύρωση οφείλεται σε γεωλογικούς παράγοντες, σε άλλες όμως οι ανθρωπογενείς παράγοντες είναι η αιτία του φαινομένου. Η περιοχή της Μεσσαράς κρίνεται η πλέον προβληματική από πλευράς ποσότητας αλλά και ποιότητας των υπόγειων νερών, ενώ έχουν σημειωθεί και αρκετές καθιζήσεις

6.4.3 Επισκόπηση προβλήματος υφαλμύρωσης στην Ελλάδα

Η υφαλμύρωση είναι ένα γενικό φαινόμενο για την Ελλάδα, λόγω του μεγάλου μήκους της ακτογραμμής της και τείνει να εξελιχθεί σε ένα μεγάλο πρόβλημα. Η έκταση της υφαλμύρωσης είναι σημαντική και το αλμυρό νερό έχει διεισδύσει στα περισσότερα παράκτια υδροφόρα στρώματα της ηπειρωτικής, αλλά και της νησιωτικής χώρας. Στο παρόν κεφάλαιο ερευνώνται οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο και είναι διαφορετικές από περιοχή σε περιοχή.

Αρχικά η υφαλμύρωση, λόγω του ότι εξαρτάται από την υπεράντληση των υδάτων στη στεριά πλησίον της ακτής, σχετίζεται με όλους τους παράγοντες που προκαλούν την υπεράντληση αυτή. Τέτοιες ανθρωπογενείς δραστηριότητες είναι οι εντατικές καλλιέργειες, η άντληση των υδάτων για χρήση στη βιομηχανία, η έντονη αστικοποίηση που συνεπάγεται μεγάλες ποσότητες νερού για ύδρευση, αλλά και η μειωμένη κατείσδυση του νερού λόγω της τσιμεντοποίησης των πόλεων. Επίσης, υπάρχουν και γεωλογικοί-κλιματολογικοί παράγοντες που εντείνουν το φαινόμενο, όπως η ύπαρξη γεωλογικών σχηματισμών με τους οποίους αντιδρά το γλυκό νερό και εμπλουτίζεται σε άλατα και επίσης, οι μειωμένες βροχοπτώσεις σε συγκεκριμένες περιοχές της χώρας.

Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται οι πιο χαρακτηριστικές περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας που έχουν υποστεί το φαινόμενο της υφαλμύρωσης σε συνδυασμό με τους κυριότερους παράγοντες που το προκαλούν. Ανάλογα στον Πίνακα 6.3 φαίνονται οι υφάλμυρες νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας, σε συνδυασμό πάντα με τις αιτίες που οφείλονται για το φαινόμενο.

	Αστικοποίηση- Τουρισμός	Εντατική καλλιέργεια	Βιομηχανική παραγωγή	Μειωμένες βροχοπτώσεις	Γεωλογικοί παράγοντες
Παράκτιες περιοχές Θράκης		✓	✓		
Χαλκιδική	✓				
Αν. Θεσ/νικη	✓	✓			
ΒΙ.ΠΕ Δ. Θεσ/νικης			✓		
Θεσσαλικός κάμπος		✓			✓
Λεκανοπέδιο της Αττικής	✓	✓	✓	✓	
Αργολικό πεδίο		✓			

Πίνακας 6.2 Οι κυριότερες υφάλμυρες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας σε συνδυασμό με τια αιτίες που προκαλούν υπεράντληση-υφαλμύρωση

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.2 γίνεται αντιληπτό πως το πρόβλημα της υφαλμύρωσης οφείλεται κυρίως στην εντατική καλλιέργεια των πεδιάδων που βρίσκονται στις παράκτιες περιοχές, όπως για παράδειγμα στον κάμπο της Θεσσαλίας.

Η έντονη αστικοποίηση επηρεάζει κυρίως τις περιοχές γύρω από την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη που είναι οι δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας. Στη Χαλκιδική, ο παράγοντας που προκαλεί την υπεράντληση είναι η έντονη τουριστική κίνηση που υπάρχει τους θερινούς κυρίως μήνες και είναι υπεύθυνη για τη ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και συγχρόνως και των υδατικών αναγκών.

Παράγοντες όπως η βιομηχανική παραγωγή ή οι γεωλογικές συνθήκες ευθύνονται για το φαινόμενο της υφαλμύρωσης, σε τοπικό κυρίως επίπεδο.

	Αστικοποίηση- Τουρισμός	Εντατική καλλιέργεια	Βιομηχανική παραγωγή	Μειωμένες βροχοπτώσεις	Γεωλογικοί παράγοντες
Νησιά Αιγαίου	✓			✓	
Νησιά Ιονίου	✓	✓			✓
Κρήτη	✓		✓		✓

Πίνακας 6.3 Οι κυριότερες υφάλμυρες περιοχές της νησιωτικής Ελλάδας σε συνδυασμό με τια αιτίες που προκαλούν υπεράντληση-υφαλμύρωση

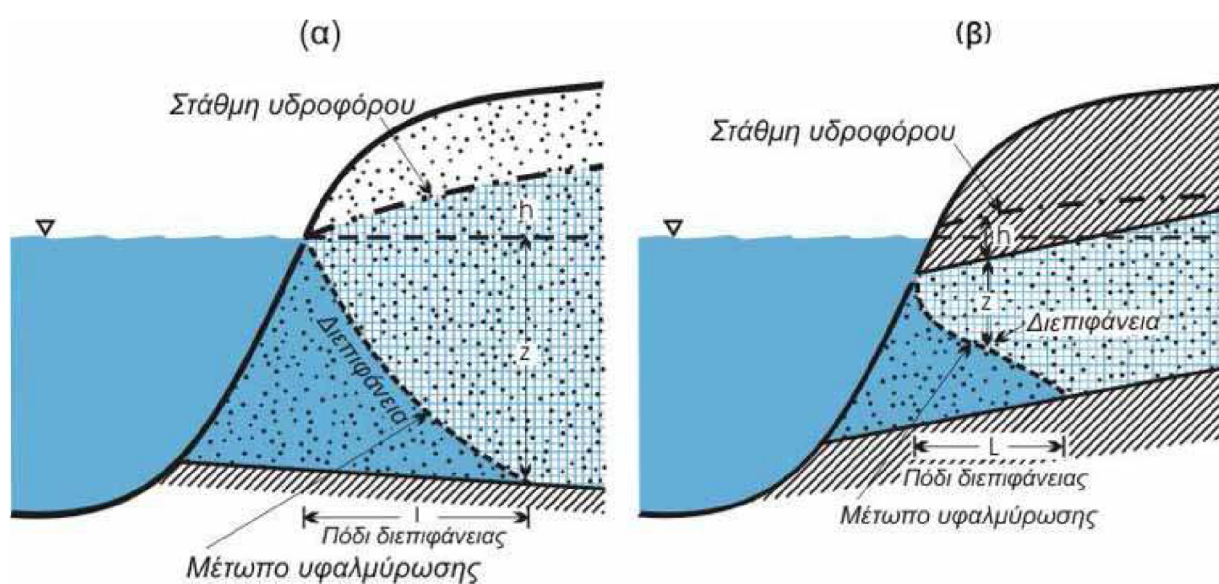
Στα νησιά οι αιτίες της υπεράντλησης οφείλονται κυρίως στον τουρισμό, που το καλοκαίρι αυξάνει τον αριθμό των κατοίκων στις παράκτιες περιοχές. Στο Αιγαίο Πέλαγος η κατάσταση είναι ιδιαίτερα σοβαρή σε συνδυασμό με το γεγονός πως οι βροχοπτώσεις είναι ιδιαίτερα μειωμένες. Η έλλειψη υδατικών πόρων σχετίζεται άμεσα με την υπεράντληση των ήδη υπαρχόντων αποθεμάτων και συνεπώς με την υφαλμύρωση.

Στο Ιόνιο Πέλαγος η υφαλμύρωση οφείλεται και σε γεωλογικούς παράγοντες, όπως παραδείγματος χάρη στα νησιά Κεφαλλονιά και Ζάκυνθος. Το ίδιο συμβαίνει και με την Κρήτη, όπου στο βόρειο κυρίως κομμάτι της η υφαλμύρωση οφείλεται σε γεωλογικά αίτια. Η υπεράντληση υδάτων για χρήση στη βιομηχανία εντείνει το πρόβλημα σε τοπικό μόνο επίπεδο.

Γενικά, η υπεράντληση των υδάτων οφείλεται σε διάφορα αίτια που δρουν όλα μαζί ή αποσπασματικά, με αποτέλεσμα την επιδείνωση της υφαλμύρωσης. Το πρόβλημα έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις και χρήζει άμεσης προσοχής και αντιμετώπισης.

6.5 Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού

Το γλυκό νερό, εμφανίζει μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με το αλμυρό και επιπλέει πάνω σε αυτό σχηματίζοντας μια διεπιφάνεια ανάμεσά τους. Η διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού, έχει τη μορφή μιας κυρτής καμπύλης, η οποία σχηματίζεται λόγω της υποκείμενης αλάτινης σφήνας και της ροής του γλυκού νερού. Χαρακτηριστικά σημεία είναι το χείλος, δηλαδή το σημείο τομής της διεπιφάνειας με την επιφάνεια της θάλασσας και το πόδι της αλάτινης σφήνας, δηλαδή το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα.



Εικόνα 6.6 Ζώνη διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού σε (α) ελεύθερο και (β) υπό πίεση υδροφόρο στρώμα

Για την αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος χρησιμοποιούνται δύο προσεγγίσεις. Η μια έχει να κάνει με το να θεωρηθεί η διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού ως πεπερασμένου πάχους λόγω υδροδυναμικής διασποράς. Η δεύτερη ονομάζεται θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, που χρησιμοποιείται όταν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σύγκριση με εκείνο του υδροφορέα.

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

Στη δεύτερη περίπτωση όπου θεωρείται απότομη διεπιφάνεια, το πρόβλημα έχει δύο διαστάσεις που εξαρτώνται από τις συνθήκες ροής. Σε αδιατάρακτες συνθήκες, η ροή

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

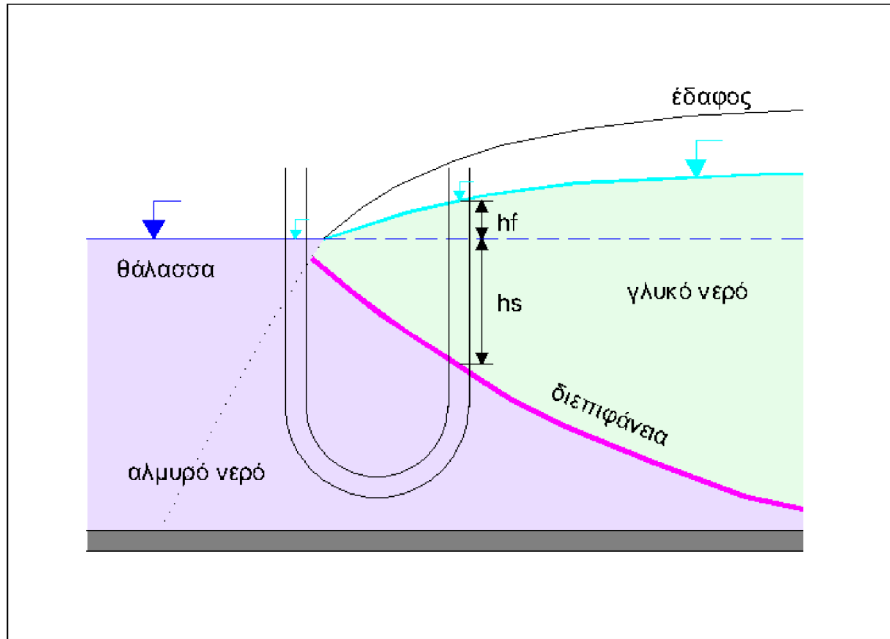
6.5.1 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Η προσέγγιση των Ghyben-Herzberg αποτελεί μία απλή αναλυτική λύση εντοπισμού της θέσης της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού. Αν και έχει βρεθεί-αποδειχθεί πάνω από έναν αιώνα πριν, παραμένει ακόμα γενικώς παραδεκτή και τα αποτελέσματά της θεωρούνται μία έγκυρη προσέγγιση του φαινομένου.

Οι Badon-Ghyben (1888) και Herzberg (1901), ξεχωριστά, ανακάλυψαν ότι η στάθμη του θαλασσινού νερού που υπάρχει υπογείως στο έδαφος, δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας (0 μέτρα) όπως αναμενόταν, αλλά κάτω από αυτό, σε βάθος περίπου 40 φορές μεγαλύτερο από το φορτίο του γλυκού νερού που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη με το όνομα Ghyben-Herzberg. Τα πιεζομετρικά φορτία στις ζώνες αλμυρού και γλυκού νερού h_s και h_f αντίστοιχα), δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z \quad (7.1)$$

$$h_f = \frac{p}{\rho_f g} + z \quad (7.2)$$



Σχήμα 6.7 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

όπου p είναι η πίεση των πόρων, h_s και h_f είναι η πυκνότητα αλμυρού και γλυκού νερού αντίστοιχως και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήσαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως 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 προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η γνωστή παραδοχή Dupuit. Ορίζοντας h_f το ύψος γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και h_s τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν και γ_f , γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού αντίστοιχα και δ το λόγο $\gamma_f/(\gamma_s-\gamma_f)$, ισχύει:

$$h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} \cdot h_f \equiv \delta h_f$$

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z \quad \text{και} \quad h_f = \frac{p}{\rho_f g} + z$$

Οι πυκνότητες ρ_s και ρ_f του αλμυρού και γλυκού νερού αντίστοιχα λαμβάνονται με τις τιμές $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_f = 1 \text{ gr/cm}^3$. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται ότι $h_s = 40h_f$.

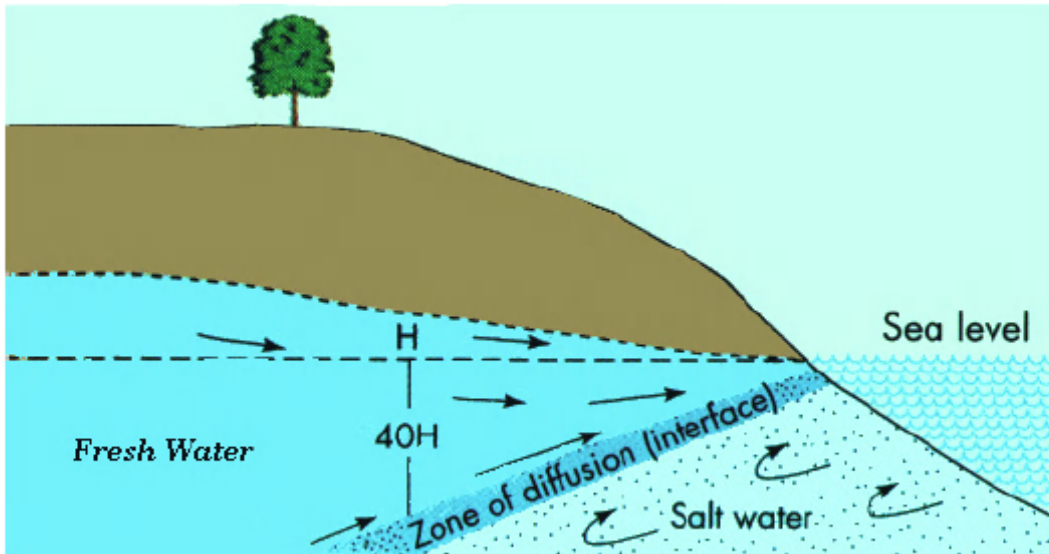
Η χρήση της εξίσωσης Ghyben - Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, ως εξής:

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

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

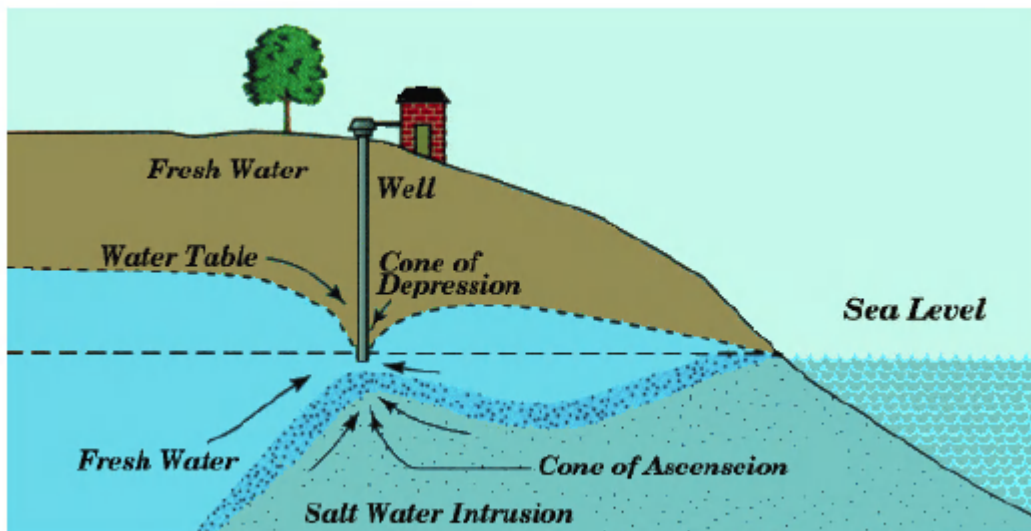
- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται διέξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού συνήθως δεν είναι ακίνητη,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

Στα Σχήματα 6.8 και 6.9 φαίνεται η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας και η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή λόγω διείσδυσης της θάλασσας στους παράκτιους υπόγειους υδροφορείς, αντίστοιχα, σύμφωνα με το νόμο των Ghyben-Herzberg.



Σχήμα 6.8 Η επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό στη ζώνη της διεπιφάνειας

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

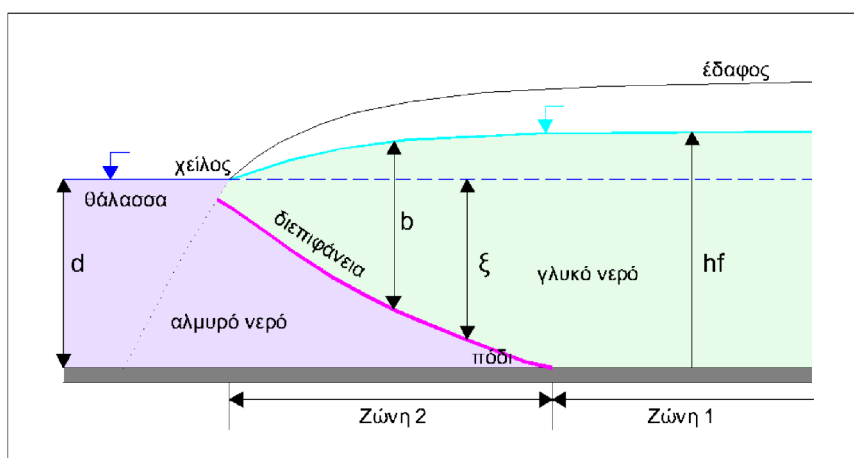


Σχήμα 6.9 Η άντληση υφάλμυρου νερού από γεώτρηση κοντά στην ακτή

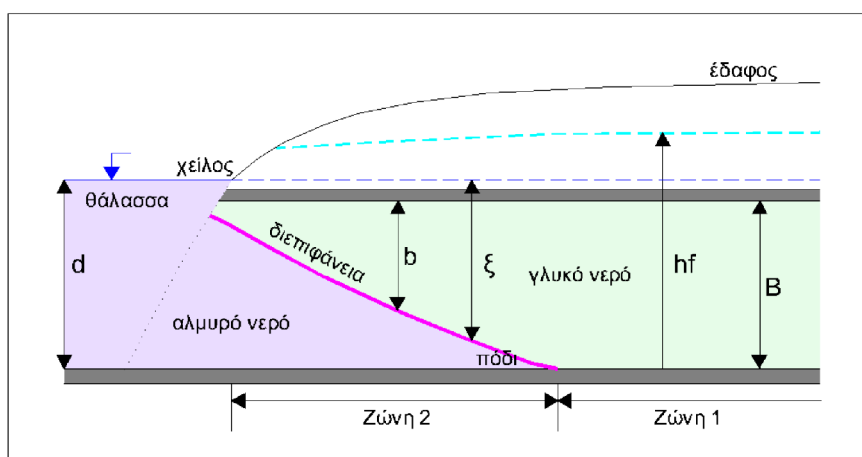
6.5.2 Λύση Strack

Ένας παράκτιος υδροφόρος ορίζοντας, έχει γενικά την μορφή που απεικονίζουν οι εγκάρσιες τομές των σχημάτων 6.8 και 6.9, στην περίπτωση ελεύθερου και περιορισμένου υδροφόρου ορίζοντα αντίστοιχα. Ο υδροφόρος ορίζοντας χωρίζεται σε δύο ζώνες:

- στην Ζώνη 1, η οποία αποτελεί την εσωτερική ζώνη, αφορά την ενδοχώρα, όπου υπάρχει μόνο γλυκό νερό και ο υδροφόρος συμπεριφέρεται σαν ένας τυπικός υδροφόρος ορίζοντας(και όχι παράκτιος) και
- στην Ζώνη 2, η οποία αποτελεί την εξωτερική ζώνη προς την θάλασσα, και στην οποία υπάρχει το γλυκό νερό του υδροφόρου επάνω από το αλμυρό νερό της θάλασσας.



Σχήμα 6.10 Φρεάτιος (ελεύθερος) υδροφορέας



Σχήμα 6.11 Περιορισμένος (υπό πίεση) υδροφορέας

Οι εξισώσεις που διέπουν τις δύο αυτές ζώνες είναι ως εκ τούτου διαφορετικές. Στην

περίπτωση ενός υδροφορέα που περιλαμβάνει και τις δύο αυτές ζώνες, η μαθηματική επίλυση του συστήματος αναμένεται ιδιαίτερα δυσχερής.

Ο Strack (1976) εισήγαγε την έννοια ενιαίου δυναμικού ϕ και για τις δύο ζώνες, ώστε να απαιτείται η επίλυση μιας μόνο εξίσωσης που ισχύει και για τις δύο ζώνες. Για το σχηματισμό της ενιαίας αυτής εξίσωσης αφενός υιοθετείται η παραδοχή Dupuit για την περίπτωση της ροής του γλυκού νερού και αφετέρου χρησιμοποιείται η σχέση Ghyben – Herzberg για να προσδιοριστεί το βάθος της διεπιφάνειας. Το φορτίο του γλυκού νερού εκφράζεται έτσι συναρτήσει μόνο των οριζόντιων συντεταγμένων, $h_f = h_f(x, y)$. Θεωρώντας ότι ο υδροφορέας είναι ομογενής, μπορεί τελικά να προκύψει μια εξίσωση που ισχύει και στις δύο ζώνες, σε περιορισμένους αλλά και ελεύθερους υδροφόρους:

$$\nabla \cdot (b \nabla h_f) = 0$$

όπου b είναι το πάχος του ανώτερου στρώματος με γλυκό νερό, το οποίο εξαρτάται από τη θέση $b = b(x, y)$. Το πάχος του ανώτερου στρώματος b διαφοροποιείται ανάλογα με τη ζώνη και τον τύπο του υδροφορέα. Για έναν φρεάτιο υδροφορέα ισχύει πως

$$b = h_f \text{ για τη ζώνη 1 και}$$

$$b = h_f - d + \xi \text{ για τη ζώνη 2}$$

όπου b είναι το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα το οποίο είναι σταθερό και d το βάθος της θάλασσας με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα.

Κάνοντας χρήση της προσέγγισης Ghyben-Herzberg ο Strack καταλήγει στις παρακάτω εξισώσεις υπολογισμού δυναμικού που για φρεάτιο υδροφορέα είναι:

Για τη ζώνη 1

$$\phi = \frac{1}{2} [h_f^2 - (1 + \delta) \cdot d^2]$$

Για τη ζώνη 2 του υδροφορέα

$$\phi = \frac{(1 + \delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2$$

ενώ η τιμή του δυναμικού στο πόδι της αλάτινης σφήνας προκύπτει:

$$\phi_{toe} = \frac{\delta \cdot (1 + \delta)}{2} \cdot d^2$$

Γενικά το δυναμικό όπως προκύπτει από την ανάλυση κατά Strack ικανοποιεί και την εξίσωση Laplace κατά τις διευθύνσεις x και y .

$$\nabla^2 \phi = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η λύση του Strack συνεχίζει και κυρίως αφορά τις αντλήσεις φρεάτων σε παράκτιους υδροφορείς, κάτι το οποίο δεν εξετάζεται κατά την παρούσα εργασία.

6.5.3 Μεθοδολογία Προσομοίωσης Παράκτιων Φρεάτιων Υδροφορέων: Μοντέλο Mantoglou et al (2004).

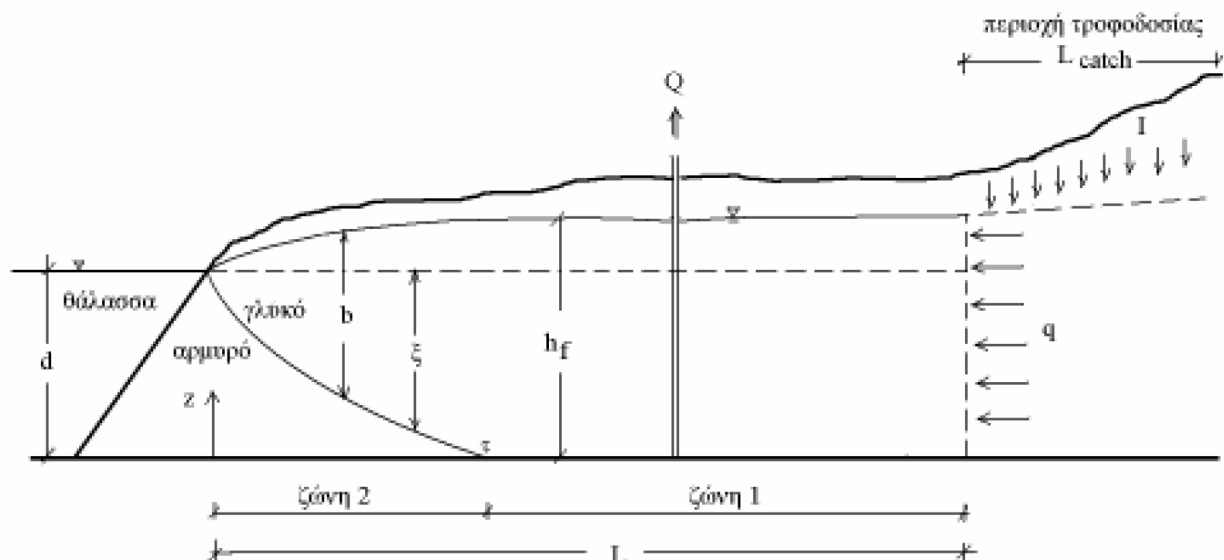
Το μοντέλο Mantoglou et al αποτελεί μια μεθοδολογία για μεγιστοποίηση του τελικού ποσοστού άντλησης από παράκτια υδροφόρα στρώματα, χρησιμοποιώντας μη γραμμική βελτιστοποίηση και εξελικτικούς αλγόριθμους. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης σε συγκεκριμένες θέσεις του υδροφορέα, ώστε ταυτόχρονα τα σημεία άντλησης να προστατεύονται από την διείσδυση θαλασσινού νερού. Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, δηλαδή:

- στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg
- στην ανάλυση κατά Strack και
- στη θεώρηση ύπαρξης απότομης διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται στην περίπτωση

- παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα,
- και σε συνθήκες μόνιμης ροής

Όπως αναφέρθηκε σε συνθήκες μόνιμης ροής σύμφωνα με τη θεώρηση Ghyben – Herzberg η θέση της διεπιφάνειας παραμένει σταθερή στον υδροφορέα.



Σχήμα 6.12 Σχηματική παράσταση φρεάτιου υδροφορέα (Μαντόγλου & Γιαννουλόπουλος, 2001)

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται χαρακτηριστικά οι δύο ζώνες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς επίσης και το σημείο τ στη διατομή, που συμβολίζει την

τομή της διεπιφάνειας με τη βάση του υδροφορέα. Η σχέση Ghyben – Herzberg συνδέει το υδραυλικό φορτίο h_f με το βάθος ξ με τη σχέση

$$h_f - d = \delta\xi$$

Σύμφωνα με την ανάλυση κατά Strack που περιγράφηκε πιο πάνω και εισάγει την έννοια του δυναμικού ϕ , συντελεί στη δημιουργία μιας γενικής εξίσωσης συνέχειας που ισχύει και για τις δύο ζώνες και συμπίπτει με την εξίσωση Laplace. Η εξίσωση αυτή για τον υδροφορέα του σχήματος παίρνει τη μορφή

$$K \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N = 0$$

Όπου N η επιφανειακή τροφοδοσία του υδροφορέα και K η υδραυλική αγωγιμότητα.

Σύμφωνα με τους Mantoglou et al (2004), η σχέση αυτή που αποτελεί την εξίσωση συνέχειας στην περίπτωση του υδροφόρου που μελετάται, μοιάζει με την αντίστοιχη σχέση που ισχύει για οριζόντια ροή σε ομογενή και ισότροπο περιορισμένο υδροφορέα που έχει τη μορφή:

$$T \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N = 0$$

όπου T είναι η μεταφορικότητα και ϕ το πιεζομετρικό φορτίο.

Τελικά οι δύο εξισώσεις, είναι όμοιες με τη διαφορά πως αντί του πιεζομετρικού φορτίου ϕ και της μεταφορικότητας T , χρησιμοποιούνται το δυναμικό ϕ και η υδραυλική αγωγιμότητα K ως παράμετροι. Βάση της ομοιότητας των εξισώσεων αυτών βγαίνει το συμπέρασμα πως ο παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας που εξετάζεται μπορεί να μελετηθεί απλοποιημένα ως ένας τυπικός περιορισμένος υδροφορέας με μεταφορικότητα T_a ίση με την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας K του φρεάτιου υδροφορέα. Παρά τις απλοποιήσεις αυτές πάντως, η τιμή του δυναμικού εξακολουθεί να παραμένει ερωτηματικό, αφού η γεωμετρία του υδροφορέα δεν είναι απλή και επομένως δεν είναι εύκολο να γνωρίζουμε την γνωρίζουμε σε κάθε θέση.

Αν επιλυθεί η εξίσωση

$$\phi = \frac{(1 + \delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2$$

που αναφέρεται στην εξωτερική ζώνη (ζώνη 2), του υδροφορέα ως προς το φορτίο γλυκού νερού h_f καταλήγουμε στη σχέση

$$\phi = \frac{(1 + \delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2 \Rightarrow (h_f - d)^2 = \frac{2\delta}{(1 + \delta)} \cdot \phi \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2\delta}{(1 + \delta)} \cdot \phi} + d$$

η οποία για συνήθεις πυκνότητες θαλασσινού και γλυκού νερού $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_f = 1,000 \text{ gr/cm}^3$ αντίστοιχα, λόγω του ότι

$$\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0,025$$

γίνεται:

$$h_f = \sqrt{\frac{0,05}{1,025} \cdot \phi} + d$$

όπου d το βάθος της θάλασσας με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα.

Εφαρμόζοντας την εξίσωση Ghyben – Herzberg καταλήγουμε πως

$$\xi = \frac{h_f - d}{0,025} = 40 \cdot (h_f - d)$$

Και αν θέσουμε $\xi = -z$ καταλήγουμε να υπολογίσουμε το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στο οποίο βρίσκεται η διεπιφάνεια

$$\xi = -z \Rightarrow z = -\xi = -40 \cdot (h_f - d)$$

Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως η ποσότητα d που αναφέρεται στο βάθος της θάλασσας διαφέρει σε κάθε παράκτιο υδροφορέα και συνήθως είναι μετρήσιμη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ωστόσο λόγω έλλειψης του στοιχείου αυτού, θεωρήθηκε ένα τυπικό βάθος $d = 50 \text{ m}$.

7.ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

7.1 Γενικά

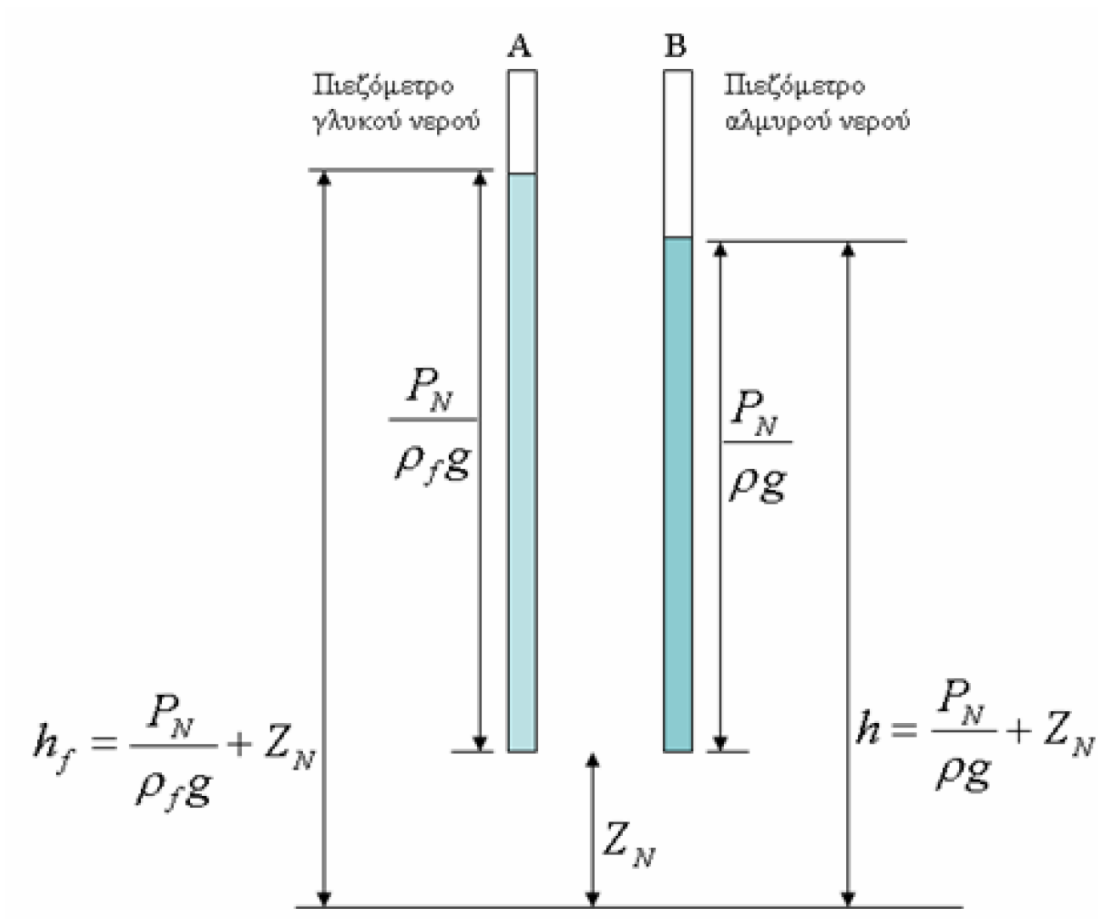
Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι μια σύνθετη υπόθεση και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που ειδικεύονται στις προσομοιώσεις παράκτιων υδροφορέων όπως το SEAWAT , το μοντέλο Mantoglou et al (2004) κ.α.

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

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

Στο σχήμα φαίνονται δύο πιεζόμετρα σε κάποιο σημείο N του υπόγειου υδροφορέα με υφάλμυρο νερό. Το πιεζόμετρο A περιέχει γλυκό νερό και είναι εξοπλισμένο με μηχανισμό που δεν επιτρέπει το αλμυρό νερό του υδροφορέα να αναμειχθεί με το γλυκό νερό του πιεζόμετρου B 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 είναι $P_N/(\rho_f \cdot g)$.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.

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



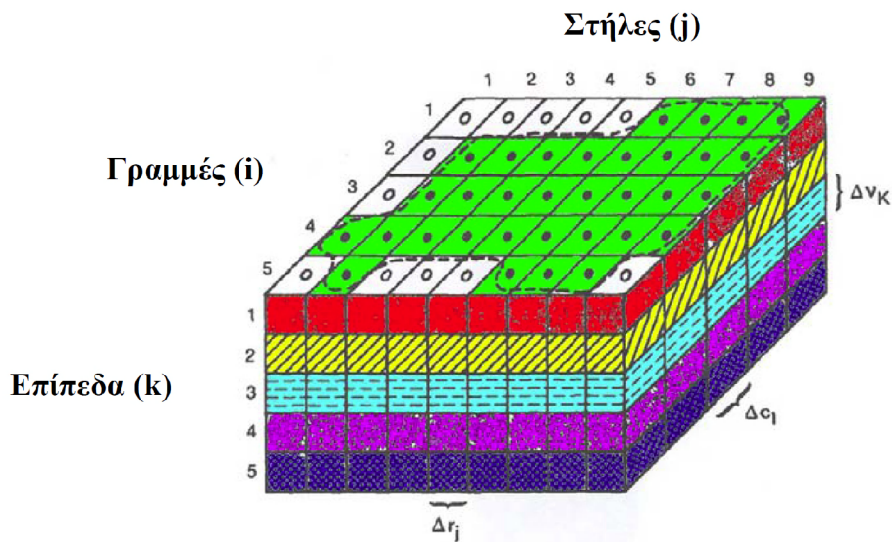
Εικόνα 7.1 Παράκτιος υδροφορέας αντλούμενος από μια γεώτρηση(πηγή:Γ. Κουράκος 2009)

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

7.1.1 Η συνθήκη της διακριτοποίησης

Το παρακάτω Σχήμα 1 παρουσιάζει τη χωρική διακριτοποίηση του συστήματος ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα κελιών, η θέση των οποίων περιγράφεται με όρους γραμμών, στηλών και επιπέδων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα δεικτών i , j , k . Για ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από “nrow” γραμμές, “ncol” στήλες και “nlay” επίπεδα, i είναι ο δείκτης των γραμμών ($i= 1, 2, \dots, \text{nrow}$), j είναι ο δείκτης των στηλών ($j= 1, 2, \dots, \text{ncol}$) και k είναι ο δείκτης των επιπέδων ($k= 1, 2, \dots, \text{nlay}$). Για παράδειγμα, το Σχήμα 1 παριστάνει ένα σύστημα με $\text{nrow}= 5$, $\text{ncol}= 9$ και $\text{nlay}= 5$.

Κατά το σχηματισμό των εξισώσεων του μοντέλου, έγινε η παραδοχή πως τα επίπεδα ανταποκρίνονται γενικά σε οριζόντιες υδρογεωλογικές μονάδες ή διαστήματα. Με αυτόν τον τρόπο, και με όρους Καρτεσιανών συντεταγμένων, ο δείκτης k καταδεικνύει μεταβολές στον κατακόρυφο άξονα z . Λόγω της συνθήκης που ακολουθείται στο μοντέλο αυτό να αριθμούνται τα επίπεδα από το ανώτατο στρώμα προς το κατώτατο, προσαύξηση στο δείκτη k μαρτυρά μείωση του επιπέδου. Αντίστοιχα οι γραμμές θεωρούνται παράλληλες στον άξονα x , έτσι ώστε προσαύξηση στο δείκτη i να μαρτυρά μείωση κατά τον άξονα των y . Τέλος, οι στήλες θεωρούνται παράλληλες στον άξονα y , έτσι ώστε μια προσαύξηση στο δείκτη j να μαρτυρά αύξηση κατά τον άξονα των x .



Σχήμα 7.1 Ένας υποθετικός διακριτοποιημένος υδροφόρας(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)

-----: τα όρια του υδροφορέα

● : ενεργό κελί

○ : ανενεργό κελί

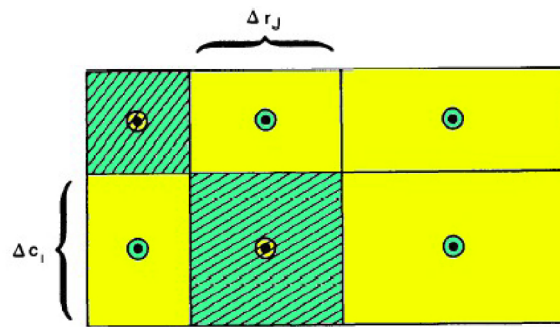
Δr_j : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των γραμμών. ο δείκτης j υποδεικνύει τον αριθμό της στήλης

Δc_i : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των στηλών. ο δείκτης i υποδεικνύει τον αριθμό της γραμμής

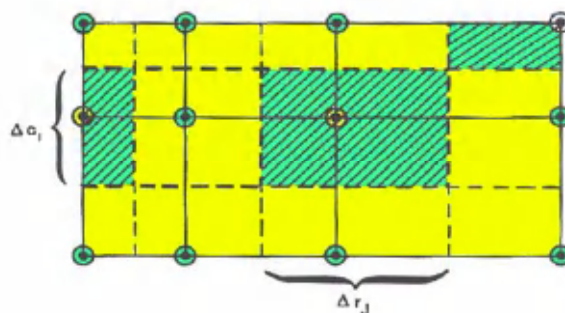
Δv_k : οι διαστάσεις του κελιού κατά μήκος της διεύθυνσης των επιπέδων. ο δείκτης k υποδεικνύει τον αριθμό των επιπέδων

Σε κάθε κελί υπάρχει ένα σημείο το οποίο καλείται «κόμβος» και για το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί το φορτίο. Το Σχήμα 7.2 απεικονίζει σε δύο διαστάσεις δύο συνθήκες για τον καθορισμό της δομής των κελιών ανάλογα με το πού βρίσκονται οι κόμβοι προσδιορισμού των τιμών του φορτίου, αυτή των κεντραρισμένων όγκων(block- centered formulation) και αυτή των κεντραρισμένων

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



Σχήμα 7.2 Σύστημα δικτύων κεντραρισμένων όγκων(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)



Σχήμα 7.3 Σύστημα δικτύων κεντραρισμένων σημείων(πηγή : Michael McDonald & Arlen Harbaugh, 1988, “A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model”, USGS)

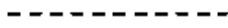
όπου:



: οι κόμβοι,



: οι γραμμές του δικτύου,



σημείων,

: τα όρια των κελιών του σχηματισμού των κεντραρισμένων

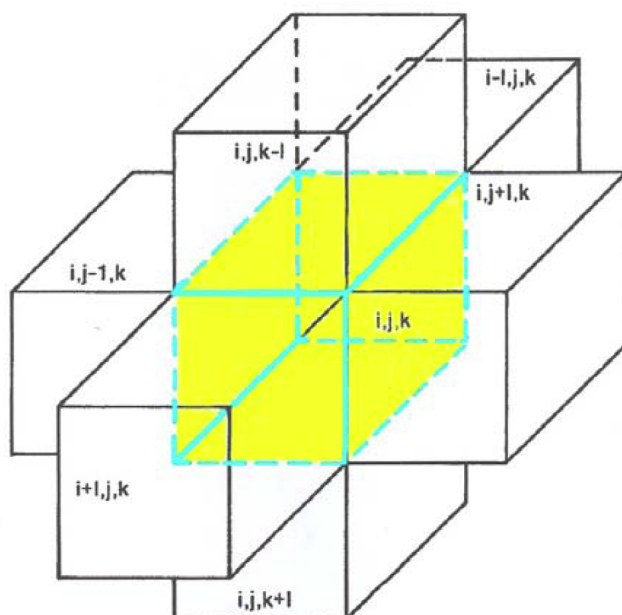


: τα κελιά που σχετίζονται με τους επιλεγμένους κόμβους

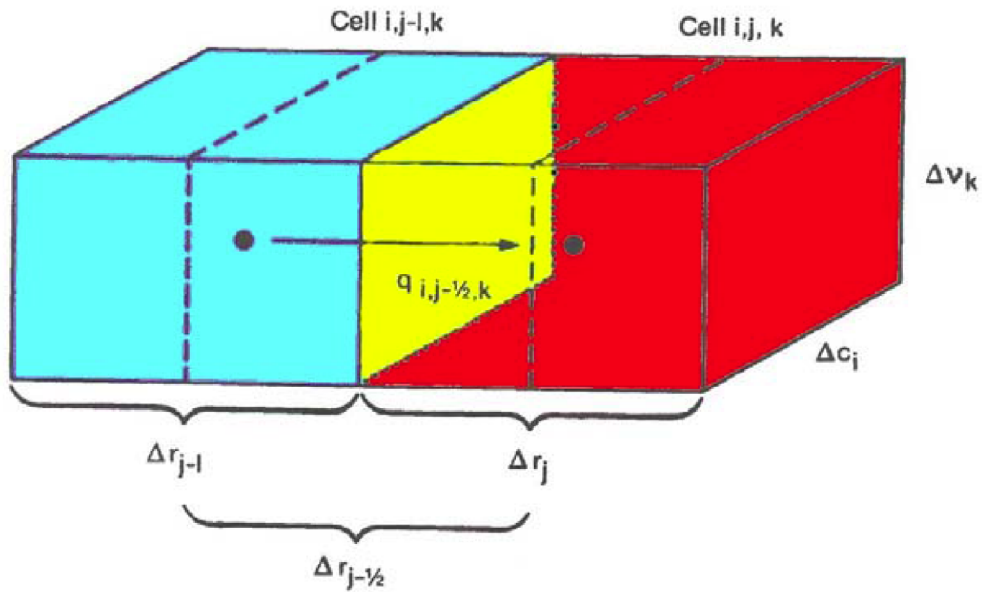
7.1.2 Η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών

Σε συνθήκες μεταβλητής πυκνότητας η κίνηση του νερού και η κίνηση της διαλυμένης μάζας είναι διαδικασίες αλληλένδετες για αυτό απαιτείται ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς. Στα περισσότερα προβλήματα είναι πολύ δύσκολο αν όχι αδύνατο να επιτευχθούν αναλυτικές λύσεις και για αυτό εφαρμόζονται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η προσέγγιση του προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών γιατί το μοντέλο προσομοίωσης που επιλέχθηκε για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων της ροής και μεταφοράς μάζας στις διάφορες εφαρμογές είναι το SEAWAT το οποίο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια συνήθης μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων κατά την οποία ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρις ορθογώνιο πλέγμα χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελιά. Η προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές επομένως εφαρμόζεται στον διακριτοποιημένο χώρο με βάση την υπόθεση ότι κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς.

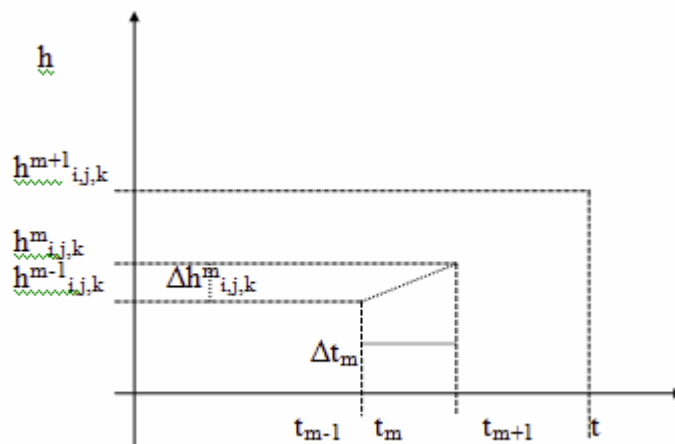


Σχήμα 7.4 Το κελί (i, j, k) και οι δείκτες των έξι γειτονικών κελιών του



Σχήμα 7.5 Ροή από το κελί (i, j- 1, k) στο κελί (i, j, k)

Στο σχήμα 7.6 δίνεται ένα διάγραμμα του υδραυλικού φορτίου για το κελί i, j, k. Οι δύο χρονικές τιμές στον οριζόντιο άξονα του χρόνου παριστάνουν, η μεν πρώτη το χρόνο κατά τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός του υδραυλικού φορτίου , η δε δεύτερη το χρόνο ένα χρονικό βήμα πίσω από την t_m .



Σχήμα 7.6 Διάγραμμα υδραυλικού φορτίου - χρόνου για το κελί i, j, k

Όπου:

t_m : ο χρόνος στο τέλος του χρονικού βήματος m

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

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης υπολογίζουν την διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής της μάζας ανά μονάδα όγκου διαμέσου των πλευρών του στοιχείου διακριτοποίησης του υδροφορέα (π.χ. σε ένα κελί). Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας του υγρού ανά μονάδα όγκου εξαιτίας των μεταβολών στην πίεση του συστήματος. Ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέρος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό μεταβολής της μάζας ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα εξαιτίας των μεταβολών της συγκέντρωσης. Ο δεύτερος όρος υπολογίζεται από τη συγκέντρωση που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Καθώς οι συγκεντρώσεις φτάνουν σε μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας αυτός ο όρος γίνεται αμελητέος. Επομένως το πεδίο ροής σταθεροποιείται όταν οι συγκεντρώσεις δεν μεταβάλλονται στο χρόνο. Ο τρίτος όρος του δεξιού μέρους της ίδιας εξίσωσης αντιπροσωπεύει την εισροή από εξωτερικές πηγές και εκροή σε καταβόθρες. Χρησιμοποιώντας το σχήμα των κεντρικών πεπερασμένων διαφορών στο χώρο και των οπισθοδρομικών πεπερασμένων διαφορών στον χρόνο η προσέγγιση της εξίσωσης της κίνησης των υπογείων νερών έχει ως εξής:

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

Εξίσωση 7.1

Όπου:

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

$A_{j,k}$ είναι το εμβαδόν της πλευράς του κελιού των πεπερασμένων διαφορών κάθετης στον άξονα x

$[L^2]$ έτσι ώστε $A_{j,k} = \Delta\beta_j \Delta\gamma_k$ και παρόμοια για τις άλλες διευθύνσεις

$Z_{i,j,k}$ είναι το υψόμετρο του κελιού $[L]$

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

$V_{i,j,k}$ είναι ο όγκος του κελιού $[L^3]$ έτσι ώστε $V_{i,j,k} = \Delta\alpha_i \Delta\beta_j \Delta\gamma_k$

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 αναφέρονται στη χρονική στιγμή $n+1$. Γενικά σε αυτό το κεφάλαιο όπου δεν υποδεικνύεται η χρονική στιγμή του υπολογισμού των ισοδύναμων υδραυλικών

φορτίων αυτή θα θεωρείται η χρονική στιγμή $n+1$. Στην παραπάνω εξίσωση συναντώνται δύο διαφορετικοί συμβολισμοί της πυκνότητας. Η διαφορετικότητα έχει να κάνει με τον τρόπο υπολογισμού της πυκνότητας στο μεσοδιάστημα δύο κελιών όπου η τιμή του $\hat{\rho}$ εξαρτάται από την κατεύθυνση της ροής. Έτσι αν υποτεθεί ότι η κατεύθυνση της ροής είναι από το κελί i,j,k στο $i,j,k+1$ τότε ο όρος $\rho_{i,j,k+1/2} = \rho_{i,j,k}$ 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 υπόψιν τον αριθμητικό μέσο όρο των γειτονικών κελιών

Εισάγοντας τον όρο της αγωγιμότητας COND σύμφωνα με τον οποίο ισχύει:

$$COND = \frac{AK}{L},$$

όπου A είναι το εμβαδόν κάθετα στη ροή και L είναι η απόσταση κατά μήκος της ροής η εξίσωση 7.1 μετασχηματίζεται ως εξής

$$\begin{aligned} & \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} \left[h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\ & - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i-1,j,k} + \frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\ & + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} \left[h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\ & - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j-1,k} + \frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\ & + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} \left[h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k} + \frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\ & - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} \left[h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j,k-1} + \frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\ & = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}, \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.2

όπου CC,CR και CV είναι η αγωγιμότητα COND κατά μήκος των στηλών, των γραμμών και επιπέδων αντίστοιχα, της διακριτοποίησης του υδροφορέα. Η εξίσωση 7.2 μετά από πράξεις μπορεί να διατυπωθεί και με την παρακάτω έκφραση

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} C_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} [h_{f,i,j,k} - h_{f,i-1,j,k}] \\
& - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} C_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} C_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j-1,k}] \\
& - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} C_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j-1,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} C_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k} - h_{f,i,j,k-1}] \\
& - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} C_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k} - Z_{i,j,k-1}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.3

Με αλλαγή των πρόσημων έτσι ώστε έξω από τις παρενθέσεις να έχουμε μόνο θετικά πρόσημα η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\begin{aligned}
& \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} {}_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} {}_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} {}_{i-1/2,j,k} [h_{f,i-1,j,k}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} {}_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i-1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} {}_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} {}_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} {}_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j-1,k}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} {}_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j-1,k} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} {}_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} {}_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} {}_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k-1}^{-} h_{f,i,j,k}^{-}] \\
& + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} {}_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2}^{-} \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k-1} - Z_{i,j,k}) \right] \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.4

Η εξίσωση 7.4 αποτελεί την προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές της διαφορικής εξίσωσης της τρισδιάστατης κίνησης του υπόγειου νερού σε περιβάλλον μεταβλητής πυκνότητας

Για λόγους απλότητας θεωρείται η παρακάτω έκφραση

$$D_{i,j,k} = D_{i+1/2,j,k} + D_{i-1/2,j,k} + D_{i,j+1/2,k} + D_{i,j-1/2,k} + D_{i,j,k+1/2} + D_{i,j,k-1/2},$$

Εξίσωση 7.5

$$D_{i+1/2,j,k} = \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i+1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right],$$

$$D_{i-1/2,j,k} = \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} \left[\frac{\rho_{i-1/2,j,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i-1,j,k} - Z_{i,j,k}) \right],$$

$$D_{i,j+1/2,k} = \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j+1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j+1,k} - Z_{i,j,k}) \right],$$

$$D_{i,j-1/2,k} = \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} \left[\frac{\rho_{i,j-1/2,k} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j-1,k} - Z_{i,j,k}) \right],$$

$$D_{i,j,k+1/2} = \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k+1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k+1} - Z_{i,j,k}) \right],$$

$$D_{i,j,k-1/2} = \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} \left[\frac{\rho_{i,j,k-1/2} - \rho_f}{\rho_f} (Z_{i,j,k-1} - Z_{i,j,k}) \right].$$

Εξίσωση 7.6

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 7.4 και 7.5 η πρώτη παίρνει την εξής μορφή

$$\begin{aligned} & \hat{\rho}_{i+1/2,j,k} CC_{i+1/2,j,k} [h_{f,i+1,j,k} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k} CC_{i-1/2,j,k} [h_{f,i-1,j,k} - h_{f,i,j,k}] \\ & + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k} CR_{i,j+1/2,k} [h_{f,i,j+1,k} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k} CR_{i,j-1/2,k} [h_{f,i,j-1,k} - h_{f,i,j,k}] \\ & + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2} CV_{i,j,k+1/2} [h_{f,i,j,k+1} - h_{f,i,j,k}] + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2} CV_{i,j,k-1/2} [h_{f,i,j,k-1} - h_{f,i,j,k}] + D_{i,j,k} \\ & = \left(\rho_{f,i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{h_{f,i,j,k}^{n+1} - h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}. \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.7

Η εξίσωση 7.7 δείχνει ότι τα επίπεδα στα οποία έχει διακριτοποιηθεί ο υδροφόρεας μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κεκλιμένα. Όταν τα επίπεδα είναι κεκλιμένα τότε οι όροι $D_{i+1/2,j,k} + D_{i-1/2,j,k} + D_{i,j+1/2,k} + D_{i,j-1/2,k}$ είναι μη μηδενικοί, ενώ αντίθετα όταν τα επίπεδα είναι οριζόντια οι όροι αυτοί μηδενίζονται.

Σύστημα Εξισώσεων

Η εξίσωση 7.7 μπορεί να γραφτεί με τέτοια μορφή έτσι ώστε όλοι όροι που περιέχουν την εξαρτημένη μεταβλητή h_f τη χρονική στιγμή $t + 1$ να μεταφερθούν στο αριστερό μέρος της εξίσωσης και στο δεξιό μέρος μεταφέρονται όλοι οι γνωστοί όροι:

$$\begin{aligned} & \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i+1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i-1,j,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j+1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j-1,k}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k+1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k-1}^{n+1} - \hat{\rho}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\ & + D_{i,j,k} - \rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{V_{i,j,k}}{t_{n+1} - t_n} h_{f,i,j,k}^{n+1} = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{-h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k}. \end{aligned}$$

Εξίσωση 7.8

Στο αριστερό μέρος της εξίσωσης 7.8 όλοι οι όροι εκτός από το $D_{i,j,k}$ περιέχουν την εξαρτημένη μεταβλητή h_f την χρονική στιγμή $t+1$ ενώ στο δεξιό μέρος δεν περιέχεται καμία μεταβλητή της χρονικής στιγμής $t + 1$. Επίσης όλες οι τιμές της πυκνότητας εκτός από αυτήν του γλυκού νερού αντιστοιχούν σε χρονική στιγμή αντίστοιχη με αυτήν των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων. Στην πραγματικότητα όταν λύνονται οι εξισώσεις υπολογισμού των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων η πυκνότητα θεωρείται σταθερή. Αυτή η απλοποίηση είναι αποδεκτή όταν το χρονικό βήμα είναι αρκετά μικρό ή όταν η μεταβολή της πυκνότητας του υγρού είναι σχετικά αργή σε σχέση με την μεταβολή του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου. Έτσι για τον υπολογισμό των ισοδύναμων φορτίων την χρονική στιγμή $t+1$ ο όρος $D_{i,j,k}$ υπολογίζεται με βάση το πεδίο

πυκνοτήτων είτε της προηγούμενης χρονικής στιγμής t είτε της προηγούμενης επανάληψης της ίδιας χρονικής στιγμής. Επομένως η ποσότητα $D_{i,j,k}$ στην εξίσωση 7.8 μπορεί να θεωρηθεί σταθερή αφού δεν επηρεάζεται από τις τιμές των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων της επόμενης χρονικής στιγμής. Έτσι ο όρος αυτός μπορεί να μεταφερθεί στο δεξιό μέρος της εξίσωσης όπου όλοι οι όροι θεωρούνται γνωστοί:

$$\begin{aligned}
& \hat{p}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i+1,j,k}^{n+1} - \hat{p}_{i+1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{p}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i-1,j,k}^{n+1} - \hat{p}_{i-1/2,j,k}^{CC} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{p}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j+1,k}^{n+1} - \hat{p}_{i,j+1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{p}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j-1,k}^{n+1} - \hat{p}_{i,j-1/2,k}^{CR} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{p}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k+1}^{n+1} - \hat{p}_{i,j,k+1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& + \hat{p}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k-1}^{n+1} - \hat{p}_{i,j,k-1/2}^{CV} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& - \rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{V_{i,j,k}^{n+1}}{t_{n+1} - t_n} h_{f,i,j,k}^{n+1} \\
& = \left(\rho_{i,j,k} S_{f,i,j,k} \frac{-h_{f,i,j,k}^n}{t_{n+1} - t_n} + \theta E \frac{\partial C}{\partial t} \right) V_{i,j,k} - (\bar{\rho} Q_s)_{i,j,k} - D_{i,j,k}
\end{aligned}$$

Εξίσωση 7.9

Επειδή στο δεξιό μέρος της εξίσωσης όλοι οι όροι θεωρούνται γνωστοί σύμφωνα με τις παραδοχές που αναφέρθηκαν μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας σταθερός αριθμός. Η εξίσωση 7.9 αποτελεί την προσέγγιση με πεπερασμένες διαφορές της ροής στο κελί (i,j,k) . Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφτούν για κάθε κελί της διακριτοποίησης του υδροφορέα. Έστω ότι ο υδροφορέας αποτελείται από N κελιά τότε μπορούν να σχηματιστούν N εξισώσεις παρόμοιες με την 7.9 και να σχηματιστεί ένα σύστημα N εξισώσεων με N αγνώστους το οποίο μπορεί να γραφτεί με μητρώα ως εξής:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{h}_f = \mathbf{B}$$

Όπου \mathbf{A} είναι το μητρώο συντελεστών μεγέθους $[\mathbf{N} \times \mathbf{N}]$,

\mathbf{h}_f είναι το άγνωστο διάνυσμα μεγέθους $[\mathbf{N} \times 1]$ των ισοδύναμων υδραυλικών φορτίων της επόμενης χρονικής στιγμής

\mathbf{B} είναι το διάνυσμα μεγέθους $[\mathbf{N} \times 1]$ στο οποίο αθροίζονται όλοι οι γνωστοί όροι.

7.1.3 Επίλυση με το SEAWAT

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

Το SEAWAT περιλαμβάνει δύο μεθοδολογίες επίλυσης (ρητή και πεπλεγμένη) για την ταυτόχρονη επίλυση των δύο διαφορικών εξισώσεων. Σύμφωνα με την ρητή επίλυση χρησιμοποιείται μια υστέρηση (lag) στον καθορισμό των πυκνοτήτων στην εξίσωση ροής. Αυτό σημαίνει ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς του προηγούμενου χρονικού βήματος. Έπειτα υπολογίζεται η κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά με βάση την λύση της εξίσωσης της ροής στο τρέχον χρονικό βήμα και η λύση χρησιμοποιείται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας. Σύμφωνα με την πεπλεγμένη μέθοδο η επίλυση των εξισώσεων κίνησης του νερού και κίνησης της μάζας επαναλαμβάνεται, ενώ οι συγκεντρώσεις και οι πυκνότητες ενημερώνονται κάθε χρονικό βήμα ωστόσο η μέγιστη διαφορά στην πυκνότητα, στα κελιά, για διαδοχικές επαναλήψεις είναι μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή.

Ο τρόπος χρονικής διακριτοποίησης που εφαρμόζεται στο SEAWAT είναι συνδυασμός των αντίστοιχων τρόπων που εφαρμόζονται στα προγράμματα MODFLOW και MT3DMS. Στο MODFLOW η συνολική περίοδος προσομοίωσης διαιρείται σε μια ή και περισσότερες περιόδους. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου οι παροχές και οι οριακές συνθήκες διατηρούνται σταθερές. Επιπλέον κάθε περίοδος χωρίζεται σε ένα ή και περισσότερα χρονικά βήματα ώστε τα αποτελέσματα να είναι είτε πιο ακριβή είτε να επιτρέπουν την εξαγωγή αποτελεσμάτων τις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές.

Το πρόγραμμα MT3DMS αρχικά σχεδιάστηκε έτσι ώστε να συνεργάζεται με το MODFLOW Σε μια συμβατική εφαρμογή που συνδυάζει το MODFLOW με το MT3DMS οι χωρικές και χρονικές μεταβολές του πεδίου πυκνοτήτων υποτίθεται

ότι είναι τόσο μικρές ώστε δεν επηρεάζουν την κίνηση του νερού. Έτσι αναπτύχθηκε μια πρακτική διαδικασία σύμφωνα με την οποία πρώτα εκτελείται η προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων νερών και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης διάφορες πληροφορίες σχετικές με την κίνηση των υπόγειων νερών που απαιτούνται από το MT3DMS αποθηκεύονται σε ένα ξεχωριστό αρχείο. Στη συνέχεια με βάση αυτό το αρχείο το πρόγραμμα MT3DMS εκτελεί την προσομοίωση της κίνησης της διαλυμένης μάζας. Στο MT3DMS κάθε χρονικό βήμα του MODFLOW χωρίζεται επιπλέον σε πιο μικρά χρονικά τμήματα που ονομάζονται βήματα μεταφοράς. Ο όρος βήματα μεταφοράς εισήχθη για να αποφευχθεί η σύγχυση με τα χρονικά βήματα στα οποία χωρίζεται μια περίοδος στο MODFLOW. Ωστόσο το βήμα μεταφοράς δεν είναι τίποτα άλλο από ένα χρονικό βήμα σύμφωνα με το οποίο υπολογίζεται η μεταφορά μάζας. Αυτός ο επιπλέον διαχωρισμός γίνεται κυρίως για λόγους σταθερότητας της λύσης που δίνει το MT3DMS. Οι Zheng and Wang(1999) όρισαν κάποιους περιορισμούς ώστε η λύση που δίνεται από το πρόγραμμα να είναι σταθερή και ακριβής. Έτσι στην περίπτωση κίνησης διαλυμένης μάζας από μεταφορά ισχύει:

$$\Delta t \leq \frac{0.5}{\frac{v_x}{\Delta x} + \frac{v_y}{\Delta y} + \frac{v_z}{\Delta z}}$$

Εξίσωση 7.10 Κίνηση διαλυμένης μάζας από μεταφορά

Στην περίπτωση κίνησης της διαλυμένης μάζας από διασπορά

$$\Delta t \leq \frac{0.5}{\frac{D_x}{\Delta x^2} + \frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}}$$

Εξίσωση 7.11 Κίνηση της διαλυμένης μάζας από διασπορά

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

$$\Delta t \leq \frac{\theta}{|q_{s,s}|}$$

Εξίσωση 7.12 Εισροή από εξωτερικές πηγές ή εκροής σε καταβόθρες διαλυμένης μάζας.

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

Το MT3DMS χρησιμοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς για να υπολογίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό βήμα μεταφοράς το οποίο υπολογίζεται από το πρόγραμμα και δεν μπορεί να ορισθεί από το χρήστη. Στην περίπτωση της εξίσωσης 1 ο υπολογισμός απαιτεί να είναι γνωστό το πεδίο των ταχυτήτων. Έτσι για ένα χρονικό βήμα του MODFLOW από t_i σε t_{i+1} το MT3DMS χρησιμοποιεί το πεδίο ταχυτήτων που έχει υπολογισθεί την στιγμή t_{i+1} για να υπολογίσει την διάρκεια και τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς. Επιπρόσθετα το MT3DMS έχει διαδικασίες σύμφωνα με τις οποίες ο χρήστης καθορίζει το βήμα μεταφοράς, το οποίο από την μια μπορεί να μειώσει τον αριθμό των βημάτων μεταφοράς που απαιτούνται σε μια προσομοίωση, αλλά ταυτόχρονα τίθενται θέματα σύγκλισης και ακρίβειας εάν το βήμα μεταφοράς δεν είναι κατάλληλο.

Η παραπάνω διαδικασία προϋποθέτει τον υπολογισμό των υδραυλικών φορτίων και του πεδίου ταχυτήτων πριν ξεκινήσει ο υπολογισμός της εξίσωσης μεταφοράς έτσι δεν είναι κατάλληλη σε προγράμματα μεταβλητής πυκνότητας εξαιτίας της αλληλεξάρτησης μεταξύ των εξισώσεων ροής και μεταφοράς. Στο πρόγραμμα SEAWAT η κάθε περίοδος χωρίζεται σε χρονικά βήματα. Αν για την εξίσωσης κίνησης της διαλυμένης μάζας χρησιμοποιηθεί ρητή επίλυση τότε το χρονικό βήμα υπολογίζεται από το πρόγραμμα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των εξισώσεων 1 έως 3 με αποτέλεσμα ο αριθμός των χρονικών βημάτων να μην είναι γνωστός πριν από τη εκτέλεση του προγράμματος. Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύονται και οι δύο εξισώσεις της ροής και μεταφοράς διαλυμένης μάζας. Για τον συνδυασμό των δύο αυτών εξισώσεων το SEAWAT έχει διαθέσιμες δύο μεθοδολογίες. Η ρητή επίλυση απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο αλλά μπορεί η λύση να μην είναι

τόσο ακριβής όσο με την πεπλεγμένη επίλυση. Επιπλέον μπορεί να απαιτούνται μικρότερα χρονικά βήματα στην ρητή μέθοδο από αυτά που απαιτούνται στην πεπλεγμένη επίλυση.

Τα βήματα που ακολουθούνται αν ο χρήστης επιλέξει ρητή επίλυση είναι τα εξής:

1. Η εξίσωση της ροής επιλύεται επαναληπτικά με το διαμορφωμένο σε προβλήματα μεταβλητής πυκνότητας πρόγραμμα MODFLOW για να υπολογιστούν τα ισοδύναμα υδραυλικά φορτία την χρονική στιγμή t_1 , το οποίο αναπαριστά και το τέλος του πρώτου χρονικού βήματος. Σε αυτήν την λύση, ως πεδίο πυκνοτήτων χρησιμοποιούνται οι τιμές της προηγούμενης περιόδου ή οι τιμές που υπολογίζονται με βάση την αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας εάν η περίοδος είναι η πρώτη. Το μήκος του αρχικού χρονικού βήματος Δt_1 είτε καθορίζεται από τον χρήστη μέσω της μεταβλητής INITIALDΤ είτε χρησιμοποιείται μια προκαθορισμένη από το πρόγραμμα τιμή ίση με 0.01 μονάδες χρόνου, π.χ 0.01 ημέρες εάν έχει επιλεγεί ως μονάδα χρόνου η ημέρα.
2. Οι τιμές ειδικής απορροής υπολογίζονται για την χρονική στιγμή t_1 με βάση το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της κίνησης και χρησιμοποιούνται στην εξίσωση κίνησης διαλυμένης μάζας και αντιπροσωπεύουν το πεδίο ροής για όλο το χρονικό βήμα Δt_1 .
3. Με βάση την εξίσωση μεταφοράς για το διάστημα Δt_1 υπολογίζεται η συγκέντρωση της διαλυμένης μάζας την χρονική στιγμή t_1 .
4. Το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_1 , το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πεδίου ροής στο δεύτερο χρονικό βήμα υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις της χρονικής στιγμής t_1 .
5. Το μήκος του χρονικού βήματος Δt_2 υπολογίζεται με βάση τους περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες που έχουν υπολογισθεί την χρονική στιγμή t_1 . Το χρονικό βήμα Δt_2 θα πρέπει πάντοτε να είναι μεγαλύτερο από το βήμα Δt_1 . Εάν η τιμή του Δt_2 είναι μικρότερη από την τιμή του Δt_1 αυτό σημαίνει ότι το πεδίο των συγκεντρώσεων κατά συνέπεια και των πυκνοτήτων μεταβάλλεται αλματωδώς. Αν το Δt_1 είναι μεγαλύτερο από το Δt_2 τότε το SEAWAT προτρέπει τον χρήστη να ελαττώσει την τιμή INITIALDΤ και να ξεκινήσει εκ νέου το πρόγραμμα.

6. Η εξίσωση της κίνησης της ροής επιλύεται για να υπολογιστούν τα υδραυλικά φορτία και το πεδίο ροής την χρονική στιγμή t_2 χρησιμοποιώντας το πεδίο των πυκνοτήτων του πρώτου χρονικού βήματος.
7. Το πεδίο συγκεντρώσεων την χρονική στιγμή t_2 προσδιορίζεται από την επίλυση της εξίσωσης της κίνησης διαλυμένης μάζας για το χρονικό βήμα Δt_2 . Με βάση τις υπολογισμένες συγκεντρώσεις υπολογίζεται το πεδίο πυκνοτήτων την χρονική στιγμή t_2 .
8. Με βάση τους περιορισμούς σταθερότητας και ακρίβειας υπολογίζεται το μήκος το χρονικού βήματος Δt_3 και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

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

1. Προβλήματα αστάθειας της λύσης που μπορεί να προκύψουν στην εξίσωση ροής, εξαιτίας του ότι οι πυκνότητες υπολογίζονται από τις συγκεντρώσεις του προηγούμενου χρονικού βήματος.
2. Το μήκος του χρονικού βήματος, το οποίο υπολογίζεται για να ικανοποιήσει τους περιορισμούς σταθερότητας και τις απαιτήσεις ακρίβειας στην εξίσωση κίνησης της διαλυμένης μάζας, βασίζεται στις ταχύτητες που υπολογίζονται στο τέλος του χρονικού βήματος.
3. Με βάση τα δύο παραπάνω γίνεται φανερό ότι υπάρχει μια υστέρηση ενός χρονικού βήματος στην εφαρμογή των περιορισμών. Έτσι οι περιορισμοί που θα έπρεπε να εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα t_i , στην πραγματικότητα εφαρμόζονται στο χρονικό βήμα t_{i+1} .

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

Η πεπλεγμένη μέθοδος επίλυσης περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υπόγειου νερού και μεταφοράς διαλυμένης μάζας επαναληπτικά για κάθε χρονικό βήμα ωστόσο οι διαφορές στο πεδίο πυκνοτήτων μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων είναι μικρότερες από μια τιμή καθορισμένη από το χρήστη. Έτσι τα βήματα 2, 3 και 4 επαναλαμβάνονται στο ίδιο χρονικό βήμα μέχρι η διαφορά στο πεδίο πυκνοτήτων είναι μικρότερη από μια τιμή που καθορίζει ο

χρήστης. Με αυτή τη διαδικασία τα υδραυλικά φορτία οι συγκεντρώσεις οι πυκνότητες και οι ταχύτητες σχετίζονται με το τέλος του

Τέλος το μοντέλο μεταβλητής πυκνότητας θεωρείται ότι προσομοιώνει καλύτερα το πραγματικό σύστημα των παράκτιων υδροφορέων , λαμβάνοντας υπ'όψιν την ζώνη διασποράς και υπολογίζοντας την συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου μέσα από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης και μεταφοράς ρύπων. Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να προσομοιώσει σύστημα μη μόνιμης ροής. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά του είναι ότι απαιτεί διακριτοποίηση ως προς την κατακόρυφη διάσταση σε επίπεδα. Έτσι ο αριθμός αγνώστων μεγαλώνει εκθετικά καθώς επίσης και ο χρόνος επίλυσης. Σε πραγματικές συνθήκες με σχετικά πυκνό σύστημα κελιών ο χρόνος είναι σχεδόν απαγορευτικός για ενσωμάτωση του μοντέλου σε προβλήματα βελτιστοποίησης (Γ. Κουράκος 2009).

7.2 Εφαρμογή

- Εξωτερικά όρια (external boundaries) :

Όπως έχει αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 3, ο υπό εξέταση υδροφορέας οριοθετείται βόρεια, ανατολικά και νότια από αδιαπέρατα πλευρικά όρια, ενώ δυτικά από τη θάλασσα. Για να οριστεί σωστά ο κανάβος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαφορά ότι η αρχή των αξόνων στο σύστημα αναφοράς του κανάβου βρίσκεται στην πάνω αριστερή του γωνία και όχι στην κάτω αριστερή όπως συμβαίνει στο σύστημα των καρτεσιανών συντεταγμένων

- Προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου
 - Διαστασιολόγηση κανάβου (Mesh Grid)

Η δημιουργία του κανάβου είναι η πρωταρχική ενέργεια κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή.

Ο κανάβος σχηματίζεται από δύο ζεύγη παραλλήλων γραμμών κάθετα μεταξύ τους, σχηματίζοντας τα αντίστοιχα κελιά. Οι στήλες του κανάβου αντιστοιχούν στον άξονα των τετμημένων X , οι γραμμές, στον άξονα των τεταγμένων Y , ενώ τα επίπεδα του κανάβου αντιστοιχούν στον άξονα των υψομέτρων Z . Αυτό συμβαίνει ώστε ο κανάβος του Groundwater Vistas να σχετίζεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες.

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

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

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

Σε αντίθεση ανομοιόμορφος κανάβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα, ενώ για άλλα μέρη της περιοχής τα αντίστοιχα δεδομένα απουσιάζουν παντελώς, αλλά κυρίως όταν υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για κάποιες συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής (όπως συμβαίνει συνήθως σε προβλήματα μεταφοράς ρύπων). Πρέπει τέλος να τονισθεί

ότι στην περίπτωση εφαρμογής ανομοιόμορφου κανάβου, υπάρχει ένας σημαντικός κανόνας που πρέπει πάντα να ακολουθείται για την σωστή μαθηματική επίλυση από το μοντέλο : το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις (κολώνα, γραμμή, επίπεδο) δεν μπορεί να διαφέρει (να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο) πάνω από 1,5 του μεγέθους των γειτονικών κελιών. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα της νήσου Μήλου, εφαρμόζεται ομοιόμορφος κανάβος, διότι τα δεδομένα εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανομημένα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο τοπικό ενδιαφέρον.

Ο υδροφορέας περικλείεται από μια περιοχή πραγματικών διαστάσεων 4,2x6,2 km. Επομένως ο κανάβος θα έχει διαστάσεις 4200x6200 m. Τα κελιά του κανάβου έχουν διαστάσεις 100x100m ώστε τελικά το πλήθος των γραμμών θα είναι 62 και το πλήθος των στηλών θα είναι 43 αφού ο υδροφορέας εκτείνεται κατά την κατακόρυφη διάσταση.

Horizontal Model Grid		Vertical Model Grid	
Number of Rows	62	Number of Layers	5
Number of Columns	43	Model Bottom Elevation	-50
Uniform X Spacing	100	Model Top Elevation	0
Uniform Y Spacing	100	<input type="checkbox"/> Layers are flat	Layer Elevations

Default Parameter Values						No. Zones	
K	Kx	15	Ky	15	Kz	1.5	10
Storage	S	0.01	Sy	0.01	Porosity	0.04	10
Leakance		0.01					10
Recharge	Rate	0.00012	Conc.	0			10
ET	Rate	0	Extinction	0			10
Dispersivity	Long.	10	Transverse	1	Vertical	0.1	10
Sorption	Kd	0	Density	157			10
Initial Conc.		0					10

Maximum Number of Stress Periods: 1

World Coordinates of Model Origin: X: 0, Y: 0, Rotation: 0

Εικόνα 7.2 Παράθυρο δημιουργίας κανάβου του μοντέλου

- Οροφή και βάση μοντέλου (Model Top and Bottom elevation)

Ο υδροφορέας που εξετάζουμε προσομοιώθηκε με 5 επίπεδα(layer) πάχους 10m το καθένα όπως φαίνεται και από το παράθυρο δημιουργίας του κανάβου του μοντέλου στην παραπάνω εικόνα. Οροφή τίθεται η τιμή 0 και ως βάση θέτουμε την τιμή -50 .

Από την εντολή Props/Top elevation(ή Bottom elevation) και την εντολή Props/Property values/Matrix editor μπορούμε να παρατηρήσουμε τις τιμές των υψομέτρων για κάθε ένα από τα 5 επίπεδα.Παρακάτω για το επίπεδο 1 φαίνεται ότι παντού έχουμε model top elevation 0 και -10 model bottom elevation.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Εικόνα 7.3 Πίνακας top elevation layer 1

Matrix Editor

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
2	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
3	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
4	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
5	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
6	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
7	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
8	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
9	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
10	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
11	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
12	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
13	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
14	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
15	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
16	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
17	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
18	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
19	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
20	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
21	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
22	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
23	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
24	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
25	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
26	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
27	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00
28	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00

Current Selection: Change Block... Replace... Math... Go to Row 1 Column 1

Layer: 1 Format Fixed Width 6 Precision 2 Copy Paste

Use Color Ramp Use Log Values for Color Ramp

Currently Editing: Bottom

OK Cancel

Εικόνα 7.4 Πίνακας bottom elevation layer 1

- Υδραυλική αγωγιμότητα(Hydraulic Conductivity)

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τις ιδιότητες του πορώδους και του ρευστού μέσου και αποτελεί την κρισιμότερη παράμετρο για το μοντέλο. Ο καθορισμός της ακριβούς τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιείται με εργαστηριακές μεθόδους, ωστόσο στην περίπτωση που εξετάζεται τέτοια δεδομένα δεν υπήρχαν στη διάθεσή μας. Επομένως για την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει μόνο μια εκτίμηση. Σύμφωνα με την εκτίμηση που είχε πραγματοποιηθεί(Διπλωματική Θεοδωρακόπουλος 2009 Υπεύθυνος Καθηγητής κ .Μαντόγλου) μέσω διαρκών δοκιμών διαφορετικών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και συνεχών προσομοιώσεων, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες στάθμες από τον πιεζομετρικό χάρτη (Κεφάλαιο 4) καταλήξαμε στην τιμή 15m/day.

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται trial and error. Δοκιμάσθηκαν τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας από 5m/day η οποία γενικά θεωρείται χαμηλή, έως 50m/day που θεωρείται μέτρια. Μετά τις δοκιμές trial and error επιλέγει $K_x=15\text{m/day}=K_y$ και $K_z=(1/10)*K_x=1.5\text{ m/day}$.

- Πορώδες (Porosity)

Βάση της επικρατούσας κοκκομετρίας των υλικών του υδροφορέα, η τιμή του πορώδους κυμαίνεται από 0,03 έως 0,05. Επομένως επιλέχθηκε η μέση τιμή 0,04.

- Τροφοδοσία υδροφορέα (Recharge)

Σύμφωνα με τα στοιχεία (Διπλωματική Θεοδωρακόπουλος 2009 Υπεύθυνος Καθηγητής κ .Μαντόγλου), η τιμή της τροφοδοσίας υπολογίσθηκε στα 42,9mm. Αυτή η τιμή προέκυψε θεωρώντας ως επικρατέστερο τύπο εδάφους Silty Clay Loam. Έτσι στην περίπτωση που ο εδαφικός τύπος θεωρηθεί ως Silty Clay Loam η ημερήσια τροφοδοσία του υδροφορέα θα αντιστοιχεί στην τιμή 0,00012m/day. Επομένως εισάγεται η τιμή 0,00012 m/day για την τροφοδοσία του υδροφορέα όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.2.

- Διασπορά (Dispersivity)

Ένας από τους κύριους μηχανισμούς κίνησης ρύπων στα υπόγεια νερά είναι η διασπορά και οφείλεται στην ετερογένεια του πορώδους και στη μεταβλητότητα των μικροσκοπικών καθώς και των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο πορώδες μέσο σε όλες τις δυνατές κλίμακες. Η τιμή που ορίστηκε για τη διασπορά επιλέχθηκε σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές καθώς είναι πολύ δύσκολος έως αδύνατος ο προσδιορισμός της γιατί δεν υπάρχουν στοιχεία συγκέντρωσης και παρουσιάζει πολλές ασάφειες και ανομοιογένειες. Συγκεκριμένα, Dispersivity Long=10m, Transverse=1m και Vertical=0.1m

- Αρχικές συνθήκες (Initial conditions)

Με τον όρο αρχικές συνθήκες εννοούνται τιμές υδραυλικών φορτίων, στην περίπτωση όμως που εξετάζουμε τιμές δυναμικού, για κάθε ενεργό κελί και για κάθε κελί σταθερού φορτίου, οι οποίες καθορίζονται για κάποια ορισμένη χρονική στιγμή – αφετηρία. Έτσι λοιπόν δόθηκε ως αρχική συνθήκη, τιμή δυναμικού μηδέν $\phi = 0$, σε όλα τα κελιά σταθερού φορτίου της θάλασσας αλλά και στα ενεργά κελιά

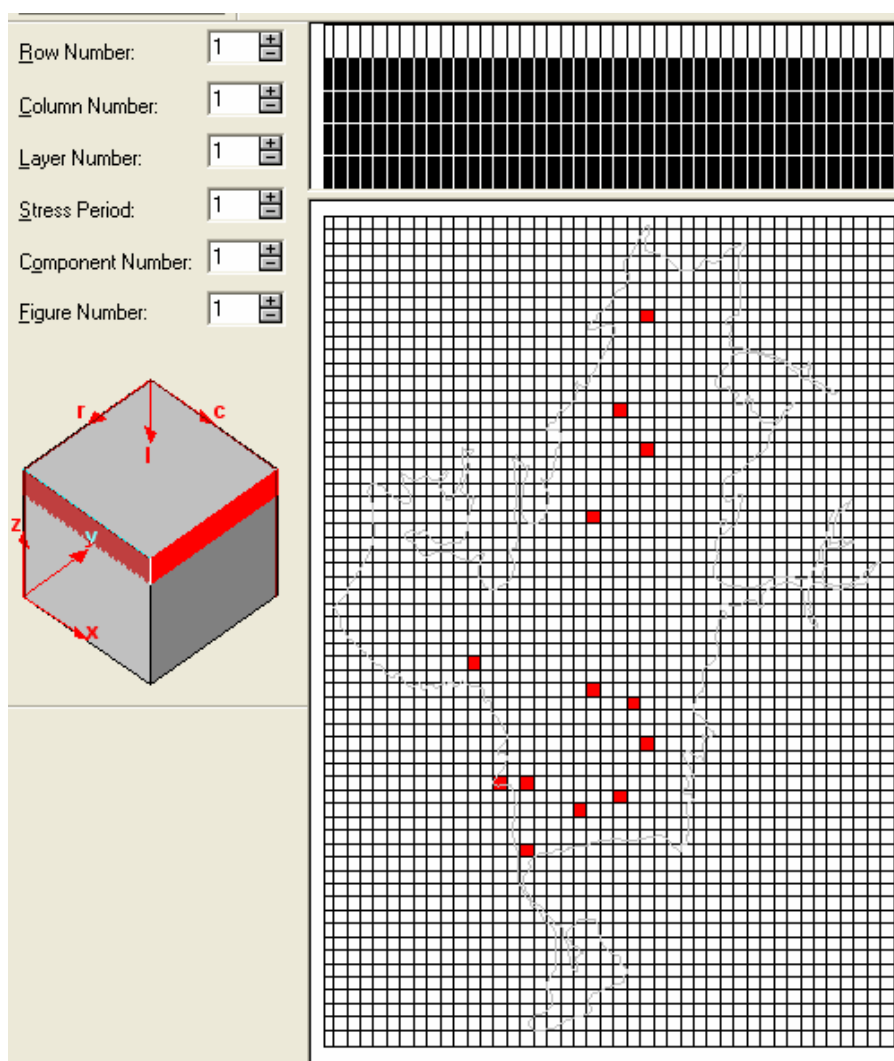
του υδροφορέα. Στη συνέχεια για να δοθούν οι αρχικές τιμές των υδραυλικών φορτίων πραγματοποιήσαμε επαναλήψεις 200.000 ημερών και έπειτα δώσαμε τιμές άντλησης στα φρέατα.

- Χρόνος (time) –Μήκος(Length)-Μάζας

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας οι μονάδες του χρόνου (time units) επιλέγονται σε ημέρες (days) και οι μονάδες του μήκους(length units) σε m, έτσι ώστε όλες οι παράμετροι στο μοντέλο να αναφέρονται σε μονάδες μέτρα ανά ημέρα (m/day) και οι μονάδες μάζας σε (kg).

- Εισαγωγή υδροφορέα

Στη συνέχεια εισάγουμε τον αντίστοιχο χάρτη μορφής .dxf έτσι ώστε να εμφανιστεί γραφικά ο υδροφορέας στο περιβάλλον του προγράμματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το περίγραμμα του υδροφορέα και η θέση των γεωτρήσεων και των φρεάτων.



Εικόνα 7.5 Εισαγωγή υδροφορέα στο περιβάλλον του προγράμματος

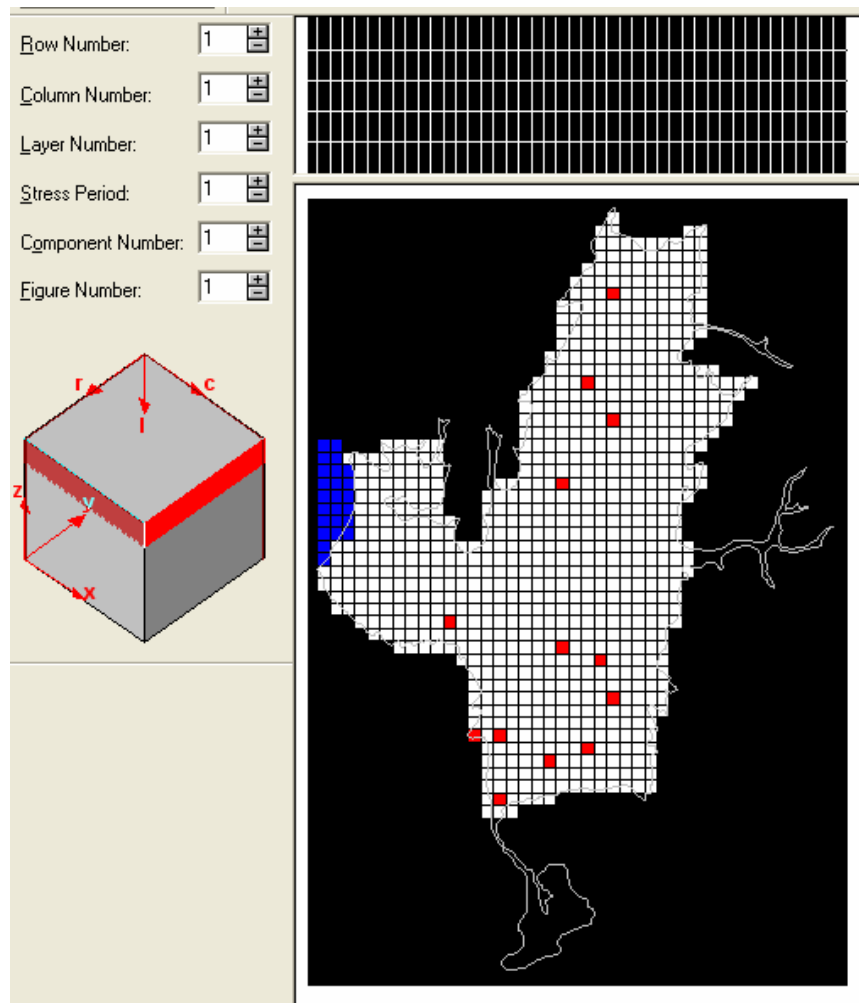
- Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατάστρωση των μαθηματικών μοντέλων ροών σε υπόγειους υδροφορείς είναι ο καθορισμός των ορίων και οι αντίστοιχες συνθήκες που ισχύουν κατά μήκος του (Λατινόπουλος, 1986). Συνηθέστερες κατηγορίες από πλευρά μαθηματικής φυσικής είναι οι συνθήκες για τη μεταβλητή του προβλήματος (όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου) ή συνθήκες Dirichlet, οι συνθήκες για την παράγωγο της μεταβλητής (όρια δεδομένων εισροών ή εκροών) ή συνθήκες Neumann και οι συνθήκες συνδυασμού της μεταβλητής και της παραγώγου της (μικτού τύπου), ή συνθήκη Cauchy. Επίσης μπορούν να οριστούν οριακές συνθήκες για την ελεύθερη επιφάνεια ή την επιφάνεια και τη γραμμή διήθησης. Στο Groundwater Vistas για την περιγραφή των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήσαμε κελιά σταθερού υδραυλικού φορτίου, ενεργά και ανενεργά κελιά.

Τα κελιά σταθερού φορτίου χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα όρια του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία, όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας έρχεται σε επαφή με υδάτινες επιφάνειες. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου στα κελιά αυτά ορίζεται από την αρχή στο μοντέλο και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, τα κελιά σταθερού φορτίου παίρνουν την τιμή -1 στο IBOUND του προγράμματος. Στον υδροφορέα που εξετάζουμε ως κελιά σταθερού δυναμικού ϕ , όπως αυτό ορίζεται από τον Strack, λαμβάνονται της θάλασσας τα οποία διακρίνονται με μπλε χρώμα στην εικόνα 7.7 του υδροφορέα.

Τα ενεργά κελιά είναι τα κελιά των οποίων το υδραυλικό φορτίο θα υπολογιστεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως ως ενεργά λαμβάνονται τα κελιά εκείνα του κανάβου εντός του περιγράμματος του υδροφορέα τα οποία διακρίνονται με λευκό χρώμα στην εικόνα 7.7 του υδροφορέα.

Αντίστοιχα ανενεργά θεωρούνται εκείνα τα κελιά στα οποία η ροή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι μηδενική, τα ανενεργά κελιά παίρνουν την τιμή 0 στο IBOUND του προγράμματος. Τέτοια κελιά αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που πρακτικά οριοθετούν τον υδροφορέα μας και τα οποία διακρίνονται με μαύρο χρώμα στην εικόνα 7.7 του υδροφορέα.

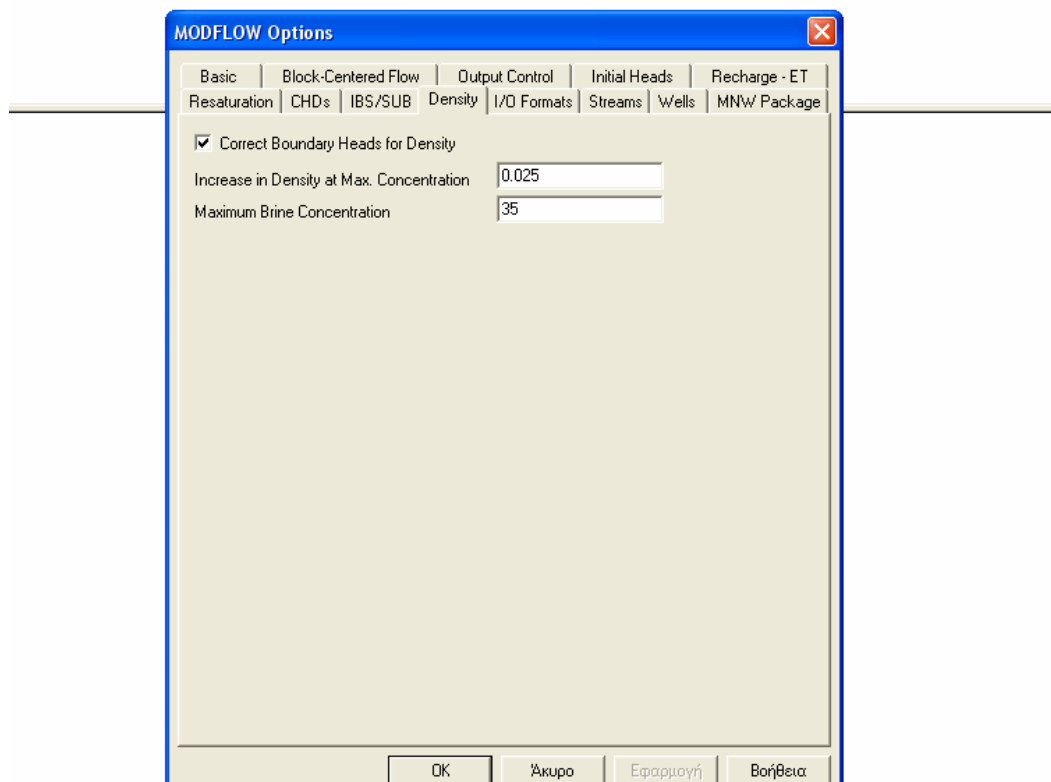


Εικόνα 7.7 Οριακές συνθήκες υδροφορέα. Με μπλε απεικονίζονται τα κελιά σταθερού φορτίου (θάλασσα), με μαύρο τα ανενεργά (αδιαπέρατοι σχηματισμοί), με λευκό τα ενεργά κελιά (υδροφορέας) και με κόκκινο τα πηγάδια.

- Χρήση του SEAWAT στο GROUNDWATER VISTAS 4

Για να χρησιμοποιήσουμε το SEAWAT, δουλεύουμε σαν MODFLOW/MT3DMS κανονικά όπως θα ήταν για μια κανονική ροή και προσομοίωση. Η μόνη πραγματική διαφορά είναι στα όρια συνθηκών ροής (π.χ. σταθερό φορτίο κατά μήκος της ακτής). Σε οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν το θαλασσινό νερό, καθορίστηκε μια συγκέντρωση, είτε 2,185 lb/ft³ ή 35 kg/m³ για το θαλασσινό νερό. Επίσης ορίσαμε τις σωστές μονάδες μάζας (kg) για MT3D από Model/MT3D/General Options – Basic transport tab.

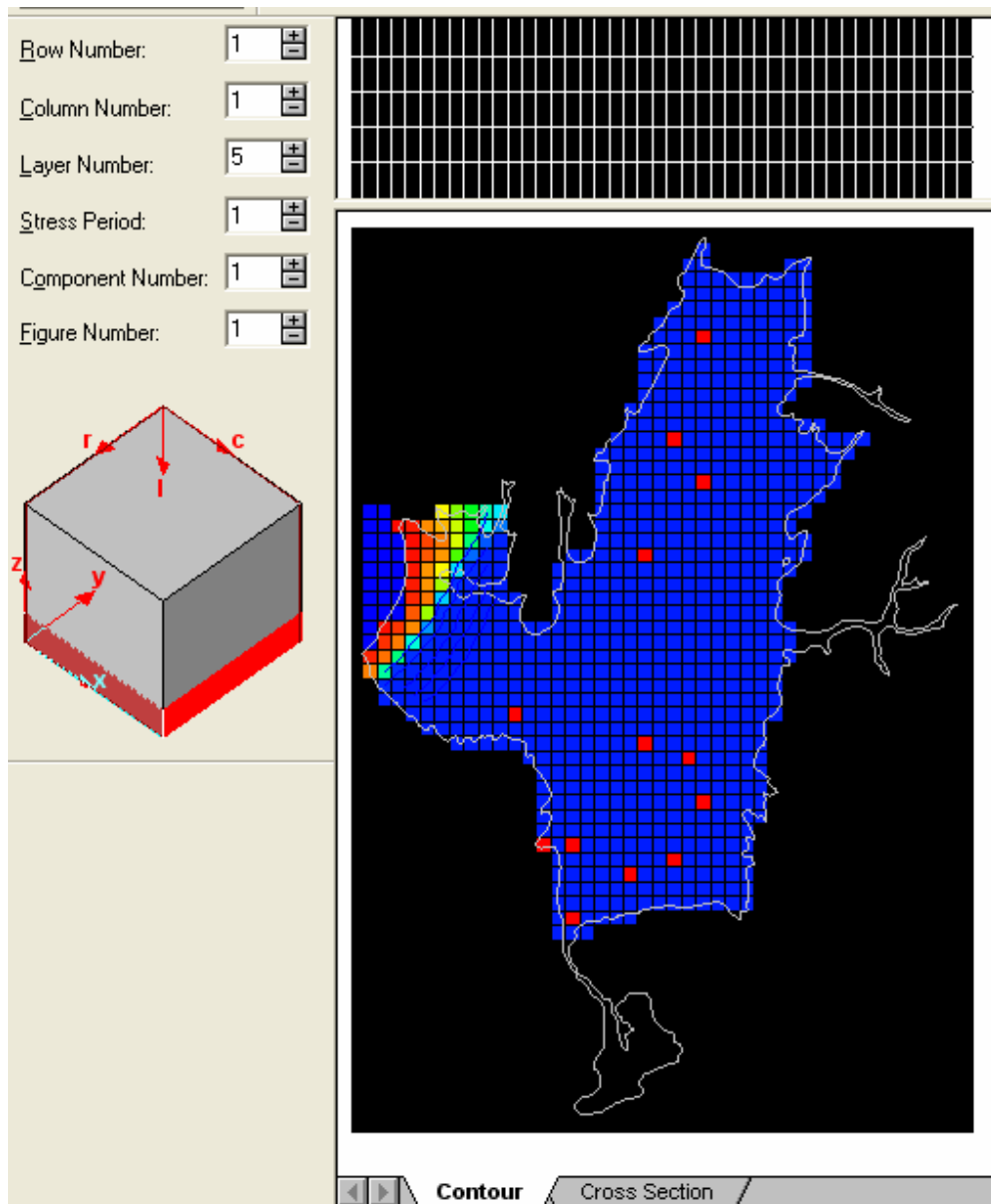
Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι το φορτίο που αποδίδεται στο όριο. Επιλέγοντας Model / MODFLOW / Package Options – Density tab ορίζουμε, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 7.8 Density tab-ορισμός φορτίου στο όριο

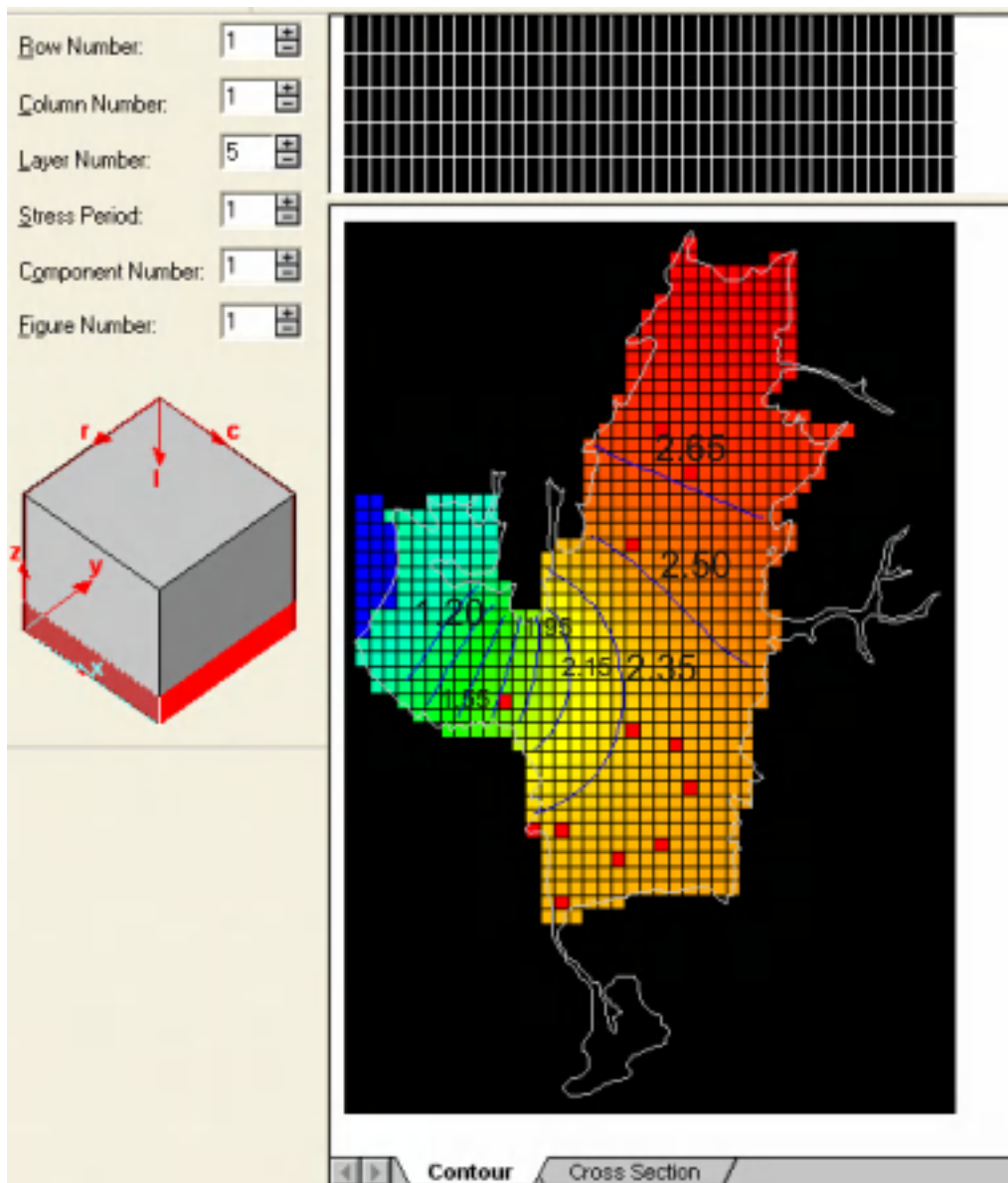
7.3 Εξαγόμενα προσομοίωσης

Αρχικά η προσομοίωση του υδροφορέα έγινε χωρίς άντληση από τα φρέατα και τις γεωτρήσεις που υπάρχουν στην περιοχή του υδροφορέα. Χρησιμοποιώντας επομένως τα διαθέσιμα στοιχεία η θέση της αλάτινης σφήνας εμφανίζεται κοντά στην ακτογραμμή, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:

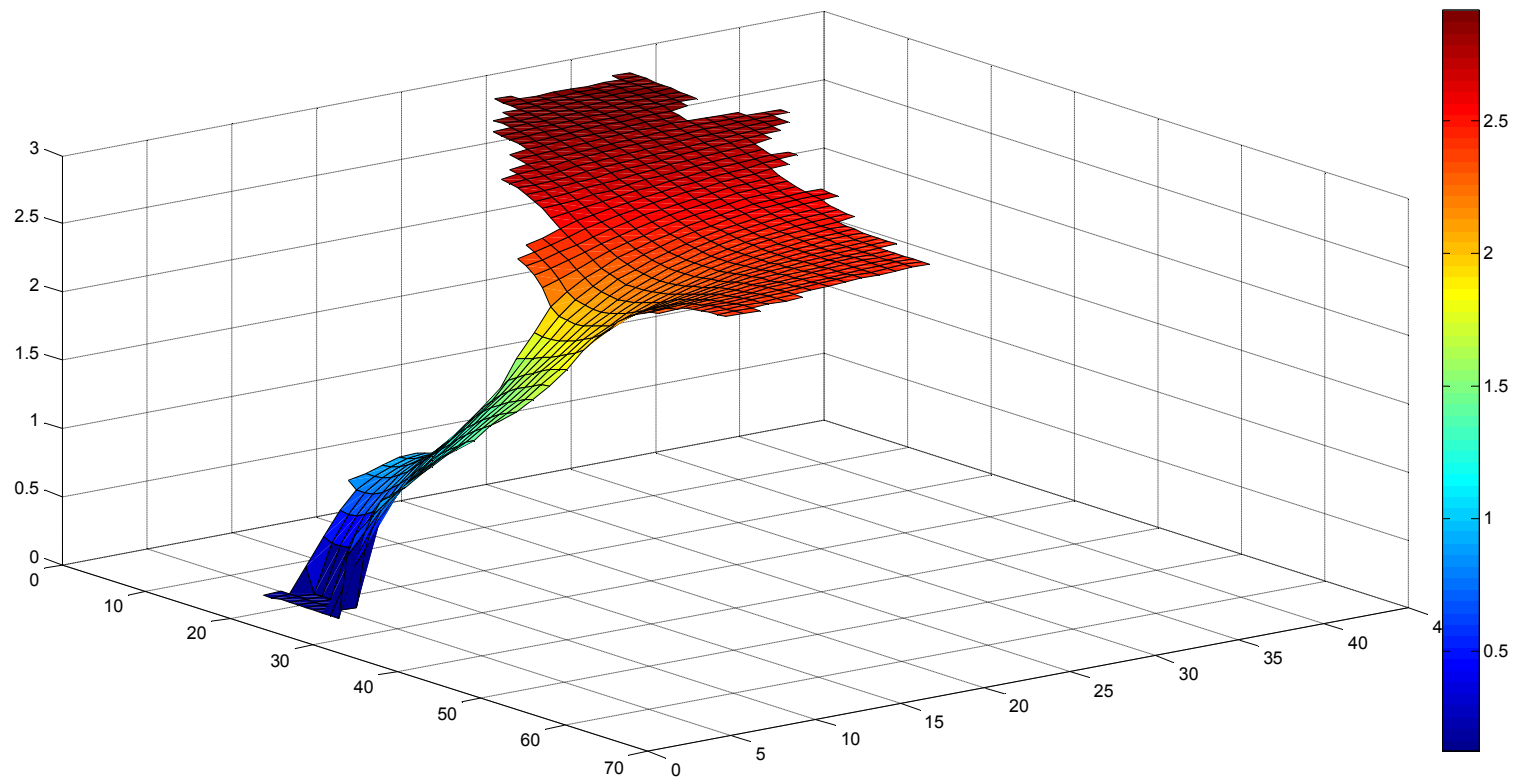


Εικόνα 7.9 Η κατανομή των συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας χωρίς άντληση από τον υδροφορέα στο επίπεδο 5 του υδροφορέα.

Αντίστοιχα οι ισοδυναμικές καμπύλες παρουσιάζονται με την παρακάτω μορφή



Εικόνα 7.10 Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση χωρίς άντληση από τον υδροφόρα στο επίπεδο 5.



Εικόνα 7.11 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης χωρίς παροχές αντλήσεων

7.4 Προσομοίωση υδροφορέα με παροχές άντλησης

7.4.1 Ισοκατανομημένη άντληση

Αν θεωρηθεί πως σε περιόδους υψηλής ζήτησης νερού, πως αντλείται το 50% του συνολικού υδατικού αποθέματος που εισρέει στον υδροφορέα τότε αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 168500 m^3 , εφόσον το συνολικό ποσό αγγίζει τα 337000 m^3 ετησίως. Βέβαια αυτά τα ποσά αντιστοιχούν σε δυσμενείς για τον υδροφορέα συνθήκες άντλησης, αφού τους χειμερινούς μήνες το ποσοστό άντλησης είναι αρκετά κάτω από το 50%(Διπλωματική Θεοδωρακόπουλος 2009 Υπεύθυνος Καθηγητής κ. Μαντόγλου).

Με επιπλέον δεδομένο ότι στην περιοχή του υδροφορέα υπάρχουν 7 γεωτρήσεις και 6 φρέατα άντλησης, θεωρείται πως σε κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί μια παροχή άντλησης της τάξης των 35 m^3 ανά ημέρα. Η τιμή αυτή εισάγεται στο περιβάλλον του προγράμματος από την εντολή Models / MODFLOW / Flow Packages/ Well, όπου επιλέγεται το κελί στο οποίο βρίσκεται το πηγάδι ή η γεώτρηση και αντιστοιχίζεται η τιμή των 35 m^3 , η οποία εισάγεται με αρνητικό πρόσημο, αφού το ποσό αυτό αφαιρείται από το υδατικό απόθεμα του υδροφορέα. Επίσης να σημειώσουμε ότι η προσομοίωση έγινε για περίοδο(stress period) 10950 ημερών δηλαδή για 30 χρόνια.

Constant Flux (Well) Boundary Condition

Modify One Boundary Cell

Spatial Location

Row number: 34

Column number: 12

Layer number: 1

Reach number: 0

Well Characteristics

Flow Rate in Well: -35

Concentration (Injection): 0

Store Data for All Chemical Components

Optimization for Managed Pumping

Unit Stimulus: 0

Radius: 0.5

Weight: 1

Install Cost: 0

Upper Bound: 0

Lower Bound: 0

Max Drawdown: 100

Pumping Cost: 0

Options

Steady-state Boundary Condition

Computed Boundary Condition

Transient Data

Component C.

Color

OK

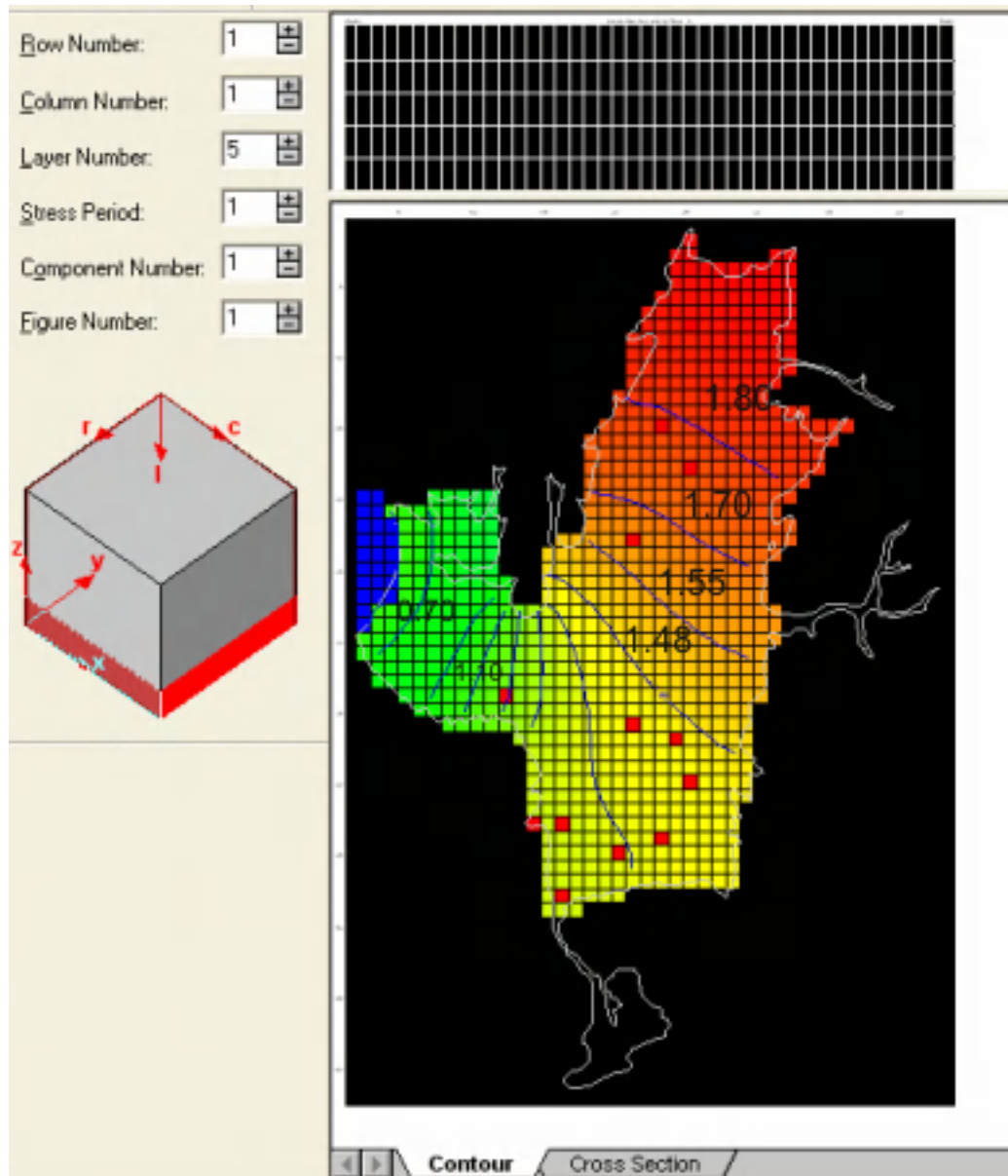
Cancel

Title

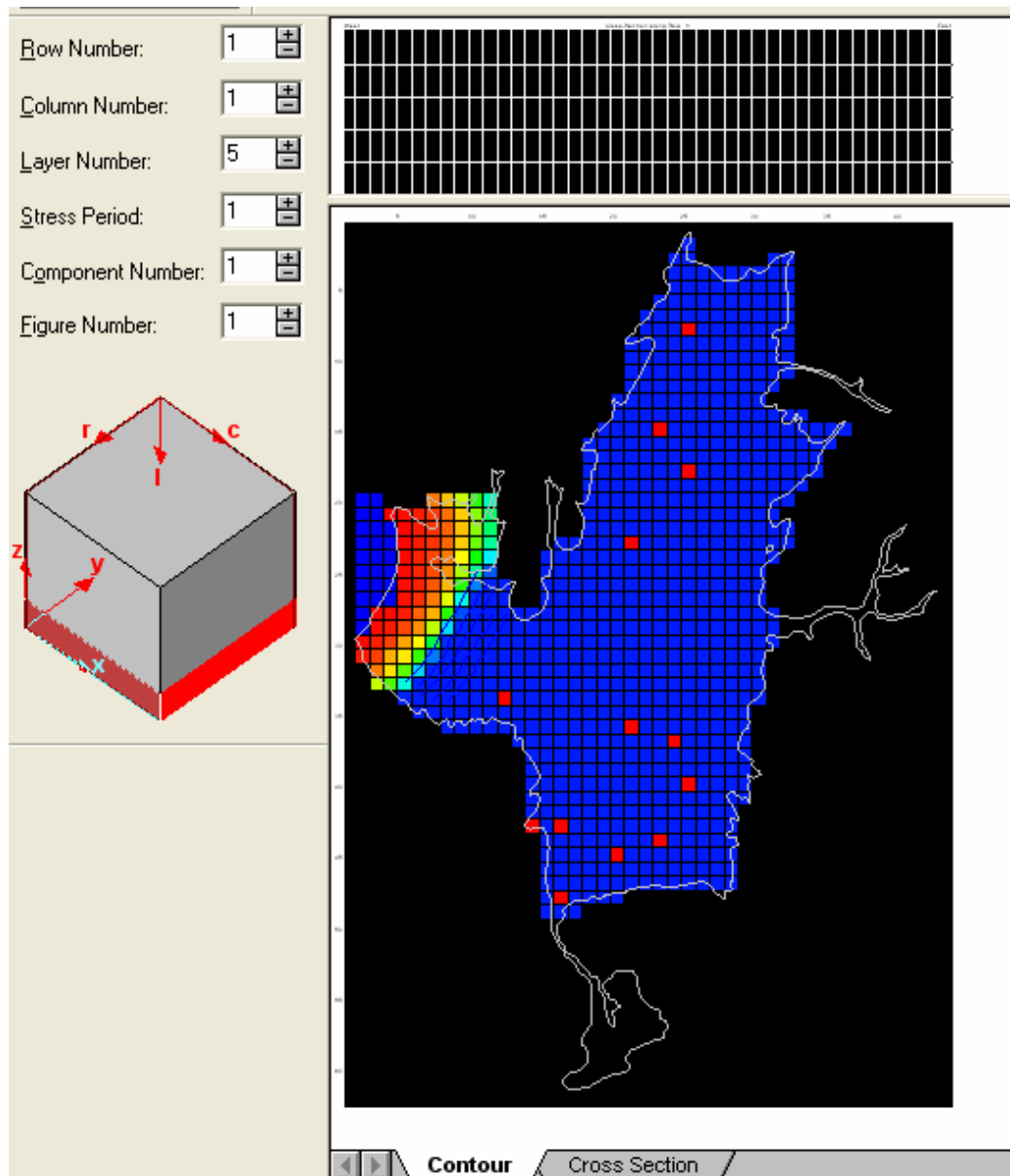
Replace Select Option when Editing an Existing Boundary Condition

Εικόνα 7.12 Εισαγωγή παροχών άντλησης

Προσομοιώνουμε τον υδροφόρα μας ξανά για να υπολογίσουμε τις καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως την μετακίνηση της αλάτινης σφίγας. Στα παρακάτω σχήματα, όπου τα κόκκινα κελιά αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των γεωτρήσεων και των φρεάτων άντλησης, εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος τα αποτελέσματα αυτά.

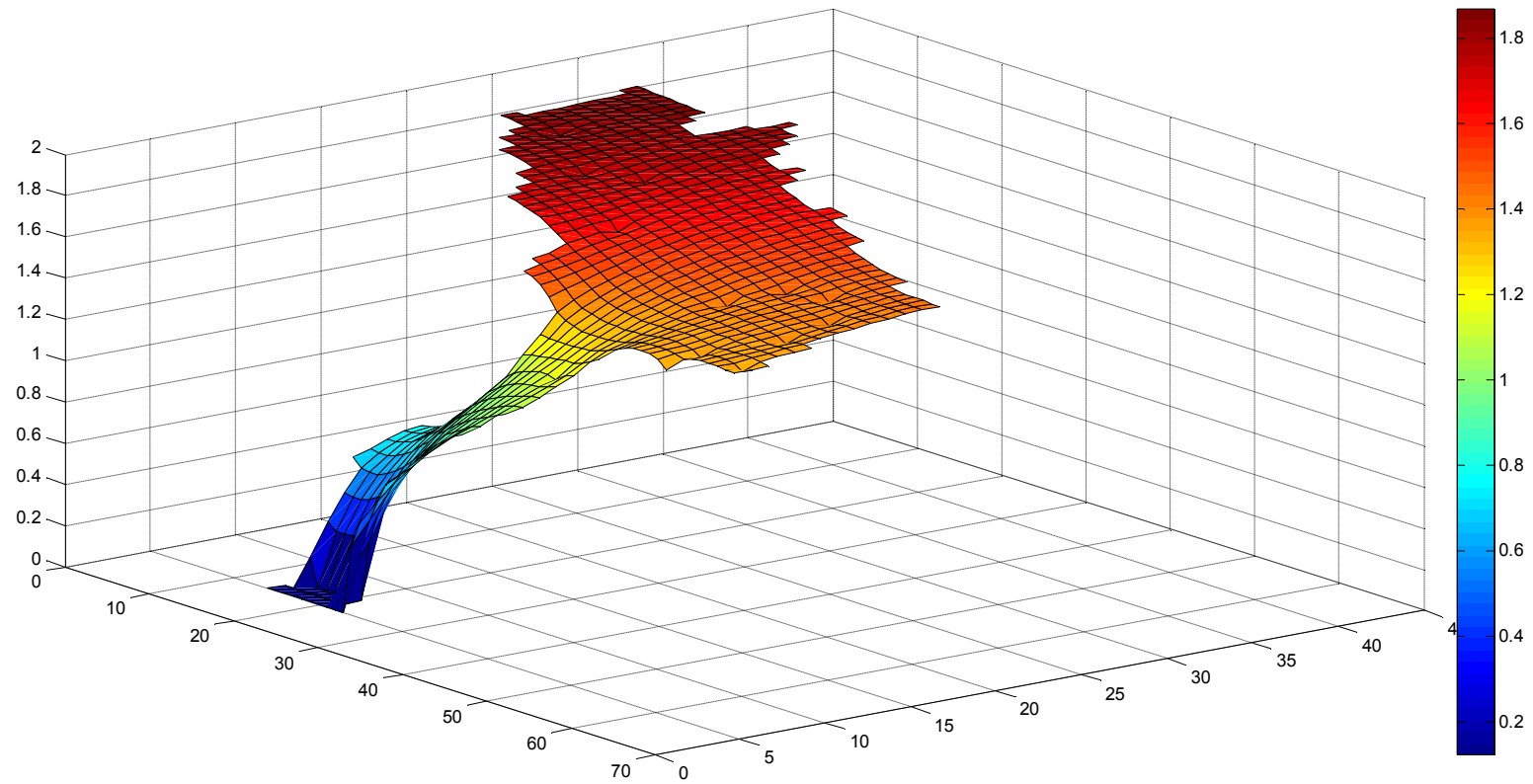


Εικόνα 7.13 Ισοδυναμικές καμπύλες μετά την προσομοίωση στο επίπεδο 5 του υδροφόρα με παροχές αντλήσεων $35\text{m}^3/\text{ημέρα}$.



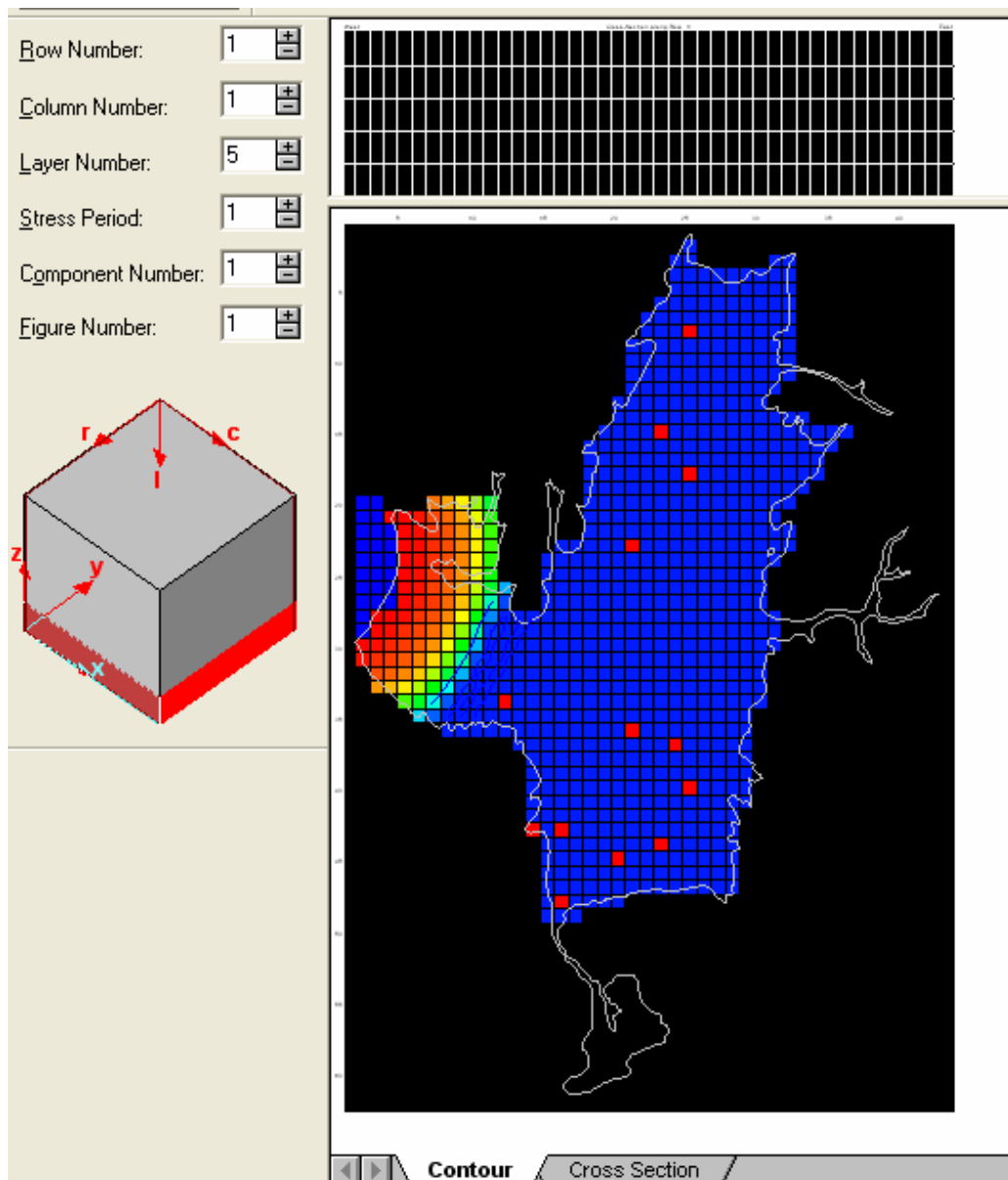
Εικόνα 7.14 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $35\text{m}^3/\text{ημέρα}$.

Είναι εμφανές πως επηρεάζουν τις τιμές του δυναμικού οι παροχές αντλήσεων, καθώς και την κατανομή των ισοδυναμικών καμπύλων στο χώρο. Όπως παρατηρούμε είναι φανερή η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε σε κατάσταση ισορροπίας. Όπως παρατηρείται, το ποσοστό του 50% της συνολικής κατείσδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, δεν αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα δεν εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα.



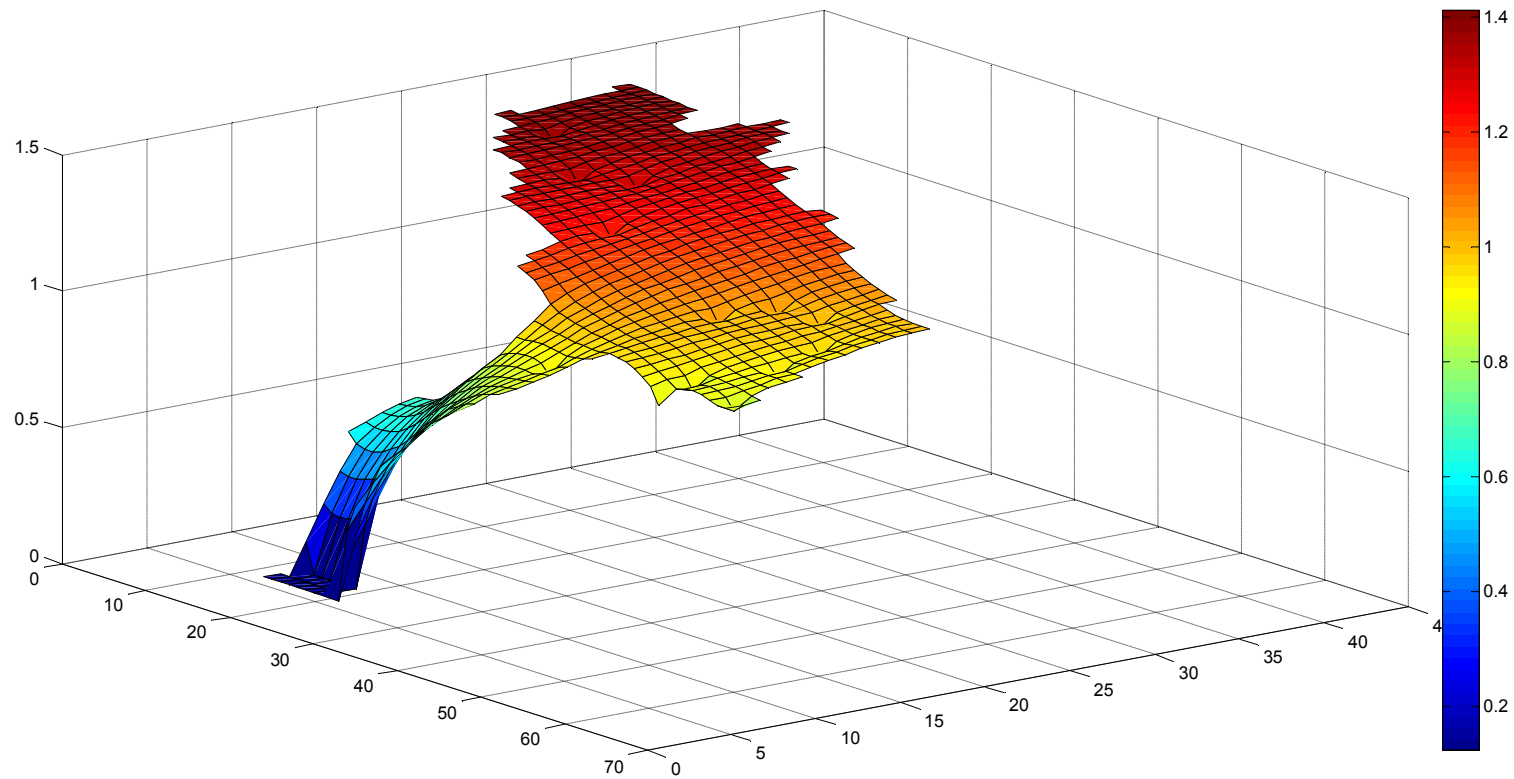
Εικόνα 7.15 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων $35\text{m}^3/\text{ημέρα}$

Προσομοιώνουμε τον υδροφορέα μας ξανά με παροχή άντλησης σε κάθε φρέαρ $50\text{m}^3/\text{ημέρα}$ που αντιστοιχεί σε 70% της συνολικής κατείδυσης για να υπολογίσουμε τις καινούριες ισοδυναμικές καμπύλες, αλλά κυρίως την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας. Στα παρακάτω σχήματα, όπου τα κόκκινα κελιά αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των γεωτρήσεων και των φρεάτων άντλησης, εμφανίζονται γραφικά στο περιβάλλον του προγράμματος τα αποτελέσματα αυτά.



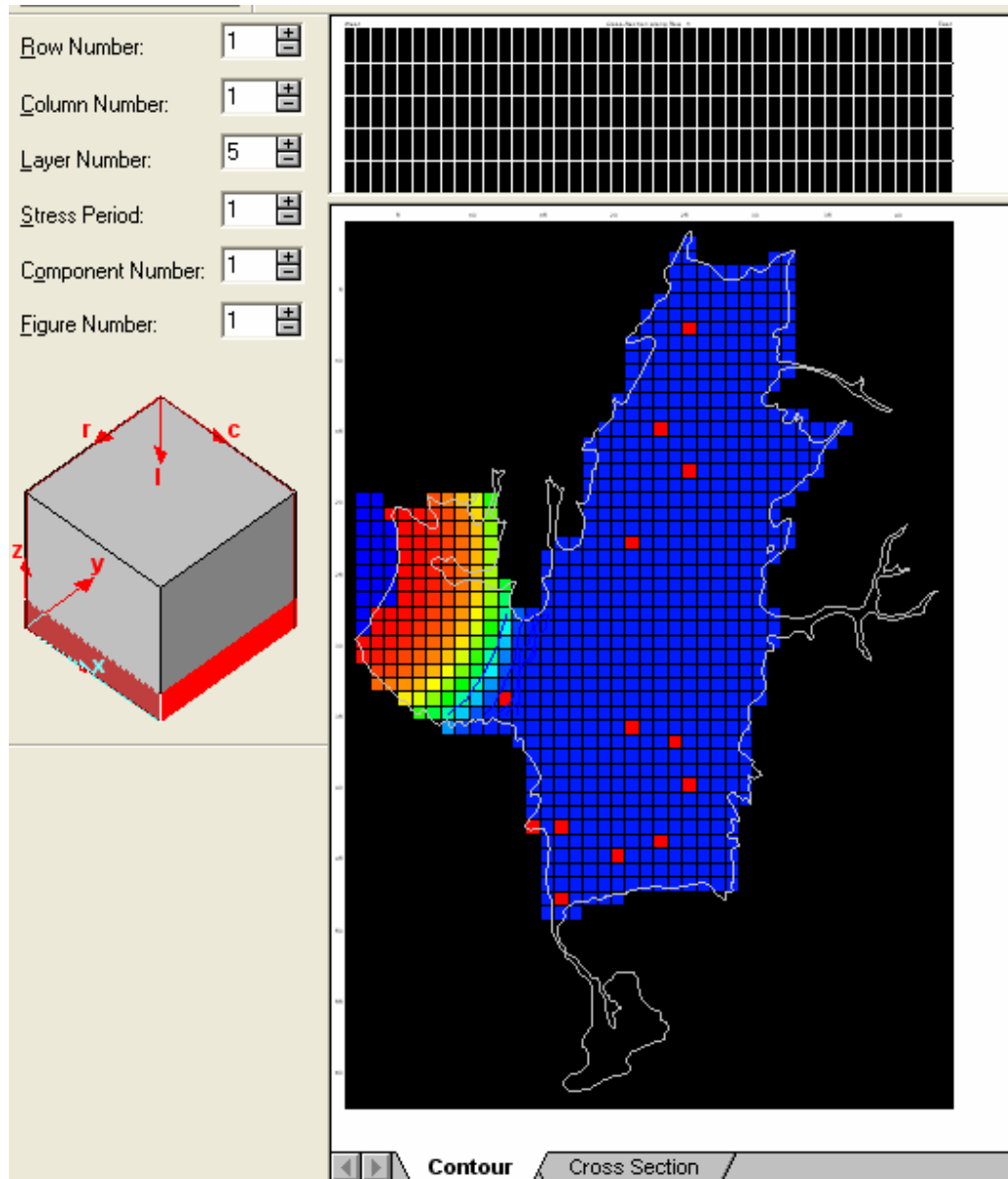
Εικόνα 7.16 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές άντλήσεων $50\text{ m}^3/\text{ημέρα}$.

Παρατηρούμε τη μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε στην προηγούμενη κατάσταση . Όπως παρατηρείται, το ποσοστό του 70% της συνολικής κατείσδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, δεν αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα δεν εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα.



Εικόνα 7.17 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων $50\text{m}^3/\text{ημέρα}$.

Προσομοιώνουμε τον υδροφορέα μας ξανά με παροχή άντλησης σε κάθε φρέαρ $60\text{m}^3/\text{ημέρα}$ που αντιστοιχεί σε 84.5% της συνολικής κατείδυσης για να δούμε την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας.

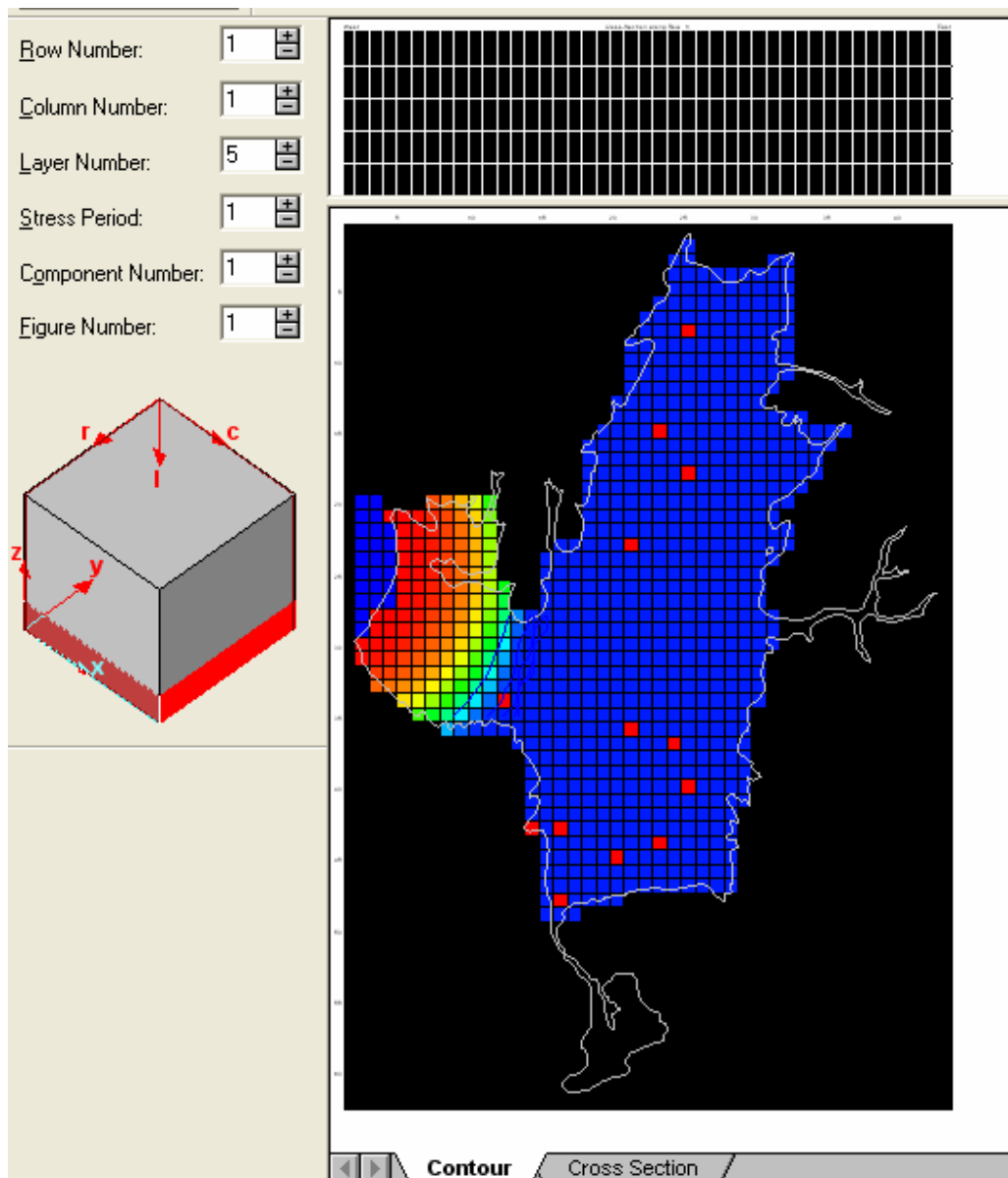


Εικόνα 7.18 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $60\text{ m}^3/\text{ημέρα}$.

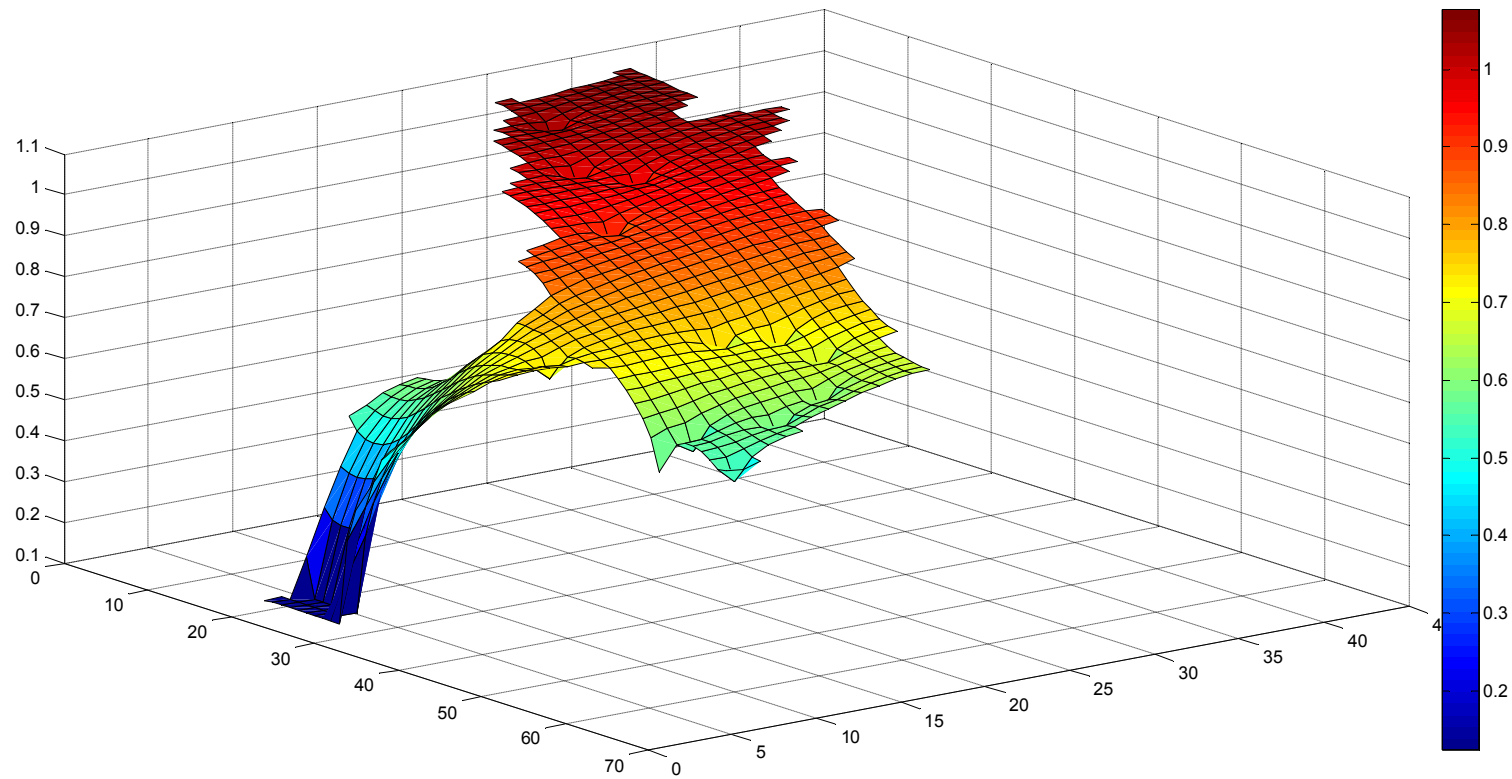
Παρατηρούμε τη μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε στην προηγούμενη κατάσταση . Όπως

παρατηρείται, το ποσοστό του 84.5% της συνολικής κατείδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, δεν αποδεικνύεται κρίσιμο αφού η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο νερό δεν υπερβαίνει τη οριακή τιμή $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ για το πηγάδι Φ14 που είναι κοντά στη θάλασσα, δυτικά του υδροφορέα. Η τιμή που λαμβάνει είναι $0.19\text{kg}/\text{m}^3$.

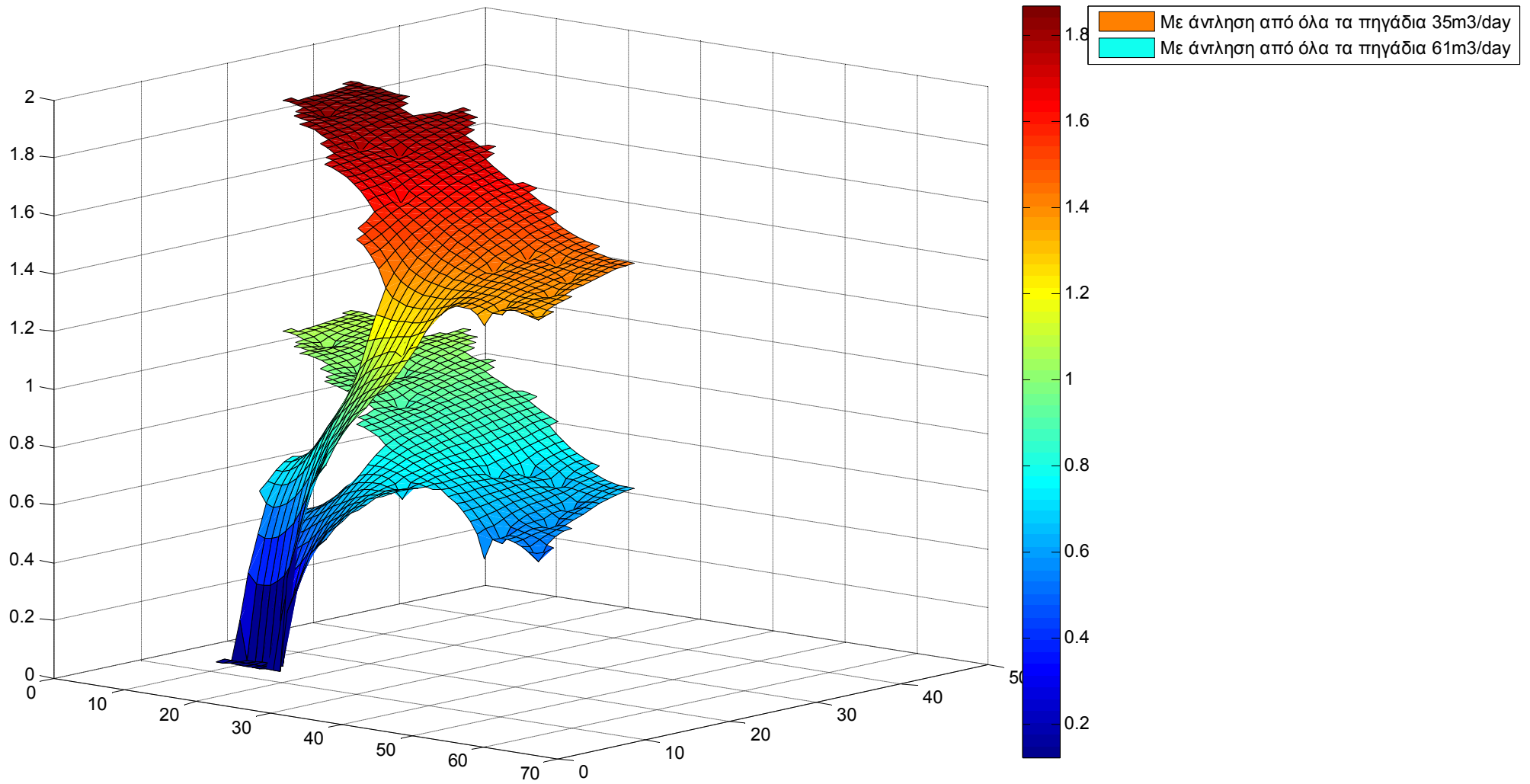
Προσομοιώνουμε τον υδροφορέα μας ξανά με παροχή άντλησης σε κάθε φρέαρ $61\text{m}^3/\text{ημέρα}$ που αντιστοιχεί σε 85.9% της συνολικής κατείδυσης για να δούμε την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας



Εικόνα 7.19 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $61\text{m}^3/\text{ημέρα}$.



Εικόνα 7.20 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων $61\text{m}^3/\text{ημέρα}$



Εικόνα 7.21 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων 35m³/ημέρα και 61m³/ημέρα σε όλα τα φρέατα.

Όπως παρατηρούμε το ποσοστό του 85.9% της συνολικής κατείδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα και η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο φρέαρ Φ14 είναι 0.49kg/m³. Στην περιοχή του υδροφορέα που υφαλμυρώνεται βρίσκεται το φρέαρ Φ14, από το οποίο πλέον είναι πολύ πιθανό να αντληθούν υφάλμυρες ποσότητες νερού ενώ συγχρόνως παρατηρούνται και πολύ μικρότερες τιμές υδραυλικού φορτίου .

Τα συγκεντρωτικά στοιχεία για τις παραπάνω προσομοιώσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)
Φ14	35	50	60	61
Φ9	35	50	60	61
Γ15	35	50	60	61
Φ7	35	50	60	61
Φ5	35	50	60	61
Φ8	35	50	60	61
Φ10	35	50	60	61
Γ11	35	50	60	61
Γ12	35	50	60	61
Γ16	35	50	60	61
Γ9	35	50	60	61
Γ13	35	50	60	61
Γ10	35	50	60	61
ΤΙΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΔΙΑΛΥΜΕΝΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ Φ14				
	0	0	0.19114	0.49284
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/ημέρα)	455	650	780	793
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/έτος)	166075	237250	284700	289445
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ(m3/έτος)	337000	337000	337000	337000
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	49,28%	70,40%	84,48%	85,89%

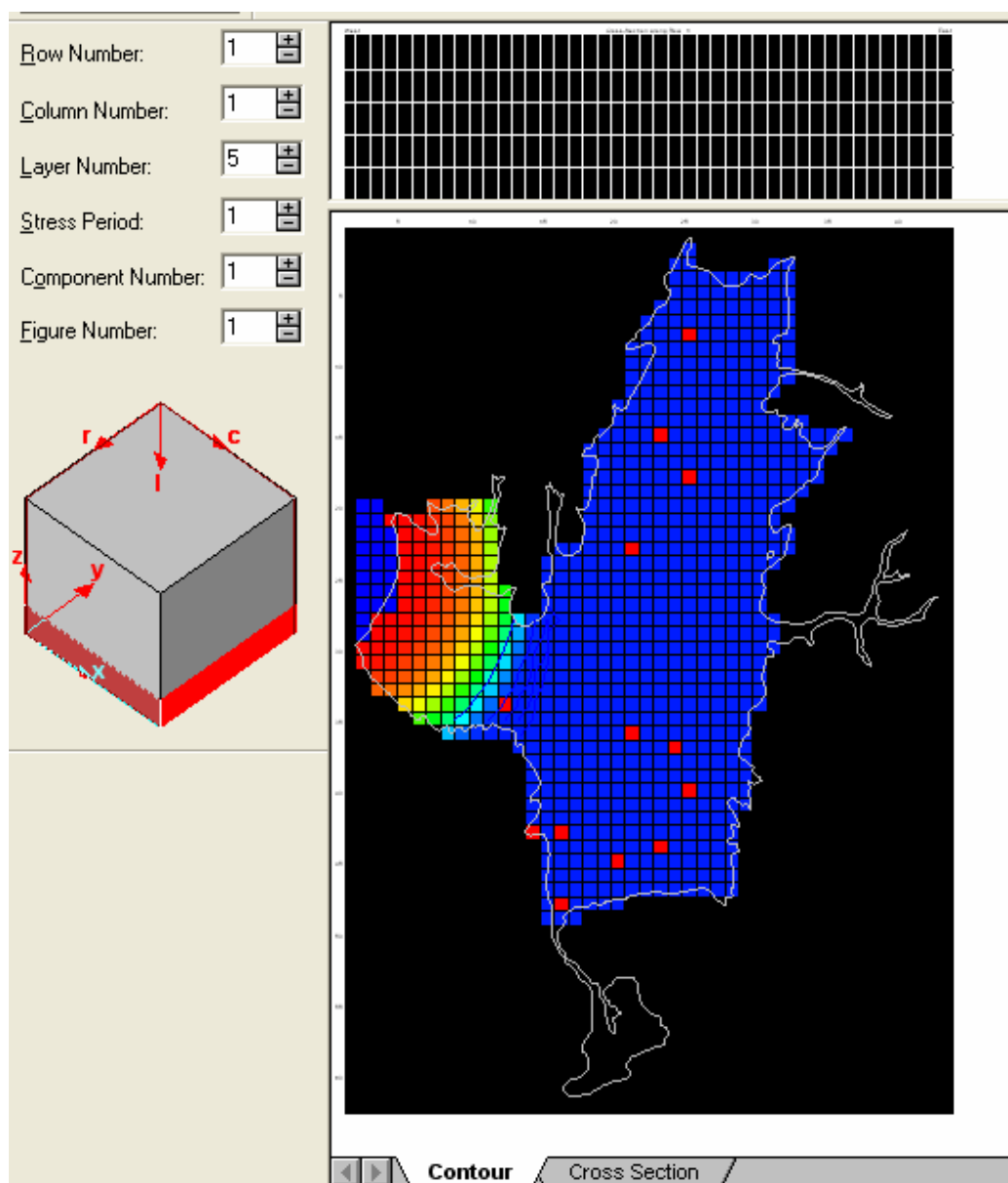
Πίνακας 7.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία προσομοιώσεων

Άρα η μέγιστη ημερήσια άντληση είναι $793 \text{ m}^3/\text{έτος}$ που αντιστοιχεί σε μέγιστη ετήσια $289445 \text{ m}^3/\text{έτος}$ και ποσοστό άντλησης 85.89%.

7.4.2 Αφαίρεση άντλησης νερού από το φρέαρ Φ14

Εν συνεχεία έγιναν προσομοιώσεις του μοντέλου του υδροφορέα μας αφαιρώντας την άντληση από το φρέαρ Φ14 καθώς επειδή είναι το πηγάδι που βρίσκεται κοντά στη θάλασσα πιθανή μη άντληση από το συγκεκριμένο να οδηγούσε σε μεγαλύτερες τιμές ετήσιας άντλησης από τον υδροφορέα μας.

Αρχικά προσομοιώνουμε τον υδροφορέα μας με παροχή άντλησης σε κάθε φρέαρ $67\text{m}^3/\text{ημέρα}$ πλην του Φ14 που αντιστοιχεί σε 87.08% της συνολικής κατείσδυσης για να δούμε την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας και αν είναι δυνατή η συγκεκριμένη άντληση .



Εικόνα 7.23 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $67\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα εκτός από το Φ14 που έχει μηδενική άντληση.

Όπως παρατηρούμε το ποσοστό του 87.08% της συνολικής κατείσδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα και η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο φρέαρ Φ14 είναι 0.46kg/m³. Στην περιοχή του υδροφορέα που υφαλμυρώνεται βρίσκεται το φρέαρ Φ14, από το οποίο πλέον είναι πολύ πιθανό να αντληθούν υφάλμυρες ποσότητες νερού .

Συγκρίνοντας λοιπόν τη συγκεκριμένη προσομοίωση με την περίπτωση που αντλούσαμε 61m³/ημέρα από κάθε φρέαρ παρατηρούμε ότι:

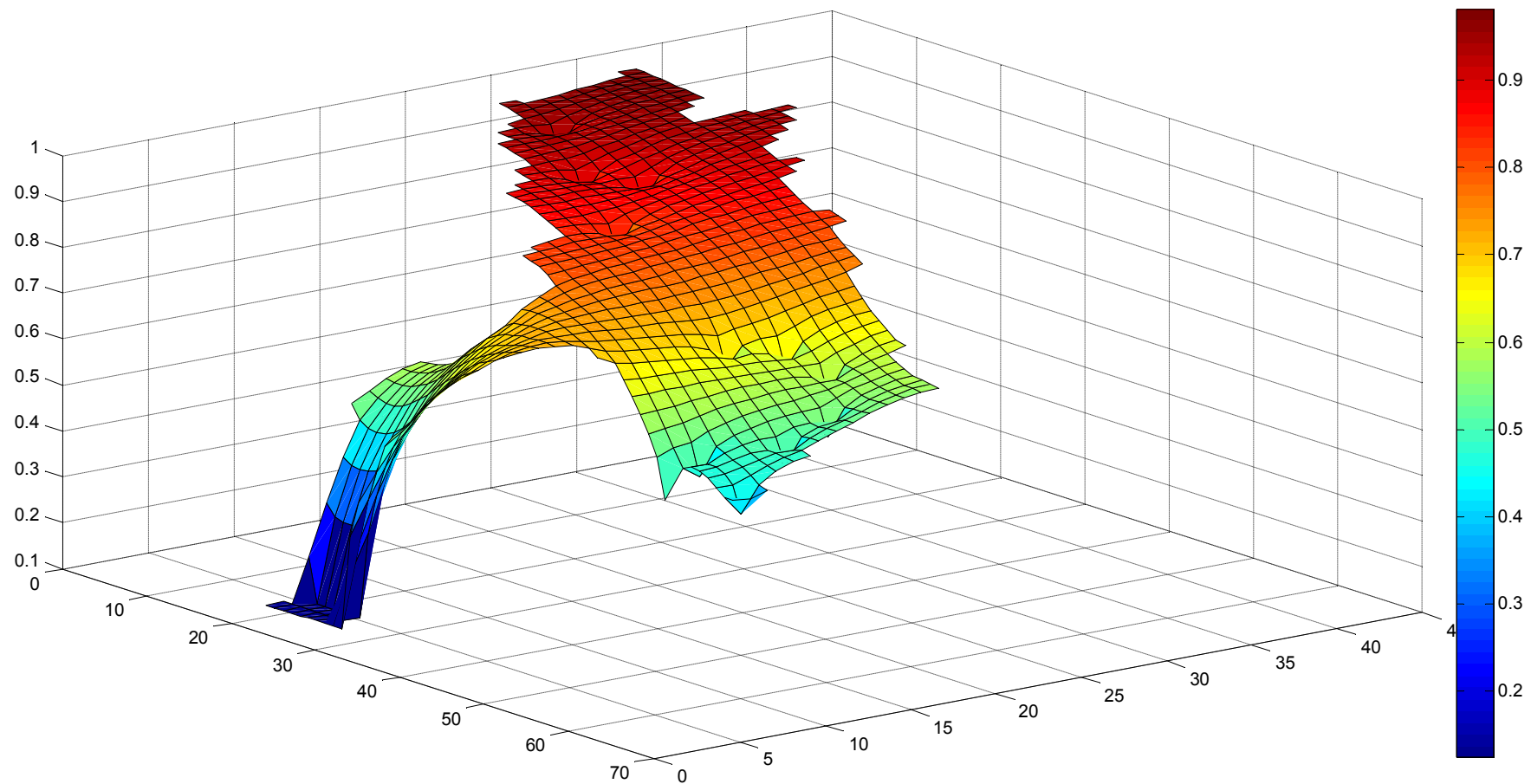
ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)
Φ14	61	0
Φ9	61	67
Γ15	61	67
Φ7	61	67
Φ5	61	67
Φ8	61	67
Φ10	61	67
Γ11	61	67
Γ12	61	67
Γ16	61	67
Γ9	61	67
Γ13	61	67
Γ10	61	67
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ		
Φ14	0,49284	0,4572
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/ημέρα)	793	804
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/έτος)	289445	293460
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ(m3/έτος)	337000	337000
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	85,89%	87,08%

Πίνακας 7.2 Συγκεντρωτικά στοιχεία των δύο προσομοιώσεων

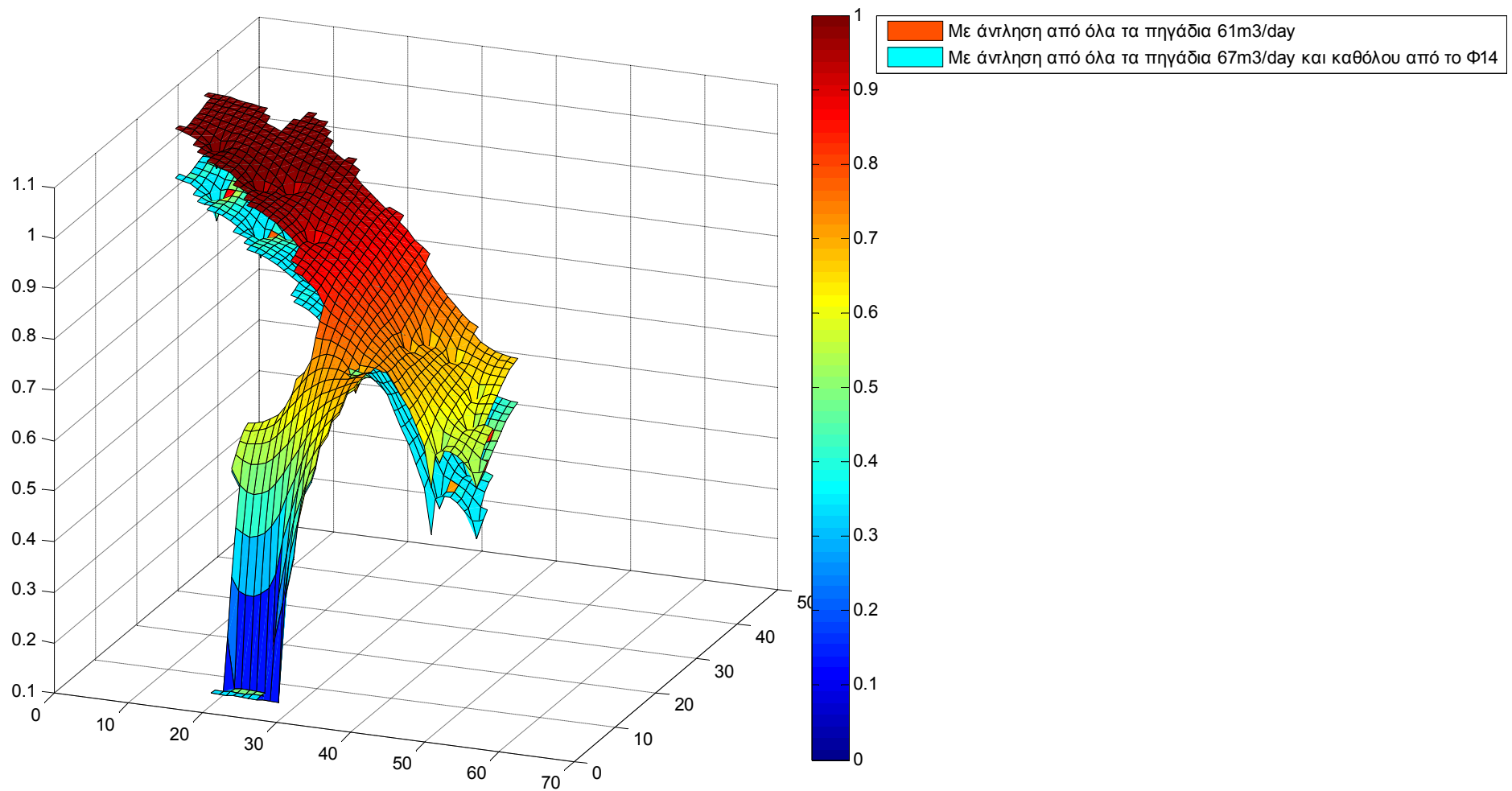
ΔΙΑΦΟΡΕΣ	
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ	0,03564
Φ14	
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/ημέρα)	-11
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/έτος)	-4015
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	-1,19%

Εικόνα 7.24 Διαφορές των συγκεντρικών στοιχείων των δύο προσομοιώσεων

Άρα παρατηρούμε ότι η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο πηγάδι Φ14 με την προσομοίωση όπου δεν έχουμε άντληση από αυτό είναι 0.03 μικρότερη επίσης η αθροιστική ημερήσια άντληση είναι 11m3/ημέρα περισσότερη που αντιστοιχεί ετήσια σε 4015 m3/έτος περισσότερο.



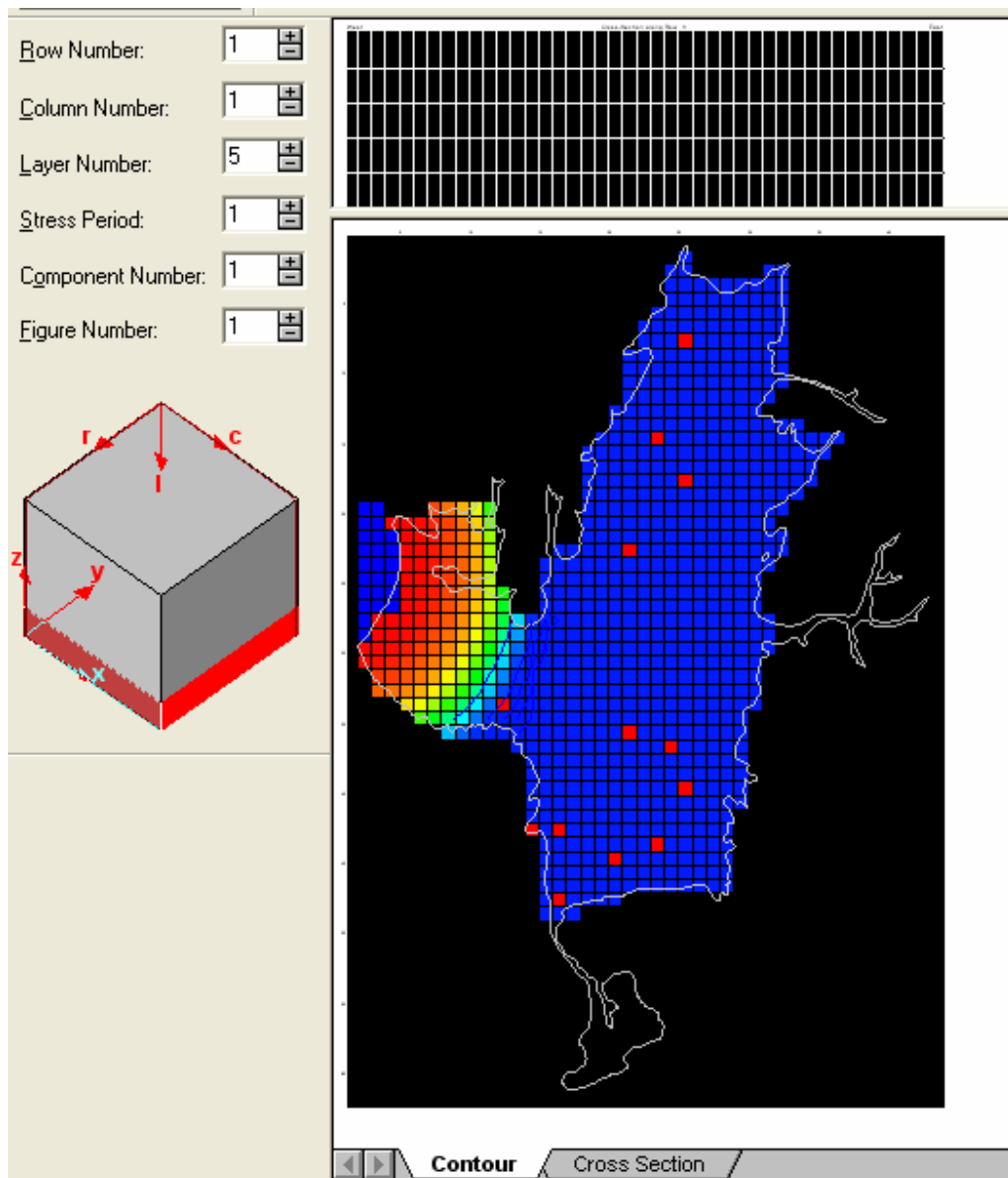
Εικόνα 7.25 Τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων $67\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα εκτός από το Φ14 που έχει μηδενική άντληση.



Εικόνα 7.26 Συγκριτική τρισδιάστατη απεικόνιση τιμών υδραυλικού φορτίου h_f σε όλη την έκταση του υδροφορέα μελέτης με παροχές αντλήσεων $67\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα εκτός από το Φ14 που έχει μηδενική άντληση με την προσομοίωση όπου αντλούμε $61\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα.

7.4.3 Δοκιμαστικές αντλήσεις νερού στο φρέαρ Φ14.

Θα εξετάσουμε την περίπτωση στην οποία αντλούμε από το φρέαρ Φ14 $10\text{m}^3/\text{ημέρα}$ και από τα υπόλοιπα φρέατα $66\text{m}^3/\text{ημέρα}$ που αντιστοιχεί σε 86.86% της συνολικής κατείδυσης για να δούμε την μετακίνηση της αλάτινης σφήνας και αν είναι δυνατή η συγκεκριμένη άντληση .



Εικόνα 7.28 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $66\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα εκτός από το Φ14 που έχει άντληση $10\text{m}^3/\text{ημέρα}$.

Συγκρίνοντας λοιπόν τη συγκεκριμένη προσομοίωση με την περίπτωση που αντλούσαμε 61m³/ημέρα από κάθε φρέαρ παρατηρούμε ότι:

ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΛΗΣΗ (m³/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m³/ημέρα)
Φ14	61	10
Φ9	61	66
Γ15	61	66
Φ7	61	66
Φ5	61	66
Φ8	61	66
Φ10	61	66
Γ11	61	66
Γ12	61	66
Γ16	61	66
Γ9	61	66
Γ13	61	66
Γ10	61	66
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ		
Φ14	0,49284	0.46949
	793	802
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m³/ημέρα)		
	289445	292730
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m³/έτος)		
	337000	337000
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ(m³/έτος)		
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	85,89%	86,86%

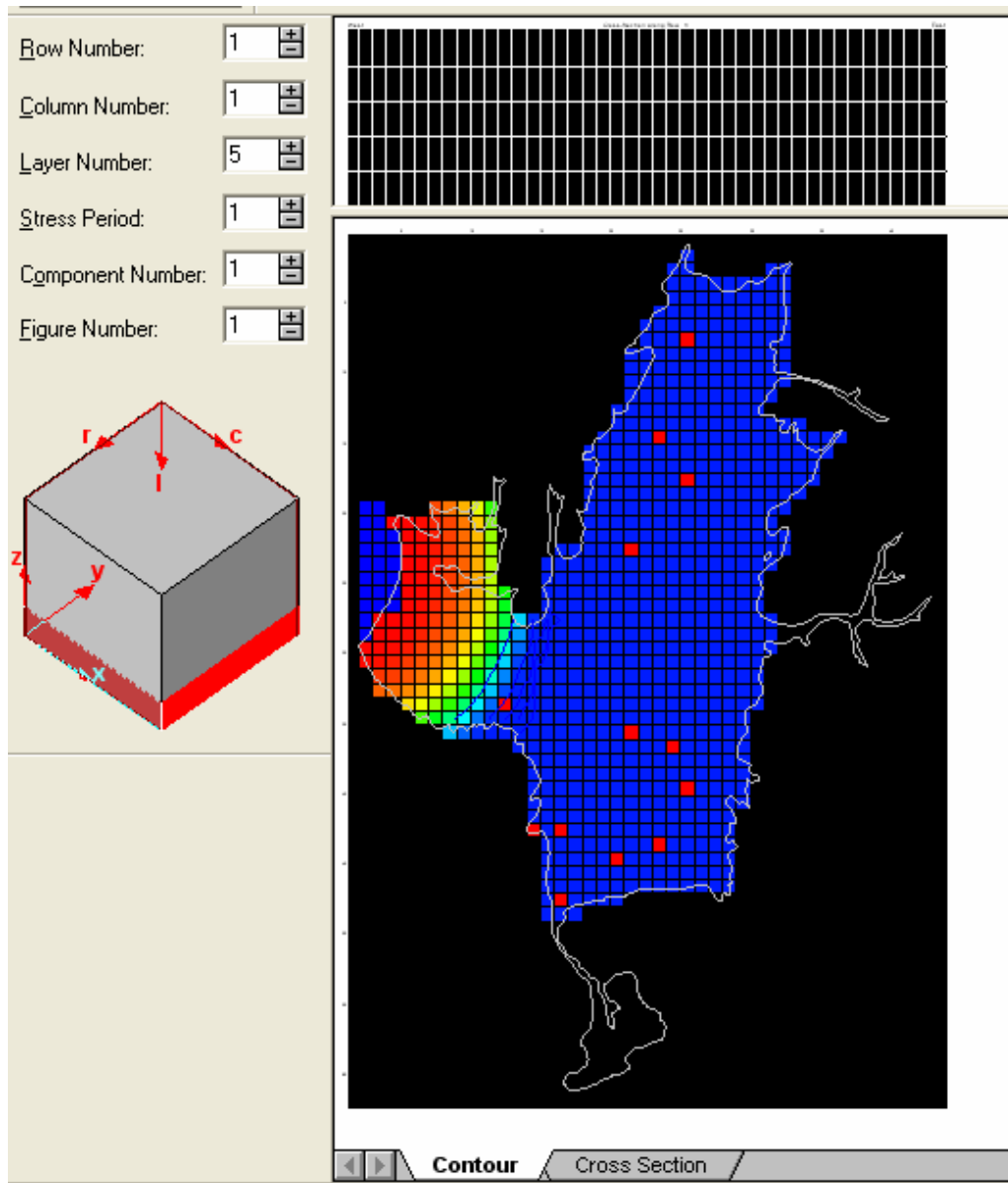
Πίνακας 7.3 Συγκεντρωτικά στοιχεία των δύο προσομοιώσεων

ΔΙΑΦΟΡΕΣ	
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ	0,02335
Φ14	
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m ³ /ημέρα)	-9
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m ³ /έτος)	-3285
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	-0,97%

Πίνακας 7.4 Διαφορές των δύο προσομοιώσεων

Άρα παρατηρούμε ότι η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο πηγάδι Φ14 με την προσομοίωση που έχουμε άντληση από αυτό 10 m³/ημέρα είναι 0.02 μικρότερη επίσης η αθροιστική ημερήσια άντληση είναι 9m³/ημέρα περισσότερη που αντιστοιχεί ετήσια σε 3285 m³/έτοςπερισσότερο.

Τέλος , ύστερα έγινε μια τελευταία προσομοίωση όπου παρατηρήσαμε ότι αν θέλουμε να έχουμε 65 m³/ημέρα από όλα τα υπόλοιπα αλλά να μπορούμε να έχουμε και μια μικρή άντληση από το Φ14 η μέγιστη τιμή για αυτή την άντληση είναι 20 m³/ημέρα.Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 7.29 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα μετά την προσομοίωση με παροχές αντλήσεων $65\text{m}^3/\text{ημέρα}$ σε όλα τα φρέατα εκτός από το Φ14 που έχει άντληση $20\text{ m}^3/\text{ημέρα}$.

Συγκρίνοντας λοιπόν τη συγκεκριμένη προσομοίωση με την περίπτωση που αντλούσαμε 61m³/ημέρα από κάθε φρέαρ παρατηρούμε ότι:

ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)
Φ14	61	20
Φ9	61	65
Γ15	61	65
Φ7	61	65
Φ5	61	65
Φ8	61	65
Φ10	61	65
Γ11	61	65
Γ12	61	65
Γ16	61	65
Γ9	61	65
Γ13	61	65
Γ10	61	65
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ		
Φ14	0,49284	0.47791
	793	800
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/ημέρα)		
	289445	292000
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/έτος)		
	337000	337000
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ(m3/έτος)		
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	85,89%	86,65%

Πίνακας 7.5 Συγκεντρωτικά στοιχεία των δύο προσομοιώσεων

ΔΙΑΦΟΡΕΣ	
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ	0,01493
Φ14	
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m ³ /ημέρα)	-7
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m ³ /έτος)	-2555
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	-0,76%

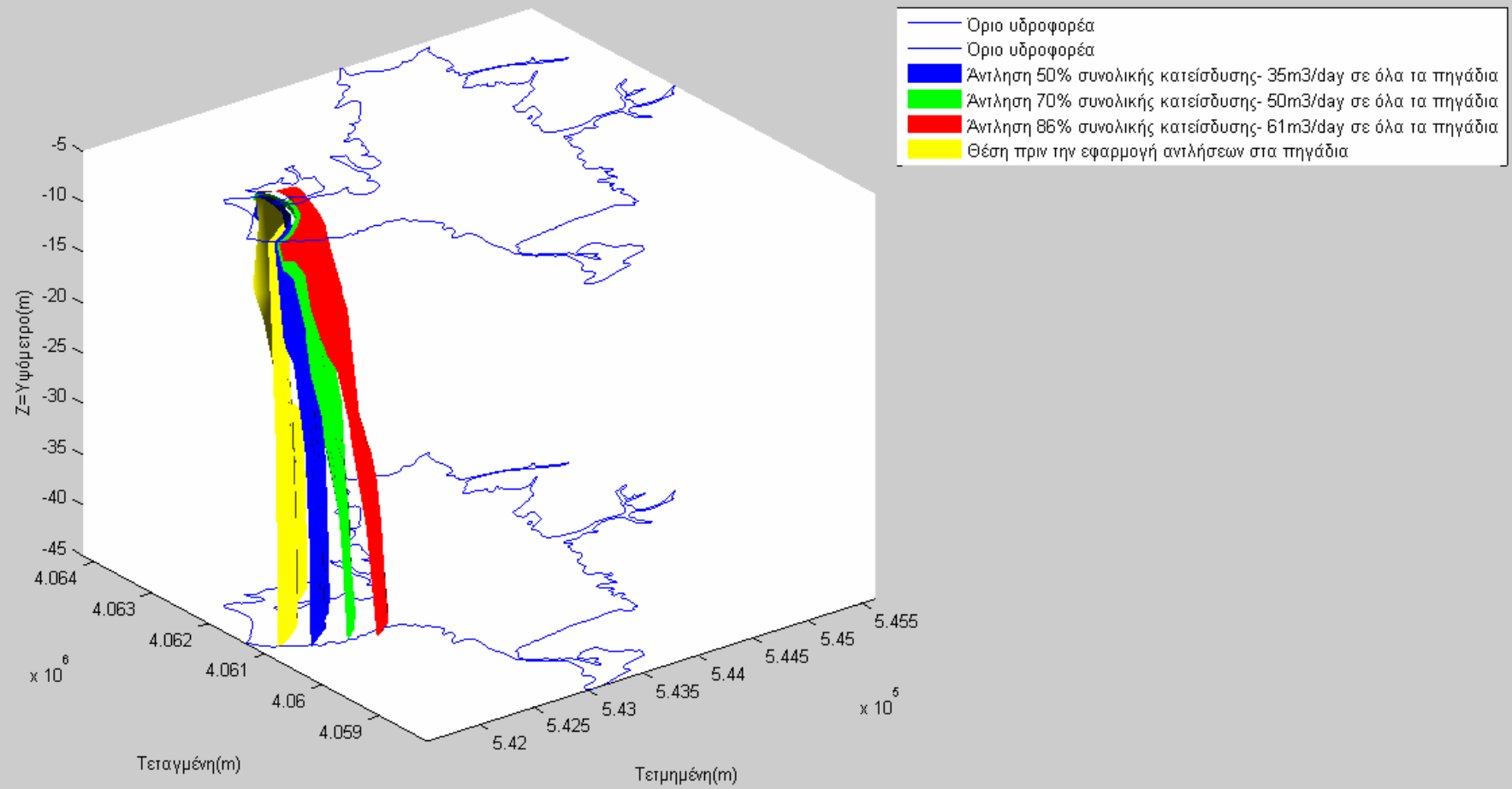
Πίνακας 7.6 Διαφορές των δύο προσομοιώσεων

Άρα παρατηρούμε ότι η τιμή της συγκέντρωσης των διαλυμένων ουσιών στο πηγάδι Φ14 με την προσομοίωση που έχουμε άντληση από αυτό 20 m³/ημέρα είναι 0.01 μικρότερη επίσης η αθροιστική ημερήσια άντληση είναι 7m³/ημέρα περισσότερη που αντιστοιχεί ετήσια σε 2555 m³/έτοςπερισσότερο.

ΟΝΟΜΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)	ΑΝΤΛΗΣΗ (m3/ημέρα)
Φ14	35	50	60	61	0	0	10	20	20
Φ9	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ15	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Φ7	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Φ5	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Φ8	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Φ10	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ11	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ12	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ16	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ9	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ13	35	50	60	61	65	67	66	64	65
Γ10	35	50	60	61	65	67	66	64	65
ΤΙΜΗ ΓΙΑ ΤΟ ΠΗΓΑΔΙ Φ14(συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων kg/m3)	0	0	0.19114	0,49284	0.04654	0,4572	0,46949	0.19197	0,47791
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/ημέρα)	455	650	780	793	780	804	802	788	800
ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗ(m3/έτος)	166075	237250	284700	289445	284700	293460	292730	287620	292000
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΘΕΜΑ(m3/έτος)	337000	337000	337000	337000	337000	337000	337000	337000	337000
ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	49,28%	70,40%	84,48%	85,89%	84,48%	87,08%	86,86%	85,35%	86,65%

Πίνακας 7.7 Συγκεντρωτικά στοιχεία όλων των προσομοιώσεων

Διάγραμμα συγκέντρωσης της ισογλώριας των 0.5kg/m³ σε 3 Σενάρια άντλησης



Εικόνα 7.30 Διάγραμμα συγκέντρωσης της ισογλώριας των 0.5kg/m³ σε 3 σενάρια άντλησης

Όπως φαίνεται , η αλάτινη σφήνα εμφανίζεται στην περιοχή εκείνη που υπάρχουν αρνητικές τιμές του υδραυλικού φορτίου, όπως αυτές προέκυψαν στο κεφάλαιο 4, αποτέλεσμα που κρίνεται λογικό. Είναι φανερό η μετακίνηση της αλάτινης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, σε σχέση με τη θέση που είχε πριν την εφαρμογή αντλήσεων. Όπως παρατηρείται, το ποσοστό 86% της συνολικής κατείδυσης που χρησιμοποιήθηκε ως παροχή άντλησης, αποδεικνύεται κρίσιμο, αφού η αλάτινη σφήνα εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα και παρουσιάζει συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών 0.5kg/m³. Στην περιοχή του υδροφορέα που υφαλμυρώνεται βρίσκεται το φρέαρ Φ14, από το οποίο πλέον είναι πολύ πιθανό να αντληθούν υφάλμυρες ποσότητες νερού. Για μεγαλύτερες, λοιπόν , τιμές άντλησης η θέση της αλάτινης σφήνας εισέρχεται περισσότερο στο εσωτερικό του υδροφορέα και πλησιάζει το φρέαρ Φ14. Για μικρότερες τιμές άντλησης διατηρούνται πιο υψηλές τιμές δυναμικού και το πόδι της αλάτινης σφήνας περιορίζεται σε ανεκτό επίπεδο , σε ότι αφορά την υφαλμύρωση του υδροφορέα. Ο περιορισμός του ποσοστού υφαλμύρωσης σε δυσμενές συνθήκες άντλησης οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στη γεωμετρία του υδροφορέα και κυρίως στο γεγονός πως παρουσιάζει μικρό μέτωπο προς τη θάλασσα, με αποτέλεσμα να εμποδίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του υδροφορέα, εκεί όπου βρίσκονται τα περισσότερα φρέατα άντλησης και οι γεωτρήσεις. Επίσης από τις προσομοιώσεις φαίνεται ότι αν δεν αντλήσουμε καθόλου από το πηγάδι Φ14 το σύστημα του υδροφορέα μας δίνει τη δυνατότητα να αντλήσουμε ελαφρώς μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Άρα το πιο «κρίσιμο» πηγάδι και το πιο ευπαθές είναι το Φ14, από το οποίο διαμορφώνοντας κάποια διαχειριστική πολιτική κατά πάσα πιθανότητα δε θα πρέπει να αντλούμε καθόλου.

7.5 Εκτίμηση Αναγκών σε Νερό

Σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που πραγματοποιήθηκε από την Κοινοπραξία Υδατοσυστημάτων Αιγαίου, η νήσος Μήλος αντιμετωπίζει ελλειμματικότητα κυρίως σε ότι αφορά την ύδρευση. Το κύριο πρόβλημα εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα, όπου εντοπίζεται η περιοχή μελέτης μας, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων. Οι εκτεταμένες αντλήσεις έχουν επιφέρει ως αποτέλεσμα την υφαλμύριση των υδροφορέων και ως εκ τούτου την ακαταλληλότητά τους για υδρευτική χρήση.

Πιο συγκεκριμένα, οι ανάγκες της νήσου διαχωρίζονται σε υδρευτικές, αρδευτικές, κτηνοτροφίας και βιομηχανίας. Οι ανάγκες της βιομηχανίας και κτηνοτροφίας ομαδοποιούνται με τις ανάγκες ύδρευσης, καθώς η εξυπηρέτησή τους γίνεται από το δίκτυο ύδρευσης. Οι αρδευτικές ανάγκες αποτελούν ανεξάρτητο κόμβο ζήτησης.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ	
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΝΑΓΚΩΝ	ΕΤΗΣΙΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ (m³)
ΥΔΡΕΥΣΗ	381480
ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ	45817
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	11310
ΑΡΔΕΥΣΗ	628867
ΣΥΝΟΛΟ	1067474

Πίνακας 7.8 Ετήσιες ανάγκες σε νερό ανά κατηγορία για τη νήσο Μήλο (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)

Είναι προφανές πως πάνω από το 50% των συνολικών αντιστοιχεί στις αρδευτικές ανάγκες, ενώ μαζί με τις ανάγκες ύδρευσης το ποσοστό αυτό αγγίζει το 95%. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως οι ανάγκες ύδρευσης υπολογίζονται μαζί με τις εκτιμώμενες απώλειες του δικτύου, που φτάνουν σε ποσοστό το 30%. Οι εκτιμώμενες μέσες ετήσιες απολήψεις, οι μετρημένες καταναλώσεις και οι μεταφερόμενες ποσότητες σύμφωνα με τα διατιθέμενα στοιχεία των Δήμων της Μήλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΗΜΟΣ ΜΗΛΟΥ		
ΑΠΟΛΗΨΕΙΣ ΕΡΓΩΝ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗΣ (m ³)	ΜΕΤΡΗΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΥΔΡΕΥΣΗΣ (m ³)	ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ (m ³)
345600	198106	159800

Πίνακας 7.9 Διαθέσιμα δεδομένα απολήψεων έργων υδροδότησης, κατανάλωσης ύδρευσης και μεταφερόμενων ποσοτήτων (Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)

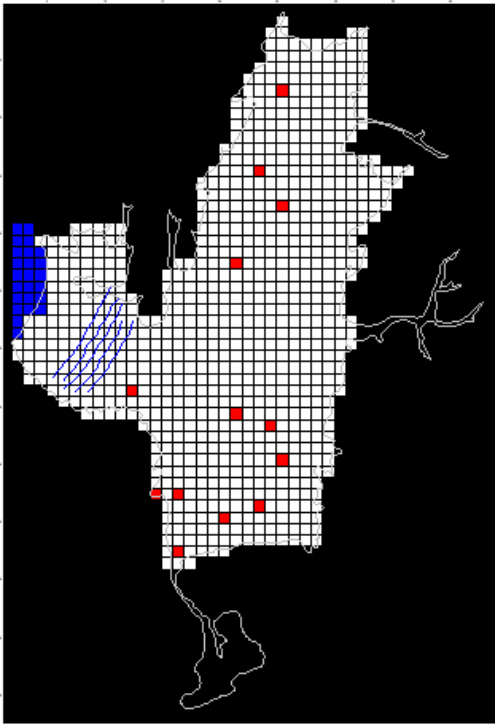
Η κάλυψη των αναγκών αυτών εξυπηρετείται κατά κύριο λόγο από τους υπόγειους υδροφορείς της νήσου. Η κατανομή της προσφοράς του υπόγειου υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σύμφωνα πάντα με τα στοιχεία της μελέτης και την ανάλογη ζήτηση, θα πρέπει να καλύπτει το 6,1% των ετησίων αναγκών ύδρευσης και το 60% των αντίστοιχων αναγκών άρδευσης. Τα ποσοστά αυτά μεταφράζονται σε ένα συνολικό ποσό 400590m³ νερού ετησίως, 377320m³ για την άρδευση και 23270m³ για την ύδρευση.

Βέβαια το φυσικό σύστημα το οποίο εξετάζεται αδυνατεί να καλύψει τις ποσότητες αυτές, αφού η ετήσια τροφοδοσία του υδροφορέα έχει εκτιμηθεί στις 337000m³. Η τροφοδοσία αυτή δεν είναι πλήρως εκμεταλλεύσιμη αφού μεγάλο μέρος της καταλήγει στη θάλασσα και χάνεται. Βάσει των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο παρών κεφάλαιο, για την προστασία και σωστή λειτουργία του υδροφορέα που εξετάζεται, και σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης που παρουσιάστηκαν στην παρούσα παράγραφο, είναι δυνατό να αντλείται περίπου το 85% της συνολικής ετήσιας κατείσδυσης, ώστε το θαλασσίνο νερό να μην εισχωρήσει περαιτέρω στο εσωτερικό του υδροφορέα, όπου υπάρχουν οι περισσότερες γεωτρήσεις και φρέατα άντλησης και δημιουργηθούν δυσμενείς συνθήκες και πιθανότατα μη αναστρέψιμες. Το ποσοστό αυτό θεωρείται ιδιαίτερος υψηλό όταν σε υπόλοιπες περιοχές όπως η Σαντορίνη παρατηρούνται ποσοστά περίπου 40%-60%. Το αποτέλεσμα οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στη γεωμετρία του υδροφορέα και κυρίως στο γεγονός πως παρουσιάζει μικρό μέτωπο προς τη θάλασσα, με αποτέλεσμα να εμποδίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσίνου νερού να εισχωρήσουν στο εσωτερικό του υδροφορέα, εκεί όπου βρίσκονται τα περισσότερα φρέατα άντλησης και οι γεωτρήσεις.

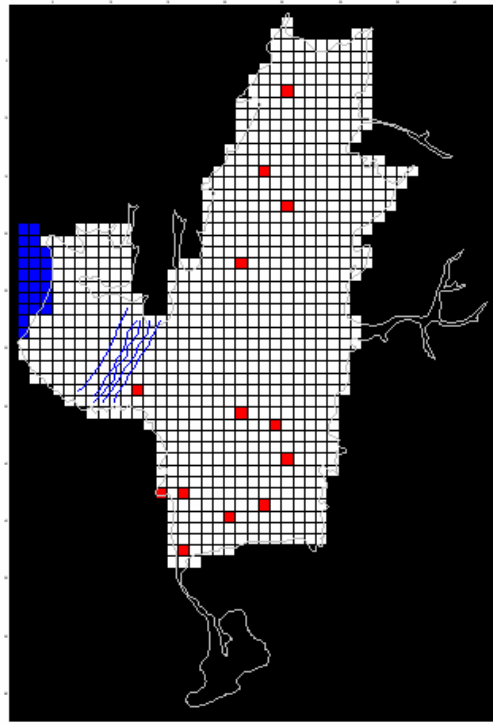
Επομένως οι ετήσιες αντλήσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα 292000m³ ετησίως. Αυτό σημαίνει πως ο υδροφορέας θα μπορεί να εξυπηρετεί περίπου το 70% των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση. Το υπόλοιπο ποσοστό θα μπορεί να καλυφθεί από μεταφερόμενες ποσότητες νερού. Στη Μήλο μεταφέρονται από το 2001 ποσότητες ύδατος από το Λαύριο για την κάλυψη του ελλειμματικού ισοζυγίου.

ΕΤΟΣ	ΜΗΝΑΣ												ΣΥΝΟΛΟ
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	
2001			10520								16254		26774
2002	13800	10750	14800	11200	14950	18750	19700	18240	21980	17850	14700	12550	189090
2003	9210	8250	11200	15450	16550	2000	23500	17690	26220	17558	10492	8362	184482
2004	8300	6000	4260	11306	12368	22760	20330	18710	17560	16590	10816	10800	159800
2005	7966	5054	14050	20170	23562	29630							100432

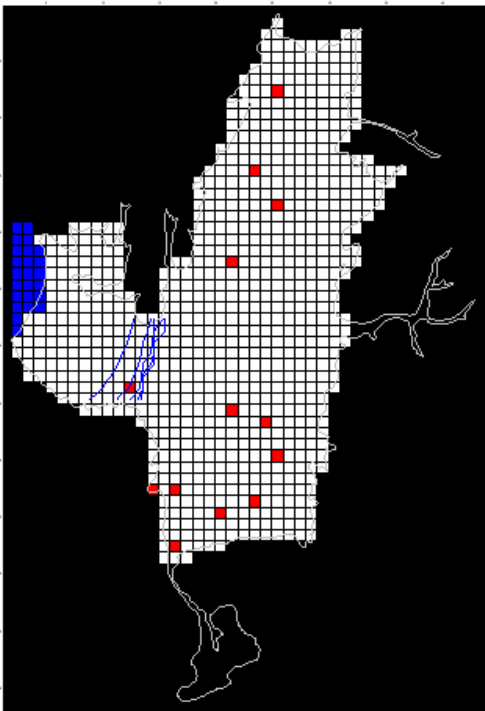
**Πίνακας 7.10 Μεταφερόμενες ποσότητες ύδατος σε m³ στη νήσο Μήλο για τα έτη 2001 – 2005
(Στοιχεία από μελέτη Κ/Ξ Υδατοσυστημάτων Αιγαίου – Ι.Γ.Μ.Ε.)**



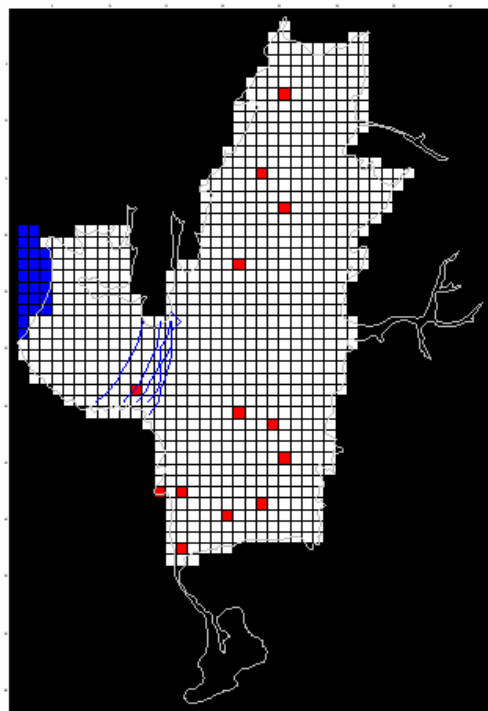
Εικόνα 7.31 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας σε ποσοστό άντλησης 50% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα.



Εικόνα 7.32 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας σε ποσοστό άντλησης 70% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα.



Εικόνα 7.33 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας σε ποσοστό άντλησης 86% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας στο επίπεδο 5 του υδροφορέα.



Εικόνα 7.34 Κατανομή συγκεντρώσεων και η θέση της αλάτινης σφήνας σε ποσοστό άντλησης 87% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας αφαιρώντας την άντληση στο Φ14 στο επίπεδο 5 του υδροφορέα.

Από τα παραπάνω σχήματα είναι προφανές πως ο υδροφορέας “αντέχει” παροχές άντλησης έως περίπου 85% της αντίστοιχης ετήσιας τροφοδοσίας και αντιστοιχούν σε 292000m³. Φαίνεται καθαρά πως για μεγαλύτερες ποσότητες άντλησης ότι η αλάτινη σφήνα μετακινείται πολύ στο εσωτερικό του υδροφορέα και δημιουργείται μεγάλο πρόβλημα υφαλμύρωσης σε όλο το νότιο τμήμα του γεγονός απαγορευτικό για την σωστή λειτουργία του φυσικού συστήματος. Η μεγάλη συγκέντρωση γεωτρήσεων και φρεάτων άντλησης στο νότιο τμήμα επιδεινώνουν σημαντικά την κατάσταση σε συνθήκες υπεράντλησης και αν ο υδροφορέας παρουσίαζε μεγαλύτερο μέτωπο ως προς τη θάλασσα, τότε πρακτικά θα είχε καταστραφεί αφού το θαλασσινό νερό θα εισχωρούσε με ακόμη μεγαλύτερη ευκολία στο εσωτερικό του.

8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Σύνοψη

Για τη διερεύνηση ενός υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα με σκοπό την προσομοίωση του σε συνθήκες υπεράντλησης των υδατικών αποθεμάτων του, χρειάζεται μια σειρά εργασιών και εφαρμογή επιστημονικών μεθόδων που θα προσομοιώσουν διάφορα σενάρια για τον υπό μελέτη υδροφορέα. Αρχικά ωστόσο θα πρέπει να γνωρίζουμε τον ίδιο τον υδροφορέα και κατ' επέκταση την ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η περιοχή μελέτης είναι ο υπόγειος και παράκτιος φρεάτιος υδροφορέας της νήσου Μήλου, που εκτείνεται σε μια περιοχή 7,8 km² κεντρικά του νησιού και περιβάλλεται από πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς. Η νήσος Μήλος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και βρίσκεται νοτιοδυτικά αυτού, 120 km ανατολικά των λακωνικών ακτών με κλίμα ήπιο μεσογειακό, με λίγες βροχοπτώσεις και αρκετούς ανέμους. Όπως και τα περισσότερα νησιά των Κυκλάδων, έτσι και η Μήλος είναι ξερή και άγονη γενικά και για το λόγο αυτό η ενασχόληση με τη γεωργία είναι αρκετά περιορισμένη. Έτσι κατά τους χειμερινούς μήνες οι απαιτούμενες ποσότητες νερού είναι μικρές και επαρκούν για τις ανάγκες των κατοίκων. Τους θερινούς μήνες ωστόσο το νησί κατακλύζεται από παραθεριστές και οι απαιτήσεις σε νερό αυξάνονται κατακόρυφα.

Η Μήλος είναι γνωστή από την αρχαιότητα κυρίως για την ηφαιστειακή δραστηριότητά της, η οποία έπαψε να υφίσταται όμως αρκετούς αιώνες πριν. Η ηφαιστειακή αυτή δράση έχει μείνει χαραγμένη στο έδαφος και υπέδαφος της νήσου, αφού σχεδόν εξολοκλήρου η γεωλογική της σύσταση αποτελείται από ηφαιστειακούς σχηματισμούς, όπως οι τοφφίτες. Εκτός από ηφαιστειακά πετρώματα ωστόσο, στη Μήλο συναντάμε και πολλά ιζηματογενή. Γενικά, στη γεωλογική διαμόρφωση της νήσου Μήλου συμβάλλουν σειρές γεωλογικών σχηματισμών που απαντώνται σε τρεις διαφορετικές γεωλογικές περιόδους, το Τεταρτογενές, όπου συναντούμε και τους περισσότερους ηφαιστειακούς σχηματισμούς, το Νεογενές και το Μεσοζωικό.

Με βάση τη λιθολογική και υδρογεωλογική σύσταση της νήσου Μήλου, έγινε και η πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα ο οποίος εδαφικά αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις. Η ακριβής εδαφική σύσταση ωστόσο δεν ήταν αρκούντως γνωστή, με αποτέλεσμα να γίνουν διάφορες υποθέσεις έως ότου καταλήξουμε στον πιθανότερο εδαφικό τύπο. Με την επεξεργασία των απαραίτητων μετρητικών δεδομένων, που παραχωρήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε., κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της πιεζομετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος, και η κατασκευή του αντίστοιχου πιεζομετρικού χάρτη.

Τα παραπάνω δεδομένα, σε συνδυασμό με τις υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα που είχαν υπολογιστεί στην προηγούμενη διπλωματική εργασία (Διπλωματική

Θεοδωρακόπουλος 2009 Υπεύθυνος Καθηγητής κ .Μαντόγλου) , χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωσή του, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας και τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού(GROUNDWATER VISTAS). Βέβαια, όπως αναφέρθηκε, πολλά από τα απαιτούμενα δεδομένα απλώς είχαν εκτιμηθεί, καθώς ήταν αδύνατον να μετρηθούν ή να υπολογισθούν, λόγω ελλειμματικών δεδομένων.

8.2 Συμπεράσματα

8.2.1 Συμπεράσματα από την πιεζομετρία του υδροφορέα

Στην περιοχή του υδροφορέα υπάρχουν έξι φρέατα άντλησης και επτά γεωτρήσεις. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως μόνο σε μία από τις επτά γεωτρήσεις και σε ένα από τα φρέατα παρουσιάζεται αρνητικό μέσο υδραυλικό φορτίο, σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας. Τα πέντε φρέατα άντλησης και οι έξι γεωτρήσεις βρίσκονται σταθερά πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.

8.2.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του υδροφόρου σχηματισμού

Το τελικό στάδιο της εργασίας αφορούσε την προσομοίωση του υδροφορέα με την εφαρμογή ενός μοντέλου μεταβλητής πυκνότητας που στηρίζεται στον προσδιορισμό διαφόρων υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων για την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση του φυσικού συστήματος. Όπως είναι αντιληπτό, οι περισσότερες από αυτές τις παραμέτρους είχαν εκτιμηθεί κατά το δυνατόν βάσει των διαθέσιμων στοιχείων, ωστόσο η εκτίμηση είναι μόνο προσεγγιστική και μπορεί να απέχει από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών αυτών χρειάζονται εργαστηριακές μετρήσεις οι οποίες στην παρούσα φάση δεν ήταν διαθέσιμες. Ακόμα όμως και αν υπήρχαν προσδιορισμένες τιμές των υδραυλικών παραμέτρων του συστήματος του υδροφορέα, οι φυσικές συνθήκες και διεργασίες είναι πάντα δύσκολο να προσομοιωθούν λόγω της πολυπλοκότητάς τους. Επομένως σε κάθε περίπτωση μπορούμε απλώς να προσεγγίσουμε τη λειτουργία του υδροφορέα εκτιμώντας τις πιθανές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό το φυσικό σύστημα.

Τέτοιες παραδοχές είναι η εκτίμηση του πάχους του υδροφορέα, η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας εφόσον απουσιάζουν εργαστηριακές μετρήσεις, η ύπαρξη άνισων χωρικά μετρήσεων της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η απουσία δεδομένων αντλήσεων στα σημεία που υπάρχουν καταγεγραμμένες γεωτρήσεις και πηγάδια παρατήρησης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επομένως οι ανάγκες σε νερό, οι οποίες διαφέρουν από μήνα σε μήνα, μπορούν απλά να εκτιμηθούν και να θεωρηθούν ίδιες για όλη

τη διάρκεια του έτους, κάτι που πρακτικά δεν είναι σωστό και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα, ιδιαίτερα αν οι τιμές αυτές υποεκτιμηθούν.

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

Για τα διάφορα σενάρια που προσομοιώθηκαν, με βάση πάντα τις παραδοχές και τα στοιχεία που είχαμε στη διάθεσή μας, οι παροχές άντλησης από τις γεωτρήσεις δεν θα πρέπει να ξεπερνούν σε ποσοστό περίπου το 85% της ετήσιας τροφοδοσίας του υδροφορέα, αφού για μεγαλύτερες τιμές άντλησης η αλάτινη σφήνα εισχωρεί κατά πολύ στο εσωτερικό του υδροφορέα υπαλμυρώνοντας μεγάλο μέρος του. Σε μικρότερα ποσά άντλησης η αλάτινη σφήνα περιορίζεται σημαντικά ενώ και η μεγάλη αυτή τιμή του ποσοστού άντλησης, συγκριτικά με άλλα νησιά που είναι 40%-60% οφείλεται στη η γεωμετρία του υδροφορέα ο οποίος είναι στενός στο δυτικό τμήμα του και παρουσιάζει μικρό μέτωπο προς τη θάλασσα, κάτι που εμποδίζει το θαλασσινό νερό να εισχωρήσει στο εσωτερικό του. Ωστόσο λόγω της έλλειψης εργαστηριακών δεδομένων η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας απλά εκτιμήθηκε, και μπορεί να διαφοροποιήσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφού μια μικρότερη τιμή της θα βοηθούσε στον περιορισμό της αλάτινης σφήνας, ενώ μια μεγαλύτερη θα δημιουργούσε πιο ανησυχητικές καταστάσεις. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο δεν πώς πρέπει να εφησυχάζουμε καθώς η σημασία του υδροφορέα για τη βιωσιμότητα του νησιού είναι σπουδαία και θα πρέπει να διαφυλαχθεί η ποιότητα των υδάτων του.

Εν κατακλείδι, το υδατικό ισοζύγιο του υπόγειου και παράκτιου υδροφορέα της προσχωματικής λεκάνης Ζεφυρίας στη νήσο Μήλο, χαρακτηρίζεται ως ελλειμματικό, κυρίως ως προς τις ανάγκες της ύδρευσης και άρδευσης, αφού μπορεί να καλυφθεί μόλις το 70% αυτών. Ωστόσο είναι σημαντική η εύρεση λύσεων, ώστε ο υδροφορέας να διατηρηθεί ποιοτικά σε ικανοποιητικό επίπεδο, ώστε να μπορεί να τροφοδοτεί την περιοχή συνεχώς έστω και με αυτά τα ποσά ύδατος, που μπορεί ποσοτικά να μην επαρκούν, αλλά ποιοτικά να καλύπτουν τις υπάρχουσες ανάγκες.

8.3 Προτάσεις – Μέτρα Προστασίας

Το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων παρουσιάζει γενικά προβληματικά υδατικά αποθέματα όχι τόσο ποσοτικά αλλά κυρίως ποιοτικά. Τα προβλήματα αυτά διογκώνονται κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, καθώς οι ανάγκες σε νερό είναι αυξημένες και οι εντατικές αντλήσεις οδηγούν σε κρίσιμες καταστάσεις για τόσο ζωτικής σημασίας φυσικά συστήματα.

Αιτία δημιουργίας αυτών των προβλημάτων δεν είναι άλλη από την έλλειψη σωστής διαχείρισης των διαθέσιμων αποθεμάτων και της ορθολογικής τους χρήση. Ιδιαίτερα οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ευάλωτοι σε λάθος συνθήκες διαχείρισης, αφού η ποιοτική υποβάθμιση των διαθέσιμων αποθεμάτων τους οδηγεί πρακτικά στην καταστροφή ολόκληρου του υδροφορέα.

Συγκριτικά με άλλες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης, η χώρα μας έχει αρκετούς διαθέσιμους υδατικούς πόρους, τόσο επιφανειακούς όσο και υπόγειους, που ποσοτικά επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του συνολικού πληθυσμού. Ωστόσο χωρίς ορθολογική διαχείριση και την κατασπατάλησή των διαθέσιμων πόρων δημιουργούνται προβλήματα υποβάθμισής του υδατικού δυναμικού που μπορούν να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμες καταστάσεις.

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, τρωτοί σε εξωτερική ρύπανση, ανομοιόμορφα κατανομημένοι, στενά εξαρτώμενοι από ακραίες συχνά μεταβολές του υδρολογικού καθεστώτος αλλά και απολύτως απαραίτητοι για την συντήρηση της ζωής και της ανάπτυξης του περιβάλλοντος. Η υπερεκμετάλλευση τους έχει προκαλέσει σε πολλές παράκτιες περιοχές και νησιά σημαντική ταπείνωση στάθμης, καθιζήσεις εδαφών, υφαλμύρωση και γενικότερα ποιοτική υποβάθμιση του νερού. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζονται και πιο ευάλωτες λόγω του μεγάλου αναπτύγματος ακτών, με αποτέλεσμα η εντατική εκμετάλλευση των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων να οδηγεί στην υφαλμύρωση τους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω χρειάζεται η εφαρμογή μέτρων και στρατηγικός σχεδιασμός για μια ορθολογική διαχείριση. Θα μπορούσαν επομένως να εφαρμοσθούν μέτρα όπως:

- Η λήψη αποφάσεων για συνολική διαχείρισή των επιφανειακών με τους υπόγειους υδροφορείς, λαμβάνοντας υπόψη τα συνολικά υδατικά αποθέματα, καθώς και ακριβή και αδιάκοπη γνώση των παραμέτρων εκείνων που έχουν άμεση σχέση με την χωροχρονική κατανομή της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων νερών μέσα από την συνεχή συλλογή πρωτογενών στοιχείων,
- Η εφαρμογή συστηματικών υδρογεωλογικών μελετών, που να καθορίζουν το υδατικό ισοζύγιο και το υδατικό δυναμικό κάθε υπόγειου υδροφορέα,

- Η εφαρμογή μέτρων προστασίας των υδροφόρων συστημάτων τα οποία συνδέονται με τα υδροληπτικά έργα ύδρευσης. Τα μέτρα αυτά πρέπει να διασφαλίζουν τόσο την ποιότητα όσο και την ποσότητα των υπόγειων νερών,
- Η απαγόρευση ιδιωτικών γεωτρήσεων και φρεάτων άντλησης μέσα στη γεωγραφική περιοχή της λεκάνης του υδροφόρου συστήματος και αποτροπή εγκατάστασης ρυπογόνων για τα υπόγεια νερά δραστηριοτήτων μέσα σ' αυτή τη ζώνη,
- Η εφαρμογή μέτρων μείωσης των σημειακών πηγών ρύπανσης, όπως βόθροι, αλλά και διάχυτων, γεωργικής κυρίως προέλευσης, πηγών ρύπανσης (φυτοφάρμακα, νιτρικά) με την υιοθέτηση ορθών γεωργικών πρακτικών,
- Ο περιορισμός των απωλειών ύδατος με την κατασκευή νέων υδρευτικών δικτύων και αντικατάσταση των παλαιότερων κατασκευών με νέες που θα πληρούν τις σύγχρονες προϋποθέσεις υγιεινής,
- Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφορέων με παράλληλη αξιοποίηση των παράκτιων υφάλμυρων υδροφόρων με την εγκατάσταση μικρών μονάδων αφαλάτωσης τα οποία θα χρησιμοποιούν υφάλμυρο νερό, μέσω κατάλληλων υδροληπτικών έργων,
- Αξιοποίηση της επιφανειακής απορροής με έργα συλλογής και αποθήκευσης του νερού σε χωμάτινα φράγματα και λιμνοδεξαμενές.
- Αν είναι αυτά δε και σωστά κατανεμημένα στο χώρο έπειτα από τεχνικοοικονομικές μελέτες για τον καθορισμό του μεγέθους τους, λαμβάνεται το καλύτερο αποτέλεσμα.
- Απαγόρευση μπαζώματος ρεμάτων και μετατροπή τους σε οδούς προσπέλασης ή ανοικοδόμηση κτιρίων στις θέσεις αυτές, καθώς διευκολύνεται η επιφανειακή απορροή σε βάρος της κατείσδυσης άρα και επανατροφοδοσίας των υπόγειων υδροφορέων.
- Εφαρμογή της στάγδην άρδευσης εφόσον είναι η μέθοδος με τη μικρότερη σπατάλη νερού, αφού τα φυτά εφοδιάζονται με νερό που παρέχεται με τη μορφή σταγόνων, από σωλήνες που «απλώνονται» κατά μήκος των γραμμών φύτευσης και δεν υπάρχει καθόλου εξάτμιση.
- Πλήρης ενσωμάτωση της Οδηγίας 2000 / 60 / ΕΚ, που καθορίζει τα μέτρα, τις χρήσεις και διαδικασίες για την ολοκληρωμένη προστασία των υδάτων.

Η εφαρμογή των παραπάνω ενδεικτικών μέτρων έγκειται κυρίως στη δραστηριοποίηση κρατικών μηχανισμών και δημόσιων φορέων. Ωστόσο με σωστή ενημέρωση του κοινού και την ευαισθητοποίησή του μπορούν να αποκομισθούν επιπρόσθετα οφέλη αφού ο κάθε ένας από εμάς μπορεί να προσφέρει στη διασφάλιση των υδατικών πόρων αποκτώντας τη σωστή νοοτροπία και σταματώντας την κατασπατάληση

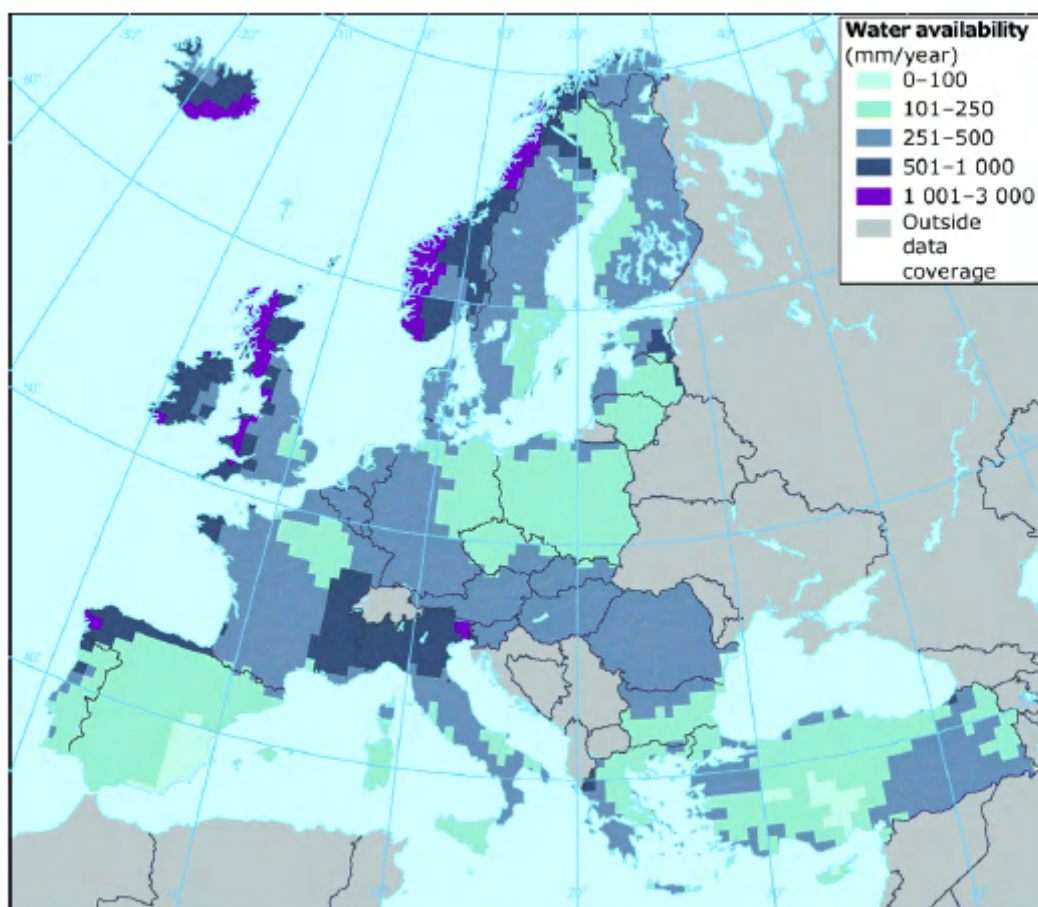
τους. Τα δεδομένα όπως παρουσιάζονται στη νήσο Μήλο είναι σαφώς ευνοϊκότερα από άλλα νησιά των Κυκλάδων, ωστόσο εξακολουθούν να είναι κρίσιμα και χρειάζεται σε κάθε περίπτωση συνολικά επαγρύπνηση. Εξ' άλλου η πρόληψη αποδεικνύεται συχνά η καλύτερη προστασία. Έτσι, με την εφαρμογή των παραπάνω μέτρων μπορεί να επιτευχθεί μείωση απωλειών νερού, ελάττωση συνολικών ποσοτήτων χρήσης, αύξηση των διαθέσιμων αποθεμάτων, αποτελεσματική άρδευση υψηλής απόδοσης και χαμηλής κατανάλωσης νερού και κυρίως έλεγχος και αποκατάσταση της ζώνης υπαλμύρωσης του υδροφορέα πριν το φαινόμενο αποκτήσει ανησυχητικές διαστάσεις. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και συνεπώς η βιωσιμότητα του νησιού.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

1. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

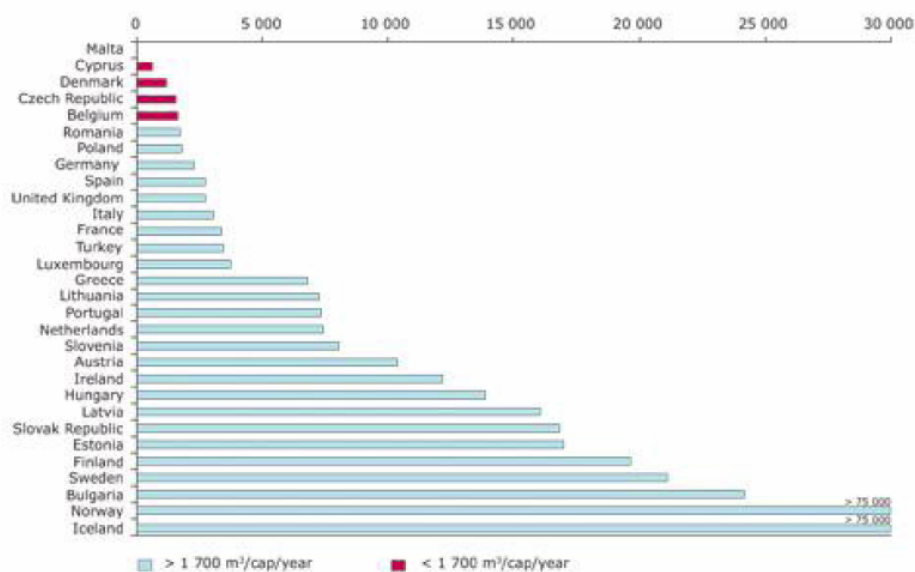
1.1 Γενικά

Η Ευρωπαϊκή ήπειρος βρέχεται στο μεγαλύτερό της τμήμα από θάλασσα και συγκεκριμένα από τη Βαλτική θάλασσα-θάλασσα Μπάρεντς, από τη Βόρεια θάλασσα, από τον Ατλαντικό ωκεανό, από τη Μεσόγειο, τη Μαύρη και τέλος από την Κασπία θάλασσα. Οι βόρειες χώρες έχουν χειμώνες με πολύ κρύο και χιόνια και κρύα καλοκαίρια, ενώ στα νότια τμήματα το κλίμα χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό. Οι βροχοπτώσεις είναι πιο έντονες στα βόρεια και μειώνεται η έντασή τους προς τα νότια. Στη Εικόνα 1.1 φαίνεται ο χάρτης που απεικονίζει το βροχομετρικό ύψος σε mm ανά χρόνο, που πέφτει στην Ευρώπη. Το υψηλότερο ύψος βροχής φαίνεται στις Σκανδιναβικές χώρες και στη βόρεια Αγγλία, ενώ η Μεσόγειος παρουσιάζει κατά μέσο όρο, ύψη βροχής κάτω από 100 mm το χρόνο.



Εικόνα 0.1 Χάρτης της Ευρώπης με το βροχομετρικό ύψος σε mm ανά έτος (πηγή:ΕΕΑ)

Οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι για κάθε χώρα ξεχωριστά απεικονίζονται στο Σχήμα 1.1. Σημαντικό είναι το γεγονός πως στην Ελλάδα η ετήσια διαθέσιμη ποσότητα νερού ανά κάτοικο είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες ποσότητες στις υπόλοιπες χώρες της Μεσογείου. Ετήσια αποθέματα νερού κάτω από 1.700 m³ ανά κάτοικο, που είναι και το όριο επικινδυνότητας για την επάρκεια των υδατικών αποθεμάτων, διαθέτουν οι χώρες Μάλτα, Κύπρος, Δανία, Τσεχία και Βέλγιο.



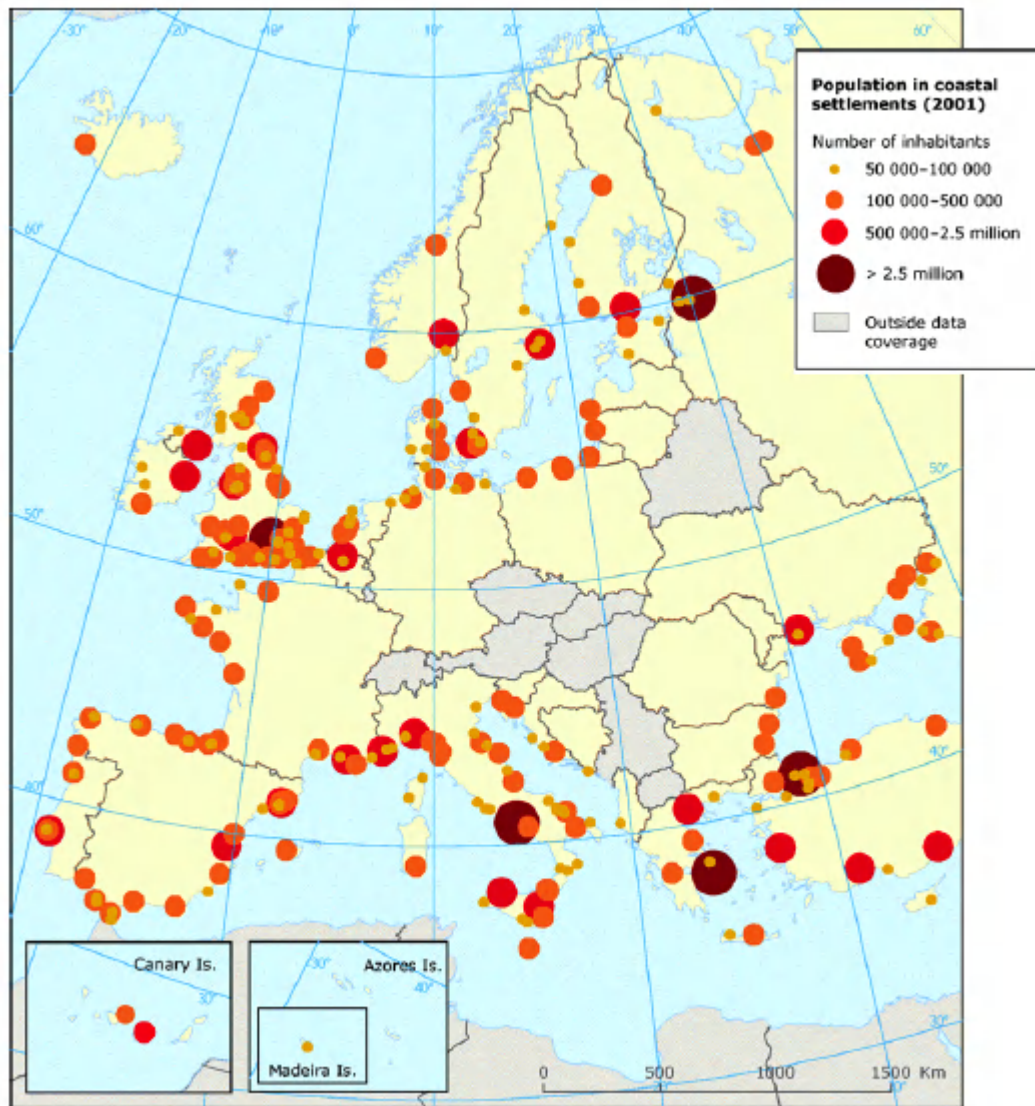
Σχήμα 0.1 Διάγραμμα ετήσιας διαθέσιμης ποσότητας(m³) νερού ανά κάτοικο στις Ευρωπαϊκές χώρες(πηγή :ΕΕΑ,2003)

Οι παράκτιες περιοχές της Ευρώπης είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένες όπως φαίνεται και στο Εικόνα 1.2 . Οι περισσότερο πυκνοκατοικημένες περιοχές εμφανίζονται με σκούρο μπορντό κύκλο και αντιστοιχούν σε μεγάλες πόλεις όπως η Κωνσταντινούπολη, η Αθήνα, η Ρώμη και άλλες. Στην Εικόνα 1.2 φαίνεται η πυκνότητα των παραθαλάσσιων αυτών περιοχών απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ ταυτόχρονα δίνονται και οι χρήσεις γης, οι οποίες απεικονίζονται στα μικρά γραφήματα, όπου με πράσινο συμβολίζονται οι δασώδεις εκτάσεις, με κίτρινο οι καλλιέργειες, με κόκκινο οι βιομηχανικές περιοχές και τέλος με μπλε οι υγροβιότοποι.

Από τα σχήματα αυτά προκύπτει πως τα παράκτια της Ευρώπης είναι ιδιαίτερα δημοφιλή για την ανθρώπινη διαβίωση. Οι κάτοικοι των περιοχών αυτών ασχολούνται ιδιαίτερα με τη γεωργία ενώ σημαντική έκταση καλύπτουν και τα δάση, ιδίως στη νότια Ευρώπη.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως στις περιοχές αυτές η έντονη αστικοποίηση, ο τουρισμός και η ενασχόληση με τον αγροτικό και το βιομηχανικό τομέα συνεπάγονται

υπεράντληση των υδάτων με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους παράκτιους υδροφορείς και την υφαλμύρωση του γλυκού νερού.



Εικόνα 0.2 Πυκνότητα πληθυσμού στις παράκτιες περιοχές της Ευρώπης(πηγή: ΕΕΑ, 2001)

1.2.Τα Αποθέματα του Νερού

Η παγκόσμια ισορροπία του νερού στον πλανήτη μας θεωρείται ότι είναι σταθερή, αλλά είναι δύσκολο να εκτιμηθεί το παγκόσμιο ισοζύγιο του κύκλου του νερού. Από τον πιο κάτω πίνακα, που ασφαλώς οι ποσότητες αναφέρονται σε τάξη μεγέθους, διαπιστώνεται ότι κάθε έτος (UNESCO, 1978):

- η θάλασσα παίζει σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο γιατί δέχεται μεγαλύτερο όγκο βροχοπτώσεων, ενώ παράγονται από αυτήν περισσότεροι σε ποσότητα ατμοί, απ'ότι στην εδαφική επιφάνεια,
- η βροχή μεταφέρει στην επιφάνεια της γης όγκο νερού της τάξης των 110000 Km³ (ύψος βροχόπτωσης 762 mm) από τα οποία τα 40000 Km³ απορρέουν προς τη θάλασσα και τα 70000 Km³ επιστρέφουν στην ατμόσφαιρα,
- οι βροχοπτώσεις σε όγκο υπερέρχουν της εξατμισοδιαπνοής στη στεριά, ενώ η εξατμηση υπερिशύχει των βροχοπτώσεων στη θάλασσα.

<i>Τύπος</i>	<i>Όγκος Km³</i>	<i>Υψος mm</i>
Εδαφική επιφάνεια της γης = 148.9 X 10⁶ Km²		
Βροχόπτωση	110000	762
Απορροή προς τη θάλασσα	40000	275
Εξατμισοδιαπνοή	70000	487
Θαλάσσια επιφάνειας της γης = 361 X 10⁶ Km²		
Βροχόπτωση	390000	1140
Συνολική έκταση επιφάνεια της γης = 510 X 10⁶ Km²		
Βροχόπτωση	500000	1030
Εξατμισοδιαπνοή	500000	1030

Πίνακας 0.1 παγκόσμια ισορροπία του νερού και τα διαθέσιμα του σε ετήσια βάση (πηγή:UNEP,1991)

Το νερό που βρίσκεται στη βιόσφαιρα έχει άνιση κατανομή. Κατά 95% είναι χημικά δεσμευμένο στα πετρώματα και επομένως δεν μπορεί να συμμετάσχει στον υδρολογικό του κύκλο και να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο. Από την υπόλοιπη ποσότητά του που βρίσκεται στη βιόσφαιρα (1100-1400 X 10⁶ Km³), το 94% αποτελεί τους ωκεανούς και τις θάλασσες, το 1.9% τους πολικούς πάγους και παγετώνες, περίπου 5% είναι τα εσωτερικά νερά που περιλαμβάνουν τις λίμνες, τα ποτάμια και τα εκμεταλλεύσιμα υπόγεια νερά, ενώ το 0.001% βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ως υδρατμοί. Εκείνο το ποσοστό του νερού που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης καλύπτει έκταση 71% της συνολικής επιφάνειάς της.

Για το εποπτικό του θέματος, μπορούμε να κάνουμε ορισμένες υποθέσεις και γενικευμένες παραδοχές. Έτσι, αν το νερό που βρίσκεται στη βιόσφαιρά μας μπορούσε να απλωθεί πάνω στην επιφάνεια της γης θα σχηματιζόταν, από τους ωκεανούς και τις θάλασσες, στρώμα πάχους (βάθος) 2.61 χιλιομέτρων, από το νερό των παγετώνων και των πάγων στρώμα πάχους 100 μέτρα, από τα υπόγεια νερά το πάχος θα ήταν 15 μέτρα, από τα επιφανειακά γλυκά νερά 40 εκατοστόμετρα και από το νερό που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα ως υδρατμός το στρώμα θα είχε πάχος μόλις 2.5 εκατοστόμετρα. Επίσης, είναι φανερό ότι από την πελώρια ποσότητα του νερού που υπάρχει στη Γη μόνο το 2.8% (-36000000 Km³) είναι γλυκό νερό και από αυτό το μεγαλύτερο μέρος του είναι πάγοι και παγετώνες. Τελικά, ποσοστό περίπου 0.65% (8290000 Km³) είναι σε υγρή κατάσταση, αλλά και πάλι το μεγαλύτερο μέρος αυτού του ποσοστού είναι μη προσιτό ή μη χρησιμοποιήσιμο, ενώ η μέση ετήσια διαθέσιμη ποσότητα γλυκού νερού στη γη είναι της τάξης των 15000 Km³ (UNEP, 1991).

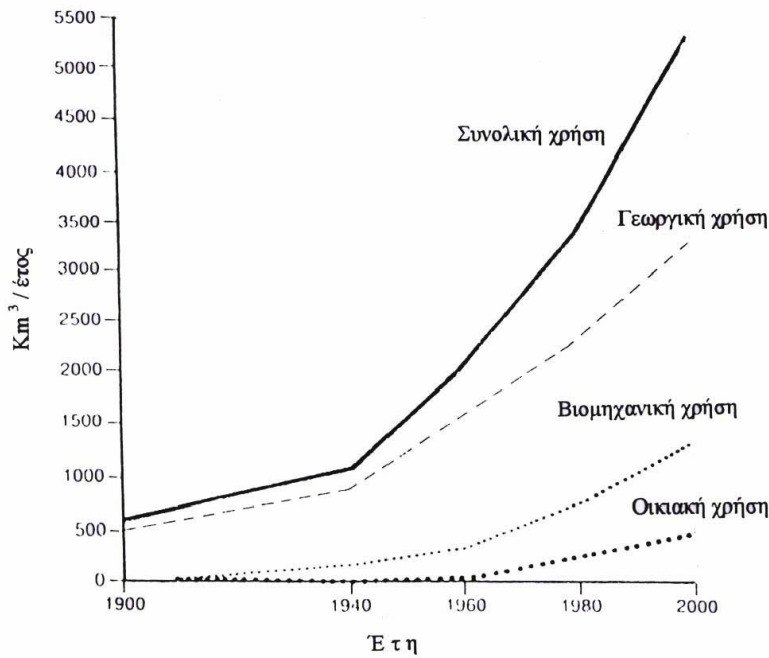
<i>Τύπος ή Μορφή αποθήκευσης- μεταφοράς</i>	<i>Όγκος X 10⁶ Km³</i>	<i>Ποσοστό όγκου βιόσφαιρας υδρόσφαιρας (%)</i>	<i>Χρόνος ανανέωσης (έτη)</i>	<i>ΣΑ (mm)</i>
Ως προς την Κατάσταση				
- Υγρή	1356,29	97,91		
- Στερεά	29,0	2,09		
- Αέρια	0,013	0,0009		
Ως προς το Περιβάλλον				
-Ωκεανοί-Θάλασσες	1348,0	97,31	8000	250
-Πάγοι-Παγετώνες	29	2,09	3000	69
-Ατμόσφαιρα	0,013	0,0009	12 ημέρ	1.9
-Νερά Ηπείρων	8,29	0,6		
(Υπόγεια νερά)	(8,065)	(0,58)	5000	34
(στην επιφάνεια)	(0,065)			
(σε βάθος>800μ.)	(4,0)			
(σε βάθος<800μ.)	(4,0)			
(Επιφανειακά νερά) (λίμνες,ποτάμια)	(0,224)	(0,016)	5	4.2
ΣΥΝΟΛΟ Βιόσφαιρας-				
Υδρόσφαιρας	1385,303	100	28000	260

(ΣΑ=σχετική αναλογία του όγκου του νερού της βιόσφαιρας ως προς σφαίρα ακτίνας ορισμένων mm).

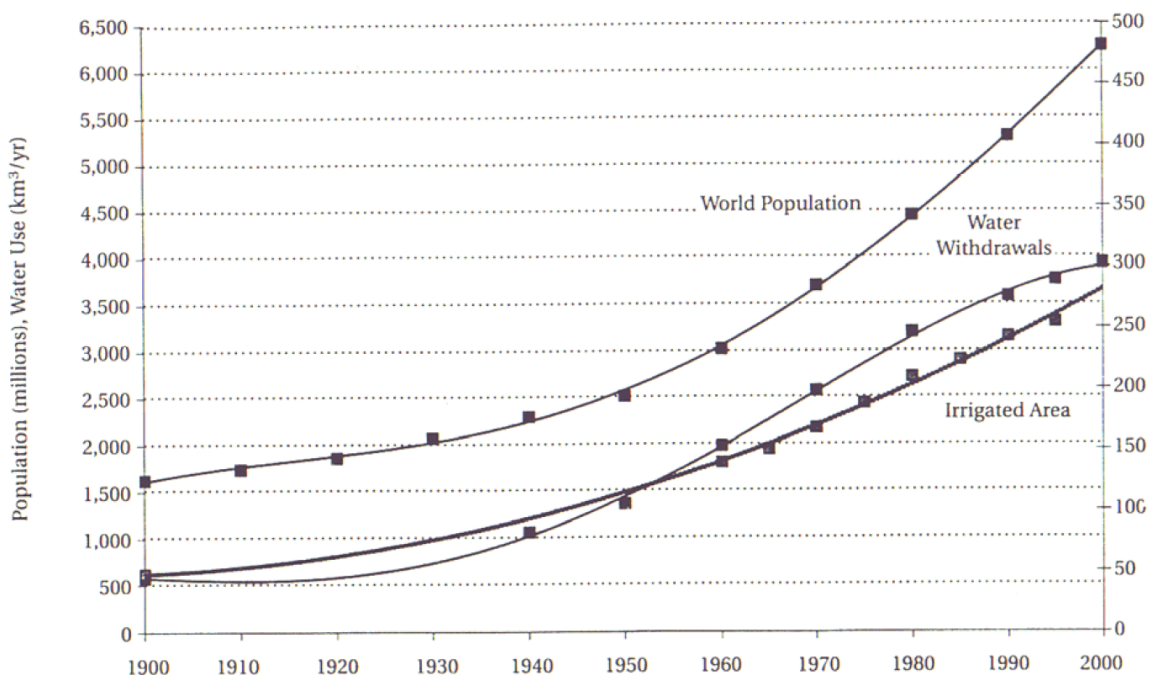
Πίνακας 0.2 Κοινοί τύποι αποθήκευσης και μεταφοράς νερού στο περιβάλλον κατά την παγκόσμια ισορροπία του (πηγή:UNEP,2001)

1.2.1 Η χρήση του νερού

Η χρήση του νερού διαχρονικά συνεχώς αυξάνεται με ταχύτατο ρυθμό, Εικόνες 1.3 και 1.4. Εάν παρατηρήσει κανείς την Εικόνα 3, θα διαπιστώσει ότι η γεωργία κατέχει την πρώτη θέση στην κατανάλωση νερού και έπεται η βιομηχανική και η αστική χρήση. Όσον αφορά τις τάσεις των απολήψεων σε νερό αυτές φαίνεται να πλησιάζουν ασυμπτωτικά μία τιμή περί τα 300 km³/yr (βλ. Εικόνα 1.4).



Εικόνα 0.3 Χρήση του νερού κατά τον 20ο αιώνα(πηγή: UNEP 2001)



Εικόνα 0.4 Παγκόσμιες τάσεις στις απολήψεις νερού. Πληθυσμός και αρδευόμενες εκτάσεις(1990-1995).Πηγή:www.fao.org

Η παγκόσμια κατανάλωση αυξάνεται με συνεχώς αυξανόμενους ρυθμούς και το έτος 2000 υπερέβει τα 5000 Km³/έτος. Οι ρυθμοί αυτοί δεν φαίνεται να μειώνονται τουλάχιστον για τα προσεχή έτη. Η παγκόσμια κατανάλωση έχει σχεδόν δεκαπλασιαστεί την τελευταία εκατονταετία από 600 σε 5000 Km³/έτος. Ο ρυθμός αυτός αύξησης πρέπει οπωσδήποτε να μειωθεί τα προσεχή χρόνια γιατί αυξάνεται το κόστος του νερού, οπότε αναγκαστικά θα πρέπει να αποβεί περισσότερο αποδοτικότερη η χρήση του. Κάτι ανάλογο συνέβη στις αρχές της δεκαετίας του 1970 με την ενεργειακή κρίση του πετρελαίου. Φαίνεται ότι η αύξηση της γεωργικής χρήσης είναι μικρότερη από την αύξηση των υπολοίπων χρήσεων (βιομηχανική, οικιακή και αναψυχή). Πάντως τα τελευταία χρόνια η συνολική αύξηση κατανάλωσης νερού είναι 3 φορές μεγαλύτερη από την αύξηση του πληθυσμού με ότι αυτό συνεπάγεται, και κατά κύριο λόγο συμβαίνει στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Όμως ποιά είναι η σχέση μεταξύ των υπαρχόντων αποθεμάτων νερού στον πλανήτη και αυτών που εκμεταλλεύονται σήμερα από τον άνθρωπο; Στην Ασία για παράδειγμα το έτος 1960 το ποσοστό ήταν 6% και το 2000 αυτό ήταν 22%. Επόμενο θέμα διερεύνησης είναι τι ποσοστό του υπάρχοντος νερού σε μια χώρα είναι δυνατόν να εκμεταλλευτεί κάτω από τα υπάρχοντα κοινωνικά, οικονομικά ή περιβαλλοντικά δεδομένα;

Υπάρχουσας της αύξησης της ζήτησης του νερού στις διάφορες χρήσεις (γεωργική, αστική, βιομηχανική, ψυχαγωγία, περιβάλλον), όπως επίσης και της αύξησης του κόστους του νερού όσο προχωράμε σε δαπανηρότερες εκμεταλλεύσεις του και λαμβάνοντας υπόψη τις κοινωνικές συνθήκες και τις επιπτώσεις της χρήσης του στο περιβάλλον (οικοσυστήματα) προβλέπεται ότι θα ενταθούν στο μέλλον οι συγκρούσεις μεταξύ των χρηστών (πληθυσμών) και των χρήσεων. Πάντως το πόσιμο νερό προκαλεί συνήθως αρκετές πολιτικές ευαισθησίες (βλ. Μέση Ανατολή). Στην χώρα μας αντιπαραθέσεις δημιουργήθηκαν μεταξύ των αγροτών χρηστών και της αστικής χρήσης στην Αττική, για το νερό ύδρευσης από τις διάφορες γεωτρήσεις στην Κωπαΐδα πριν από μερικά χρόνια, που παρουσιάστηκε η τελευταία σημαντική λειψυδρία (1990-1993).

Οι εύκολα εκμεταλλεύσιμοι υδατικοί πόροι έχουν σχεδόν παγκόσμια (περισσότερο στις αναπτυσσόμενες χώρες) χρησιμοποιηθεί και περαιτέρω εκμετάλλευση θα ισοδυναμεί με αύξηση του κόστους χρήσης και μεγαλύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον (φράγματα, υπόγεια νερά κλπ.). Επομένως δημιουργούνται πολλαπλά προβλήματα σ' αυτές τις χώρες όπου τα υπόγεια νερά είναι κύρια πηγή ύδρευσης αφού η Γερμανία έχει ποσοστό γύρω στα 73%, η Μεγάλη Βρετανία 30%, η Ολλανδία 70%, και οι ΗΠΑ 50%.

Επί πλέον, στις αναπτυσσόμενες και αναπτυγμένες χώρες όλο και περισσότερες πηγές ρύπανσης των υδατικών πόρων δημιουργούνται και επιβαρύνουν τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια νερά. Τέλος τα έργα εκμετάλλευσης υδατικών πόρων για αρδευτική, αστική και βιομηχανική χρήση προκαλούν περιβαλλοντικά προβλήματα που δεν λαμβάνονται μέχρι στιγμής τόσο σοβαρά όσο θα έπρεπε υπόψη από τους μελετητές των

έργων αλλά και τους αρμόδιους φορείς.

Κάτω από τις υπάρχουσες συνθήκες εκμετάλλευσης των εδαφών με τη συμβολή του γλυκού νερού παράγεται σήμερα το 99% της τροφής του ανθρώπου. Έχει υπολογιστεί ότι ο κάθε άνθρωπος απαιτεί 5 στρέμματα αρόσιμης γης για να διατραφεί επαρκώς. Αντί αυτού σήμερα ο πληθυσμός της γης (πάνω από 6 δις) χρησιμοποιεί 2.7 στρέμματα κατ' άτομο (ήδη το 1 δις υποσιτίζεται, κατά την Παγκόσμια Τράπεζα, 1993) και σε 40 χρόνια σε κάθε άτομο θα αντιστοιχεί 1.4 στρέμματα. Αυτό είναι επακόλουθο της αλλαγής χρήσης γης από γεωργική σε αστική, βιομηχανική, κλπ. Αλλά ο κυριότερος παράγοντας μείωσης της γεωργικής γης παραμένει η διεργασία της διάβρωσης μια και πάνω από το 80% της παγκόσμιας γεωργικής γης περισσότερο ή λιγότερο διαβρώνεται.

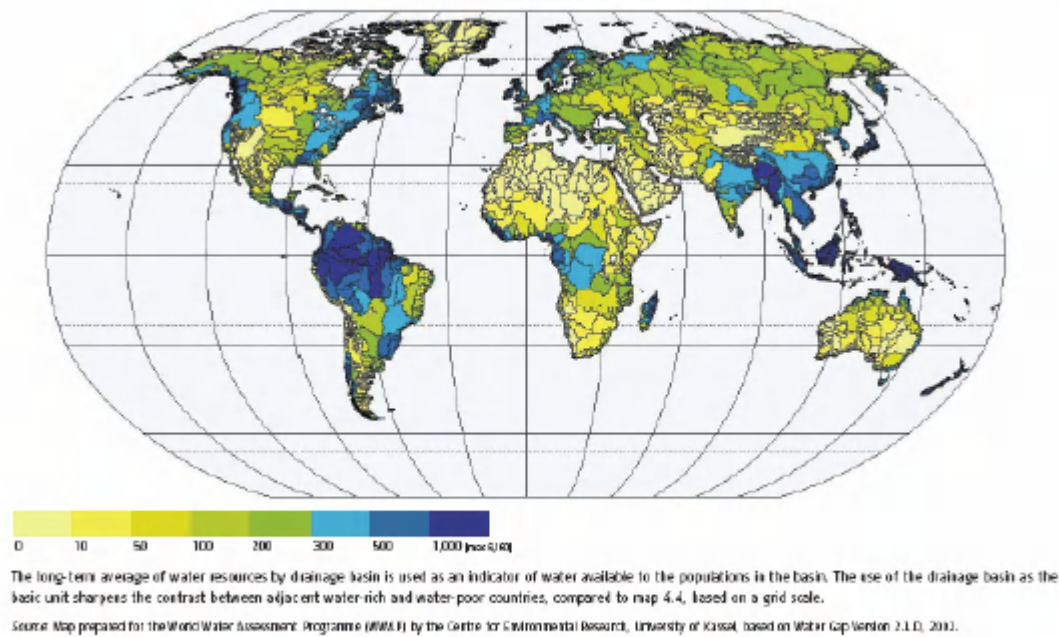
Ο πληθυσμός αυξάνεται περίπου με τους σημερινούς ρυθμούς κατά 0.25 εκατομμύρια την ημέρα και προβλέπεται, αν αυτές οι τάσεις συνεχιστούν, με το ακραίο απαισιόδοξο σενάριο, το 2050 να γίνει 14 δις και το 2100 40 δις. Είναι πιθανόν, ότι η πληθυσμιακή αυτή αύξηση δεδομένης της μείωσης της εκμεταλλεύσιμης γης κατά άτομο θα οδηγήσει σε προβλήματα τροφικής επάρκειας, εντατικοποίηση της χρήσης των πόρων και σε περαιτέρω υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Ο άνθρωπος σε παγκόσμια κλίμακα καταναλώνει κατά μέσο όρο για αστικές ανάγκες 180 lt/day κατ' άτομο περίπου, που αντιστοιχεί σε ποσοστό 7% της συνολικής κατανάλωσης. Η γεωργία καταναλώνει το 87% και το υπόλοιπο η κτηνοτροφία, δασοκομία και η βιομηχανία. Πάντως το διαθέσιμο νερό κατά άτομο σε παγκόσμια κλίμακα σήμερα είναι 35% χαμηλότερο από το 1970 γιατί προστέθηκε από τότε 1.8 δις πληθυσμός περίπου. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες η ποσότητα των 180 lt/day κατ' άτομο είναι κατά πολύ χαμηλότερη αυτής των 274 lt/day κατ' άτομο που φαίνεται να είναι η ιδανική ποσότητα. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων ανά κύρια υδρολογική λεκάνη σε παγκόσμιο επίπεδο. Αυτό συνεχώς επιδεινώνεται και λόγω της φύσεώς του επιφέρει περιβαλλοντικά προβλήματα. Από στοιχεία της UNESCO φαίνεται ότι ακόμα και σήμερα ένα ποσοστό 20% του παγκοσμίου πληθυσμού (1.3 δις άτομα) δεν έχει πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό και ποσοστό 40% σε νερό χρησιμοποιούμενο για λόγους υγιεινής

Για τη μείωση της οικιακής κατανάλωσης στην Ελλάδα το 1991 με Προεδρικό Διάταγμα καθορίστηκαν τα επιθυμητά όρια κατανάλωσης κατά κεφαλή σε:

- 100-250 lt/ημέρα/άτομο από δίκτυα ύδρευσης
- 100-200 lt/ημέρα/άτομο από γεωτρήσεις
- 100-180 lt/ημέρα/άτομο για χώρους κατασκήνωσης και ξενοδοχεία.

Ενδεικτικά η μέση κατανάλωση στην Μητροπολιτική Αθήνα είναι περίπου 220 lt/ημέρα/άτομο.



Εικόνα 0.5 Διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων ανά κύρια υδρολογική λεκάνη σε παγκόσμιο επίπεδο(UNEP, 2004)

Οι εκτιμήσεις για την συνολική μέση ετήσια χρήση του νερού στην Ελλάδα είναι αντικρουόμενες. Το ΥΠΑΝ αναφέρει ότι καταναλώνονται περίπου $5.04 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$, ενώ το ΥΠΤ δίνει μία εκτίμηση $4.8 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$. Παρόλα αυτά οι εκτιμήσεις φαίνεται να συγκλίνουν όσον αφορά τις διάφορες χρήσεις (Karavitis, C.A., 1999; CPER, 1989; OECD, 1983). Ως εκ τούτου, εκτιμάται ότι η γεωργία χρησιμοποιεί περίπου το 80%-84%, η αστική χρήση περί το 13%-15%, και η παραγωγή ενέργειας καθώς και η βιομηχανία γύρω στο 2.5%-4% του ετήσια καταναλισκόμενου ύδατος.

1.3 Οι Υδατικοί πόροι στην Ελλάδα

Η Ελλάδα τοποθετείται γεωγραφικά στο νοτιοανατολικό άκρο της Ευρωπαϊκής ηπείρου. Η έκτασή της αγγίζει τα 131.957 km², ενώ ο πληθυσμός της υπολογίζεται σε 10.934.097 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2001.

Πρόκειται για μία χώρα κυρίως ορεινή με έντονο ανάγλυφο και λίγες πεδινές εκτάσεις. Περιβάλλεται από θάλασσα, εκτός από τα βόρεια σύνορά της, ενώ περιλαμβάνει και σημαντικά μεγάλο αριθμό νησιών. Το σύνολο των ακτογραμμών της Ελλάδας είναι ιδιαίτερα μεγάλο αφού προσεγγίζει τα 15.021 km.

Χώρα	Εισροές στη Μεσόγειο Km ³ /yr	Χρησιμοποιούμενα νερά Km ³ /yr	Σχετική Χρήση ανά Κάτοικο m ³ /yr.inh	Διαθέσιμοι Υδάτινοι Πόροι ανά Κάτοικο m ³ /yr.inh
Ελλάδα	49.1	4.3	470	5934
Γαλλία	68.5	8.2	510	3400
Ιταλία	158	36	645	2993
Ισπανία	25.2	14	667	2933

(Πηγή: UNESCO, 1978)

Πίνακας 0.3 Διαθέσιμοι υδατικοί πόροι ανά κάτοικο

Το κλίμα της χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό με ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι βροχοπτώσεις να περιορίζονται στην ηπειρωτική κυρίως Ελλάδα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ αντίθετα το καλοκαίρι οι βροχοπτώσεις είναι σπάνιες και εκδηλώνονται με τη μορφή ξαφνικών καταιγίδων, μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας, οι οποίες συντελούν στη διάβρωση των εδαφών. Τα ελληνικά νησιά χαρακτηρίζονται ως άνυδρες περιοχές και παρουσιάζουν προβλήματα με τα διαθέσιμα αποθέματα των υδατικών πόρων. Η ανισοκατανομή αυτή των βροχοπτώσεων φαίνεται στο Σχήμα 1.2, όπου απεικονίζονται οι ισοϋετείς καμπύλες, οι καμπύλες δηλαδή ίσου ύψους βροχής στην Ελλάδα.

Το υδρολογικό ισοζύγιο σε μία περιοχή υπολογίζεται γενικά από την παρακάτω εξίσωση :

$$P = I + R + E \quad (2.1)$$

όπου:

P = συνολικά κατακρημνίσματα

I = κατείδυση

R = επιφανειακή απορροή

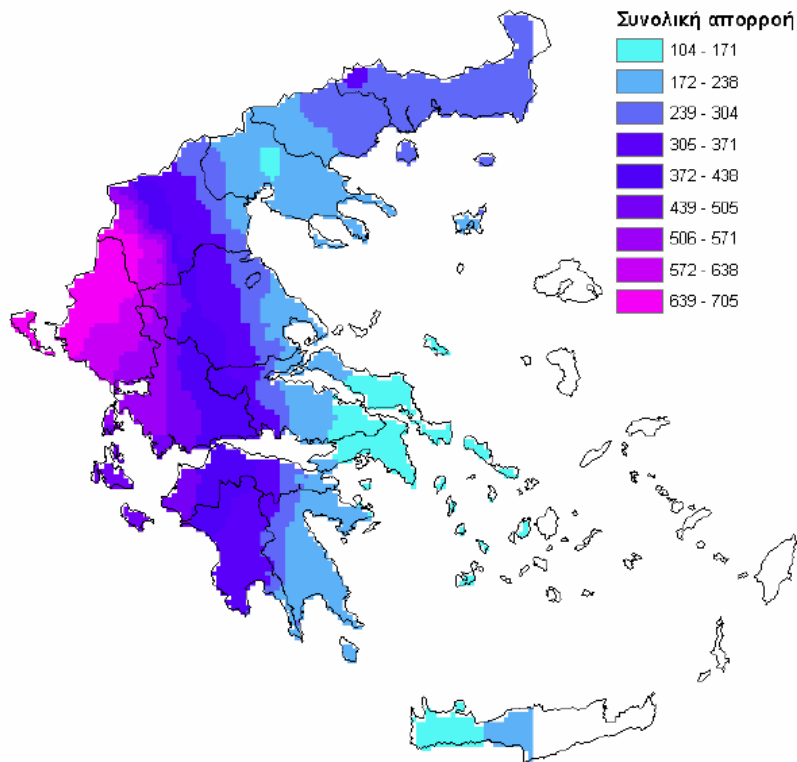
E = εξατμισοδιαπνοή

και ο υπολογισμός των μεταβλητών γίνεται είτε σε όγκο (m³), είτε σε ύψος νερού βροχής (mm), είτε σε ποσοστιαία αναλογία (%).



Σχήμα 0.2 Ισουετείς καμπύλες στον Ελλαδικό χώρο ,κατά Ιακωβάκη και Τσελεπιδάκη, 1975
(πηγή :Σουλιός, 2004)

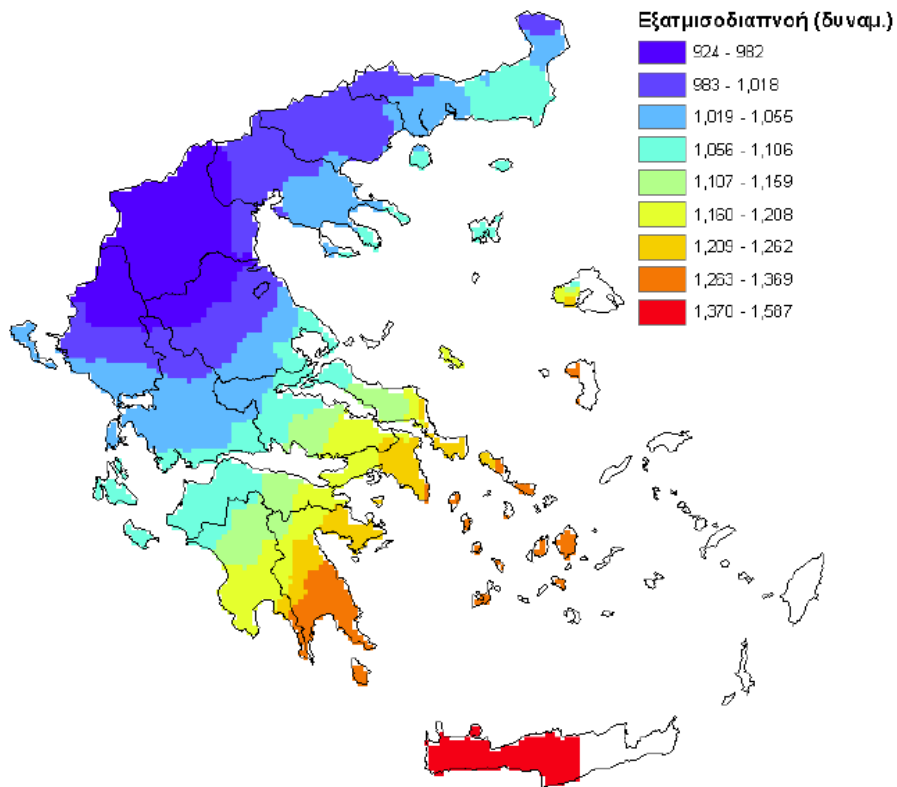
Το νερό που προέρχεται από τα κατακρημνίσματα, είναι δυνατό να εισέλθει στα υπόγεια υδροφόρα στρώματα και να προστεθεί στο υπόγειο νερό. Η ποσότητα αυτή του νερού συνιστά την ποσότητα της κατείδυσης, I. Το νερό όμως μπορεί να κινηθεί επιφανειακά, να ενωθεί με το νερό των ποταμών και μέσω αυτών να καταλήξει στη θάλασσα. Η ποσότητα αυτή συνιστά την απορροή R, η οποία για τον Ελλαδικό χώρο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3, όπου όπως φαίνεται είναι μεγαλύτερη στη δυτική Ελλάδα και μικρότερη στο λεκανοπέδιο της Αττικής και στις Κυκλάδες.



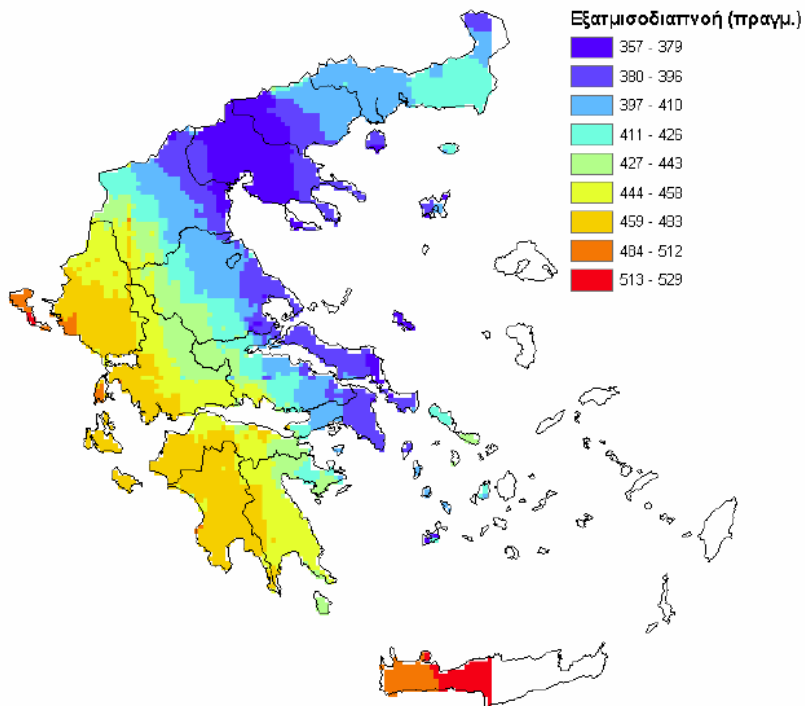
Σχήμα 0.3 Συνολική απορροή για τον Ελλαδικό χώρο(πηγή ΕΤΥΜΠ)

Η εξατμισοδιαπνοή είναι η ποσότητα των υδάτων, η οποία ακολουθεί μία σύνθετη διεργασία και είτε εξατμίζεται άμεσα από το έδαφος, είτε διαπνέεται, εξαιτίας της διαδικασίας της διαπνοής των φυτών. Χωρίζεται σε δυναμική εξατμισοδιαπνοή, η οποία είναι η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η εξατμισοδιαπνοή όταν η προσφορά του νερού ισοσταθμίζει την ποσότητα που εξατμίζεται ή διαπνέεται. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι αυτή που συμβαίνει πραγματικά, καθώς σπάνια η προσφορά νερού αναπληρώνει τις χαμένες ποσότητες. Στα Σχήματα 1.4 και 1.5 φαίνεται αρχικά η δυναμική και έπειτα η πραγματική εξατμισοδιαπνοή στην Ελλάδα. Οι τιμές της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής είναι μεγαλύτερες στη νότια Πελοπόννησο και την Κρήτη και μικρότερες στη βόρεια Ελλάδα, όμως αντίθετα μεγαλύτερες τιμές πραγματικής εξατμισοδιαπνοής εμφανίζονται στη δυτική Ελλάδα και μικρότερες στην κεντρική Μακεδονία και την Αττική.

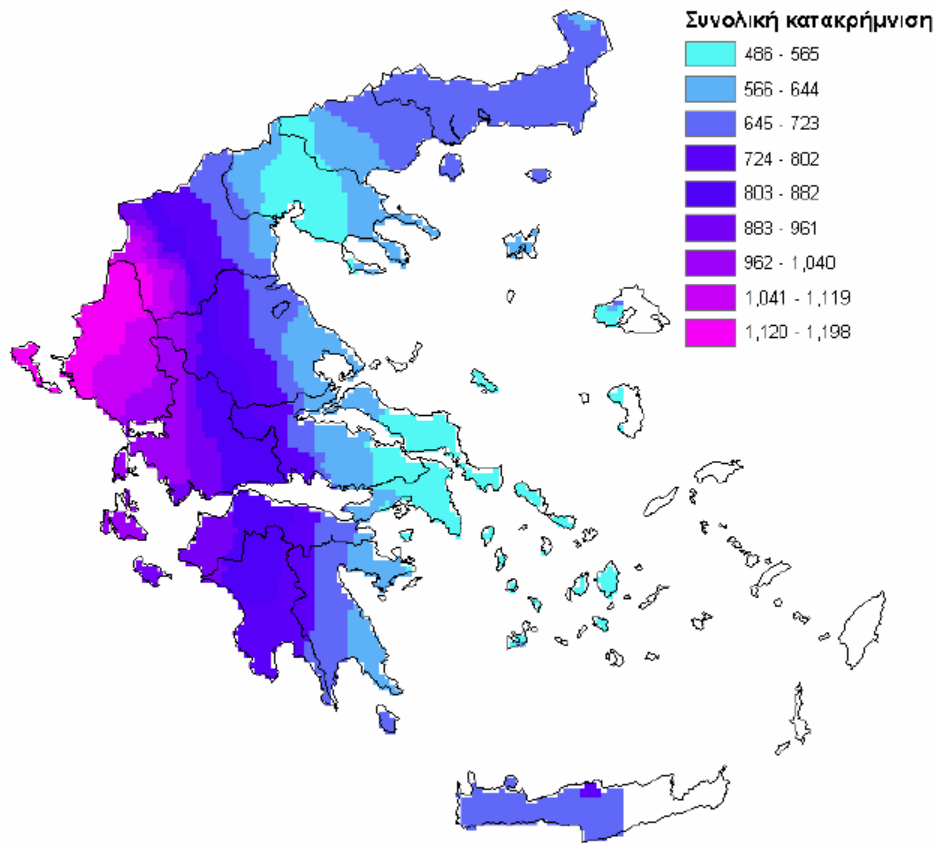
Τέλος, οι τιμές των κατακρημνισμάτων στην Ελλάδα φαίνονται στο Σχήμα 1.6 και είναι μεγαλύτερες, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην ηπειρωτική ενδοχώρα. Έλλειψη βροχοπτώσεων εμφανίζουν κυρίως η Αττική και οι Κυκλάδες.



Σχήμα 0.4 Συνολική δυναμική εξαμνησοδιαπνοή για τον Ελλαδικό χώρο(πηγή:ΕΤΥΜΠ)

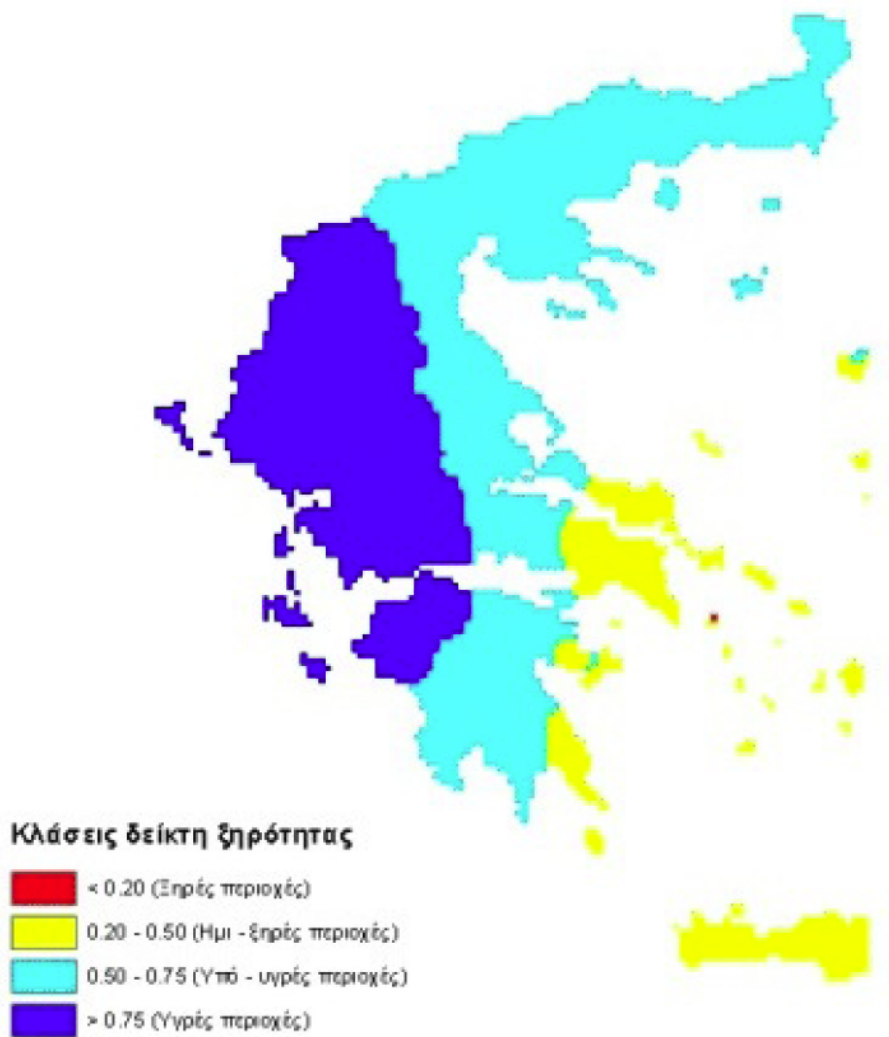


Σχήμα 0.5 Συνολική πραγματική εξαμνησοδιαπνοή για τον Ελλαδικό χώρο(πηγή:ΕΤΥΜΠ)



Σχήμα 0.6 Συνολική κατακρήμνιση για τον Ελλαδικό χώρο(πηγή:ΕΤΥΜΠ)

Με τον όρο δείκτης ξηρότητας εννοείται ο λόγος των συνολικών κατακρημνισμάτων προς τη συνολική δυναμική εξατμισοδιαπνοή και με το δείκτη αυτό μπορεί να καθορισθεί το κλίμα της κάθε περιοχής. Στο Σχήμα 7 φαίνεται ο διαχωρισμός των περιοχών της Ελλάδας με βάση το δείκτη αυτό.



Σχήμα 0.7 Δείκτης ξηρότητας για τον Ελλαδικό χώρο(πηγή :ΕΤΥΜΠ)

Προκύπτει ότι η δυτική Ελλάδα θεωρείται υγρή περιοχή σε αντίθεση με το λεκανοπέδιο της Αττικής και τα νησιά του Αιγαίου όπου το κλίμα θεωρείται ημίξηρο. Δεν είναι τυχαίο πως οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα υφαλμύρωσης και είναι έντονος και ο κίνδυνος της ερημοποίησης των εδαφών τους.

Για την ορθότερη διαχείριση των υπαρχόντων υδατικών πόρων, η χώρα έχει χωριστεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα, τα οποία φαίνονται αναλυτικά στο Σχήμα 1.8 και είναι τα παρακάτω 01=Δυτικής Πελοποννήσου, 02=Βόρειας Πελοποννήσου, 03=Ανατολικής Πελοποννήσου, 04=Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, 05=Ηπείρου, 06=Αττικής, 07=Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, 08=Θεσσαλίας, 09=Δυτικής Μακεδονίας, 10=Κεντρικής Μακεδονίας, 11=Ανατολικής Μακεδονίας, 12=Θράκης, 13=Κρήτης, 14=Νησιών Αιγαίου. Κάθε υδατικό

διαμέρισμα συνεπάγεται ότι περιλαμβάνει διαφορετικές υδρολογικές λεκάνες ή πολλές υδρολογικές λεκάνες και υπολεκάνες με παρόμοιο υδατικό ισοζύγιο. Η σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων άλλωστε, για να είναι βιώσιμη οφείλει να γίνεται σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης.



Σχήμα 0.8 Τα υδατικά διαμερίσματα στην Ελλάδα(πηγή:Σουλιός ,2004)

Γίνεται πλέον μία προσπάθεια, ώστε να οργανωθεί ένας ενιαίος φορέας διαχείρισης των υδατικών πόρων, με στόχο τη μελέτη και την προστασία της χώρας. Έχει ήδη δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο σε συνεργασία με το ΥΠΕΧΩΔΕ, η Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ), με στόχο τη συλλογή, αξιοποίηση και επεξεργασία των υδατικών δεδομένων για περαιτέρω μελέτη και έρευνα των υδατικών πόρων. Τα στοιχεία του Πίνακα 1.4 προέρχονται από την τράπεζα αυτή και είναι δεδομένα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης, δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και απορροής για το κάθε υδατικό διαμέρισμα της χώρας χωριστά.

Υδατικό Διαμέρισμα	Μέση Ετήσια Βροχόπτωση (mm)	Μέση Ετήσια Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	Μέση Ετήσια Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (mm)	Μέση Ετήσια Συνολική Απορροή ($10^6 \cdot \text{m}^3/\text{yr}$)
Δυτική Πελοπόννησος	878	1155	464	3,75
Βόρεια Πελοπόννησος	703	1105	458	3,55
Ανατολική Πελοπόννησος	807	1243	448	1,95
Δυτική Στερεά Ελλάδα	1149	1033	452	10,6
Ήπειρος	1320	992	463	5,55
Αττική	410	1219	395	4,0
Ανατολική Στερεά Ελλάδα	830	1123	409	2,95
Θεσσαλία	857	1005	411	4,6
Δυτική Μακεδονία	638	959	411	4,95
Κεντρική Μακεδονία	577	1013	374	4,7
Ανατολική Μακεδονία	609	1010	392	4,2
Θράκη	694	1044	409	1,5
Κρήτη	απουσία δεδομένων	απουσία δεδομένων	απουσία δεδομένων	2,6

Πίνακας 0.4 Υδρογεολογικές μεταβλητές ανά υδατικό διαμέρισμα(πηγή: ΕΤΥΜΠ)

Το σύνολο της επιφάνειας της χώρας (131990 τ.χλμ) καλύπτεται με επιφανειακούς υδατικούς πόρους συνολικής επιφάνειας γύρω στα 2200 τ.χλμ., δηλαδή ποσοστό κάλυψης 1.6%. Από αυτά οι φυσικές και οι τεχνητές λίμνες καλύπτουν έκταση περίπου 956 τ.χλμ. (47.2%), οι λιμνοθάλασσες 288 τ.χλμ (14.2%), οι ποταμοί έχουν μήκος 4268 χλμ, και οι εκβολές ποταμών με τα δέλτα τους καλύπτουν έκταση περίπου 723 τ.χλμ. (35.7%) που χρόνο με το χρόνο μειώνονται με έργα αποξήρανσης και διευθέτησης τους (ΝΑ, 1970-1996, Κουσουρήσ και συν., 1981-1994, ΕΚΒΥ, 1994).

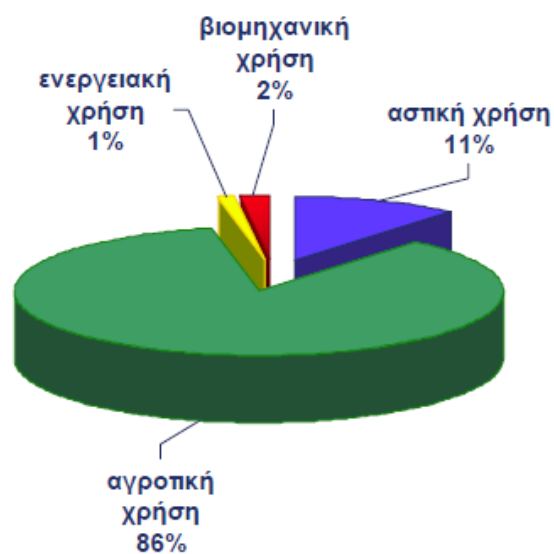
Από την άποψη της γεωγραφικής κάλυψης της χώρας μας με εσωτερικά νερά

μπορούμε να πούμε ότι, η πλέον βροχοφόρα περιοχή, η δυτική Ελλάδα έχει τη μεγαλύτερη κάλυψη με εσωτερικά νερά (444 τ.χλμ) και ακολουθούν η κεντρική Μακεδονία (386 τ.χλμ), η Ηπειρος(337 τ.χλμ), η ανατολική Μακεδονία και Θράκη (316 τ.χλμ), η δυτική Μακεδονία (213τ.χλμ), η Στερεά Ελλάδα (159 τ.χλμ), ενώ μικρότερες εκτάσεις με εσωτερικά ύδατα και υγροτοπικές περιοχές έχουν η Θεσσαλία (59 τ.χλμ), τα νησιά του βόρειου Αιγαίου (33 τ.χλμ), τα Ιόνια νησιά (22 τ.χλμ), η Κρήτη (14 τ.χλμ), τα νησιά του νότιου Αιγαίου (7 τ.χλμ) και τέλος η Αττική (5 τ.χλμ).

Γεωγραφικό Διαμέρισμα	Λίμνες Φυσικές		Λίμνες Τεχνητές		Λιμνοθάλασσες		Ποταμοί		Ελη		Άλλοι Υγρότοποι	
	No	τ.χλμ	No	τ.χλμ	No	τ.χλμ	No	χλμ	No	τ.χλμ	No	τ.χλμ
Μακεδονία & Θράκη	14	370	5	150	7	63	29	1737	9	10	17	323
Θεσσαλία	3	1	3	30	4	0.7	8	649	13	2	6	26
Ηπειρος	13	32	2	54	3	2	8	466	2	0.6	6	248
Στερεά & Δ. Ελλάδα	15	188	8	121	14	297	21	846	13	10	16	102
Πελοπόννησος	4	6	1	1.4	6	4	7	276	7	11	5	29
Νησιά Β.Αιγαίου	-	-	1	2	6	13	1	8	12	16	2	0.8
Νησιά Ν. Αιγαίου	3	0.4	2	0.2	7	2.5	6	65	11	4	-	-
Νησιά Ιονίου	3	0.1	-	-	10	21	2	20	2	0.5	4	0.2
Κρήτη	1	0.6	3	0.3	3	4	9	201	6	3	15	5

Πίνακας 0.5 Γεωγραφική κατανομή των κυριότερων επιφανειακών υδατικών πόρων στην Ελλάδα(πηγή: ΕΤΥΜΠ)

Όσον αφορά τη χρήση των υδατικών πόρων, οι κυριότερες χρήσεις του νερού είναι για ύδρευση, άρδευση και για τη βιομηχανία. Στην Ελλάδα η κατανομή τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10 έχει ως εξής: το μεγαλύτερο ποσοστό, που αγγίζει ως και το 86% του συνολικού νερού χρησιμοποιείται από τον αγροτικό τομέα για την άρδευση των καλλιεργειών. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο, καθώς η Ελλάδα είναι χώρα που στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αγροτική παραγωγή. Ποσοστό του 11% χρησιμοποιείται για την ύδρευση των κατοίκων, ενώ ένα ποσοστό της τάξης του 2% καταναλώνεται από το βιομηχανικό τομέα παραγωγής. Τέλος, υπάρχει και ένα ποσοστό του 1% που χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 0.9 Κατανομή των χρήσεων του νερού στην Ελλάδα(πηγή :ΕΤΥΜΠ)

1.4 Υπόγεια ύδατα

1.4.1 Υδατικοί πόροι και υπόγεια ύδατα

Στη δήλωση του Υπουργικού Σεμιναρίου για τα υπόγεια ύδατα το οποίο πραγματοποιήθηκε στη Χάγη το 1991, αναγνωρίστηκε η ανάγκη δράσης προς αποφυγή μακροπρόθεσμης επιδείνωσης της ποιότητας και της ποσότητας των γλυκών υδάτων, και έγινε έκκληση για ένα πρόγραμμα δράσεων υλοποιητέων μέχρι του έτους 2000 με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση και προστασία των πόρων γλυκού ύδατος· το Συμβούλιο, με τα ψηφίσματά του της 25ης Φεβρουαρίου 1992 και της 20ής Φεβρουαρίου 1995, ζήτησε ένα πρόγραμμα δράσης για τα υπόγεια ύδατα καθώς και την αναθεώρηση της οδηγίας 80/68/ΕΟΚ του Συμβουλίου, της 17ης Δεκεμβρίου 1979, περί προστασίας των υπογείων υδάτων από τη ρύπανση που προκαλείται από ορισμένες επικίνδυνες ουσίες, ως τμήμα μιας συνολικής πολιτικής για την προστασία των γλυκών υδάτων. Έγινε προσπάθεια επομένως καταγραφής των κινδύνων όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα και εφαρμογή νομοθετικού πλαισίου για την προστασία τους.

Η ποσοτική κατάσταση ενός συστήματος υπογείων υδάτων μπορεί να έχει επιπτώσεις στην οικολογική ποιότητα των επιφανειακών υδάτων και των χερσαίων οικοσυστημάτων που συνδέονται με αυτό το σύστημα υπογείων υδάτων.

Τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα είναι, κατ'αρχήν, ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι· ιδίως, η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους· κατά τη θέσπιση μέτρων για την επίτευξη καλής κατάστασης των υπογείων υδάτων και αναστροφής κάθε σημαντικής και έμμονης ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οιουδήποτε ρύπου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα χρονοδιαγράμματα αυτές οι καθυστερήσεις των βελτιώσεων.

Σύμφωνα με την παρούσα οδηγία οι ορισμοί όσον αφορά τα υπόγεια ύδατα διατυπώνονται ως εξής :

"Υπόγεια ύδατα" : το σύνολο των υδάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στη ζώνη κορεσμού και σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος. "Υδροφόρος ορίζοντας" : υπόγειο στρώμα ή στρώματα βράχων ή άλλες γεωλογικές στοιβάδες επαρκώς πορώδεις και διαπερατές ώστε να επιτρέπουν είτε σημαντική ροή υπόγειων υδάτων είτε την άντληση σημαντικών ποσοτήτων υπόγειων υδάτων.

"Σύστημα υπόγειων υδάτων" : συγκεκριμένος όγκος υπόγειων υδάτων εντός ενός ή περισσότερων υδροφόρων οριζόντων.

"Κατάσταση υπόγειων υδάτων" : η συνολική έκφραση της κατάστασης υπογείου υδατικού συστήματος, που καθορίζεται από τις χαμηλότερες τιμές της ποσοτικής και της χημικής του κατάστασης.

"Καλή κατάσταση υπόγειων υδάτων" : η κατάσταση υπογείου υδατικού συστήματος που χαρακτηρίζεται τουλάχιστον "καλή", τόσο από ποσοτική όσο και από χημική

άποψη.

"Ποσοτική κατάσταση" : η έκφραση του βαθμού στον οποίο ένα σύστημα υπόγειων υδάτων επηρεάζεται από άμεσες και έμμεσες αντλήσεις.

"Διαθέσιμοι πόροι υπόγειων υδάτων" : ο μακροπρόθεσμος μέσος ετήσιος ρυθμός

γενικής ανατροφοδότησης ενός συστήματος υπόγειων υδάτων μείον τον

μακροπρόθεσμο μέσο ετήσιο ρυθμό ροής που απαιτείται για την επίτευξη των στόχων οικολογικής ποιότητας για τα συναφή επιφανειακά ύδατα, για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής μείωσης της οικολογικής κατάστασης των υδάτων αυτών και για την αποφυγή οιασδήποτε σημαντικής ζημίας των συναφών χερσαίων οικοσυστημάτων.

Περιβαλλοντικοί Στόχοι για τα υπόγεια ύδατα είναι :

(i)Τα κράτη μέλη λαμβάνουν τα αναγκαία μέτρα ώστε να προληφθεί ή να περιορισθεί η διοχέτευση ρύπων στα υπόγεια ύδατα και να προληφθεί η υποβάθμιση της κατάστασης όλων των συστημάτων των υπογείων υδάτων

(ii)Τα κράτη μέλη προστατεύουν, αναβαθμίζουν και αποκαθιστούν όλα τα συστήματα των υπόγειων υδάτων, διασφαλίζουν ισορροπία μεταξύ της άντλησης και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων, με στόχο την επίτευξη καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων το αργότερο 15 έτη από την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας

(iii)Τα κράτη μέλη εφαρμόζουν τα αναγκαία μέτρα για την αναστροφή κάθε σημαντικής και έμμονης ανοδικής τάσης συγκέντρωσης οιασδήποτε ρύπου, η οποία οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα προκειμένου να μειωθεί προοδευτικά η ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

Τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίζουν τις όσο το δυνατόν λιγότερες μεταβολές στην καλή κατάσταση των υπόγειων υδάτων, δεδομένων των επιπτώσεων που δεν θα μπορούσαν ευλόγως να έχουν αποφευχθεί λόγω της φύσεως της ανθρώπινης δραστηριότητας ή της ρύπανσης.

Τα "βασικά μέτρα" που ορίζει η οδηγία είναι οι στοιχειώδεις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται και συνίστανται :

- σε ελέγχους που διέπουν την άντληση γλυκών επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και την κατακράτηση γλυκών επιφανειακών υδάτων, συμπεριλαμβανομένου μητρώου ή μητρώων αντλήσεων, και απαίτηση προηγούμενης άδειας για την άντληση και την κατακράτηση. Οι έλεγχοι αυτοί επανεξετάζονται περιοδικώς και, εφόσον χρειάζεται, εκσυγχρονίζονται. Τα κράτη μέλη μπορούν να εξαιρούν από τους εν λόγω ελέγχους τις αντλήσεις ή τις κατακρατήσεις που δεν έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην κατάσταση του ύδατος,

- σε απαγόρευση των απορρίψεων ρύπων, απευθείας στα υπόγεια ύδατα, με την επιφύλαξη των ακόλουθων διατάξεων:

- Τα κράτη μέλη μπορούν να επιτρέπουν την επανέγχυση στον ίδιο υδροφόρο ορίζοντα ύδατος το οποίο χρησιμοποιείται για

γεωθερμικούς σκοπούς.

➤ Τα κράτη μέλη μπορούν επίσης να επιτρέπουν, ορίζοντας τις σχετικές προϋποθέσεις :

(i) την έγχυση υδάτων που περιέχουν ουσίες οι οποίες προέρχονται από εργασίες αναζήτησης και εξαγωγής υδρογονανθράκων ή από μεταλλευτικές δραστηριότητες, και την έγχυση υδάτων για τεχνικούς λόγους, σε γεωλογικούς σχηματισμούς από τους οποίους έχουν εξαχθεί υδρογονάνθρακες ή άλλες ουσίες ή σε γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι, για φυσικούς λόγους, είναι μονίμως ακατάλληλοι για άλλους σκοπούς. Οι εγχύσεις αυτές δεν επιτρέπεται να περιέχουν άλλες ουσίες πλην εκείνων που προέρχονται από τις προαναφερόμενες εργασίες,

(ii) την επανέγχυση υπόγειων υδάτων που αντλούνται από ορυχεία και λατομεία ή που συνδέονται με την κατασκευή ή τη συντήρηση έργων πολιτικού μηχανικού,

(iii) την έγχυση φυσικού αερίου ή υγραερίου (LPG) προς αποθήκευση σε γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι, για φυσικούς λόγους, είναι μονίμως ακατάλληλοι για άλλους σκοπούς,

(iv) την έγχυση φυσικού αερίου ή υγραερίου (LPG) προς αποθήκευση σε άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς όταν υπάρχει επιτακτική ανάγκη για την ασφάλεια του εφοδιασμού σε αέριο, και όταν η έγχυση πραγματοποιείται κατά τρόπο που δεν παρουσιάζει ή δεν θα παρουσιάσει κίνδυνο υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων υποδοχής,

- κατασκευαστικές και οικοδομικές εργασίες και εργασίες πολιτικού μηχανικού και παρόμοιες δραστηριότητες επί ή εντός του εδάφους που έρχεται σε επαφή με τα υπόγεια ύδατα. Για τους σκοπούς αυτούς, τα κράτη μέλη μπορούν να ορίζουν ότι, οι δραστηριότητες αυτές επιτρέπονται εφόσον διεξάγονται σύμφωνα με γενικούς δεσμευτικούς κανόνες τους οποίους θεσπίζουν τα κράτη μέλη για τις δραστηριότητες αυτές,
- απορρίψεις μικρών ποσοτήτων ουσιών οι οποίες πραγματοποιούνται για επιστημονικούς λόγους για το χαρακτηρισμό, την προστασία ή την αποκατάσταση υδατικών συστημάτων και οι οποίες περιορίζονται αυστηρά στην απαιτούμενη ποσότητα, εφόσον οι εν λόγω απορρίψεις δεν θέτουν σε κίνδυνο την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που καθορίζονται για το εν λόγω σύστημα υπογείων υδάτων.

Στρατηγικές για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων :

1. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο θεσπίζουν ειδικά μέτρα για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην επίτευξη του στόχου της καλής χημικής κατάστασης των υπογείων υδάτων, β) και θεσπίζονται βάσει προτάσεως, την οποία υποβάλλει η Επιτροπή εντός δύο ετών από τη θέση σε ισχύ της παρούσας οδηγίας, σύμφωνα με τις διαδικασίες που προβλέπονται στη

Συνθήκη.

2. Κατά την υποβολή προτάσεως μέτρων, η Επιτροπή λαμβάνει υπόψη την ανάλυση που διεξήχθη. Τα μέτρα αυτά προτείνονται νωρίτερα αν είναι διαθέσιμα τα δεδομένα και περιλαμβάνουν :

- α) κριτήρια αξιολόγησης της καλής χημικής κατάστασης των υπογείων υδάτων,
- β) κριτήρια για τον προσδιορισμό σημαντικής και βιώσιμης ανοδικής τάσης και για τον καθορισμό εναρκτήριων σημείων αναστροφής της τάσης που θα χρησιμοποιούνται.

3. Τα μέτρα που προκύπτουν από την εφαρμογή της παραγράφου 1 περιλαμβάνονται στα προγράμματα των μέτρων που απαιτούνται.

4. Ελλείψει θεσπίσεως κριτηρίων δυνάμει της παραγράφου 2 σε κοινοτικό επίπεδο, τα κράτη μέλη θεσπίζουν τα κατάλληλα κριτήρια το αργότερο πέντε έτη μετά την ημερομηνία έναρξης ισχύος της παρούσας οδηγίας.

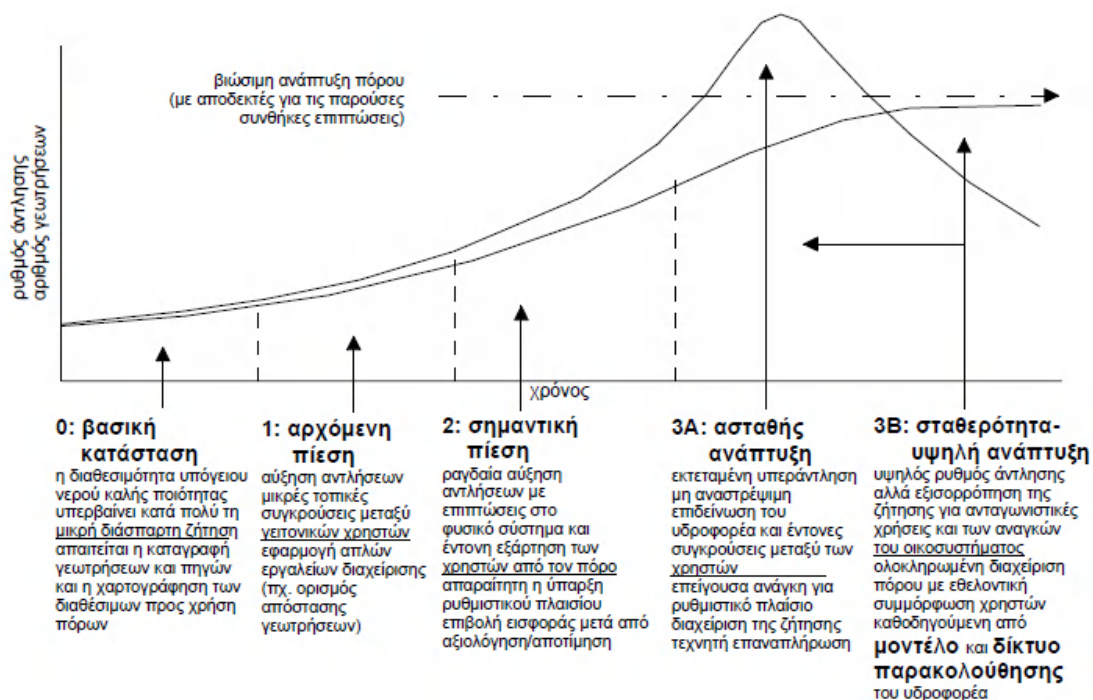
5. Ελλείψει θεσπίσεως κριτηρίων δυνάμει της παραγράφου 4 σε εθνικό επίπεδο, η αναστροφή της τάσης λαμβάνει ως εναρκτήριο σημείο της το 75%, κατ' ανώτατο όριο, του επιπέδου των ποιοτικών προδιαγραφών που προβλέπονται στην υφιστάμενη κοινοτική νομοθεσία η οποία εφαρμόζεται στα υπόγεια ύδατα.

1.4.2 Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων

Τα υπόγεια νερά αποτελούν σημαντικό τμήμα των υδατικών πόρων. Η διαχείριση των υπόγειων νερών έχει ως στόχο την ισορροπημένη και ορθολογική εκμετάλλευσή τους, όσον αφορά την ποσότητα και την ποιότητά τους, καθώς και την αλληλεπίδρασή τους με τα επιφανειακά νερά. Οι συνέπειες της αλόγιστης εκμετάλλευσης γίνονται αντιληπτές από τους φορείς διαχείρισης και τους χρήστες όταν παρουσιαστεί μείωση της απόδοσης των γεωτρήσεων ή και υποβάθμιση της ποιότητας του αντλούμενου νερού. Αν συνεχιστεί η υπεράντληση μπορεί να προκληθεί σοβαρή πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού, διείσδυση αλμυρού νερού αν ο υδροφορέας βρίσκεται σε επαφή με τη θάλασσα, ακόμα και καθίζηση εδαφών. Είναι ουσιώδους σημασίας να αναγνωρισθεί ότι η διαχείριση του υπόγειου νερού αφορά τόσο τη διαχείριση της ζήτησης (χρήστες του νερού) όσο και τη διαχείριση του υδροφορέα: η κοινωνικοοικονομική διάσταση είναι εξίσου σημαντική με την υδρογεωλογική διάσταση.

Το υπόγειο νερό χρησιμοποιείται στη γεωργία, στη βιομηχανία και την παραγωγή πόσιμου νερού. Εξασφαλίζει επίσης τη μόνιμη ροή των επιφανειακών υδάτων. Χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα από τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του υπόγειου νερού. Η διαχείριση των υπόγειων νερών, ως κομμάτι της διαχείρισης των υδατικών πόρων, θα πρέπει να επιτυγχάνει την εξισορρόπηση του κόστους και του οφέλους που προκύπτουν από τις διαχειριστικές δράσεις. Θα πρέπει δηλαδή να εξασφαλίζει, κατά το δυνατό, τις ανάγκες των διαφόρων χρηστών (συμπεριλαμβανομένων των οικοσυστημάτων που άμεσα ή έμμεσα εξαρτώνται από αυτά), αποτρέποντας την υποβάθμιση του υδρογεωλογικού συστήματος από το οποίο καλύπτονται οι ανάγκες αυτές. Από την υδρογεωλογική σκοπιά, θα πρέπει να κατανοηθεί η λειτουργία κάθε υδροφορέα ή συστήματος υδροφορέων και η δυνατότητα ανταπόκρισης του συγκεκριμένου υδροφορέα ή συστήματος σε διαφορετικά επίπεδα ζήτησης, καθώς επίσης και η αλληλεπίδρασή του με επιφανειακά νερά (φόρτιση-εκφόρτιση). Τα αποτελέσματα της υπεράντλησης μπορεί να είναι βραχυπρόθεσμα και αναστρέψιμα ή μακροπρόθεσμα και σχεδόν μη αναστρέψιμα. Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια ανάπτυξης ενός υδροφορέα και οι αντίστοιχες ανάγκες διαχείρισης (Tuinhof et al.,-). Σε πρακτικό επίπεδο, διευκολύνει η διάκριση επιπέδων ανάπτυξης των υπόγειων υδατικών πόρων και αντίστοιχων εργαλείων και δράσεων διαχείρισης, με στόχο πάντα την πρόληψη της υποβάθμισής τους και την προστασία τους, προς όφελος των σημερινών αλλά και των μελλοντικών αναγκών. Τα τεχνικά εργαλεία τα οποία είναι απαραίτητα να αναπτυχθούν για τη διαχείριση ενός υδροφορέα εξελίσσονται σταδιακά, ξεκινώντας από τη βασική κατανόηση και γνώση του υδροφορέα, τη διαμόρφωση ενός θεωρητικού μοντέλου βασιζόμενου σε δεδομένα πεδίου (conceptual model), την κατάρτιση μαθηματικού μοντέλου για την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων άντλησης και τέλος τη σύνδεση του μοντέλου αυτού με μοντέλα λήψης απόφασης χρησιμοποιούμενα για τη διαχείριση του υπόγειου νερού (decision support models). Παράλληλα εξελίσσονται και τα

τεχνικά εργαλεία που αφορούν την ποιότητα του υπόγειου νερού, καθώς και το δίκτυο ποσοτικής και ποιοτικής παρακολούθησης του υδροφορέα.



Σχήμα 0.10 Στάδια ανάπτυξης ενός υδροφορέα και αντίστοιχες ανάγκες διαχείρισης.

1.5 Διαδικασία εφαρμογής της οδηγίας για τα υπόγεια ύδατα

1.5.1 Αρχικός χαρακτηρισμός υπόγειων υδάτων

Τα κράτη μέλη προβαίνουν σε αρχικό χαρακτηρισμό όλων των συστημάτων υπογείων υδάτων προκειμένου να αξιολογηθούν οι χρήσεις τους και οι κίνδυνοι που διατρέχουν να μην πληρούν τους στόχους για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων. Για τον αρχικό αυτό χαρακτηρισμό, τα κράτη μέλη μπορούν να συνενώνουν διάφορα συστήματα υπόγειων υδάτων. Κατά την ανάλυση αυτή, είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται υφιστάμενα στοιχεία υδρολογίας, γεωλογίας, εδαφολογίας, χρήσεων γης, απορροών, υδροληψιών κλπ., προκειμένου να προσδιορίζονται :

- η θέση και τα όρια του ή των συστημάτων υπόγειων υδάτων,
- οι πιέσεις τις οποίες αναμένεται να υποστούν το ή τα συστήματα υπόγειων υδάτων, δηλαδή μεταξύ άλλων :
 - διάχυτες πηγές ρύπανσης
 - σημειακές πηγές ρύπανσης υδροληψία
 - τεχνητή ανατροφοδότηση,
- γενικός χαρακτήρας των υπερκείμενων στρωμάτων στην υδρολογική λεκάνη από την οποία τροφοδοτείται το σύστημα υπόγειων υδάτων, τα συστήματα υπόγειων υδάτων για τα οποία υπάρχουν άμεσα εξαρτημένα οικοσυστήματα επιφανειακών υδάτων ή χερσαία οικοσυστήματα.

1.5.2 Λεπτομερής ανάλυση υπογείων υδάτων

Έπειτα από τον αρχικό αυτό χαρακτηρισμό, τα κράτη μέλη προβαίνουν σε περαιτέρω χαρακτηρισμό των συστημάτων ή των ομάδων συστημάτων υπόγειων υδάτων τα οποία έχουν θεωρηθεί ότι απειλούνται προκειμένου να επιτευχθεί ακριβέστερη αξιολόγηση της σοβαρότητας του κινδύνου και να προσδιοριστούν τα τυχόν μέτρα που θα απαιτηθούν. Συνεπώς, ο χαρακτηρισμός αυτός περιλαμβάνει σχετικές πληροφορίες για τις επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και, κατά περίπτωση, πληροφορίες για :

- τα γεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης και του τύπου των γεωλογικών ενοτήτων,
- τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά του συστήματος υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων της υδροαγωγιμότητας, του πορώδους και της στεγανότητας,

-τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών εναποθέσεων και εδαφών στην υδρολογική λεκάνη από την οποία τροφοδοτείται το σύστημα υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένων του πάχους, του πορώδους, της υδροαγωγιμότητας και των απορροφητικών ιδιοτήτων των εναποθεμάτων και εδαφών,

-τα χαρακτηριστικά διαστρωμάτωσης του ύδατος εντός του συστήματος υπόγειων υδάτων,

-απογραφή των συνδεδόμενων επιφανειακών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των χερσαίων οικοσυστημάτων και των συστημάτων επιφανειακών υδάτων, με τα οποία συνδέεται δυναμικά το σύστημα υπόγειων υδάτων,

-εκτιμήσεις των κατευθύνσεων και των ρυθμών ανταλλαγής υδάτων μεταξύ του συστήματος υπόγειων υδάτων και των συνδεδόμενων επιφανειακών συστημάτων, και επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό του μακροπρόθεσμου μέσου ετήσιου ρυθμού συνολικής ανατροφοδότησης.

-το χαρακτηρισμό της χημικής σύνθεσης των υπόγειων υδάτων, συμπεριλαμβανομένου του καθορισμού των συμβολών από ανθρώπινη δραστηριότητα. Όταν καθορίζουν φυσικά βασικά επίπεδα για τα συστήματα αυτά υπόγειων υδάτων, τα κράτη μέλη μπορούν να χρησιμοποιούν τυπολογίες χαρακτηρισμού υπόγειων υδάτων.

1.5.3 Επισκόπηση των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων επί των υπόγειων υδάτων

Για τα συστήματα υπόγειων υδάτων που διασχίζουν τα σύνορα μεταξύ δύο ή περισσότερων κρατών μελών ή θεωρούνται στον αρχικό χαρακτηρισμό, ως διατρέχοντα τον κίνδυνο να μην πληρούν τους στόχους που καθορίζονται για κάθε σύστημα, συλλέγονται και διατηρούνται, κατά περίπτωση, οι ακόλουθες πληροφορίες για κάθε σύστημα υπόγειων υδάτων :

- α) η θέση των σημείων υδροληψίας του συστήματος υπόγειων υδάτων πλην:
 - των σημείων υδροληψίας που παρέχουν λιγότερα από 10 m³ ημερησίως κατά μέσον όρο, ή
 - των σημείων άντλησης ύδατος προοριζομένου για ανθρώπινη κατανάλωση, τα οποία παρέχουν λιγότερα από 10m³ ημερησίως κατά μέσον όρο ή που εξυπηρετούν λιγότερα από 50 άτομα,
- β) οι μέσοι ετήσιοι ρυθμοί υδροληψίας από τα σημεία αυτά.
- γ) η χημική σύνθεση του ύδατος που αντλείται από το σύστημα υπόγειων υδάτων,
- δ) η θέση των σημείων του συστήματος υπόγειων υδάτων στα οποία γίνεται άμεση εισαγωγή ύδατος,
- ε) οι ρυθμοί απόρριψης στα σημεία αυτά,
- στ) η χημική σύνθεση του ύδατος που εισάγεται στο σύστημα υπόγειων υδάτων, και
- ζ) η χρήση γης στην υδρολογική λεκάνη ή λεκάνες από τις οποίες το σύστημα υπόγειων υδάτων δέχεται τις ανατροφοδοτήσεις του, συμπεριλαμβανομένων των εισροών ρύπων και των ανθρωπογενών μεταβολών στα χαρακτηριστικά των ανατροφοδοτήσεων, όπως π.χ. η εκτροπή και η διαρροή ομβρίων λόγω στεγανοποίησης εδαφών, τεχνητής ανατροφοδότησης, κατασκευής φραγμάτων ή αποστράγγισης.

1.5.4 Εργαλεία εφαρμογής της οδηγίας σε υπόγειους υδροφορείς

Τα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό την εφαρμογή της οδηγίας στα υπόγεια ύδατα είναι τα μαθηματικά μοντέλα. Προϋπόθεση για την εφαρμογή κάποιου μαθηματικού ομοιώματος είναι η ύπαρξη αξιόπιστων στοιχείων-δεδομένων για τον υπό μελέτη υδροφορέα. Με την προσομοίωση των υδροφορέων επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση συμπεριφοράς αυτών, αλλά και πρόβλεψη, με σκοπό τη λήψη δραστηκών μέτρων για την προστασία τους είτε από υπεραντλήσεις, είτε από κάθε μορφής ρύπανση. Ο συγκεκριμένος υδροφορέας υπόκειται σε σημαντικές αντλήσεις που έχουν ως συνέπειες τη πτώση στάθμης και την εισχώρηση θαλασσινού νερού σ' αυτόν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΝΗΣΟΥ ΜΗΛΟΥ

2.1 Ιστορικά Στοιχεία

Η Μήλος στη δωρική διάλεκτο ονομαζόταν Μάλος. Με το ίδιο όνομα στα ιστορικά χρόνια αναφέρεται και το νησί και η πόλη. Μεταγενέστερες παραδόσεις αποδίδουν το όνομα στο σχήμα του νησιού. Στα νομίσματα της πόλης απεικονίζεται το μήλο που αποτελεί το σήμα κατατεθέν του νησιού στα ιστορικά χρόνια.

Τα ηφαιστειογενή εδάφη της Μήλου, που οφείλονται στην ύπαρξη ενεργού σε πανάρχαιους χρόνους ηφαιστείου, είναι πλούσια σε ορυκτά, που αποτέλεσαν την κυριότερη πηγή πλούτου για το νησί από πολύ παλιά εποχή έως σήμερα. Σπουδαιότατο ρόλο στην ανάπτυξη της Μήλου από τους νεολιθικούς ακόμα χρόνους, έπαιξε το εμπόριο του οψιδιανού, σιλπνού και σκληρού μαύρου λίθου, που μόνο στη Μήλο από ολόκληρη τη Μεσόγειο βρίσκεται σε αφθονία, και χρησίμευε κυρίως στην κατασκευή εργαλείων και όπλων. Άλλα ορυκτά χρησιμοποιήθηκαν στην ιατρική, τη ζωγραφική ή ακόμα και για την λείανση των δερμάτων (ελαφρόπετρα).

Κατά την παράδοση, πρώτοι κάτοικοι της νήσου ήταν οι Φοίνικες, με την επιρροή των οποίων η Μήλος αρχίζει να διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο μέσα στον κυκλαδίτικο πολιτισμό, από την τρίτη κι όλας χιλιετηρίδα. Η μινωική θαλασσοκρατία επιδρά ισχυρά στον πολιτισμό της, με αποτέλεσμα η Μήλος να αποτελεί πραγματική κρητική εγκατάσταση. Αργότερα, τη μινωική επίδραση διαδέχεται η μυκηναϊκή. Το σημαντικότερο κέντρο σε όλους αυτούς τους αιώνες βρίσκεται στη βόρεια ακτή, στη Φυλακωπή.

Περί το 1200 π.Χ. Δωριείς εγκαθίστανται στην περιοχή και ιδρύουν αποικία, με αποτέλεσμα το κέντρο να μεταφέρεται στο εσωτερικό του μεγάλου και ασφαλισμένου κόλπου. Η νέα πόλη, όπως δείχνουν σήμερα τα ευρήματα, γρήγορα παρουσίασε σημαντική ανάπτυξη. Παρά τη δωρική καταγωγή των κατοίκων, στην τέχνη παρατηρείται έντονη ιωνική επίδραση, ιδιαίτερα στη μεγάλη σειρά των λεγόμενων «μηλιακών αγγείων», τα περισσότερα από τα οποία βρέθηκαν στον ομαδικό τάφο της κάθαρσης της Δήλου και αποτελούν μια από τις σπουδαιότερες συλλογές του μουσείου της Μυκόνου. Για το υψηλό επίπεδο της τέχνης της Μήλου μιλούν τα λίγα αλλά εξαιρετικά έργα που διασώθηκαν στις μέρες μας, όπως ο κούρος στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο, που χρονολογείται τον 6^ο π.Χ. αιώνα, και ο ανάγλυφος δίσκος με την κεφαλή της Αφροδίτης, περί των 5^ο π.Χ. αιώνα.

Πολύ λίγα γνωρίζουμε από τις αρχαίες πηγές για τη Μήλο πριν από τον 5^ο π.Χ. αιώνα. Οι κατοικοί της είναι από τους λίγους που αρνήθηκαν «γη και ύδωρ»

στους Πέρσες, ενώ στη ναυμαχία της Σαλαμίνας αγωνίζονται στο πλευρό των άλλων Ελλήνων. Η δημιουργία της συμμαχίας τις Δήλου, καθώς και η αύξηση της αθηναϊκής δύναμης είχαν σοβαρές επιπτώσεις στη Μήλο. Το καλοκαίρι του 426 π.Χ. αθηναϊκή δύναμη εκστρατεύει για πρώτη φορά εναντίον της, με αποτέλεσμα την επιβολή φόρου ίσο με 15 τάλαντα, ποσό που μόνο τα πιο πλούσια νησιά των κυκλάδων πληρώνουν στην Αθήνα ως φόρο υποτέλειας. Δέκα χρόνια αργότερα, η συμπάθειά της προς τους Λακεδαιμόνιους τη φέρνει πάλι αντιμέτωπη με την Αθήνα. Στον νησί εγκαθίστανται 500 Αθηναίοι κληρούχοι, που εξορίζουν τους άρχοντες του νησιού, μετά την ήττα της Αθήνας ωστόσο, οι Λακεδαιμόνιοι επαναφέρουν στο νησί όσους είχαν επιζήσει της καταστροφής.

Στους μετέπειτα αιώνες, η Μήλος ακολουθεί κοινή πορεία με τα υπόλοιπα νησιά των κυκλάδων. Έως το 311 π.Χ. ανήκει στην Μακεδονία και στη συνέχεια περνάει στα χέρια της Αιγύπτου, όπου βρίσκει πρόσφορο έδαφος για μια νέα περίοδο ακμής. Το εμπόριο των ορυκτών βοήθησε εκ νέου στην οικονομική ανάπτυξη του νησιού και στην άνθηση των τεχνών, πάντα υπό την ελευθερία και την ασφάλεια των θαλασσών που προσέφερε ο πανίσχυρος για την εποχή στόλος των Πτολεμαίων. Το περίφημο άγαλμα της «Αφροδίτης της Μήλου» που βρίσκεται στο μουσείο του Λούβρου και ο επιβλητικός Ποσειδώνας που βρίσκεται στο Εθνικό Μουσείο, αποτελούν αντιπροσωπευτικά δείγματα της νέας ακμής. Πολύ γρήγορα διαδόθηκε στη Μήλο και ο χριστιανισμός, ίσως εξαιτίας των πολλών Ιουδαίων που είχαν συγκεντρωθεί στο νησί λόγω της ανάπτυξης του εμπορίου. Στα πρώιμα βυζαντινά χρόνια η Μήλος ανήκει αρχικά στην «επαρχία των νήσων» και κατόπιν μετά το 565 μ.Χ. Στο «Θέμα του Αιγαίου» που είχε πρωτεύουσα τη Σάμο. Οι καταστροφές και οι ερημώσεις που ακολούθησαν στους χρόνους μετά τον Ιουστινιανό, με τις επιδρομές των σλαβικών φύλων, των πειρατών και των Αράβων είχαν αρνητικές επιδράσεις στη Μήλο. Μετά την πτώση της Βυζαντινής αυτοκρατορίας, το νησί υποτάσσεται στους Βενετούς, ωστόσο η περίοδος της παρακμής συνεχίζεται από τους συνεχείς πολέμους μεταξύ των Βενετών και των Τούρκων.

Μετά την κατάκτησή της από τους Τούρκους, το κέντρο της ζωής του νησιού μεταφέρεται στο βάθος του κόλπου στη Ζεφυρία. Η ηρεμία ωστόσο δεν κρατάει πολύ, αφού με την εξασθένηση της οθωμανικής αυτοκρατορίας, το νησί γίνεται στόχος πειρατών, που καταλαμβάνουν και χρησιμοποιούν το ασφαλισμένο λιμάνι του, ως ορμητήριό τους. Μέχρι το τέλος του 17^{ου} αιώνα, οι κάτοικοι της Μήλου παίρνουν πολλές φορές μέρος σε πειρατείες εις βάρος του τουρκικού στόλου, λαμβάνοντας μερίδιο από τα λάφυρα. Μετά την επανάσταση του 1821, η Μήλος αποκτά την ελευθερία της, και μαζί με τις υπόλοιπες κυκλάδες αποτέλεσαν ιδιαίτερο νομό του νεοσύστατου ελληνικού κράτους, μέχρι τις μέρες μας, με πρωτεύουσα τη Σύρο.

2.2 Αρχαιολογικά Ευρήματα

2.2.1 Αφροδίτη της Μήλου

Η Αφροδίτη της Μήλου είναι ένα πολύ γνωστό μαρμάρινο άγαλμα, το οποίο βρέθηκε το 1820 σε μία αγροτική περιοχή του νησιού από έναν αγρότη με το όνομα Γεώργιος



Εικόνα 0.1 Η Αφροδίτη της Μήλου

Κεντρωτάς. Ο ίδιος βέβαια δεν ήξερε την μεγάλη αρχαιολογική του αξία, αποφάσισε όμως να το περιφράξει σε ένα χώρο του κτήματός του. Πολύ γρήγορα όμως το ανακάλυψαν κάποιοι Γάλλοι αρχαιολόγοι και εξαγόρασαν με 400 γρόσια το άγαλμα, μεταφέροντάς το στο Μουσείο του Λούβρου, όπου βρίσκεται μέχρι σήμερα. Στο μουσείο της Μήλου σήμερα υπάρχει ένα πιστό αντίγραφο, που το έφεραν οι Γάλλοι υπεύθυνοι του Μουσείου του Λούβρου. Το συγκεκριμένο άγαλμα παριστάνει την Αφροδίτη ημίγυμνη, που μάλλον όπως φαίνεται από τη στάση της, ετοιμάζεται να κάνει το μπάνιο της. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν βρέθηκε το άγαλμα, υπήρχαν και τα χέρια τα οποία σήμερα δεν υπάρχουν, ενώ έχουν ειπωθεί δύο εκδοχές για το πώς έσπασαν: η μία είναι ότι έσπασαν κατά την μεταφορά του αγάλματος στο

Λούβρο, και η άλλη κατά τη διάρκεια μιας διαμάχης μεταξύ των Γάλλων αρχαιολόγων και των ντόπιων κατοίκων της Μήλου, όταν όπως φαίνεται κάποιος έριξε κατά λάθος το άγαλμα με αποτέλεσμα να σπάσουν τα χέρια και να χαθούν. Η Αφροδίτη της Μήλου θεωρείται ένα καταπληκτικό έργο της ελληνιστικής τέχνης, συνδυάζοντας αρμονικά τη γυναικεία ομορφιά και θηλυκότητα, χρονολογείται γύρω στον 1ο αιώνα π.Χ. και ο κατασκευαστής του είναι άγνωστος. Θεωρείται ακόμα ως σήμα κατατεθέν της Μήλου ή προσδιοριστικό στοιχείο του τουρισμού της Μήλου.

2.2.2 Οι κατακόμβες της Μήλου

Οι κατακόμβες είναι σκαμμένες σε ηφαιστειακό τάφο και αποτελούν ένα από τα αξιοθέατα του νησιού. Οι κατακόμβες ανακαλύφθηκαν από αρχαιολόγους και έγιναν γνωστές μετά τη σύλησή τους, το 1840. Είναι τρεις και μαζί με πέντε διαδρόμους και ένα νεκρικό θάλαμο αποτελούν ένα δαιδαλώδες σύστημα συνολικού σημερινού μήκους 185 μέτρων. Είχαν εισόδους στο εξωτερικό περιβάλλον, αλλά σήμερα λειτουργεί μόνο μία, αυτή της δεύτερης κατακόμβης ή των «Πρεσβυτέρων», απ' όπου μπορεί να εισέλθει ο επισκέπτης.

Στο εσωτερικό των κατακομβών, δεξιά και αριστερά επάνω στους τοίχους, υπάρχουν τα «αρκοσόλια» (σκαμμένες αψίδες) όπου μέσα σ' αυτά, καθώς και στο πάτωμα, ανοίγονταν οι τάφοι. Αρκοσόλια σήμερα σώζονται 126 (Πετροχείλου, 1972) και υπολογίζεται ότι έχουν ταφεί μερικές χιλιάδες νεκρών. Σε κάθε τάφο υπήρχε λυχνάρι, ενώ σήμερα έχουν τοποθετηθεί ηλεκτρικοί λαμπτήρες που φωτίζουν το χώρο διακριτικά και δημιουργούν την ατμόσφαιρα εκείνων των χρόνων.

Στους τάφους των πιο διακεκριμένων προσώπων ζωγράφιζαν χριστιανικά σύμβολα ή χάραζαν επιγραφές. Τέτοια είδαν και μελέτησαν οι Ross (1843) και Σωτηρίου(1927), αλλά με την πάροδο των χρόνων τα περισσότερα καταστράφηκαν. Μια τέτοια επιγραφή μπορεί να δει ο σημερινός επισκέπτης στη δεύτερη κατακόμβη, στο 6ο αρκοσόλιο δεξιά. Είναι η επιγραφή των «Πρεσβυτέρων», απ' όπου και το όνομά της. Ακόμα στην ίδια κατακόμβη, στη μέση περίπου, υπάρχει ένας τάφος σκαμμένος στο βράχο υπό μορφή σαρκοφάγου. Πιστεύεται ότι είχε ταφεί σ' αυτόν ένας από τους πρώτους μάρτυρες της χριστιανοσύνης και ακόμα ότι οι πρώτοι χριστιανοί τον χρησιμοποιούσαν ως Αγία Τράπεζα στις λειτουργίες τους. Η δραστηριότητα των πρώτων χριστιανών στις κατακόμβες σταματά λίγο μετά τη θεσμοθέτηση της ανεξιθρησκίας (διάταγμα Μεδιολάνων), ή μέχρι να καταστραφεί και να εγκαταλειφθεί η αρχαία πόλη του Κλήματος από σεισμούς τον 5ο ή 6ο αιώνα μ.Χ.

Βιβλιογραφία

- Anderson M. and Woessner W., (1992), Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press.
- Bakker M., (2005), The Sea Water Intrusion (SWI) Package Manual, Artesia – The University of Georgia.
- Bear J., (1979), Hydraulics of Groundwater, Edition of 2007, Dover Publications Inc., Mineola, New York.
- Bear J., (1972), Dynamics of Fluids in Porous Media, Dover Publications Inc., Mineola, New York.
- Bear J. and Verruijt A., (1987), Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company.
- Bear J. et al., (1999), Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices, Kluwer Academic Publishers, p. 163 – 191.
- Chiang W. and Kinzelbach W., (2001), 3D – Groundwater Modeling with PMWIN, Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Chiang W., (2005), Processing Modflow Pro, WebTech360.
- Hiscock K., (2005), Hydrogeology Principles and Practice, Blackwell Publishing, 2nd Edition.
- Kresic N., (2006), Hydrogeology and Groundwater Modeling, 2nd Edition 2007.
- Mc Donald M. and Harbaugh A., (1988), A Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground Water Flow Model, U.S. Geological Survey.
- Mantoglou A., Papantoniou M., & Giannouloupoulos P., (2004), “Management of coastal Aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms”, Journal of Hydrology 297, p. 209 – 228.
- Mantoglou A., (2003), “Pumping Management of coastal Aquifers using Analytical Models of Saltwater Intrusion”, Water Resources Research 39 (12).
- Mantoglou A. and P. Giannouloupoulos, «Sustainable Yield of Coastal Aquifers Using Simulation and Optimization: Application to Santorini Island», International Conference “Protection and Restoration of the Environment VII”, Mykonos, Greece, 2004.
- Reilly T. & A. Goodman, (1985), «Quantitative analysis of saltwater – freshwater relationships in groundwater systems – a historical perspective», U.S. Geological Survey, Polytechnic Institute of New York, Brooklyn.
- Morris & Johnson, (1967), “Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil materials, as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948 – 60, U.S.G.S. Water Supply paper, 1839 – D.
- Νάνου – Γιάνναρου Α., (2006), Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

- Βογιατζή Χ., (2007), «Προσομοίωση παράκτιου υδροφορέα-Βόρεια Κω», Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
- Παπανικολάου Δ., (1986), Γεωλογία της Ελλάδας, σελ. 219.
- Παπαντωνίου Μ., (2003), «Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων – Βελτιστοποίηση Αντλήσεων», Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
- Todd D., (1980), Groundwater Hydrology, Second Edition, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Γιαννουλόπουλος Π., «Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό πεδίο», Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 2000.
- Κουράκος Γ., «Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων με Περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια», Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 2009.
- Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., (1999), «Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας υδατικών πόρων, Αθήνα.
- Κουτσογιάννης Δ., «Υδρομετεωρολογία - Εξάτμιση και διαπνοή» Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- Τσακίρης Γ., (1995), «Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.
- Τσακίρης Γ., (2006), «Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση – Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά Έργα», Αθήνα.
- Donker, N. H. W. (1987), Wtrbln: A computer program to calculate water balance. "Computers & Geosciences, 13(2), 95 – 122.
- Στράντζαλης Κ., Διπλωματική εργασία, «Προσδιορισμός Υδάτινου Ισοζυγίου Υπόγειου Παράκτιου Υδροφορέα της Ν. Θήρας υπό την Επίδραση Έντονων Κλιματικών Αλλαγών», ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- Νικολή Ρ., Διπλωματική εργασία, «Διερεύνηση Υδάτινου Δυναμικού Υπόγειου Υδροφορέα Εμπορείου – Περίσσης Ν. Θήρας», ΕΜΠ, Αθήνα 2007.
- Richard G. Allen & Luis S. Pereira & Dirk Raes & Martin Smith, FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56, 2000.
- Μαντόγλου Α., Κουράκος Γ., «Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων», Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006: Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα, Τεύχος 4β, Αθήνα, 2005.
- Μαντόγλου Α., «Προσομοίωση και διαχείριση παράκτιων υδροφορέων» Διαχείριση φυσικών καταστροφών, Ημερίδα, Δεκέμβριος 2007.
- Πασά Καλλιόπη-Σοφία, Βιομηχανικά Ορυκτά για Περιβαλλοντικές Χρήσεις: Μελέτη Φυσικών, Χημικών, και Ορυκτολογικών Ιδιοτήτων του Περλίτη της Νήσου Μήλου, Διπλωματική Εργασία Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών, (2007).

Watermark Computing, Groundwater Data Utilities, Part A: Overview, 1999a
Watermark Computing, Groundwater Data Utilities, Part B: Program Descriptions, 1999b

Carrera Jesus & Neuman P. Shlomo, Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 1. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 2, Pages 199 – 210, February 1986a.

Carrera Jesus & Neuman P. Shlomo, Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 2. Uniqueness, Stability and Solution Algorithms, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 2, Pages 211 – 227, February 1986b.

Gelhar W. Lynn & Axness L. Carl, Three – Dimensional Stochastic Analysis of Macrodistribution in Aquifers, *Water Resources Research*, Vol. 19, No. 1, Pages 161 – 180, February 1983.

Παπουτσής Σ., Διπλωματική Εργασία, «Μοντέλα Προσομοίωσης Κίνησης Νερού και Ρύπων στους Υπόγειους Υδροφορείς και Ρύθμιση Παραμέτρων», ΕΜΠ, Αθήνα 2001.

Golden Software Inc, Surfer User's Guide – Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, Colorado, 2002.

B. Booth & A. Mitchell, Getting Started with ArcGis, ESRI, USA, 2001.

Διαδικτυακές Πηγές

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Εκμετάλλευση & Διαχείριση Υπογείου Νερού, Σούλιος Γ., www.geo.auth.gr/763/

Agricultural Bureau of South Australia, «*Managing Soil Moisture*», Module 5, Better Soils, <http://www.agbureau.com.au/home.shtml>,
<http://www.bettersoils.com.au/index.htm>

<http://ga.water.usgs.gov/edu/earthgwaquifer.html>

<http://oikoen.gr/selides-groundwater.htm>

<http://www.milos.gr>

Stormwater Management Planning and Design Manual 2003:
http://www.ene.gov.on.ca/envision/gp/4329e_3.htm

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Υδρογεωλογικές Μελέτες Λεκανών και Γεωλογικές Μελέτες Τεχνικών Έργων, Δημόπουλος Γ., <http://www.geo.auth.gr/881/>

ΤΕΕ, Τεύχος 2039: Η Υφαλμύρωση των Υπόγειων Υδάτων, 15 Φεβρουαρίου 1999 <http://www.tee.gr/online/epikaira/1999/2039/pg014.shtml>

Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Μεταλλείων, Ε.Μ.Π., Κυρούσης Ι., (http://www.metal.ntua.gr/index.pl/7d3d07d8_gr)

<http://www.itia.ntua.gr/el/>

<http://www.merck.com/mmhe/sec12/ch158/ch158a.html>

<http://openarchives.gr/view/274993>

http://www.itia.ntua.gr/getfile/281/1/documents/er1_5-4.pdf

<http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/115/>

<http://el.wikipedia.org/wiki/>

<http://www.milos-island.gr/geography/geography.gr.html>

<http://www.milos-island.gr/geography/milosmap.gr.html>

<http://www.milos-island.gr/geology/geology.gr.html>

<http://maps.google.com/maps?>