



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – Μ.Δ.Ε. «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ &
ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ».

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Καρστικοί υδροφορείς- Αναχαίτιση του φαινομένου της
υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης
προσομοιώνοντας τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού».**

Κουτάντου Παρασκευή

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

Καρατζάς Π. Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καλογεράκης Νικόλαος

Γκέκας Βασίλειος

Χανιά

Ιούνιος 2006

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Καρατζά Π. Γεώργιο, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και ιδιαίτερα την κυρία Παπαδοπούλου Μαρία για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κύριο Καλογεράκη Νικόλαο και Γκέκα Βασίλειο.

Κουτάντου Βούλα

Περίληψη

«Καρστικοί υδροφορείς- Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης προσομοιώνοντας τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού».

Η παρούσα διπλωματική εργασία προσεγγίζει ένα σημαντικό πρόβλημα των παράκτιων υδροφορέων την υφαλμύρωση. Το φαινόμενο αυτό έχει πολύ αρνητικά αποτελέσματα τόσο για τον υδροφορέα όσο και για τις ανθρώπινες δραστηριότητες όπως τη γεωργία και τον τουρισμό. Αρχικά εξετάζονται τα αίτια και οι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος, ανάλογα με το είδος του υδροφορέα στον οποίο εμφανίζεται. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους καρστικούς υδροφορείς για τους οποίους δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τη συμπεριφορά τους υπό υφάλμυρη κατάσταση. Επειδή ένας από τους πιο δραστικούς τρόπους αντιμετώπισης του φαινομένου είναι ο τεχνητός εμπλουτισμός, αναλύονται αφενός οι τρόποι εφαρμογής του και αφετέρου οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να εφαρμοστεί. Για άλλη μία φορά ο τεχνητός εμπλουτισμός των καρστικών υδροφορέων αποτελεί ξεχωριστό κεφάλαιο όπου αναλύεται η συμπεριφορά τους κατά το εμπλουτισμό τους.

Πέρα από τη βιβλιογραφική αναφορά, η παρούσα εργασία εξέτασε και ένα υπαρκτό πρόβλημα, την υφαλμύρωση του καρστικού υδροφορέα της περιοχής της Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης. Αρχικά εντοπίστηκε η ζώνη υφαλμύρωσης της περιοχής και στη συνέχεια διερευνήθηκαν πιθανές λύσεις του προβλήματος. Σε πρώτο στάδιο διακόπηκε η λειτουργία κάποιων γεωτρήσεων ή μειώθηκε ο ρυθμός άντλησής τους, ενώ στη συνέχεια συνδυάστηκαν οι επιλογές αυτές και με τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού. Αφού εντοπίστηκε η καλύτερη δυνατή επιλογή, η λύση βελτιώθηκε ακόμα περισσότερο με την αναζήτηση της βέλτιστης θέσης των πηγαδιών εμπλουτισμού. Η όλη διαδικασία έγινε με τη μέθοδο της προσομοίωσης και τη χρήση του λογισμικού προγράμματος Argus One.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.1	Το αντικείμενο της Υπόγειας Υδραυλικής.....	1
1.2	Βασικές έννοιες της Υπόγειας Υδραυλικής.....	1
1.2.1	Ταξινόμηση του υπόγειου ύδατος.....	1
1.2.1.1	Κορεσμένη ζώνη.....	1
1.2.1.2	Μη κορεσμένη ζώνη.....	2
1.2.2	Υποζώνες.....	2
1.2.3	Είδη υδάτων.....	2
1.3	Υδροφορέας.....	2
1.4	Χαρακτηριστικά Υδροφορέων.....	3
1.5	Το πείραμα του Darcy –Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	4
1.5.1	Ταχύτητα Διήθησης.....	6
1.5.2	Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	6
1.5.3	Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας (Transmissivity)-Τ.....	7
1.6	Ομοιογένεια και Ανισοτροπία.....	7
1.7	Ανισοτροπία και Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	8
1.8	Η εξίσωση της συνέχειας.....	9
1.9	Μαθηματικό Ομοίωμα.....	10
1.10	Τύποι ορίων και Οριακές συνθήκες.....	11
1.11	Επίλυση του μαθηματικού ομοιώματος με τη μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης.....	12
1.11.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.....	12
1.11.2	Κατασκευή ορθογωνικού δικτύου.....	14
2.1	Γενικά το πρόβλημα των παράκτιων υδροφορέων.....	16
2.2	Χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής σε παράκτιους υδροφορείς.....	19
2.2.1	Εισαγωγή.....	19
2.2.2	Εξίσωση της υπόγειας ροής.....	19
2.3	Η πυκνότητα του νερού.....	20
2.4	Η αρχή των Badon Ghyben-Herzberg.....	22
2.4.1	Ελεύθερος υδροφορέας-Μονοδιάστατη ροή.....	23
2.4.2	Περιορισμένος υδροφορέας –Μονοδιάστατη ροή.....	26
2.5	Προβλήματα του γλυκού νερού που προμηθεύει τις παράκτιες ζώνες.....	27
2.5.1	Η αύξηση της διεπιφάνειας του φρέσκου-αλμυρού νερού.....	28
2.5.2	Επιδράσεις της αύξηση του σχετικού επιπέδου θαλάσσης.....	30
2.6	Μέτρα Αντιμετώπισης Υφαλμύρωσης.....	32
2.7	Διαχείριση παρακτίων υδάτων.....	36
3.1	Γενικά – ορισμός.....	38
3.2	Σκοπός του τεχνητού εμπλουτισμού.....	39
3.3	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα.....	40
3.4	Κατηγορίες και μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού.....	41
3.4.1	Άμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός.....	41
3.4.1.1	Μέθοδος λεκάνης (spreading basin)-επιφανειακή κατάκλιση.....	42
3.4.1.2	Μέθοδος της πλημμύρας επιφανειών.....	43
3.4.1.3	Μέθοδος φυσικών ανοιγμάτων (pit and shaft).....	44
3.4.1.4	Μέθοδος των αυλακιών (ditch).....	44
3.4.1.5	Μέθοδος με φρεάτια εμπλουτισμού (με έγχυση).....	45
3.4.2	Έμμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός.....	48
3.4.2.1	Μέθοδος διευθέτησης υδρορεύματος.....	48
3.4.2.2	Μέθοδος των Συνθετικών (Ενωτικών Φρεατίων).....	49
3.4.2.3	Μέθοδος των Πηγαδιών για εμπλουτισμό.....	49
3.5	Γενικές προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου.....	51
3.6	Επιπτώσεις τεχνητού εμπλουτισμού.....	53

4.1	Γενικά για τους καρστικούς υδροφορείς.....	54
4.1.1	Η προέλευση των καρστικών σχηματισμών.....	54
4.1.2	Η περιοχή εκτόνωσης.....	56
4.2	Χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων.....	56
4.2.1	Συνέπειες των καρστικών χαρακτηριστικών.....	60
4.3	Προσέγγιση του καρστικού συστήματος.....	61
4.3.1	Μεθοδολογική προσέγγιση.....	61
4.3.2	Προσέγγιση της δομής του συστήματος.....	62
4.3.3	Προσέγγιση της λειτουργίας του συστήματος.....	62
4.4	Μεθοδολογία της ανάλυσης.....	63
4.5	Μοντελοποίηση του καρστικού συστήματος.....	64
4.6	Μέθοδοι εκμετάλλευσης και προστασίας των καρστικών υδροφορέων.....	65
4.7	Ιδιαίτερα σημεία στη δομή και λειτουργία των καρστικών υδροφορέων.....	66
4.7.1	Προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων.....	66
4.7.2	Πρακτικά προβλήματα των καρστικών υδροφορέων.....	68
4.8	Τεχνητός εμπλουτισμός σε καρστικά εδάφη.....	69
4.8.1	Νεοτεκτονική Δομή.....	70
4.8.2	Βασικά Βήματα του Καρστικού Εμπλουτισμού.....	72
4.9	Μοντέλα προσομοίωσης της ροής των καρστικών υδροφορέων & παραδείγματα εφαρμογής τους	73
4.9.1	Το παράδειγμα του υδροφορέα Edward στο Τέξας.....	75
4.9.2	Μεθοδολογία του πειράματος- Περιγραφή του μοντέλου.....	76
4.9.3	Αποτελέσματα.....	80
4.9.4	Γενικά συμπεράσματα.....	84
4.10	Το παράδειγμα του υδροφορέα Crestatx στην Ισπανία.....	84
4.10.1	Εισαγωγή.....	84
4.10.2	Περιγραφή του υδροφορέα.....	85
4.10.3	Οριακές συνθήκες.....	86
4.10.4	Καθεστώς μόνιμης προσομοίωσης.....	86
4.10.5	Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	87
4.10.6	Υποθέσεις της προσομοίωσης.....	88
4.10.7	Αποτελέσματα.....	89
4.11.	Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στην Ελλάδα –παράδειγμα.....	92
4.11.1	Γενικά.....	92
4.11.2	Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	92
4.11.3	Υδρογεωλογία της κοιλάδας του Άργους.....	94
4.11.4	Νέο πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού.....	94
4.11.5	Αποτελέσματα.....	95
4.11.5.1	Ποιότητα νερού.....	95
4.11.6	Φαινόμενα υφαλμύρωσης.....	95
4.11.6.2	Φαινόμενα ανανέωσης υδάτων.....	97

5.1	Το μοντέλο προσομοίωσης.....	99
5.1.1	Οριακές συνθήκες μοντέλου.....	99
5.2	Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	100
5.2.1	Κλιματολογικά στοιχεία	100
5.2.2	Χλωρίδα και πανίδα.....	101
5.2.3	Γεωλογία της περιοχής	102
5.2.4	Οι υδρογεωλογικές ενότητες	103
5.3	Κατάστρωση μοντέλου- περιοχή μελέτης.....	104
5.3.1	Χάρτες	105
5.3.2	Οριακές συνθήκες.....	108
5.3.4	Υψόμετρο – Αρχικές συνθήκες.....	109
5.3.5	Βροχόπτωση	109
5.3.6	Βαθμονόμηση του μοντέλου	109
5.4	Υπολογισμός της αρχικής κατάστασης του υδροφορέα.	111
5.5	Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος χωρίς εμπλουτισμό του υδροφορέα.	115
5.6	Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος με εμπλουτισμό του υδροφορέα.	121
5.7	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ1: Γενικά για την Υπόγεια Υδραυλική

1.1 Το αντικείμενο της Υπόγειας Υδραυλικής

Η Υπόγεια Υδραυλική μελετά τους νόμους που διέπουν την κίνηση των υγρών, αερίων ή μιγμάτων υγρών-αερίων μέσα από πορώδη υλικά. Η θεωρία αυτών των ροών δίνει τα απαραίτητα μέσα για την επίλυση πολλών προβλημάτων που αναφέρονται σε διάφορα πεδία εφαρμογών όπως:

- **Φράγματα:** Χωμάτινα Φράγματα ή φράγματα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τη μελέτη της ευστάθειάς τους καθώς και για τον υπολογισμό της παροχής που διηθείται κάτω από τα φράγματα είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αναπτυσσόμενων πιέσεων και η κατανομή των ταχυτήτων.
- **Υδρεύσεις :** Υδρεύσεις πόλεων, χωριών και οικισμών από υπόγεια νερά. Η μελέτη τους βασίζεται στον υπολογισμό υπόγειων ροών ενός συνόλου γεωτρήσεων από υδροφορείς υπό πίεση ή υδροφορείς με ελεύθερη επιφάνεια.
- **Αποστραγγιστικά έργα:** Αποστραγγιστικά έργα που έχουν σκοπό την ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και την αξιοποίηση γεωργικών εκτάσεων με υψηλό υπόγειο υδάτινο ορίζοντα
- **Εξόρυξη πετρελαίου:** Πρωτογενής και δευτερογενής εξόρυξη κοιτασμάτων πετρελαίου όπου εκτός από τη μελέτη της υπόγειας ροής του πετρελαίου, είναι επίσης απαραίτητη η μελέτη του φαινομένου της αστάθειας της διεπιφάνειας διφασικών ροών. [1]

1.2 Βασικές έννοιες της Υπόγειας Υδραυλικής

1.2.1 Ταξινόμηση του υπόγειου ύδατος

Το υπόγειο νερό ταξινομείται στις εξής κατηγορίες:

1. Κορεσμένη ζώνη (Saturated zone)-Υπόγεια Ύδατα
2. Μη κορεσμένη ζώνη (Unsaturated zone)—Υπόγεια Ύδατα εκτός της ζώνης αερισμού.

1.2.1.1 Κορεσμένη ζώνη

1. Όλοι οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό και κάτω από υδροστατική πίεση .
2. Η άνω επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης είναι ο υδροφόρος ορίζοντας όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

1.2.1.2 Μη κορεσμένη ζώνη

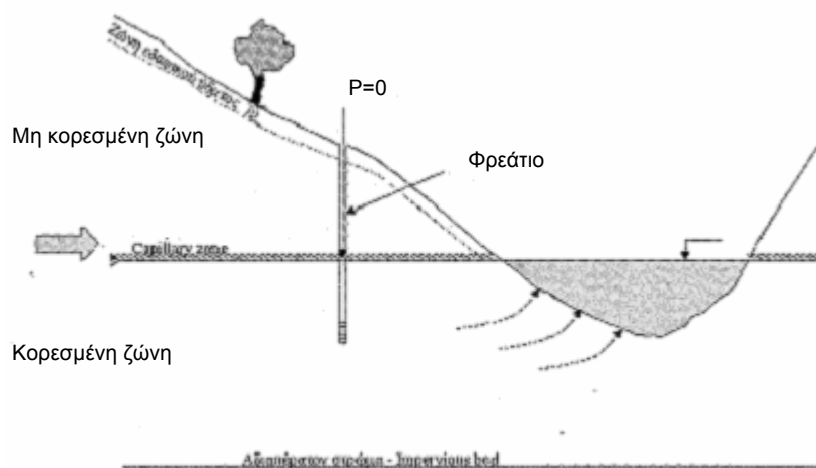
Μη κορεσμένη ζώνη χαρακτηρίζεται η ζώνη του υπεδάφους εντός της οποίας οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό ταυτόχρονα εκτός στην περίπτωση της πλημμύρας κατά την οποία οι πόροι γεμίζουν προσωρινά μόνο με νερό.

1.2.2 Υποζώνες

1. Ζώνη του εδαφικού ύδατος (Soil Water Zone)- επεκτείνεται από την εδαφική επιφάνεια μέχρι το τέλος της ζώνης του ριζικού συστήματος.
2. Ζώνη τριχοειδών φαινομένων (Capillary zone) επεκτείνεται από τον υδροφόρο ορίζοντα μέχρι το όριο που παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα.

1.2.3 Είδη υδάτων

1. Υμενοειδές ύδωρ: μη κινούμενο νερό που συγκρατείται από τάσεις τριχοειδών φαινομένων και υδροσκοπικές δυνάμεις.
2. Ύδωρ βαρύτητας-επιπλέον νερό το οποίο κινείται υπό την επίδραση της βαρύτητας .[2]



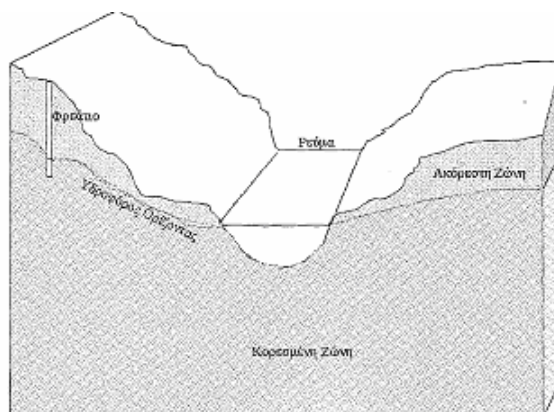
Σχήμα1.1 Βασικές έννοιες της Υπόγειας Υδραυλικής. Πηγή[2]

1.3 Υδροφορέας

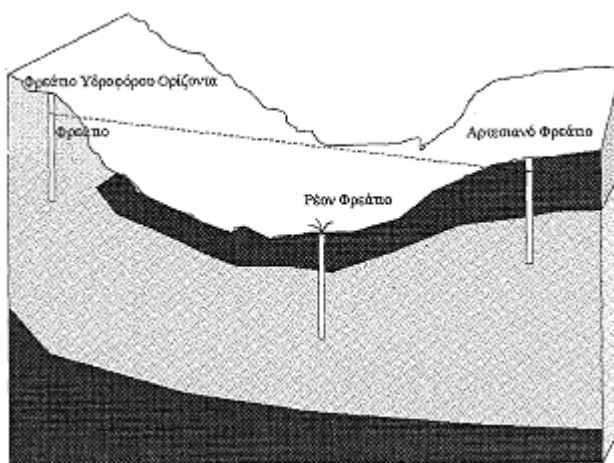
Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό. Οι περισσότεροι υδροφορείς έχουν μεγάλη έκταση και ταξινομούνται σε *ελεύθερους* και *περιορισμένους*, με βάση τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Έτσι:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

- Ελεύθερος υδροφόρας: Η ανώτατη επιφάνεια του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. (Σχήμα 1.2)
- Περιορισμένος ή Αρτεσιανός υδροφόρας: Περιέχει νερό υπό πίεση, η οποία είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, ενώ στην άνω και κάτω επιφάνειά του περιορίζεται από αδιαπέρατα στρώματα. (Σχήμα 1.3)



Σχήμα1.2 Ελεύθερος Υδροφόρας. Πηγή[2]



Σχήμα1.3 Περιορισμένος Υδροφόρας. Πηγή[2]

1.4 Χαρακτηριστικά Υδροφορέων

1. **Πορώδες (porosity):**Πρόκειται για το ποσοστό του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά και ορίζεται ως :

$$n = \frac{V_v}{V_o},$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

όπου V_v : ο όγκος των κενών

V_0 συνολικός όγκος εδάφους.

Χαρακτηριστικές τιμές πορώδους είναι οι εξής :

- Αμμώδη εδάφη : 0,45-0,55
- Πηλός Άργιλος : 0,40-0,60
- Ασβεστολιθικά : 0,20

Το πορώδες επηρεάζεται από τα εξής χαρακτηριστικά του δείγματος : την κοκκομετρική του σύνθεση, τη διάταξη και το σχήμα των κόκκων.

2. Ενεργό πορώδες (effective porosity) : Πρόκειται για το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για τη ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων δεν επικοινωνούν μεταξύ τους. Έτσι έχουμε [2]:

$$n_e = \frac{V_y}{V_o} \text{ όπου}$$

V_y : ο όγκος του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων

V_0 συνολικός όγκος εδάφους

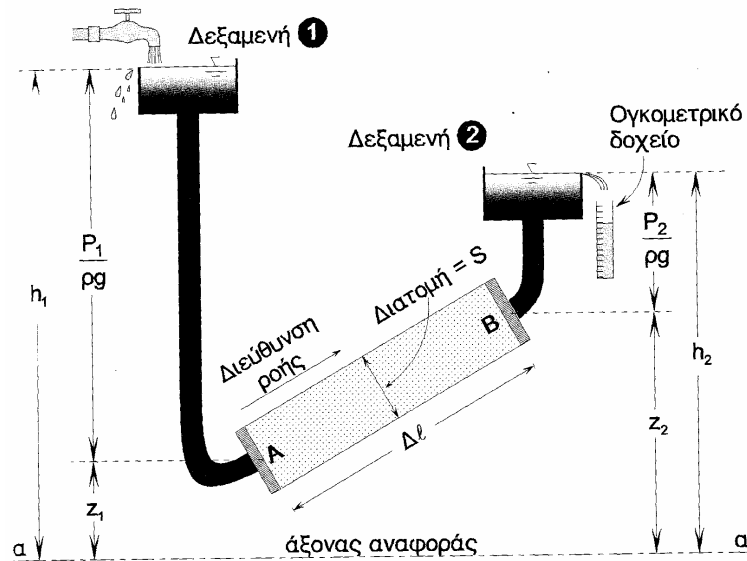
Διαφορά μεταξύ του πορώδους και του ενεργού πορώδους παρουσιάζουν τα αργιλώδη εδάφη ενώ τα ιζηματογενή δεν έχουν τέτοιες διαφορές.

3. Ειδική συγκράτηση: Πρόκειται για τη διαφορά μεταξύ του πορώδους και του ενεργού πορώδους. [2]

$$S_r = n - n_e$$

1.5 Το πείραμα του Darcy –Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η μακροσκοπική εξέταση των προβλημάτων της Υπόγειας Υδραυλικής επιτυγχάνεται με τον εμπειρικό νόμο του Darcy που διατυπώθηκε το 1856 και αποτελεί θεμελιώδη νόμο κίνησης της Υπόγειας Υδραυλικής. Για τη διατύπωση αυτού του νόμου ο Darcy έκανε ένα σύνολο πειραμάτων με τη συσκευή που φαίνεται παρακάτω,



Σχήμα 1.4 Το πείραμα του Darcy Πηγή[1]

Ανάμεσα στις δύο δεξαμενές υπήρχε ένας σωλήνας με εμβαδόν διατομής S γεμάτος με πορώδες υλικό κορεσμένο με νερό. Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς που υπήρχε στις στάθμες του νερού στις δύο δεξαμενές το νερό κινιόταν κατά τη διεύθυνση του σχήματος. Ένα ογκομετρικό δοχείο μετά τον εκχειλιστή της δεύτερης δεξαμενής χρησίμευε για τη μέτρηση του όγκου του νερού που περνούσε στη μονάδα του χρόνου μέσα από το πορώδες υλικό. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται παροχή διήθησης και συμβολίζεται με Q . [1]

Ο Darcy εκτελώντας πολλά πειράματα διαπίστωσε ότι η παροχή Q είναι ανάλογη της υψομετρικής διαφοράς $h_1 - h_2$ και της διατομής S αντιστρόφως ανάλογη του μήκους Δl του πορώδους υλικού. Μαθηματικά ο νόμος διατυπώθηκε ως εξής [1]:

$$Q = KS \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} \quad (1)$$

ή με την πιο διαδεδομένη του μορφή:

$$\frac{Q}{A} = K \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} \quad (2)$$

όπου:

- Q : η παροχή σε (L^3/T)
- A η επιφάνεια σε L^2
- K η υδραυλική αγωγιμότητα σε (L/T)
- Δh η απώλεια φορτίου
- L το μήκος της στήλης σε (L)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

Μάλιστα η έκφραση $\Delta h/L$ ονομάζεται υδραυλική κλίση.

1.5.1 Ταχύτητα Διήθησης

Στο νόμο του Darcy ο λόγος Q/A είναι η παροχή που περνά από τη μονάδα επιφανείας της διατομής και παριστάνει μια υποθετική ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα Darcy δηλαδή [1]:

$$q_p = \frac{Q}{A} = K \frac{h_1 - h_2}{\Delta l} = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3)$$

όπου:

$\Delta h = h_2 - h_1$ χωρίς όμως στη μορφή αυτή να λαμβάνεται υπόψη το στερεό υλικό και οι πόροι. Στην πραγματικότητα όμως σε ένα πορώδες υλικό, η ροή περιορίζεται μόνο εντός των πόρων οπότε η πραγματική ταχύτητα που είναι γνωστή ως ταχύτητα διήθησης είναι [1]:

$$q_n = \frac{Q}{nA} = K \frac{h_1 - h_2}{n\Delta l} = -K \frac{\Delta h}{n\Delta l} \quad (4)$$

1.5.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα που υπεισέρχεται στο νόμο του Darcy αποδείχθηκε πειραματικά ότι δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τα χαρακτηριστικά του ρευστού που κινείται στο πορώδες υλικό. Συγκεκριμένα αποδείχθηκε ότι αυτή η παράμετρος είναι αντιστρόφως ανάλογη του κινηματικού ιξώδους ν του ρευστού. Έτσι μπορεί να αναλυθεί σε μεγέθη που άλλα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του πορώδους υλικού και άλλα από τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Η σχέση που εκφράζει αυτήν την εξάρτηση είναι [1]:

$$K = g \frac{k}{\nu} \quad \text{όπου}$$

- k το μέγεθος που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους υλικού, ονομάζεται συντελεστής γεωμετρικής διαπερατότητας και έχει διαστάσεις επιφάνειας.
- ν κινηματικό ιξώδες υγρού

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή σχετικής διαπερατότητας

ΕΛΑΦΟΣ	K(m/sec)
Άργιλος	$<10^{-9}$
Αμμώδης Άργιλος	$10^{-9}-10^{-8}$
Ανθρακούχος Άργιλος	$10^{-9}-10^{-7}$
Ιλύς	$10^{-8}-10^{-7}$
Εξαιρετικά λεπτόκοκκη άμμος	$10^{-6}-10^{-5}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$10^{-5}-10^{-4}$
Χοντρόκοκκη άμμος	$10^{-4}-10^{-3}$
Άμμος με χαλίκι	$10^{-3}-10^{-2}$
Λεπτόκοκκα χαλίκια	$>10^{-2}$

Πίνακας 1.1:Εδάφη και Συντελεστές Διαπερατότητας Πηγή[1]

1.5.3 Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας (Transmissivity)-T

Ως Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο, νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση. Μαθηματικά εκφράζεται ως [2]:

$$T = Kb$$

όπου:

- b το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα
- K η υδραυλική αγωγιμότητα σε (L/T)

1.6 Ομοιογένεια και Ανισοτροπία

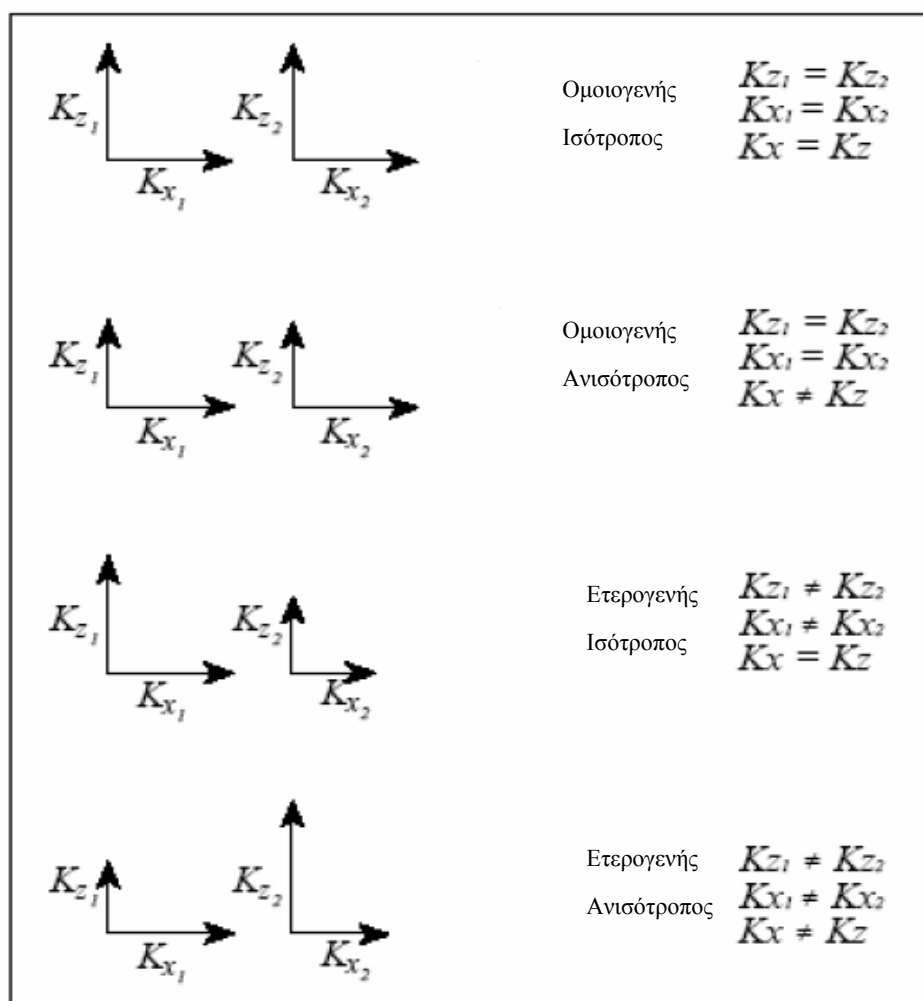
Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα δεν παραμένει σταθερή αντιθέτως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Μάλιστα είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και στο ίδιο σημείο ως προς την κατεύθυνση. Έτσι στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για την ιδιότητα της ομοιογένειας ή της ετερογένειας και στη δεύτερη για την περίπτωση της ισοτροπίας ή της ανισοτροπίας. Έτσι έχουμε την εξής ταξινόμηση[2]:

1. Ομοιογενής χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
2. Ετερογενής χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες μεταβάλλονται χωρικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

3. Ισότροπος είναι ο υδροφορέας ο οποίος σε οποιοδήποτε σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
4. Ανισότροπος χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας που έχει διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.

Παρακάτω βλέπουμε σχηματικά αυτές τις έννοιες.

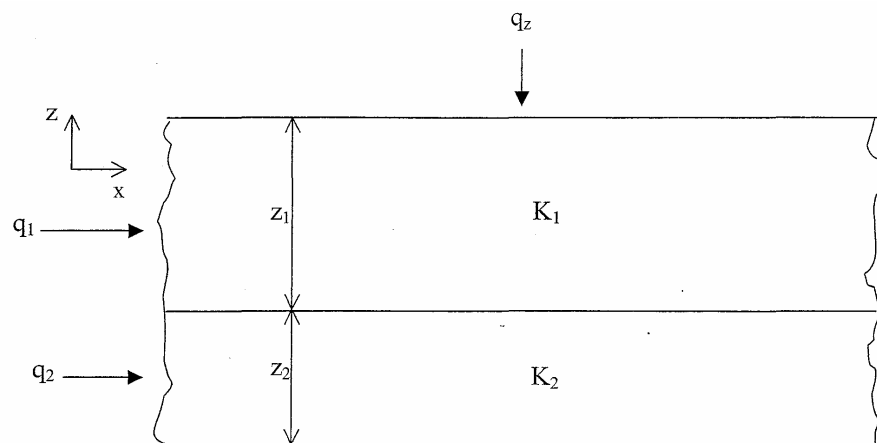


Σχήμα1.5 Ομοιογένεια και ισοτροπία στους Υδροφορείς.

Πηγή[Freeze and Cherry,1979]

1.7 Ανισοτροπία και Υδραυλική Αγωγιμότητα

Ένας υδροφορέας μπορεί να αποτελείται από διαφορετικά στρώματα με διαφορετικό πάχος και υδραυλική αγωγιμότητα το κάθε ένα. Θεωρώντας την ιδεατή τομή του υδροφορέα του παρακάτω σχήματος, με πάχη και υδραυλικές αγωγιμότητες στρωμάτων, z_1, z_2 και K_1, K_2 αντίστοιχα, για την εύρεση του K_x, K_z προκύπτουν τα εξής[2]:



Σχήμα1.6 Διαγραμματική αναπαράσταση δύο ισότροπων οριζοντίων στρωμάτων με διαφορετικό πάχος και υδραυλική αγωγιμότητα K . Πηγή[2]

➤
$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2}{z_1 + z_2}$$

➤
$$K_z = \frac{z_1 + z_2}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2}}$$

και στις δύο περιπτώσεις οι όροι μπορούν να γενικευθούν οπότε προκύπτουν οι τύποι αντίστοιχα:

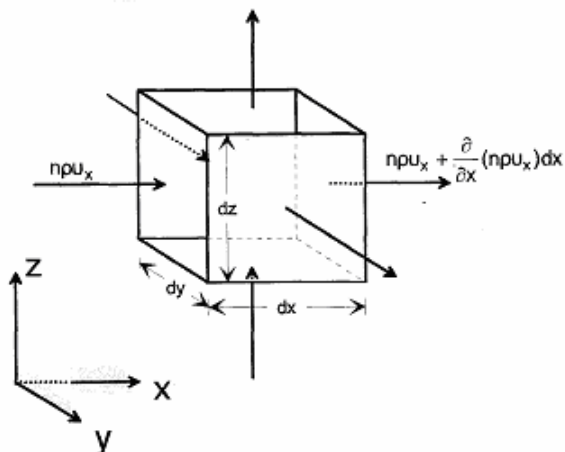
➤
$$K_x = \frac{K_1 z_1 + K_2 z_2 + \dots + K_n z_n}{z_1 + z_2 + \dots + z_n} \text{ για περισσότερα του ενός στρώματα}$$

➤
$$K_z = \frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{\frac{z_1}{K_1} + \frac{z_2}{K_2} + \dots + \frac{z_n}{K_n}} \text{ για περισσότερα του ενός στρώματα.}$$

1.8 Η εξίσωση της συνέχειας

Ο νόμος του Darcy αποτελεί το Θεμελιώδη νόμο της Υπόγειας Υδραυλικής. Με την εφαρμογή όμως μόνο του νόμου του Darcy δεν είναι δυνατόν να λυθούν τα προβλήματα της Υπόγειας Υδραυλικής χωρίς μία επιπλέον εξίσωση. Η εξίσωση αυτή προκύπτει από την αρχή διατήρησης της μάζας, δηλαδή την εξίσωση της συνέχειας. [1]

Για τη μαθηματική εξίσωση της συνέχειας απομονώνεται ένας στοιχειώδης όγκος σε σχήμα παραλληλεπίπεδου με διαστάσεις dx, dy, dz όπως στο παρακάτω σχήμα και υπολογίζεται η συνθήκη εκείνη, ώστε η ποσότητα του ρευστού που βρίσκεται μέσα στο στοιχειώδες όγκο να παραμένει σταθερή.



Σχήμα1.7 Στοιχειώδης όγκος με διαστάσεις dx,dy,dz Πηγή[1]

Από το σχήμα φαίνεται η ποσότητα του ρευστού που εισέρχεται στη μονάδα του χρόνου κατά x,y,z. Έτσι για παράδειγμα κατά x, στη μονάδα του χρόνου έχουμε διαφορά παροχής την εξής ποσότητα[1] :

$$\{n\rho v_x - [n\rho v_x + \frac{\partial(n\rho v_x)}{\partial x} dx]\} dydz = -\frac{\partial(n\rho v_x)}{\partial x} dx dydz \quad (5)$$

ομοίως κατά y,z έχουμε:

$$\{n\rho v_y - [n\rho v_y + \frac{\partial(n\rho v_y)}{\partial y} dy]\} dx dz = -\frac{\partial(n\rho v_y)}{\partial y} dx dydz \quad (6)$$

$$\{n\rho v_z - [n\rho v_z + \frac{\partial(n\rho v_z)}{\partial z} dz]\} dy dx = -\frac{\partial(n\rho v_z)}{\partial z} dx dydz \quad (7)$$

προσθέτοντας τις τρεις αυτές εξισώσεις και διαιρώντας κατά dx dy dz και θεωρώντας το πορώδες του υλικού αμετάβλητο λαμβάνουμε την εξίσωση της συνέχειας :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

1.9 Μαθηματικό Ομοίωμα

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy οι συνιστώσες της ταχύτητας διήθησης είναι [1]:

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

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \text{ και}$$

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

όπου Φ η συνάρτηση του δυναμικού δηλ $\Phi = -Kh$.

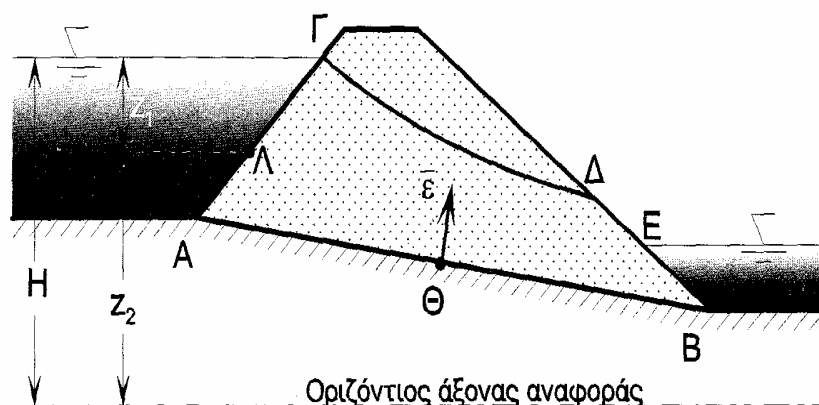
Αν αντικαταστήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις στη συνάρτηση της συνέχειας λαμβάνουμε[1]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

γνωστή ως συνάρτηση Laplace. Η συνάρτηση αυτή αποτελεί θεμελιώδη εξίσωση της Υπόγειας Υδραυλικής από την οποία μπορεί να υπολογιστεί το Φ και στη συνέχεια οποιοδήποτε υδραυλικό μέγεθος. Συνήθως η επίλυσή της γίνεται με τη βοήθεια οριακών συνθηκών του πεδίου ροής[1].

1.10 Τύποι ορίων και Οριακές συνθήκες

Τα πιο συνηθισμένα όρια των επίπεδων ροών είναι αυτά που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα1.8 Οριακές συνθήκες Πηγή[1]

1. **Όριο Δεξαμενής** : Είναι η γραμμή επαφής του ελεύθερου ρευστού με το πορώδες υλικό. Τέτοιες γραμμές αποτελούν οι ΑΓ και η ΕΒ του σχήματος . Η συνάρτηση του δυναμικού σε ένα τυχαίο σημείο ενός τέτοιου ορίου είναι

$$\Phi = -KH$$

Κάθε σημείο πάνω σε αυτό το όριο έχει σταθερό δυναμικό. Ουσιαστικά τα όρια δεξαμενής αποτελούν ισοδυναμικές γραμμές [1].

2. **Αδιαπέρατο όριο** : Είναι η γραμμή επαφής του πορώδους υλικού με αδιαπέρατη στρώση. Τέτοιο όριο αποτελεί η γραμμή ΑΒ του σχήματος. Οι ισοδυναμικές γραμμές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

τέμνουν κάθετα ένα τέτοιο όριο και συνεπώς $\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon} = 0$ όπου ε είναι το μοναδιαίο κάθετο

διάνυσμα προς το όριο στο τυχαίο σημείο το Θ . [1]

3. **Ελεύθερη επιφάνεια:** Είναι η γραμμή επαφής του πορώδους υλικού του κορεσμένου με ρευστό, με το πορώδες υλικό το κορεσμένο με ατμοσφαιρικό αέρα. Η καμπύλη ΓΔ αποτελεί την ελεύθερη επιφάνεια της ροής. Υποτίθεται ότι κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας η πίεση παραμένει σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Το δυναμικό σε τυχαίο σημείο της ελεύθερης επιφάνειας προκύπτει ότι είναι :

$$\Phi + Kz = -Kra/\rho g = \text{σταθερό}$$

Μάλιστα αν η ατμοσφαιρική πίεση θεωρηθεί ως πίεσης αναφοράς δηλ $p_a = 0$ τότε

$$\Phi + Kz = 0$$

Έτσι όλα τα σημεία της ελεύθερης επιφάνειας ικανοποιούν τη συνθήκη αυτή αλλά δεν ισχύει το αντίστροφο, όποιο δηλαδή σημείο ικανοποιεί τη συνθήκη να είναι και σημείο της ελεύθερης επιφάνειας. [1]

4. **Επιφάνεια διήθησης:** Είναι η γραμμή επαφής του πορώδους υλικού του κορεσμένου με ρευστό με τον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτή η γραμμή στο παραπάνω σήμα είναι η ΔΕ. Κατά μήκος της επιφάνειας διήθησης η πίεση παραμένει σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Οπότε η οριακή συνθήκη είναι ίδια με την προηγούμενη περίπτωση δηλαδή [1]:

$$\Phi + Kz = 0$$

1.11 Επίλυση του μαθηματικού ομοιώματος με τη μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης

Ένας τρόπος επίλυσης της εξίσωσης Laplace είναι με τη μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης και συγκεκριμένα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, που μπορεί να δώσει αριθμητικά αποτελέσματα ανεξάρτητα από τη μορφή του πεδίου ροής. [1]

1.11.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Αρχές της μεθόδου

Μία συνάρτηση $\Phi(x,y)$ μονοσήμαντη και πεπερασμένη στην περιοχή R αναπτύσσεται σε σειρά Taylor μέσα στην περιοχή και κοντά στο σημείο με συντεταγμένες (x,y) σύμφωνα με τις σχέσεις [1]:

$$\Phi(x+h, y) = \Phi(x, y) + h \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{h^3}{6} \frac{\partial^3 \Phi(x, y)}{\partial x^3} + \dots \quad (10)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

$$\Phi(x-h, y) = \Phi(x, y) - h \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} + \frac{h^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial x^2} - \frac{h^3}{6} \frac{\partial^3 \Phi(x, y)}{\partial x^3} + \dots (11)$$

Προσθέτοντας αυτές τις δύο εξισώσεις έχουμε:

$$\Phi(x+h, y) + \Phi(x-h, y) = 2\Phi(x, y) + \frac{h^2}{1} \frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial x^2} + 0(h^4) \dots (12)$$

Το τελευταίο σύμβολο σημαίνει ότι παραλείπονται οι όροι που περιέχουν το h σε δύναμη μεγαλύτερη ίση από την τέταρτη.

Υπολογίζουμε τη δεύτερη μερική παράγωγο της εξ. 12 ως προς x έχουμε:

$$\frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial x^2} = \frac{1}{h^2} [\Phi(x+h, y) - 2\Phi(x, y) + \Phi(x-h, y)] + 0(h^2) (13)$$

ομοίως έχουμε τη δεύτερη παράγωγο ως προς y .

$$\frac{\partial^2 \Phi(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{k^2} [\Phi(x, y+k) - 2\Phi(x, y) + \Phi(x, y-k)] + 0(k^2) (14)$$

Οι σχέσεις αυτές είναι προσεγγιστικές και η προσέγγιση είναι τόσο καλύτερη όσο μικρότερες είναι οι τιμές του h και του k . [1]

Στη συνέχεια αν αφαιρέσουμε την εξ. 12 από την 11 μπορούμε να υπολογίσουμε την πρώτη μερική παράγωγο της Φ ως προς x στη θέση x, y .

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{2h} [\Phi(x+h, y) - \Phi(x-h, y)] + 0(h^2) (15) \text{ ομοίως κατά } y$$

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{2k} [\Phi(x, y+k) - \Phi(x, y-k)] + 0(k^2) (16)$$

Οι δύο αυτοί τύποι είναι γνωστοί ως τύποι κεντρικής διαφοράς.

Η πρώτη μερική παράγωγος της Φ ως προς x στη θέση x, y μπορεί επίσης να υπολογισθεί από την εξ. 11 παραλείποντας του όρους που περιέχουν το h σε δύναμη ίση και μεγαλύτερη της δεύτερης. Έτσι έχουμε [1]:

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{2h} [\Phi(x+h, y) - \Phi(x, y)] + 0(h) (17)$$

ομοίως κατά y έχουμε:

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{2k} [\Phi(x, y+k) - \Phi(x, y)] + 0(h) (18)$$

Οι δύο τελευταίοι τύποι ονομάζονται τύποι της εμπροσθοδρομικής διαφοράς. Οι τύποι αυτοί μπορούν να μετασχηματισθούν σε τύποι της οπισθοδρομικής διαφοράς και έτσι έχουμε [1] :

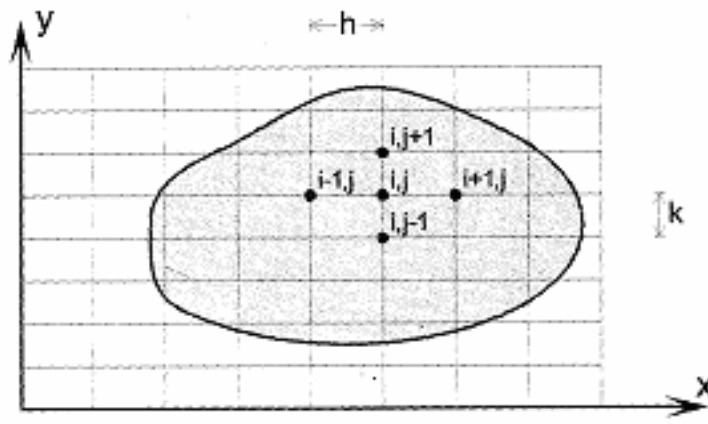
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{h} [\Phi(x, y) - \Phi(x - h, y)] + 0(h) \quad (19)$$

$$\frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{k} [\Phi(x, y) - \Phi(x, y - k)] + 0(k) \quad (20)$$

1.11.2 Κατασκευή ορθογωνικού δικτύου

Αν στην περιοχή R κατασκευασθεί ένα δίκτυο από ίσα ορθογώνια παραλληλόγραμμα πλευρών $\delta x = h$ και $\delta y = k$ όπως στο παρακάτω σχήμα τότε οι συντεταγμένες ενός τυχαίου κόμβου (x, y) είναι $x = ih$, και $y = jk$ όπου i , και j ακέραιοι αριθμοί.[1]



Σχήμα 1.9 Κατασκευή ορθογωνικού δικτύου Πηγή[1]

Έτσι σε τυχαίο κόμβο $\Phi(x, y) = \Phi(ih, jk) = \Phi_{i,j}$. Αντικαθιστώντας αυτό το συμβολισμό στις εξισώσεις 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 έχουμε [1]:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j}}{\partial x^2} = \frac{1}{h^2} [\Phi(i+1, j) - 2\Phi_{i,j} + \Phi(i-1, j)] \quad (21)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j}}{\partial y^2} = \frac{1}{k^2} [\Phi(i, j+1) - 2\Phi_{i,j} + \Phi(i, j-1)] \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial x} = \frac{1}{2h} [\Phi(i+1, j) - \Phi(i-1, j)] \quad (23)$$

$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial y} = \frac{1}{2k} [\Phi(i, j+1) - \Phi(i, j-1)] \quad (24)$$

$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial x} = \frac{1}{h} [\Phi(i+1, j) - \Phi_{i,j}] \quad (25)$$

$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial y} = \frac{1}{k} [\Phi(i, j+1) - \Phi_{i,j}] \quad (26)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial x} = \frac{1}{h} [\Phi_{i,j} - \Phi_{(i-1,j)}] \quad (27)$$

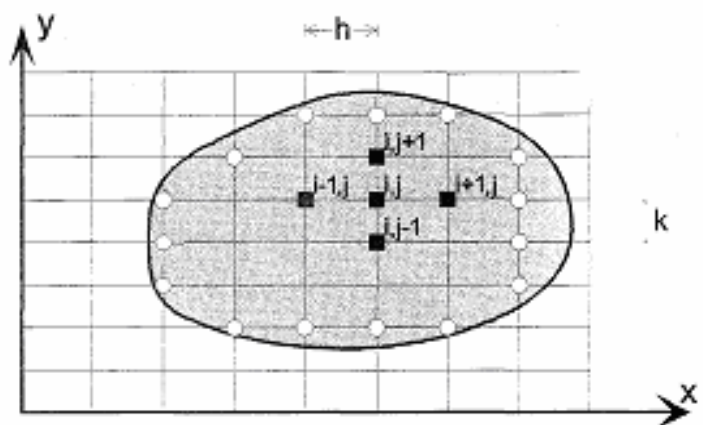
$$\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial y} = \frac{1}{k} [\Phi_{(i,j)} - \Phi_{(i,j-1)}] \quad (28)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις στην εξίσωση Laplace $\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0$

παίρνει τη μορφή:

$$\Phi_{i+1,j} + \Phi_{i-1,j} + r^2 (\Phi_{i,j+1} + \Phi_{i,j-1}) - 2(1+r^2) \Phi_{i,j} = 0 \quad (29)$$

όπου $r=h/k$ είναι ο λόγος των ισοδιαστάσεων του ορθογωνικού δικτύου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όταν αυτή η εξίσωση γράφεται για τον κόμβο i,j συνδέει την τιμή της συνάρτησης Φ σε αυτόν τον κόμβο και τις τιμές της συνάρτησης στους τέσσερις γειτονικούς κόμβους.[1]



Σχήμα 1.10 Ο τύπος των πέντε σημείων Πηγή[1]

Επειδή ο τύπος συνδέει τις τιμές της συνάρτησης σε πέντε γειτονικούς κόμβους ονομάζεται τύπος των πέντε σημείων. Όταν το δίκτυο είναι τετραγωνικό δηλ. $r=1$ τότε η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\Phi_{i+1,j} + \Phi_{i-1,j} + \Phi_{i,j+1} + \Phi_{i,j-1} - 4\Phi_{i,j} = 0 \quad (30)$$

Μάλιστα όσο μικρότερες οι ισοδιαστάσεις h,k τόσο καλύτερη η προσέγγιση της εξίσωσης. Με βάση αυτήν την εξίσωση και τις συνθήκες ορίων που ισχύουν στο υπό μελέτη πεδίο ροής επιλύονται οι γραμμικές εξισώσεις που προκύπτουν και βρίσκονται τα ζητούμενα υδραυλικά στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Γενικά για την υπόγεια υδραυλική

1.1	Το αντικείμενο της Υπόγειας Υδραυλικής.....	1
1.2	Βασικές έννοιες της Υπόγειας Υδραυλικής	1
1.2.1	Ταξινόμηση του υπόγειου ύδατος.....	1
1.2.1.1	Κορεσμένη ζώνη.....	1
1.2.1.2	Μη κορεσμένη ζώνη	2
1.2.2	Υποζώνες	2
1.2.3	Είδη υδάτων	2
1.3	Υδροφορέας	2
1.4	Χαρακτηριστικά Υδροφορέων	3
1.5	Το πείραμα του Darcy –Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	4
1.5.1	Ταχύτητα Διήθησης	6
1.5.2	Υδραυλική Αγωγιμότητα	6
1.5.3	Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας (Transmissivity)-T.....	7
1.6	Ομοιογένεια και Ανισοτροπία.....	7
1.7	Ανισοτροπία και Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	8
1.8	Η εξίσωση της συνέχειας	9
1.9	Μαθηματικό Ομοίωμα	10
1.10	Τύποι ορίων και Οριακές συνθήκες	11
1.11	Επίλυση του μαθηματικού ομοιώματος με τη μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης.....	12
1.11.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών	12
1.11.2	Κατασκευή ορθογωνικού δικτύου	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης**2.1 Γενικά το πρόβλημα των παράκτιων υδροφορέων**

Πολλές παράκτιες ζώνες και ιδιαίτερα οι δελταϊκές περιοχές είναι ιδιαίτερα πυκνοκατοικημένες. Το 50% σχεδόν του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε μία απόσταση 60 χιλιομέτρων από την ακτή. Η παραθαλάσσια ζώνη πάντα προσέλκυε τον άνθρωπο τόσο εξαιτίας της αφθονίας της τροφής λόγω της αλιείας και της καλλιέργειας της γης, όσο και εξαιτίας της δυνατότητας ανάπτυξης οικονομικών δραστηριοτήτων. Η αυξημένη όμως συγκέντρωση ανθρώπινων ενεργειών σε αυτές τις περιοχές έχει προκαλέσει μείωση του φυσικού υπόγειου νερού. Σε σχέση με τα επιφανειακά ύδατα τα πλεονεκτήματα των υπόγειων υδάτων είναι αρκετά:

- Η υψηλή ποιότητα
- Η σχεδόν ελάχιστη εποχιακή μεταβολή, μάλιστα παρουσιάζουν σταθερή θερμοκρασία όλο το χρόνο,
- Το μικρό κόστος αποθήκευσης και μάλιστα χωρίς χωρικούς περιορισμούς και τέλος
- Οι τεράστιες διαθέσιμες ποσότητες

Παρόλα αυτά όμως το καθαρό νερό είναι μάλλον σπάνιο και αγγίζει μόλις το 2,5% ολόκληρου του νερού στη γη. Ο πίνακας 2.1 παρακάτω μας δείχνει την κατανομή του νερού στη γη.[3]

Τύπος	Όγκος, 10^6 km^3	%
Κατανομή του νερού στη γη		
Ωκεανοί & Θάλασσες	1351	97,5
Γλυκό νερό	35	2,5
Συνολική ποσότητα νερού	1386	100
Κατανομή γλυκού νερού στη γη		
Πάγος	24,4	69,7
Επιφανειακά ύδατα	0,1	0,3
Υπόγεια ύδατα	10,5	30,0
Συνολική ποσότητα φρέσκου νερού	35,00	100,0

Πίνακας 2.1 Κατανομή του νερού στη γη. Πηγή[3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Περίπου το 1/3 του φρέσκου νερού που χρησιμοποιείται είναι από υπόγεια ύδατα. Το ποσοστό αυτό αυξάνει συνεχώς αφού η απαίτηση για νερό αυξάνει εξαιτίας:

- Της αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομικής άνθησης
- Της αδυναμίας αξιοποίησης των επιφανειακών υδάτων λόγω ρύπανσης.
- Της διαθεσιμότητας των μεγάλων υπόγειων ποσοτήτων σε σχέση με αυτή των επιφανειακών υδάτων.
- Τη υψηλή ποιότητα των υπόγειων υδάτων σε σχέση με τα επιφανειακά.

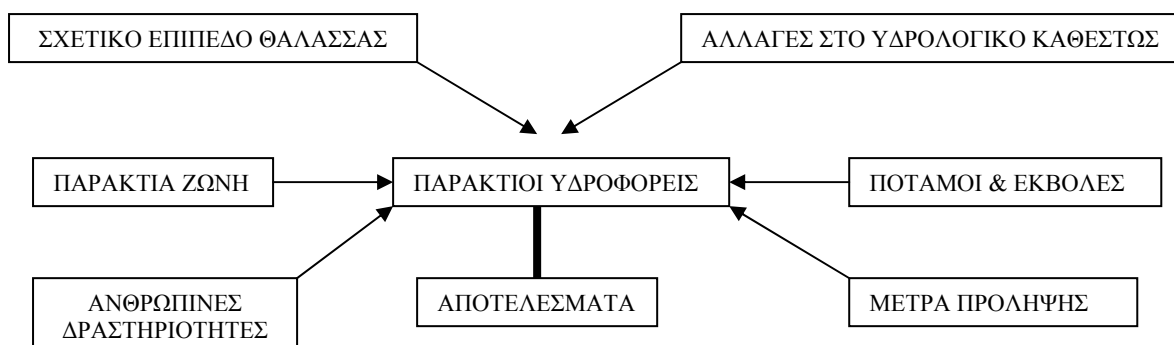
Βέβαια και τα υπόγεια ύδατα παρουσιάζουν μειονεκτήματα μερικά από τα οποία είναι τα εξής:

- Η υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα
- Το ενδεχόμενο εμφάνισης φαινομένων καθίζησης σε περιπτώσεις υπεράντλησης
- Το υψηλό κόστος εξόρυξης.
- Το ενδεχόμενο της υφαλμύρωσης.

Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης δηλαδή την εισροή του θαλασσινού υπόγειου νερού σε έναν υδροφορέα που περιέχει καθαρό νερό, αποτελεί απειλή όχι μόνο για τον άνθρωπο και τη βιομηχανία αλλά ιδιαίτερα για τη γεωργία. Αν και έχουν ανακαλυφθεί μέθοδοι αφαλάτωσης του υφάλμυρου νερού, δυστυχώς παραμένει μία πολύ δαπανηρή τεχνική.

Η τωρινή διάθεση του γλυκού, του θαλασσινού και του υφάλμυρου ύδατος στο υπέδαφος επηρεάζεται τόσο από φυσικές διαδικασίες όσο και από τον ανθρώπινο παράγοντα. Όπως είναι αναμενόμενο θαλασσινό και υφάλμυρο νερό εντοπίζεται σε παράκτιους υδροφορείς. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τους παράκτιους υδροφορείς εμφανίζονται στο παρακάτω σχήμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



Σχήμα 2.1 Επιδράσεις στους παράκτιους υδροφορείς Πηγή[3]

Οι παράκτιοι υδροφορείς επηρεάζονται από στο σχετικό επίπεδο της θάλασσας. Αυτό αλλοιώνεται τόσο από τις φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς καθιζήσεις, από το υδρολογικό καθεστώς που μεταβάλλεται ανάλογα με το φυσικό εμπλουτισμό, από τις επιδράσεις της παράκτιας ζώνης όπως η διάβρωση και η παλίρροια ακόμη και από τα ύδατα που προέρχονται από τους παραποτάμους. Όμως τη μεγαλύτερη επιρροή ασκεί ο άνθρωπος ο οποίος με τις δραστηριότητές του, όπως τη γεωργία και την άντληση έχει οδηγήσει τη στάθμη των υδάτων σε μείωση και σε υφαλμύρωση. Το φαινόμενο όμως αυτό δρα εις βάρος και πάλι του ανθρώπου. Η ποιότητα των γεωργικών προϊόντων του υποβαθμίζεται, ενώ ακόμα και οι πιο ανθεκτικές σε αλατότητα καλλιέργειες δεν μπορούν να αντέξουν, με αποτέλεσμα να αναζητούνται πιο εύφορες περιοχές, να εγκαταλείπονται οι υφάλμυρες και να δημιουργείται κοινωνική αναταραχή. [3]

Ο ρόλος των παράκτιων υδροφορέων που βρίσκονται στη ζώνη επιρροής του Μέσου επιπέδου της θάλασσας (Mean Sea Level- MSL) είναι πολύ σημαντικός. Οι υδροφορείς αυτοί απειλούνται από μία ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου επιπέδου της θάλασσας. Έχει υπολογιστεί ότι τον επόμενο αιώνα να αγγίξει τα 50εκατοστά γεγονός που θα προκαλέσει μεγαλύτερα προβλήματα σε τέτοιους ευαίσθητους υδροφορείς. Συγκεκριμένα αναμένεται αύξηση της υφαλμύρωσης τους, με ταυτόχρονη μείωση του καθαρού νερού. Μάλιστα οι παράκτιες περιοχές που βρίσκονται κάτω από το Μέσο Επίπεδο Θαλάσσης δε θα μπορούν να αντεπεξέλθουν με το περίσσειμα του διηθέντος ύδατος με αποτέλεσμα να εμφανίσουν υψηλότερη περιεκτικότητα αλατιού από ότι τώρα. [3]

2.2 Χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής σε παράκτιους υδροφορείς

2.2.1 Εισαγωγή

Οι διακυμάνσεις στην πυκνότητα των υπόγειων υδάτων εξαιτίας της αλατότητας επηρεάζουν σημαντικά την υπόγεια ροή. Το φαινόμενο αυτό θα πρέπει να ληφθεί σημαντικά υπόψη στη διαχείριση των υπόγειων υδάτων.

2.2.2 Εξίσωση της υπόγειας ροής

Η ροή των υπόγειων υδάτων σε ένα πορώδες μέσο πραγματοποιείται μέσω ενός πολύπλοκου συστήματος πόρων και ανοιγμάτων. Το πορώδες μέσο αποτελείται από ένα συμπαγές υλικό όπως άμμο ή ασβεστόλιθο του οποίου τα κενά καταλαμβάνονται από μία ή δύο φάσεις δηλαδή νερό ή αέρα. Ουσιαστικά η εξίσωση υπόγειας ροής που προκύπτει βασίζεται στην εξίσωση συνέχειας και στην εξίσωση κίνησης, όπως θα δούμε παρακάτω.

Η ύπαρξη διαλυτών ουσιών μπορεί να επηρεάσει πολύ σημαντικά την πυκνότητα του νερού εάν η συγκέντρωσή τους είναι αρκετά υψηλή. Στην περίπτωση αυτή η διακύμανση της πυκνότητας πρέπει να ληφθεί υπόψη γιατί η ροή θα είναι εξαρτημένη από την πυκνότητα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η μεταφορά διαλυτών ουσιών σε υπόγεια ύδατα μπορεί να περιγραφεί από τη δισδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διασποράς (advection-dispersion). Ουσιαστικά αυτό το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε παράκτιους υδροφορείς των οποίων η πυκνότητα δεν είναι σταθερή αλλά ακόμη και για συντηρητικές διαλυτές ουσίες, ουσίες δηλαδή που δεν έχουν υποστεί χημικές αντιδράσεις όπως το ιόν του χλωρίου Cl^- . Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση της μεταφοράς- διάχυσης παίρνει την εξής μορφή[3]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (C V_i) + \frac{(C - C')W}{n_e D} \quad (31)$$

όπου:

- C συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών σε (M/L^3) τη χρονική στιγμή t
- D_{ij} ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς σε (L^2/T)
- $V_i = q_i/n_e$ η ταχύτητα διήθησης του υπόγειου ύδατος κατά τη διεύθυνση x_i σε (M/L^3)
- C' η αρχική συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στην πηγή σε (M/L^3)
- W ο γενικός όρος που περιγράφει την πηγή σε (M/L) και
- D το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα σε (L).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τη μεταβολή της συγκέντρωσης των διαλυτών ουσιών εξαιτίας της υδροδυναμικής διασποράς. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει την επιρροή της συμμεταφοράς δηλαδή της κίνησης των διαλυμένων ουσιών εξαιτίας της κίνησης του υπόγειου υδροφορέα. Τέλος, ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει την επιρροή των διαλυμένων ουσιών εξαιτίας της ύπαρξης πηγών ρύπανσης. [3]

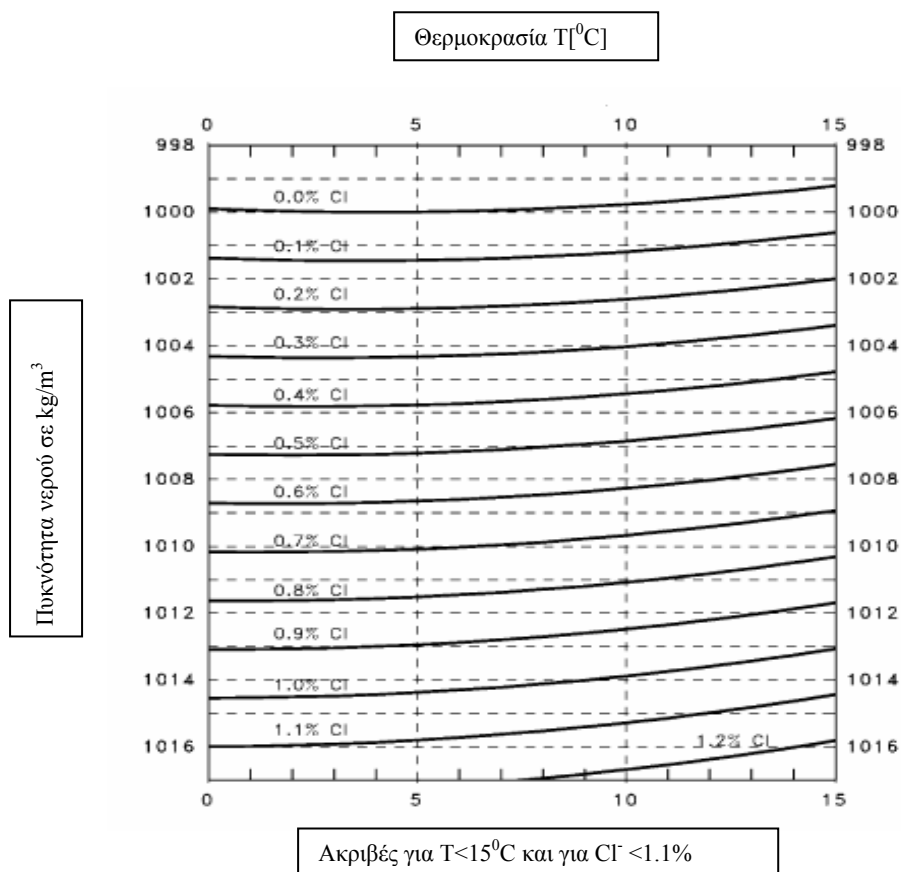
Πρέπει να αναφέρουμε ότι με τον όρο υδροδυναμική διασπορά εννοούμε την ταυτόχρονη ύπαρξη των δύο παρακάτω διαδικασιών[3]:

- **Της Μηχανικής διασποράς** (mechanical dispersion)-η οποία προκαλείται από τη διακύμανση των ταχυτήτων σε μικροσκοπική κλίμακα. Πρόκειται ουσιαστικά για μηχανισμό ανάμειξης ο οποίος εξαρτάται από τη ροή του υγρού και από τα χαρακτηριστικά του πορώδους συστήματος. Γενικά το υγρό κινείται γρηγορότερα στο μέσο των πόρων, ενώ άλλοι πόροι είναι μεγαλύτεροι και άλλοι μικρότεροι.
- **Της Μοριακής Διάχυσης** (molecular diffusion) η οποία προκαλείται από την τυχαία κίνηση των μορίων σε ένα υγρό και εξαρτάται από τη διαφορά των συγκεντρώσεων του υγρού και του πορώδους μέσου.

Σε συνθήκες στρωτής ροής η μοριακή διάχυση είναι δευτερευούσης σημασίας μπροστά στη μηχανική διασπορά. Ο ακριβής καθορισμός της υδροδυναμικής διασποράς είναι πολύ δύσκολος εάν όχι αδύνατος δεδομένου ότι εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως η ετερογένεια και η ανισοτροπία του υδροφορέα. Γενικά πάντως η εξίσωση της μεταφοράς-διασποράς συνδέεται με την εξίσωση της ροής μέσω της ταχύτητας διήθησης της συγκέντρωσης και της πυκνότητας.[3]

2.3 Η πυκνότητα του νερού

Κάτω από συνθήκες στρωτής ροής η επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στην πυκνότητα απεικονίζονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Επίδραση πίεσης και θερμοκρασίας στην πυκνότητα του νερού. Πηγή[3]

Με βάση το παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι και οι δύο παράμετροι πίεση και θερμοκρασία δεν παίζουν τόσο σημαντικό ρόλο όσο η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών. Γι αυτό θεωρούμε ότι η πυκνότητα του νερού σχετίζεται μόνο με τη συγκέντρωση των συνολικών διαλυμένων ουσιών (Total dissolved solids-TDS) σε αυτό. Μάλιστα στους παράκτιους υδροφορείς το κυρίαρχο ιόν είναι το ιόν του χλωρίου Cl^- , και για αυτό το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη διανομή αυτού του ιόντος. Μάλιστα με βάση τη συγκέντρωση του ιόντος Cl^- γίνεται και η ταξινόμηση του καθαρού, του υφάλμυρου και αλμυρού ύδατος. Έτσι έχουμε[3]:

1. Καθαρό νερό συγκέντρωση χλωρίου $\text{Cl}^- \leq 300\text{mg/l}$
2. Υφάλμυρο νερό συγκέντρωση χλωρίου $300\text{mg/l} < \text{Cl}^- < 10.000\text{mg/l}$
3. Αλμυρό νερό συγκέντρωση χλωρίου $\text{Cl}^- > 10.000\text{mg/l}$

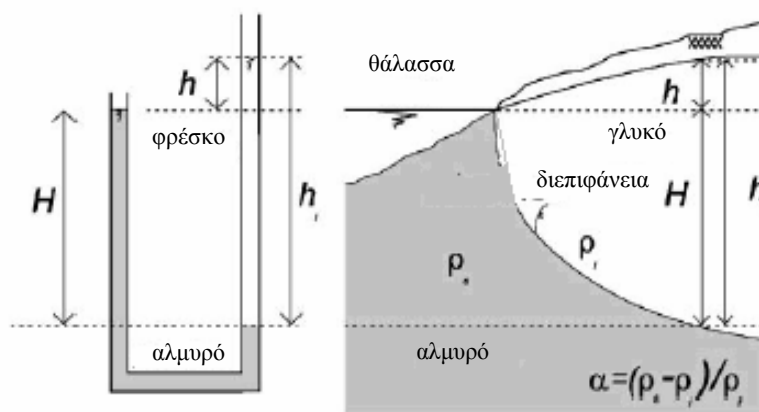
Με βάση τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης το πόσιμο νερό πρέπει να έχει συγκέντρωση χλωρίου $150\text{mg Cl}^-/\text{lt}$ ενώ αντίστοιχα ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ορίζει μία ανεκτή τιμή συγκέντρωσης χλωρίου στα $200\text{mg Cl}^-/\text{lt}$. Αξίζει να

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

αναφέρουμε ότι ο άνθρωπος αρχίζει να αντιλαμβάνεται την αλμυρότητα στο νερό μετά τη συγκέντρωση Cl^- 100mg/l ενώ οι ωκεανοί έχουν αντίστοιχη συγκέντρωση 19.000 mg /lt .

2.4 Η αρχή των Badon Ghyben-Herzberg

Η διαφορά στην πυκνότητα μεταξύ φρέσκου-αλμυρού νερού που παρατηρείται στους παράκτιους υδροφορείς εμφανίζονται να είναι μικρή μπορεί να έχει πολύ σημαντική επιρροή στη ροή των υπόγειων υδάτων. Η αρχή των Badon Ghyben-Herzberg λαμβάνει υπόψη της όπως την πυκνότητα στη ροή με έναν πολύ απλό τρόπο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.3 Διεπιφάνεια γλυκού –αλμυρού με βάση τους Badon Ghyben-Herzberg. Πηγή[3]

Με βάση τους Badon Ghyben-Herzberg η θέση της διεπιφάνειας

περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση
$$h = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H \Leftrightarrow h = aH \quad (32)$$

όπου

- h είναι το πιεζομετρικό μέτωπο σε σχέση με το Μέσο Επίπεδο Θάλασσας σε (L).
- H το βάθος της διεπιφάνειας καθαρού- αλμυρού νερού κάτω από το Μέσο Επίπεδο Θάλασσας σε (L).
- ρ_f η πυκνότητα αναφοράς συνήθως η πυκνότητα του φρέσκου νερού χωρίς διαλυμένα στερεά σε (M/L^3)
- ρ_s η πυκνότητα του αλμυρού νερού σε (M/L^3) και

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

➤ $a = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$ η σχετική διαφορά πυκνοτήτων (αδιάστατο).

Η τυπική πυκνότητα του θαλασσινού νερού είναι ίση με $\rho_f=1025\text{kg/m}^3$ ενώ του φρέσκου $\rho_s=1000\text{ kg/m}^3$ οπότε το a παίρνει την τιμή 0.025. Αν και η αρχή αυτή μας δίνει μία πολύ καλή προσέγγιση υπάρχουν παράμετροι που την καθιστούν ευάλωτη όπως[3]:

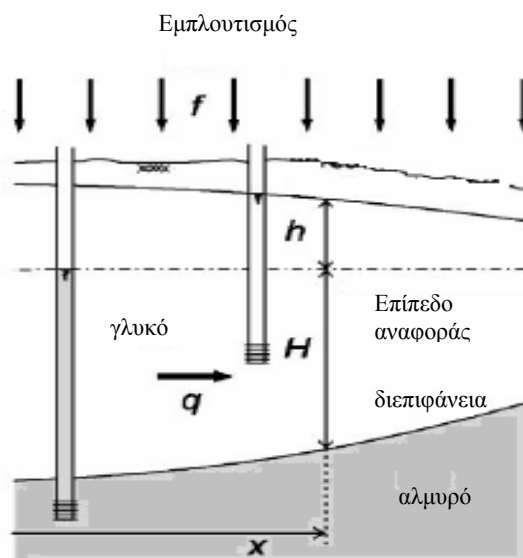
- Για την αρχή αυτή θεωρήθηκε ότι η ζώνη μεταφοράς μεταξύ καθαρού και αλμυρού νερού είναι μόλις ένα μικρό ποσοστό του πάχους της κορεσμένης ζώνης του υδροφορέα με το γλυκό νερό, δηλαδή της τάξεως μερικών μέτρων. Τέτοια κατάσταση παρουσιάζεται σε αδιατάραχτες αμμώδεις περιοχές ή σε κοραλλιογενή νησιά όπου το γλυκό νερό ανανεώνεται με φυσικό τρόπο. Στην πραγματικότητα όμως τέτοια συστήματα σπάνια υπάρχουν. Αυτό σημαίνει ότι η αρχή οδηγείται σε κάποια μικρά λάθη κυρίως σε σχέση με την απόσταση της ακτής με τη ζώνη ροής.
- Δεν ισχύει η υπόθεση της οριζόντιας ροής. Αντίθετα η διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού νερού χαρακτηρίζεται έντονα από την ύπαρξη κατακόρυφων συνιστωσών ταχυτήτων.
- Δεν υπάρχει κάποιος υπολογισμός για τη διέξοδο του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Και τέλος δεν λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η διεπιφάνεια δεν παραμένει ακίνητη αλλά κινείται προς τον υδροφορέα ή και αντίστροφα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναλυτικές φόρμουλες που προκύπτουν για τον υπολογισμό της διεπιφάνειας σε περιορισμένο και μη υδροφορέα για μονοδιάστατη ροή σύμφωνα με την παραπάνω αρχή.

2.4.1 Ελεύθερος υδροφορέας-Μονοδιάστατη ροή

Στην περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα η αρχή των Badon Ghyben-Herzberg υιοθετεί το σχήμα 2.4 στο οποίο περιγράφεται η εύρεση της διεπιφάνειας γλυκού- αλμυρού νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



Σχήμα 2.4 Διεπιφάνεια αλμυρού-θαλασσινού νερού σε ελεύθερο υδροφορέα

Πηγή[3]

Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση $H = \sqrt{\frac{-fx^2 - 2C_1x - 2C_2}{k(1+a)a}}$, $h = aH$,

$$q = fx + C_1 \quad (33)$$

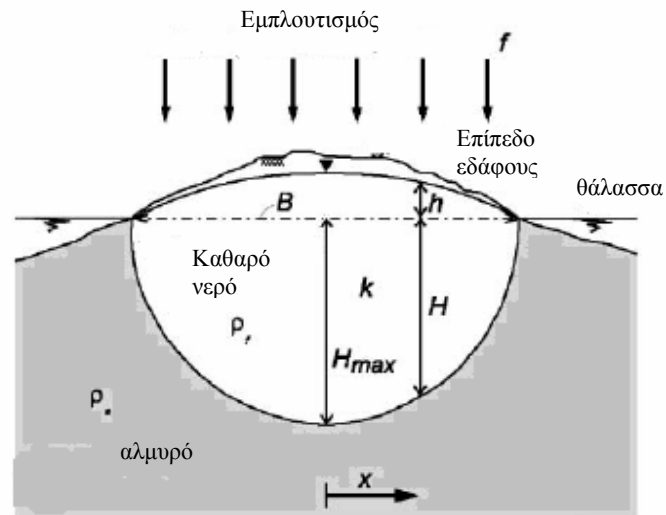
όπου

- q η ροή ανά μονάδα μήκους της ακτής (L^2/T)
- k η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)
- f ο φυσικός εμπλουτισμός (L/T)
- Και x η οριζόντια θέση(απόσταση από τον άξονα συμμετρίας) (L) [3]

Παραλλαγές του τύπου –Υποπερίπτωση 1

Στην περίπτωση που έχουμε μονοδιάστατη ροή σε υπόγειο υδροφορέα σε ένα μεμονωμένο νησί όπου το γλυκό νερό ανανεώνεται δια μέσω φυσικού εμπλουτισμού όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5, ισχύει ο παρακάτω τύπος που είναι τροποποίηση της σχέσης 33.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



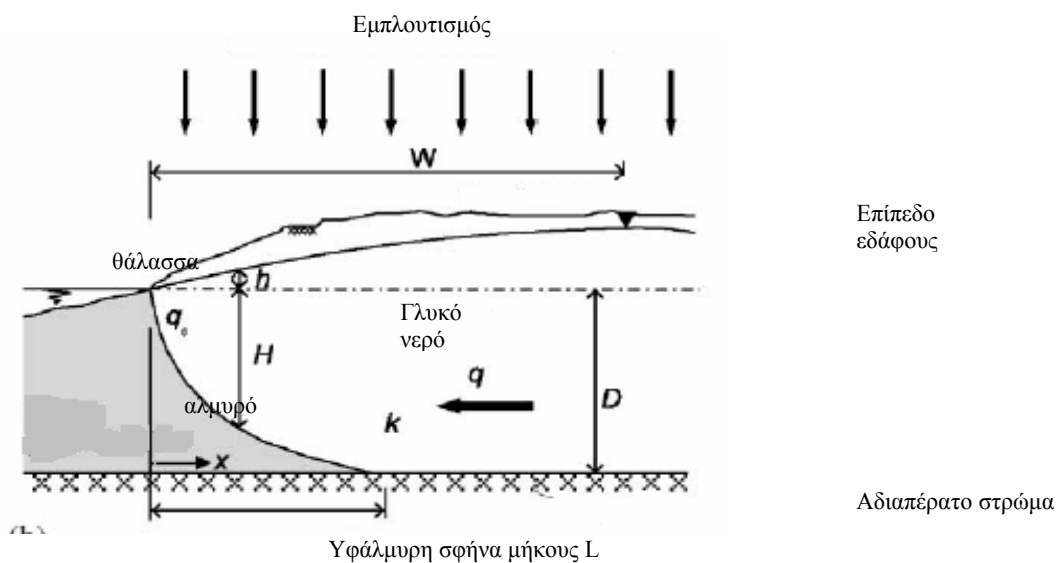
Σχήμα 2.5 Διεπιφάνεια αλμυρού-θαλασσινού νερού σε μεμονωμένο νησί Πηγή[3]

Η εξίσωση που χαρακτηρίζει την διεπιφάνεια θαλασσινού –γλυκού νερού στην παραπάνω περίπτωση είναι η εξής[3]:
$$H = \sqrt{\frac{f(0.25B^2 - x^2)}{k(1+a)a}} \quad (34)$$

όπου: B είναι το πλάτος της αμμόδους περιοχής.

Υποπερίπτωση 2

Στην περίπτωση που έχουμε ένα ρηχό υδροφορέα με πάχος D το σώμα του γλυκού νερού αγγίζει την αδιαπέρατη βάση και τότε η είσοδος του αλμυρού νερού δημιουργεί μία σφήνα μήκους L όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6 Διεπιφάνεια αλμυρού-θαλασσινού νερού σε ρηχό υδροφορέα Πηγή[3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Στην περίπτωση αυτή ισχύουν οι εξής εξισώσεις[3]: $H = \sqrt{\frac{-fx^2 - 2q_0x}{k(1+a)a}}$ $h = aH$

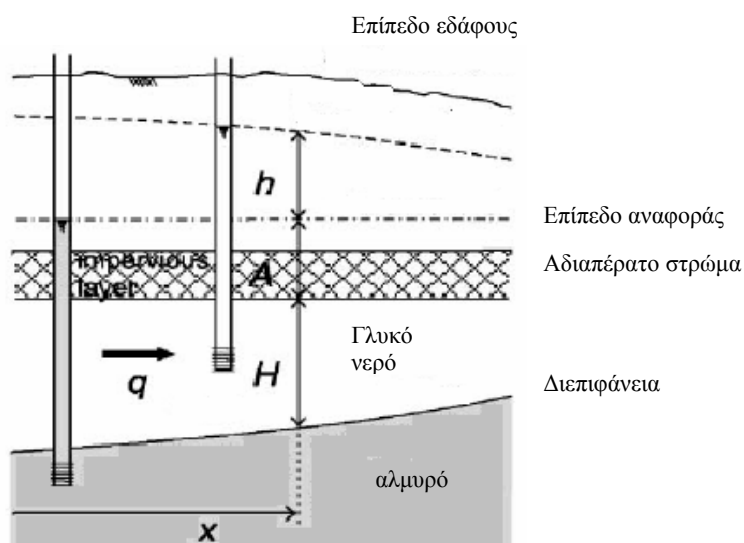
$$q = fx + q_0, \quad q_0 = -fW, \quad L = -\frac{q_0}{f} - \sqrt{\left(\frac{q_0}{f}\right)^2 - \frac{k}{f}D^2(1+a)a} \quad (35)$$

Όπου:

- q_0 ο φυσικός εμπλουτισμός στην ακτή για $x=0$ (L^2/T)
- L το μήκος της υφάλμυρης σφήνας
- D το πάχος του υδροφορέα (L)
- W το μήκος του υδροφορέα μέχρι να συναντήσει το επίπεδο του εδάφους (L)

2.4.2 Περιορισμένος υδροφορέας –Μονοδιάστατη ροή

Η εισροή του αλμυρού νερού σε ένα περιορισμένο υδροφορέα απεικονίζεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Διεπιφάνεια αλμυρού-θαλασσινού νερού σε περιορισμένο υδροφορέα. Πηγή[3]

Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση που χαρακτηρίζει τη διεπιφάνεια αλμυρού-φρέσκου νερού είναι η εξής[3]: $H = \sqrt{\frac{-2q_0x}{ka}} + C$, $h = a(H + A)$, $q = q_0$ (36)

όπου

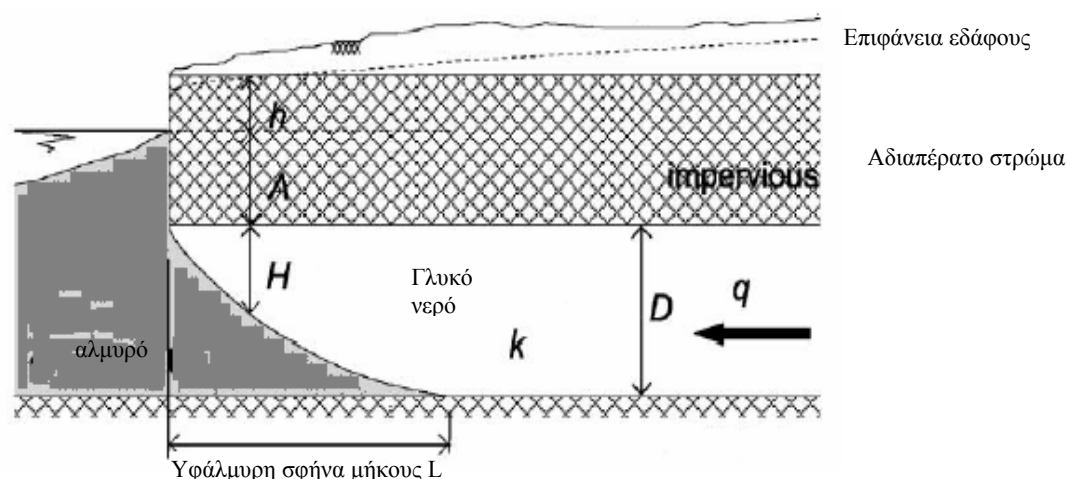
- q_0 είναι ο εμπλουτισμός ανά μονάδα μήκους ακτής (L^2/T)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

- Α το ύψος του επιπέδου της θάλασσας σε σχέση με το ανώτατο όριο του υδροφορέα. (L)

Υποπερίπτωση 1-Υφάλμυρη σφήνα

Στην περίπτωση που και πάλι το γλυκό νερό συναντά αδιαπέρατη βάση δημιουργείται μία σφήνα η οποία ονομάζεται υφάλμυρη και απεικονίζεται στο σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Υφάλμυρη σφήνα σε περιορισμένο υδροφορέα Πηγή[3]

Οι εξισώσεις που ισχύουν σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής[3]:

$$H = \sqrt{\frac{-2q_0x}{ka}}, \quad h = a(H + A), \quad q = q_0, \quad L = -\frac{kD^2a}{2q_0} \quad (37)$$

Παρατηρούμε ότι το μήκος της υφάλμυρης σφήνας είναι αντιστρόφως ανάλογο από τη ροή q_0 . Η ροή του γλυκού νερού μπορεί να ποικίλλει εξαρτώμενη από την επαναφόρτιση του υδροφορέα, η οποία μπορεί να παρουσιάσει διακυμάνσεις εξαιτίας αλλαγών στο υδρολογικό καθεστώς ή λόγω ανθρώπινων επεμβάσεων όπως η υπεράντληση.

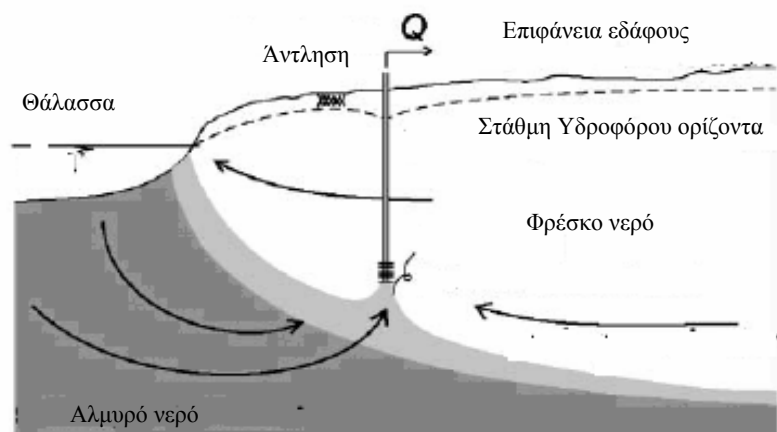
2.5 Προβλήματα του γλυκού νερού που προμηθεύει τις παράκτιες ζώνες

Το κύριο πρόβλημα σε ότι αφορά την υποβάθμιση της ποιότητας του καθαρού νερού στις παράκτιες περιοχές είναι:

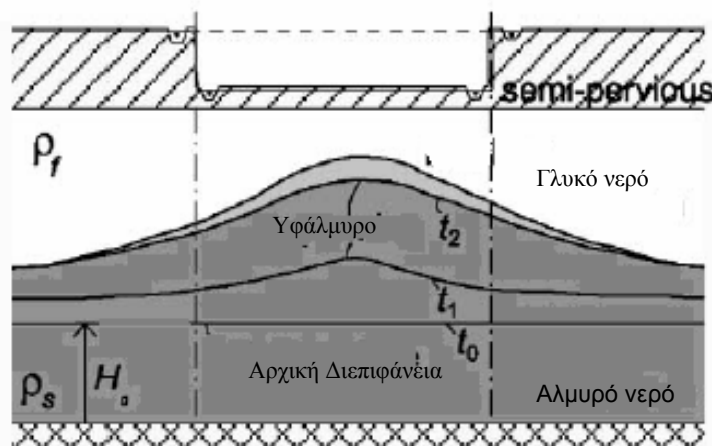
1. Η αύξηση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού.
2. Η αύξηση του σχετικού επιπέδου της θάλασσας.

2.5.1 Η αύξηση της διεπιφάνειας του φρέσκου-αλμυρού νερού

Σε περιοχές που το αλμυρό νερό βρίσκεται κάτω από το γλυκό, η διεπιφάνεια αλμυρού- γλυκού νερού μπορεί να αυξηθεί εξαιτίας των αντλήσεων οπότε η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα χαμηλώνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα από τις γεωτρήσεις να αντλείται πλέον αλμυρό νερό και υπάρχει το ενδεχόμενο να προκληθεί σοβαρό πρόβλημα. Είναι δύσκολο να βρεθεί λύση σε αυτές τις περιπτώσεις γιατί το αφενός το νερό είναι σπάνιο σε αυτές τις περιοχές, αφετέρου είναι δύσκολο να σταματήσει η παράνομη άντληση. Μάλιστα αν συνεχιστεί η άντληση, το αλμυρό νερό θα φτάσει στο επίπεδο άντλησης των πηγαδιών και η ποιότητα του εξαγόμενου ύδατος συνεχώς θα χειροτερεύει. Για να αποφευχθούν αυτές οι αρνητικές επιπτώσεις θα πρέπει να διατηρηθεί ένας σταθερός ρυθμός άντλησης που θα οδηγήσει σε πτώση της πιεζομετρικής γραμμής και η οποία θα διατηρείται σε ένα σταθερό επίπεδο. Μία άλλη λύση θα μπορούσε να αποτελέσει η μεταφορά του πηγαδιού σε μία άλλη θέση όπου το αλμυρό νερό βρίσκεται σε αρκετό βάθος κάτω από αυτό. Αυτή η λύση προϋποθέτει ότι δεν θα υπάρξει αύξηση του ρυθμού άντλησης αλλιώς το φαινόμενο θα ξαναεμφανιστεί. Παρακάτω απεικονίζεται σχηματικά το φαινόμενο αυτό της αύξησης της διεπιφάνειας αλμυρού-φρέσκου νερού.

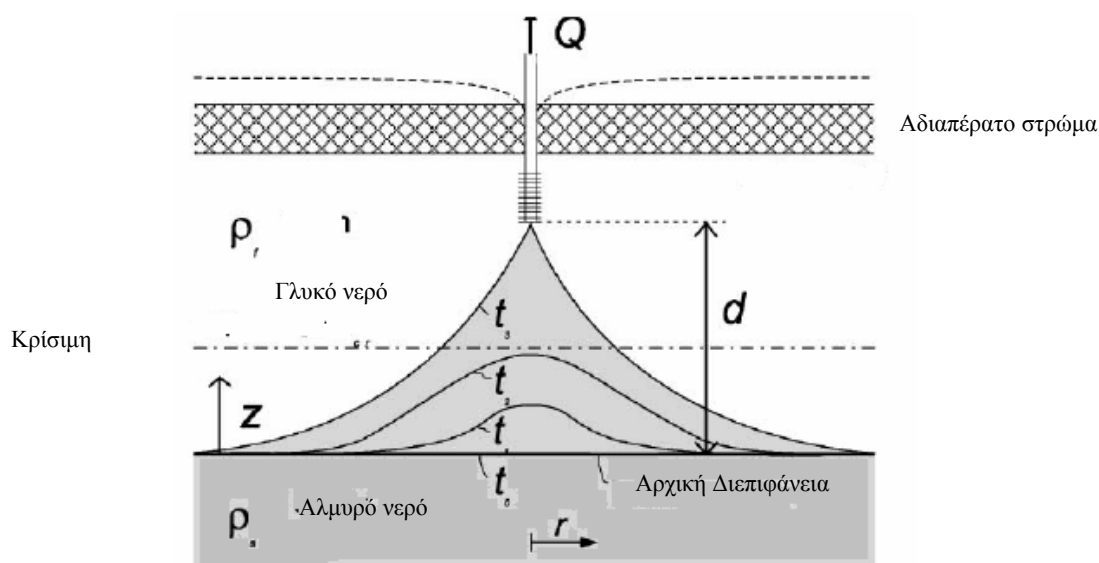


Σχήμα 2.9 Αύξηση διεπιφάνειας κάτω από ένα φρεάτιο άντλησης Πηγή[3]



Σχήμα 2.10 Αύξηση διεπιφάνειας κάτω από μία λεπτή στρώματος περιοχή Πηγή[3]

Για την περίπτωση του φρεατίου έχει αναπτυχθεί αναλυτική εξίσωση η οποία δίνει την αύξηση της διεπιφάνειας τη χρονική στιγμή t . Το μοντέλο της λύσης βασίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της εξίσωσης αύξησης της διεπιφάνειας στην περίπτωση του φρεατίου Πηγή[3]

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την παραπάνω κατάσταση είναι το

$$\text{εξής: } z(r,t) = \frac{Q}{2\pi a k_x d} \left[\frac{1}{(1 + R'^2)} - \frac{1}{[(1 + \gamma')^2 + R'^2]^{1/2}} \right], \quad R' = \frac{r}{d} \frac{k_z^{1/2}}{k_x}, \quad \gamma' = \frac{a k_z}{2n_e d} \quad \text{όπου:}$$

- $Z(r,t)$ η αύξηση της διεπιφάνειας πάνω από την αρχική της θέση r και τη χρονική στιγμή t . (L),

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

- Q ο βαθμός άντλησης του φρεατίου (L^3/T)
- d η απόσταση από το φρεάτιο και την αρχική θέση της διεπιφάνειας τη χρονική στιγμή $t=0$. (L)
- k_x, k_z οι οριζόντια και η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα σε (L/T)
- ne το ενεργό πορώδες αδιάστατο
- t ο χρόνος που ξεκινά να μετρά με την άντληση (T)

Στην περίπτωση που η διεπιφάνεια βρίσκεται ακριβώς κάτω από το φρεάτιο $r=0$

τότε η θέση της διεπιφάνειας για $t \rightarrow \infty$ είναι $z(0, t \rightarrow \infty) = \frac{Q}{2\pi k_x d}$.

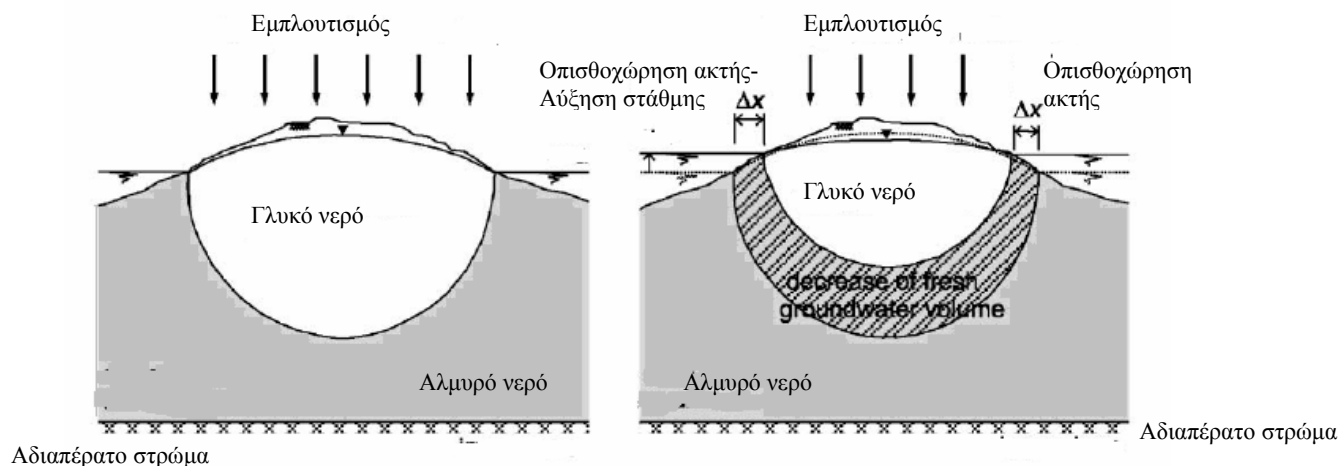
Εάν η διεπιφάνεια περάσει το κρίσιμο ύψος $z_{cr}=\theta d$ θα φτάσει το φρεάτιο. Για να αποφύγουμε μία τέτοια κατάσταση και δεδομένου ότι η υφαλμύρωση του φρεατίου συμβαίνει για $z > z_{cr}$ ο μέγιστος επιτρεπόμενος βαθμός άντλησης δίδεται από τον παρακάτω τύπο: $Q_{max} \leq z_{cr} 2\pi k_x d$ ή $Q_{max} \leq 2\pi k_x \theta d^2$. Οι τιμές που δίνει η βιβλιογραφία για το συντελεστή θ κυμαίνονται από 0,25-0,6. Γενικά προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα των φρεατίων με χαμηλούς βαθμούς άντλησης είναι προτιμότερο.

2.5.2 Επιδράσεις της αύξηση του σχετικού επιπέδου θαλάσσης

Τα αποτελέσματα από μία πιθανή αύξηση του επιπέδου της θάλασσας θα προκαλούσε δυσάρεστα αποτελέσματα, διότι[3]:

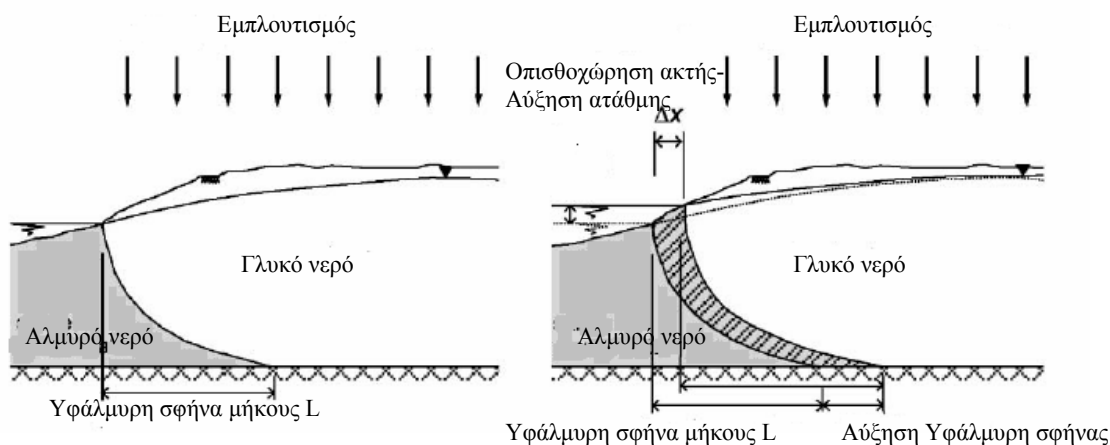
- Το φαινόμενο θα γινόταν αμέσως αντιληπτό στο παράκτιο σύστημα υδάτων. Τα κύρια χαρακτηριστικά θα ήταν η ανάπτυξη έντονων και πελώριων κυμάτων, οι πλημμύρες οι καταρρεύσεις των παράκτιων έργων προστασίας και η παράκτια διάβρωση. Για πολλές κατοικημένες περιοχές θα τεθεί το ενδεχόμενο της εγκατάλειψης. Μάλιστα αν δεν λαμβάνονταν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας η ακτογραμμή θα υποχωρούσε, γεγονός που θα επηρέαζε και τους παράκτιους υδροφορείς μειώνοντας τον ωφέλιμο όγκο φυσικού εμπλουτισμού όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



Σχήμα 2.11 Μείωση ωφέλιμου όγκου φυσικού εμπλουτισμού Πηγή[3]

- Στην περίπτωση των ποταμών, η είσοδος του αλμυρού νερού θα αυξηθεί, εάν το υποκείμενο στρώμα του ποταμού δε θα μπορέσει να καλύψει την αύξηση του επιπέδου της θάλασσας. Η κατάσταση χειροτερεύει αν πρόκειται για ποτάμια που συνορεύουν με υδροφορείς που δέχονται έντονες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η άντληση. Το επιπλέον νερό που θα προκύψει μειώνει την ασφάλεια σε περίπτωση πλημμύρας, ενώ για περιοχές που συνορεύουν με υδροφορείς και έχουν λίγο υψηλότερη κλίση από αυτούς πρέπει να προστατευθούν με αναχώματα. Το παραπάνω φαινόμενο απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 2.12.

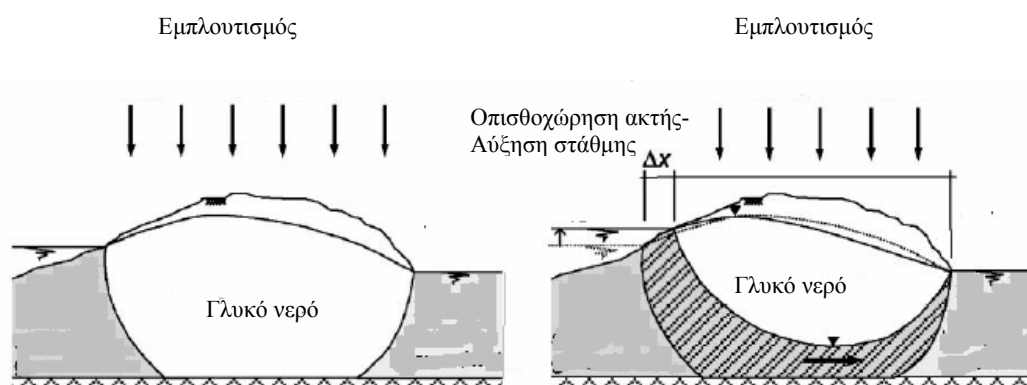


Σχήμα 2.12 Αύξηση υφάλμυρης σφήνας Πηγή[3]

- Οι υδροφορείς οι οποίοι βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής του Μέσου Επιπέδου Θαλάσσης απειλούνται σημαντικά από την αύξηση του. Η εισροή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

θαλασσινού νερού επιταχύνεται σε αυτούς τους υδροφορείς ενώ ο χώρος για φυσική επαναφόρτιση μειώνεται. Η διήθηση του αλμυρού νερού αυξάνεται σε αυτές τις περιοχές, με αποτέλεσμα να πλήγεται ανεπανόρθωτα η γεωργία. Παράλληλα η ζώνη ανάμειξης του γλυκού και του αλμυρού νερού μεταφέρεται προς το ενδότερο με αποτέλεσμα να συναντήσουν φρεάτια άντλησης τα οποία είχαν τοποθετηθεί με κριτήριο να είναι μακριά από αυτή τη ζώνη. Το πρόβλημα αυτό περιγράφεται σχηματικά στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Μείωση χώρου επαναφόρτισης σε υδροφορείς κάτω από MSL Πηγή[3]

Είναι πολύ σημαντικό να συγκρίνουμε την επιρροή της αύξησης του επιπέδου της θάλασσας σε σχέση με τις επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Είναι δυνατόν, ο άνθρωπος να προκαλέσει πολύ έντονη υφαλμύρωση δεδομένου και του χρόνου που λαμβάνει χώρα η κάθε δραστηριότητα. Η αύξηση του επιπέδου της θάλασσας πραγματοποιείται σταδιακά και με αργό ρυθμό. Αντίθετα το φαινόμενο της άντλησης είναι ένα φαινόμενο που λαμβάνει χώρα ταχύτατα και καθημερινά ο ρυθμός του αυξάνεται. Γι αυτό πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προτού ξεκινήσει η άντληση σε μία περιοχή. [3]

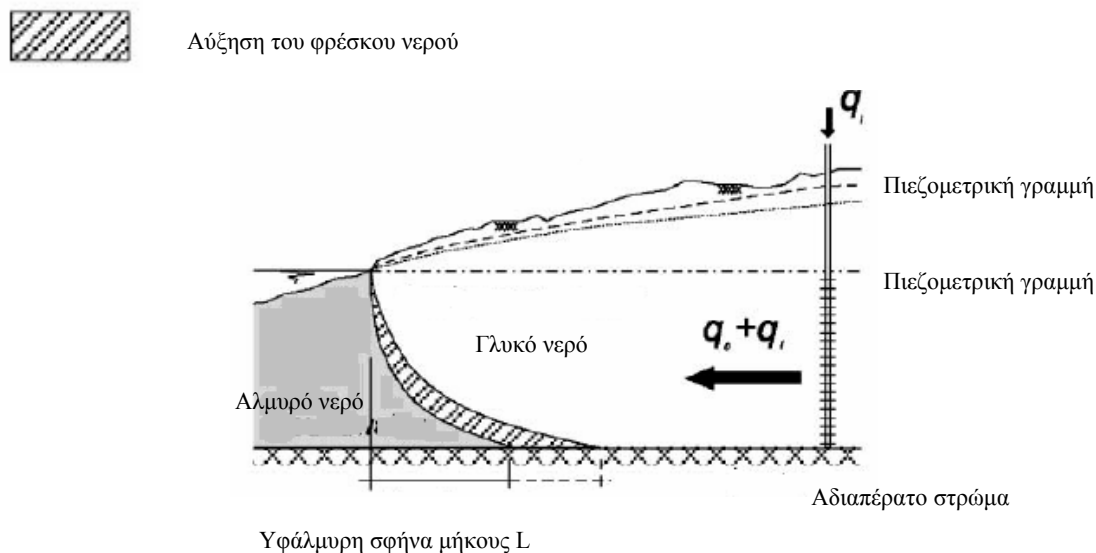
2.6 Μέτρα Αντιμετώπισης Υφαλμύρωσης

Τα αποτελέσματα της ανθρώπινης δραστηριότητας στην υφαλμύρωση των υδροφορέων δεν είναι αμέσως ορατά, δεδομένου ότι η πτώση της πιεζομετρικής στάθμης πραγματοποιείται σταδιακά μέχρι να γίνει αντιληπτή. Μέχρι να αντικατασταθούν οι τεράστιοι όγκοι καθαρού νερού από αλμυρό δεν μπορούμε να αντιληφθούμε το μέγεθος του προβλήματος. [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

Υπάρχουν όμως μέθοδοι με τις οποίες μπορούμε να εμποδίσουμε ή τουλάχιστον να καθυστερήσουμε την υφαλμύρωση. Μερικές από αυτές είναι [3]:

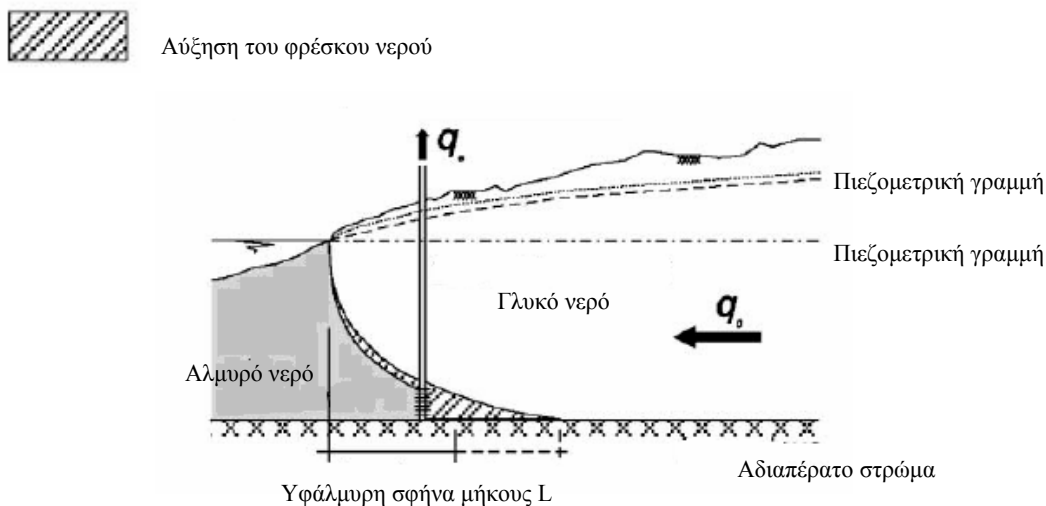
1. Η έγχυση καθαρού νερού, ή ακόμα και επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων μέσω φρεατίων σε μεγάλο βάθος, σε περιοχές που παρουσιάζουν πρόβλημα υφαλμύρωσης. Αυτή η μέθοδος έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στο Ισραήλ και στο Λος Άντζελες. Σχηματικά βλέπουμε τη λύση παρακάτω.



Σχήμα 2.14 Έγχυση καθαρού νερού Πηγή[3]

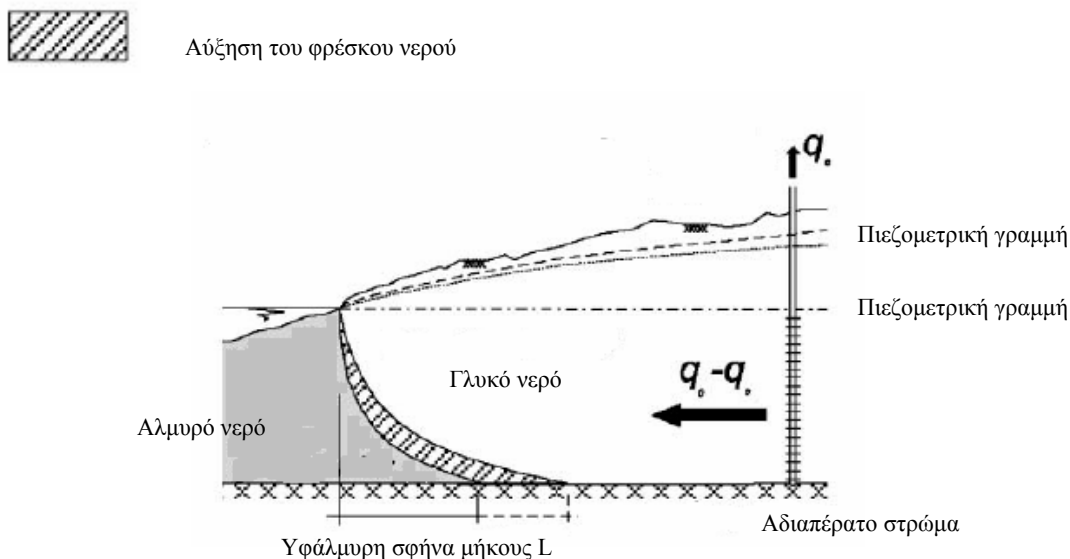
2. Εξαγωγή του αλμυρού και του υφάλμυρου νερού. Αυτή η λύση όμως ενδέχεται να οδηγήσει σε χαμηλές πιεζομετρικές στάθμες ιδιαίτερα σε ρηχούς υδροφορείς, ενώ η απόθεση του εξαγόμενου νερού μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Σχηματικά μπορούμε να δούμε τη λύση στο σχήμα 2.15.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



Σχήμα 2.15 Εξαγωγή αλμυρού και υφάλμυρου νερού Πηγή[3]

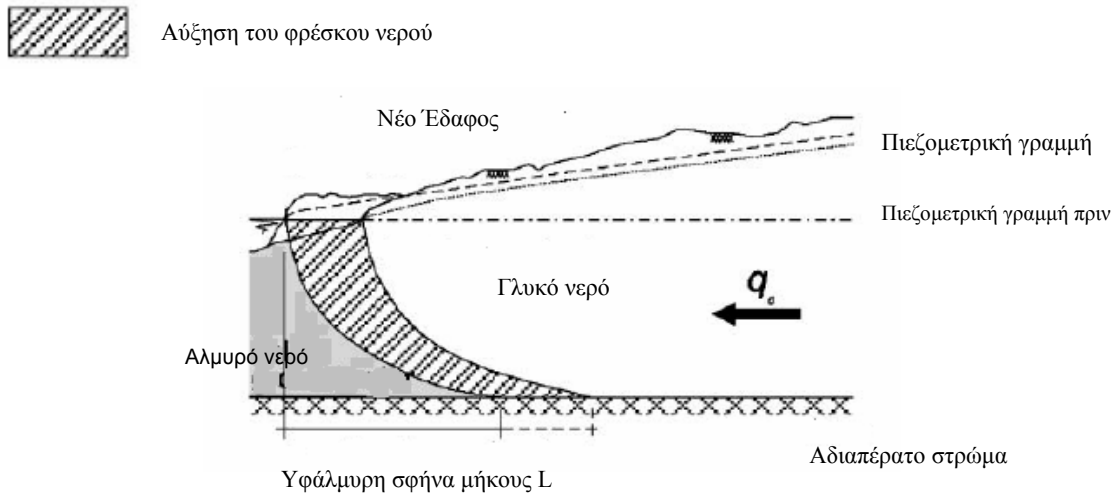
3. Μεταβολή του ρυθμού άντλησης ή αλλαγή θέσης των φρεατίων. Ο ρυθμός άντλησης θα πρέπει να παραμένει σταθερός, ενώ τα φρεάτια πρέπει να είναι καλά διανεμημένα ώστε να μην δημιουργείται πρόβλημα ακόμα και σε περιόδους ξηρασίας κατά τις οποίες ο κίνδυνος υφαλμύρωσης είναι μεγαλύτερος.



Σχήμα 2.16 Μεταβολή του ρυθμού άντλησης Πηγή[3]

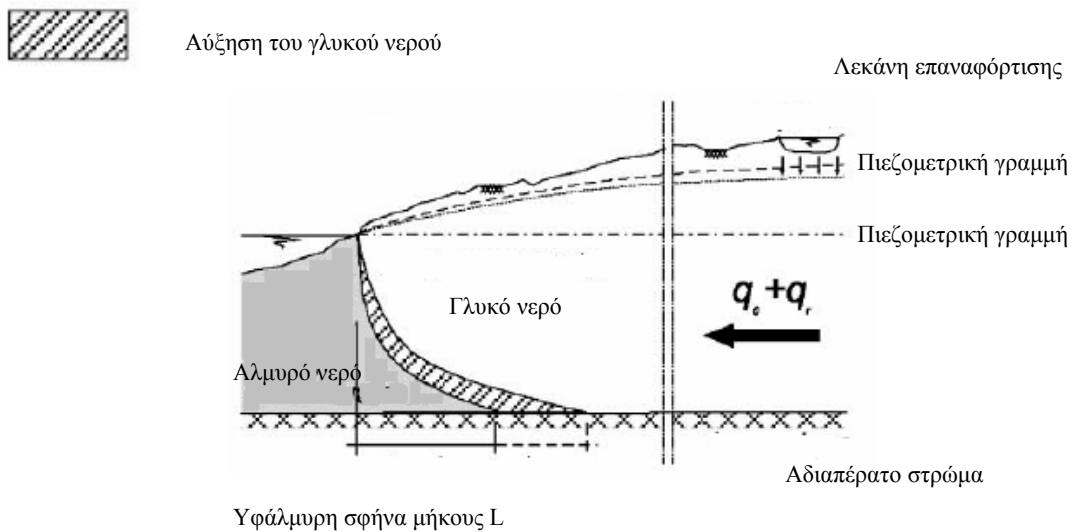
4. Αποκατάσταση της γης δημιουργώντας έτσι ένα σώμα εδάφους όπου να μπορεί να αποθηκευθεί το καθαρό νερό και ταυτόχρονα δημιουργώντας μία φυσική καθυστέρηση στην εισροή του αλμυρού νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης



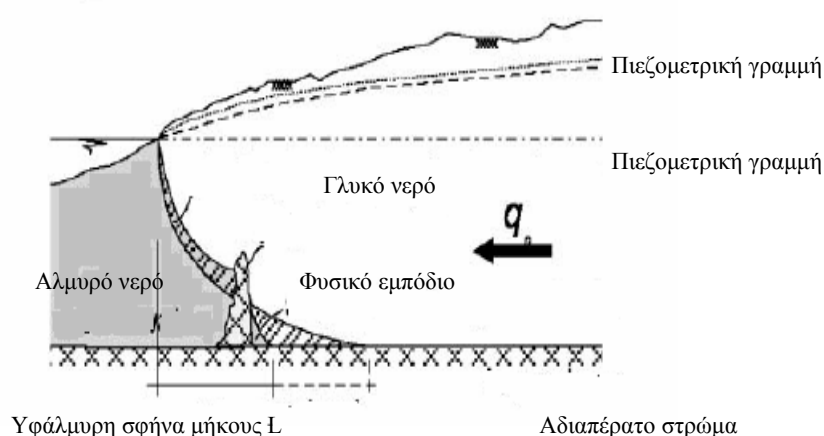
Σχήμα 2.16 Αποκατάσταση εδάφους Πηγή[3]

5. Τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα με σκοπό την αύξηση του γλυκού νερού και την ταυτόχρονη μείωση της διείσδυσης του αλμυρού. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι τεχνικού εμπλουτισμού, και κάθε μία από αυτές εφαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής και τα δεδομένα της.



Σχήμα 2.17 Τεχνητός Εμπλουτισμός. Πηγή[3]

6. Δημιουργία φυσικών εμποδίων στη ζώνη υφαλμύρωσης. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε ρηχούς υδροφορείς και δυστυχώς με μεγάλο κόστος.



Σχήμα 2.18 Δημιουργία φυσικού εμποδίου [3]

Σε κάθε περίπτωση όμως προτού υιοθετηθεί κάποια λύση αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το μέγεθος του προβλήματος, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και φυσικά το κόστος.

2.7 Διαχείριση παρακτίων υδάτων

Η εκμετάλλευση και η αποθήκευση νερού σε παράκτια υδατικά συστήματα θα έπρεπε να αποτελεί μέρος μίας γενικότερης διαχείρισης των υδάτων που θα συμπεριλάμβανε τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια ύδατα. Αυτή η διαχείριση θα έπρεπε να λάμβανε υπόψη της την ποιότητα, την ποσότητα του νερού και τις ανάγκες κάθε περιοχής. Κάτι τέτοιο όμως σημαίνει συνεργασία, ενημέρωση, μελέτη, σχεδιασμό και νομοθεσία. [4]

Όπως είναι αναμενόμενο η διαχείριση των υδάτων διαφέρει από χώρα σε χώρα αν και πλέον οι οδηγίες της Ε.Ε. για την προστασία των υδάτων θέτουν μία κοινή βάση για όλα τα κράτη μέλη. Σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος μπορεί όμως να επιτευχθεί μόνο αν συνεργαστούν όλες οι αρχές που φέρουν ευθύνη για το νερό. Το νερό χρησιμοποιείται για οικιακή, βιομηχανική και για αγροτική χρήση άρα είναι ευθύνη όλων. Δυστυχώς υπάρχουν εμπόδια είτε διοικητικά είτε φυσικά, που είναι πολύ δύσκολα να ξεπεραστούν. [4]

Μία άλλη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι οι απαιτούμενες πληροφορίες. Ότι πληροφορία απαιτείται θα πρέπει να συλλέγεται από μετρήσεις πεδίου ώστε να δημιουργείται μία πλήρη εικόνα του προβλήματος. Μερικές από αυτές τις πληροφορίες είναι [4]:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

- Το υπέδαφος, η γεωλογική δομή της περιοχής σε συνδυασμό με τα υδρογεωλογικά δεδομένα.
- Οι κλιματολογικές συνθήκες και ιδιαίτερα ο φυσικός εμπλουτισμός της περιοχής, και το ισοζύγιο βροχόπτωσης- εξάτμισης.
- Το επίπεδο του νερού, οι πιεζομετρικές στάθμες των υπόγειων υδάτων και η ποσότητα των επιφανειακών υδάτων.
- Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων, η χημική τους σύσταση, ο βαθμός υφαλμύρωσής τους η τυχόν ρύπανσής τους καθώς και ο εντοπισμός πηγών μόλυνσης.
- Τα επιφανειακά ύδατα, η φυσική απορροή τους, η ποιότητά τους και η δυνατότητα χρησιμοποίησης τους για τεχνητό εμπλουτισμό.
- Ο βαθμός εκμετάλλευσης των υδάτων τόσο ο τωρινός όσο και ο παλαιότερος, οι τυχόν εξαγωγές αλμυρού νερού καθώς και ο τυχόν τεχνητός εμπλουτισμός.
- Η οικολογία της περιοχής, χλωρίδα, πανίδα και η σχέση τους με το υδρολογικό καθεστώς.
- Το επίπεδο της θάλασσας και τέλος,
- Οι απαιτήσεις για νερό σε κάθε περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη και μία εκτίμηση για το μέλλον.

Σε κάθε περίπτωση βέβαια απαιτείται μία σωστή αυστηρή νομοθεσία για να διασφαλιστεί η ποιότητα των υπόγειων υδάτων. Με τους σωστούς κανόνες να ελέγχουν, να σταματούν όπου απαιτείται την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, η ποιότητα του νερού αναμένεται να παραμείνει αναλλοίωτη. Η νομοθεσία όμως πρέπει να προβλέπει και την αποκατάσταση των υδάτων σε περίπτωση που ξεπεραστεί η ικανότητα εξαγωγής τους. Αυτό δε σημαίνει ότι θα απαγορευθεί η εκμετάλλευση των υδάτων αλλά ότι αυτή θα γίνεται ορθολογικά, χωρίς κίνδυνο καταστροφής των υδροφορέων. Μάλιστα θα δίνονται άδειες άντλησης οι οποίες όμως θα χορηγούνται ύστερα από τον απαιτούμενο έλεγχο και ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα αναιρούνται ώστε να ελέγχεται η κατάσταση του υδροφορέα. Μάλιστα αξίζει να αναφέρουμε ότι ήδη υπάρχουν μέθοδοι με τις οποίες παρακολουθείται και καταγράφεται πλήρως η κατάσταση της στάθμης του υδροφορέα. Αυτό το μέτρο απευθύνεται κυρίως στους αγρότες αφού όπως φαίνεται αυτοί αποτελούν τη μεγαλύτερη πληγή για το νερό. Σε κάθε περίπτωση όμως θα πρέπει να ενημερωθούν και να ελέγχονται από το κράτος. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης

2.1	Γενικά το πρόβλημα των παράκτιων υδροφορέων.....	16
2.2	Χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής σε παράκτιους υδροφορείς	19
2.2.1	Εισαγωγή.....	19
2.2.2	Εξίσωση της υπόγειας ροής	19
2.3	Η πυκνότητα του νερού	20
2.4	Η αρχή των Badon Ghyben-Herzberg	22
2.4.1	Ελεύθερος υδροφορέας-Μονοδιάστατη ροή.....	23
2.4.2	Περιορισμένος υδροφορέας –Μονοδιάστατη ροή	26
2.5	Προβλήματα του γλυκού νερού που προμηθεύει τις παράκτιες ζώνες	27
2.5.1	Η αύξηση της διεπιφάνειας του φρέσκου-αλμυρού νερού	28
2.5.2	Επιδράσεις της αύξηση του σχετικού επιπέδου θαλάσσης	30
2.6	Μέτρα Αντιμετώπισης Υφαλμύρωσης.....	32
2.7	Διαχείριση παρακτίων υδάτων	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τεχνητός εμπλουτισμός

3.1 Γενικά – ορισμός

Η αυξημένη ζήτηση για νερό ανά τον πλανήτη σε συνδυασμό με την αλλοίωση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως η υπεράντληση, έχει αυξήσει την ανησυχία για την επάρκειά του. Για το λόγο αυτό, αρχικά κρίθηκε αναγκαία η αξιοποίηση του επιφανειακού νερού. Το νερό της επιφανειακής απορροής μπορεί να αξιοποιηθεί με τους εξής τρόπους [5]:

- Με άμεση άντληση από την κοίτη του υδρογραφικού δικτύου, όσο ρέει, πριν καταλήξει στη θάλασσα.
- Με κατασκευή φραγμάτων και τη δημιουργία τεχνητών λιμνών εντός των οποίων αποθηκεύεται το νερό και στη συνέχεια μπορεί να αξιοποιηθεί.
- Με τη χρησιμοποίησή του για τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων.

Στην πρώτη περίπτωση η λύση είναι κατά κανόνα συμφέρουσα, όμως μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο ένα μικρό ποσοστό του επιφανειακού νερού. Εξάλλου όταν η ζήτηση του νερού είναι μέγιστη δηλαδή το καλοκαίρι, η παροχή του υδρογραφικού δικτύου είναι ελάχιστη ή μηδενική. Άρα στις περιπτώσεις (σε χώρες όπως η Ελλάδα) δεν αποτελεί λύση για το σήμερα αφού απαιτείται αξιοποίηση όλου του υδατικού δυναμικού. [5]

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε την κατασκευή φραγμάτων για τη συλλογή και αποθήκευση του νερού σε τεχνητές λίμνες, από τις οποίες στη συνέχεια αντλείται για να χρησιμοποιηθεί. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της θέσης κατασκευής του φράγματος η λύση μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο συμφέρουσα ή και ενίοτε αρκετά έως παντελώς ασύμφορη. Αυτή η μέθοδος είναι ευρέως διαδεδομένη. [5]

Στην τρίτη τέλος περίπτωση υπάρχει η λύση του τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων, που αναπτύχθηκε σιγά-σιγά κατά τις τελευταίες δεκαετίες και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός είναι η διαδικασία με την οποία το περίσσειμα του επιφανειακού νερού διηθείται μέσα στο έδαφος, άλλοτε χρησιμοποιώντας πηγάδια εμπλουτισμού και άλλοτε μεταβάλλοντας τις φυσικές συνθήκες με σκοπό να αυξηθεί η φυσική διήθηση. Η μέθοδος αυτή βασίζεται ουσιαστικά στην κίνηση του νερού, μέσω τεχνικών διαδικασιών, από την επιφάνεια προς το εσωτερικό της γης, όπου μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

Στην πιο ευρεία έννοια ο τεχνητός εμπλουτισμός είναι η εισαγωγή **πλεοναζόντων** ποσοτήτων νερού σε ένα υδροφόρο στρώμα. Το πρόσθετο αυτό νερό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακό νερό ή από κάποιο παρακείμενο υδροφόρο στρώμα. Πρόκειται δηλαδή για μια μέθοδο αποθήκευσης νερού σε περιόδους περισσειας, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους λειψυδρίας.

Βέβαια, η λύση αυτή ενδείκνυται όταν είναι πρόσφορες οι γεωλογικές και υδρο-γεωλογικές συνθήκες και εντέλει συμφέρουσες οι οικονομικές παράμετροι στο πλαίσιο μιας συνολικής διαχείρισης των υδατικών πόρων μιας ολόκληρης περιοχής. Σε ορισμένες περιοχές η μέθοδος αυτή είναι η μόνη εφικτή, και γι' αυτό πρέπει να εφαρμόζεται ανεξάρτητα από οικονομικές παραμέτρους και αποδόσεις. [5]

3.2 Σκοπός του τεχνητού εμπλουτισμού

Ο βασικός σκοπός που οδήγησε στην ανάπτυξη της μεθόδου του τεχνητού εμπλουτισμού ήταν η αποθήκευση επιφανειακών υδάτων.

Σήμερα, ο σκοπός του τεχνητού εμπλουτισμού μπορεί να [5]:

- Η αύξηση της εκμεταλλεύσιμης ποσότητας υπόγειου νερού ή η δημιουργία προσωρινής υπόγειας αποθήκης για εκμετάλλευση.
- Η αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας των υδροφόρων στρωμάτων ή συστημάτων που διαταράχθηκε λόγω υπερεκμετάλλευσης (υπεράντλησης) τους.
- Η άνοδος της στάθμης, τοπικά ή γενικά, σε παράκτια υδροφόρα στρώματα για την αποφυγή ή την αναχαίτιση διείσδυσης της θάλασσας και υφαλμύρωσης των υδροφορέων.
- Η άνοδος ή έστω η διατήρηση της στάθμης υδροφόρων στρωμάτων για την αποφυγή υποχώρησης της επιφάνειας του εδάφους.
- Η αναβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού με τον εμπλουτισμό του από άλλο κατάλληλο ποιοτικά.
- Η ενεργειακή χρήση νερού με εισαγωγή κρύου και άντληση ζεστού σε περιοχές γεωθερμικών πεδίων.
- Η λειτουργία ψυκτικών εγκαταστάσεων και μηχανισμών εργοστασίων με την εισαγωγή θερμού νερού και την άντληση κρύου.
- Η αντιμετώπιση πλημμυρικών παροχών με τη διοχέτευση μέρους τους σε περιοχές με διατάξεις-εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

Από όλα αυτά κύριο ενδιαφέρον αποτελεί η χρησιμοποίηση του τεχνητού εμπλουτισμού ως μέσο αναχαίτισης του φαινομένου της υφαλμύρωσης.

3.3 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων δεν αποτελεί πανάκεια, καθώς έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια

Τα κύρια **πλεονεκτήματα** είναι τα εξής [5]:

- Περιβαλλοντικά έχει γενικά θετικές επιπτώσεις: βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, προστασία της ύπαρξης και της λειτουργίας πηγών και υδροτόπων, αποφυγή συνίζησης και άρα ποσοτικής υποβάθμισης υδροφορέων, αποφυγή ή αναχαίτιση διείσδυσης θαλασσινού νερού στα παράκτια υδροφόρα στρώματα.
- 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
- Η τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται είναι γενικά απλή και κατανοητή όχι μόνο από τους διάφορους τεχνικούς αλλά και από τον απλό κόσμο.
- Πολύ λίγα εξειδικευμένα εργαλεία απαιτούνται για να σκαφτούν τα διάφορα πηγάδια.
- Η ποιότητα του νερού των υδροφόρων στρωμάτων μπορούν να βελτιωθούν κατά πολύ.
- Τα συστήματα εμπλουτισμού είναι εύκολο να διαχειριστούν.
- Υπάρχει αποθηκευμένο νερό σε περιόδους ξηρασίας, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε τομείς όπως η γεωργία κ.τ.λ.

Αντίστοιχα ορισμένα από τα **μειονεκτήματά** είναι[5]:

- Απαιτείται συνεχής και επιμελής παρακολούθηση των συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

- Χωρίς την κατάλληλη προσοχή ενδέχεται στο τέλος οι πηγές εμπλουτισμού να καταλήξουν πηγές μόλυνσης των υπόγειων υδάτων, όπως έχει συμβεί με τα τα πηγάδια εμπλουτισμού.
- Υπάρχει ο κίνδυνος μεταφοράς μολυσμένου νερού κυρίως λόγω γεωργικών φαρμάκων ιδιαίτερα όταν το επιφανειακό νερό διηθείται ανεπεξέργαστο.
- Αν δεν διηθούνται σημαντικές ποσότητες νερού υπάρχει ο κίνδυνος η μέθοδος να καταλήξει οικονομικά ασύμφορη.
- Πρέπει να εξεταστεί η υδρογεωλογία του υδροφόρου στρώματος πολύ προσεκτικά αν πρόκειται να πραγματοποιηθεί κάποιο μακροχρόνιο σχέδιο.
- Τέλος εξαιτίας των υποδομών που θα κατασκευαστούν υπάρχει το ενδεχόμενο να αλλοιωθεί το προφίλ της περιοχής, όπως η φυτοκάλυψη ή η ποιότητα του εδάφους.

Είναι επομένως φανερό ότι η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού απαιτεί συστηματική μελέτη πολλών παραγόντων.

3.4 Κατηγορίες και μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού

Επειδή τα υδρογεωλογικά δεδομένα μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού.

Οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες[5]:

- Άμεσες μέθοδοι εμπλουτισμού
- Έμμεσες μέθοδοι εμπλουτισμού

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότερες μέθοδοι για κάθε μία από τις δύο βασικές κατηγορίες.

3.4.1 Άμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός

Στον άμεσο τεχνητό εμπλουτισμό πραγματοποιείται άμεση εισαγωγή επιφανειακών υδάτων στον υπόγειο υδροφόρο, τα οποία δεν θα κατέληγαν σε αυτόν με φυσικό τρόπο. [5]

Τα επιφανειακά ύδατα μπορεί να προέρχονται από επιφανειακά υδατορεύματα (π.χ. χείμαρρους), ή από βροχοπτώσεις, τα οποία συνήθως δεν αξιοποιούνται. Μάλιστα έχει ήδη ξεκινήσει η επαναφόρτιση των υδροφορέων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι οι οποίες αφορούν στη συλλογή αλλά και στον τρόπο εισαγωγής των υδάτων σε υπόγειο υδροφόρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

3.4.1.1 Μέθοδος λεκάνης (spreading basin)-επιφανειακή κατάκλιση

Πρόκειται για την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μέθοδο. Στην περίπτωση αυτή το νερό συγκεντρώνεται μέσα σε λεκάνες οι οποίες έχουν εκσκαφθεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή και από εκεί διηθείται σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα. Για να είναι αποτελεσματικός ο τεχνητός εμπλουτισμός σε αυτή την περίπτωση, το έδαφος στο οποίο πραγματοποιείται αυτή η κατασκευή πρέπει να είναι υδατοπερατό. Η ποσότητα του νερού η οποία καταλήγει στον υδροφορέα εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες[6] :

- Το ρυθμό διήθησης του νερού και
- από την ικανότητα οριζόντιας κίνησης του νερού.

. Στην επιφάνεια του υδροφορέα υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί φράξιμο του επιφανειακού του στρώματος εξαιτίας της μετατόπισης μεταφερόμενων κομματιών από το νερό, ή ακόμη λόγω ανάπτυξης φυκών, βλάστησης, κολλοειδών σωματιδίων, μικροβιολογικής δραστηριότητας ή ακόμη και λόγω φυσικής εδαφολογικής μετατόπισης. Αυτή η μέθοδος είναι η πλέον αποδοτική όταν δεν υπάρχουν επικείμενα στρώματα μεταξύ της επιφάνειας εμπλουτισμού και του υδροφόρου ορίζοντα, δεδομένου ότι υπάρχει καθαρό νερό για εμπλουτισμό. Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα της μεθόδου είναι το φράξιμο του επιφανειακού στρώματος του υδροφορέα που δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα. Σε μια τέτοια περίπτωση το νερό οδηγείται μακριά από τον υδροφορέα, ενώ σημαντικές είναι και οι απώλειες λόγω εξάτμισης του νερού, το οποίο παραμένει άνω του επιφανειακού φραγμένου στρώματος χωρίς όμως να διηθείται. Για να αποφευχθεί το φράξιμο στη μέθοδο αυτή πρέπει:

- Η στάθμη του νερού στη λεκάνη να είναι αρκετά υψηλή
- Το νερό προς διήθηση να υπόκειται σε μηχανική και χημική επεξεργασία ώστε να αποφεύγεται η ανάπτυξη μικροβίων.
- Στο πάτο της λεκάνης να τοποθετείται ένα εδαφικό στρώμα μεσαίας διαπερατότητας το οποίο θα λειτουργεί ως φίλτρο και τέλος
- Όπου απαιτείται να υφίσταται μηχανική επεξεργασία και το έδαφος.

Στο σχήμα 3.1 που ακολουθεί φαίνεται πως λειτουργεί αυτή η μέθοδος. [6]

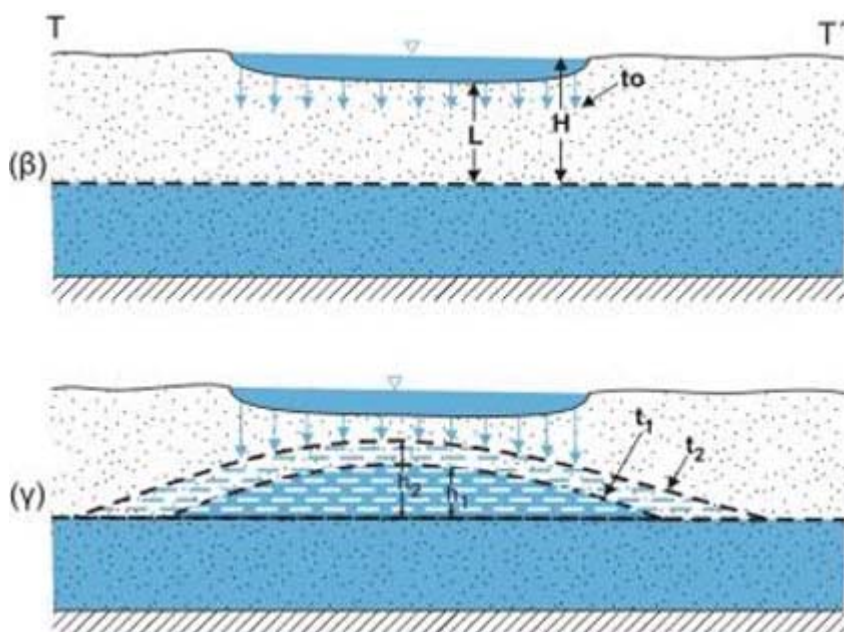
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός



Σχήμα 3.1 Η μέθοδος της επιφανειακής κατάκλισης. Πηγή[7]

3.4.1.2 Μέθοδος της πλημμύρας επιφανειών

Στη μέθοδο αυτή καθορίζεται μια περιοχή η οποία πλημμυρίζει και στη συνέχεια αναμένεται το νερό να διεισδύσει μέσω του υπεδάφους στον υπόγειο υδροφόρο. Καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη μέθοδο παίζει η διαπερατότητα των εδαφολογικών στρωμάτων. Η μέθοδος απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. [6]

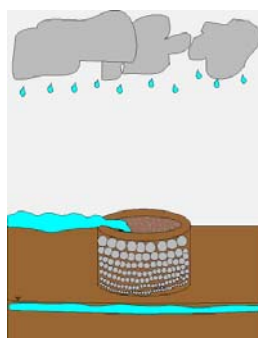


Σχήμα 3.2 Η Μέθοδος της πλημμύρας επιφανειών Πηγή[7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

3.4.1.3 Μέθοδος φυσικών ανοιγμάτων (pit and shaft)

Συνθήκες που να επιτρέπουν τη σωστή λειτουργία της μεθόδου των λεκανών είναι εξαιρετικά σπάνιες. Συνήθως υπάρχουν αδιαπέρατα στρώματα μεταξύ του υδροφόρου ορίζοντα και την επιφάνεια της ξηράς με αποτέλεσμα η διήθηση του νερού να είναι αδύνατη. Σε αυτή την περίπτωση η διάτρηση του εδάφους και η δημιουργία ενός φυσικού ανοίγματος που να επικοινωνεί με τον υδροφορέα μοιάζει η καλύτερη λύση. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί ότι όσο πιο απότομες είναι οι πλευρές του ανοίγματος αυτού, τόσο αυξάνει ο ρυθμός του εμπλουτισμού. Αντίστοιχα ο ρυθμός εμπλουτισμού μειώνεται αισθητά, αν το νερό που θα χρησιμοποιηθεί δεν έχει φιλτραριστεί προηγουμένως, οπότε και δημιουργείται ίζημα στις πλευρές του ανοίγματος. Οι διατομές του μπορούν να είναι κυκλικές, ορθογώνιες, τετράγωνες ή ακόμα να είναι γεμισμένες με κάποιο διαπερατό υλικό. Ο άξονας μπορεί να σταματάει πάνω από τη στάθμη του υδροφορέα αλλά μπορεί και να τελειώνει μέσα στον υδροφορέα. Ο ρυθμός εμπλουτισμού μειώνεται με το χρόνο και σε αυτή τη μέθοδο, λόγω της συσσώρευσης υλικών ή λόγω της ανάπτυξης διαφόρων μικροβίων στις πλευρές του άξονα. Ένα παράδειγμα φυσικού ανοίγματος παρουσιάζεται παρακάτω. [6]



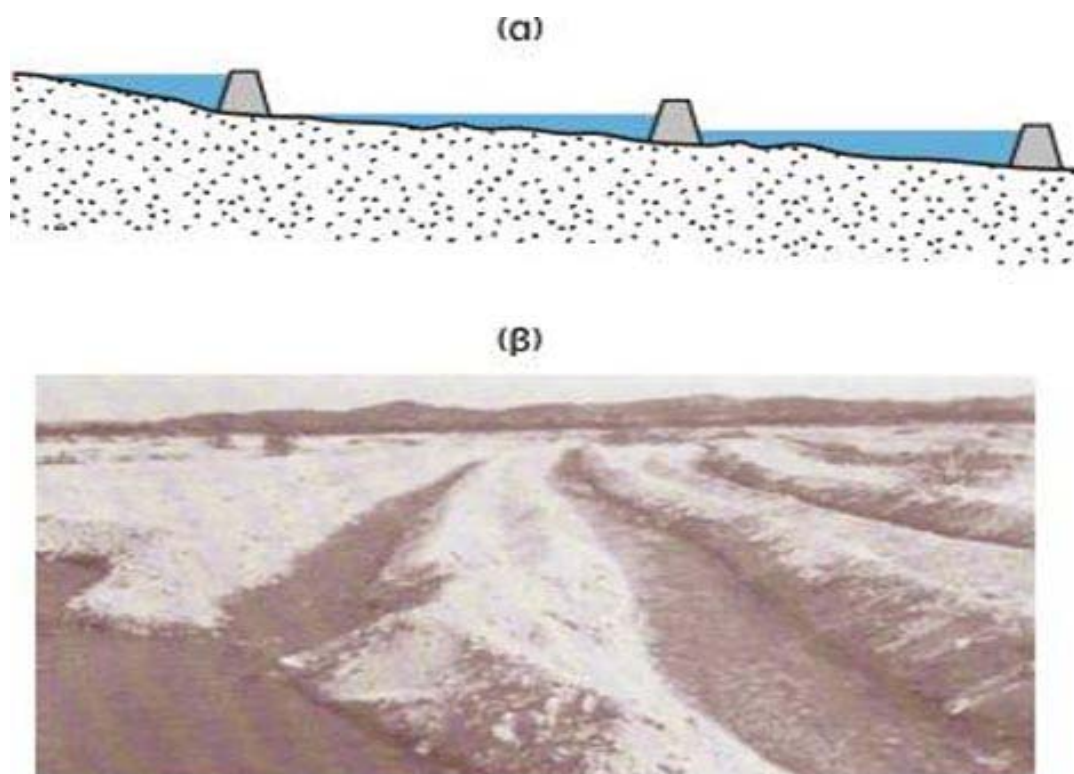
Σχήμα 3.3 Η Μέθοδος φυσικών ανοιγμάτων (pit and shaft) Πηγή[7]

3.4.1.4 Μέθοδος των αυλακιών (ditch)

Η μέθοδος των αυλακιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές με ιδιαίτερα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σειρά από αυλάκια τα οποία να καταλήγουν σε ένα μεγαλύτερο, το οποίο με τη σειρά του να απομακρύνει το νερό το οποίο δεν μπορεί να διηθηθεί. Μάλιστα με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται και η συσσώρευση αδρανούς υλικού. Για την καλύτερη αποτελεσματικότητα της μεθόδου, ο ρυθμός κίνηση του νερού μέσα στα αυλάκια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

πρέπει να είναι χαμηλός, ενώ σε περιόδους πολύ χαμηλής ροής καλό είναι να καθαρίζονται οι πάτοι τους. Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα. [6]



Σχήμα 3.4 Διευθετήσεις στις κοίτες χειμάρρων για τεχνητό εμπλουτισμό.

(α): μικρά φράγματα κατά μήκος, (β): αυλάκια Πηγή[7]

3.4.1.5 Μέθοδος με φρεάτια εμπλουτισμού (με έγχυση)

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για άμεσο εμπλουτισμό υδροφορέων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μια σειρά από φρεάτια στην ίδια περιοχή. Είναι η κατάλληλη λύση όταν υπάρχει αδιαπέρατο στρώμα μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του υδροφορέα, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί και σε ελεύθερους και σε περιορισμένους υδροφορείς.

Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει υψηλά ποσοστά εμπλουτισμού αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην υπάρξει κάποιο πρόβλημα φραξίματος της εισόδου του φρεατίου, διαφορετικά το νερό θα συγκεντρώνεται στο φρεάτιο χωρίς όμως να καταλήγει στον υδροφορέα. Σε ιδανικές συνθήκες το φρεάτιο αναμένεται να λειτουργήσει τέλεια, πράγμα που όμως δεν γίνεται λόγω των εξής [6]:

- Της υψηλής συγκέντρωσης των στερεών που διαπερνούν το φρεάτιο, των οποίων όταν η συγκέντρωση υπερβαίνει κάποια τιμή μπορεί να προκαλέσει

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

φράξιμο. Μάλιστα έχει βρεθεί ότι συγκεντρώσεις στερεών μόλις 1mg/l μπορούν φράξουν το φρεάτιο σε σύντομο χρονικό διάστημα.

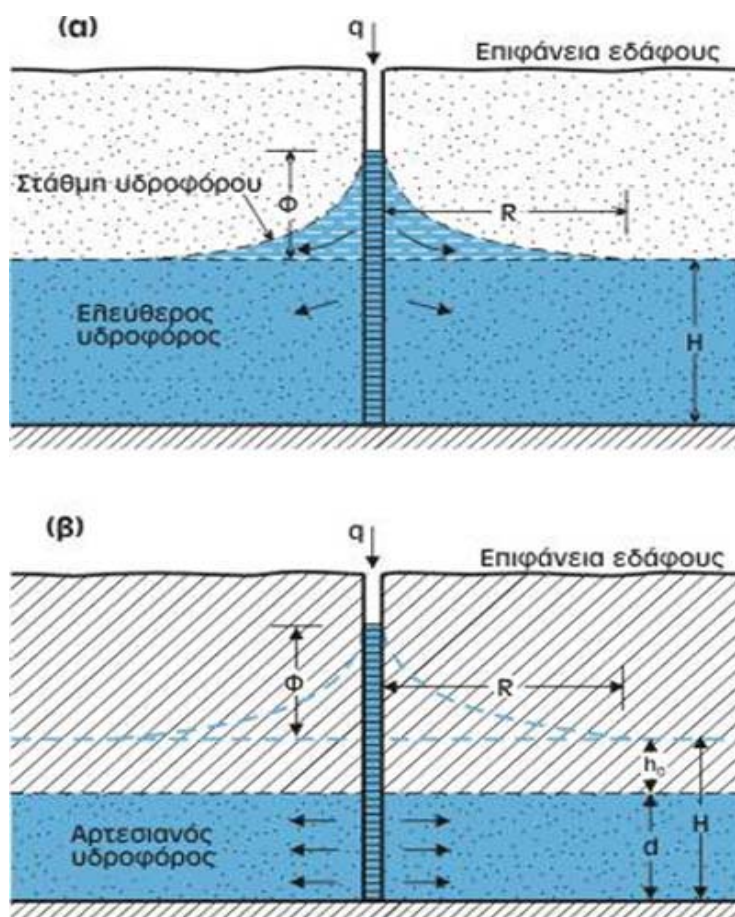
- Της δημιουργίας ιζημάτων κατά μήκος του φρεατίου λόγω ιονικών αντιδράσεων στο νερό. Τα ιζήματα αυτά συσσωρεύονται συνεχώς μέσα στο φρεάτιο με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποτελεσματικότητά τους. Επειδή αυτό το φαινόμενο δεν μπορεί να αποφευχθεί, επιλέγεται το μήκος του φρεατίου να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ώστε να καθυστερήσει αρκετά η συσσώρευση αυτών των ιζημάτων.
- Του εγκλωβισμού αέρα μέσα στο νερό. Όταν εισάγεται αέρας μαζί με το νερό τότε είναι δυνατόν να μειωθεί η υδραυλική αγωγιμότητα δεδομένου ότι οι φουσκάλες αέρα μπλοκάρουν την έξοδο του νερού καταλαμβάνοντας περισσότερο χώρο μέσα στον υδροφορέα.
- Της ανάπτυξης μικροβιακής δραστηριότητας μέσα στο φρεάτιο, η οποία ευνοείται όταν η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού είναι υψηλότερη από αυτή του υδροφορέα.
- Της χημικής αντίδρασης του εισερχόμενου νερού με το φυσικό νερό του υδροφορέα. Η χημική διαφορά των δύο υγρών όπως πχ το διαφορετικό PH, η διαφορετική περιεκτικότητα σε οξυγόνο και η διαφορετική θερμοκρασία των δύο υγρών (συνήθως το νερό προς εμπλουτισμό έχει μεγαλύτερη) μπορούν να προκαλέσουν πολλά ανεπιθύμητα προβλήματα. Έτσι αν το νερό προς έγχυση έχει υψηλή περιεκτικότητα σε κάποιο ορυκτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κρυσταλλοποίησης μέσα στο φρεάτιο. Παρομοίως αν εισαχθεί κάποια οξειδωμένη ουσία και βρεθεί στο κατάλληλο περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε οξείδωση σιδήρου και να παραχθούν υδροξύλια μέσα στο φρεάτιο.
- Της υψηλής ταχύτητας του ρυθμού εμπλουτισμού που μπορεί να προκαλέσει αιτία φραξίματος. Συγκεκριμένα έχει βρεθεί ότι αν η ταχύτητα εμπλουτισμού υπερβαίνει το 0.015m/sec μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα.

Τέλος μερικές γενικές αρχές για τα φρεάτια έγχυσης είναι οι εξής[6]:

- Γενικά ένα φρεάτιο έγχυσης πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να υπάρχει θετική πίεση σε όλο το μήκος του, ενώ πρέπει να τερματίζεται κάτω από το στατικό επίπεδο νερού του υδροφορέα ώστε να έχει όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

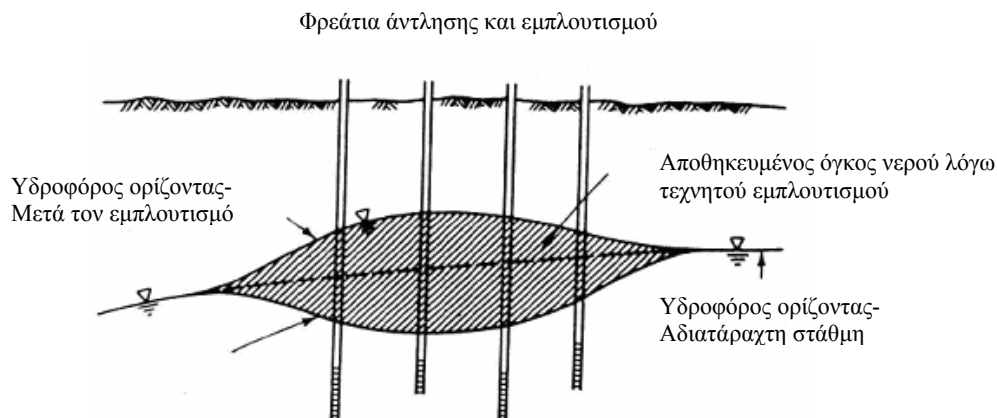
- Γενικά δεν πρέπει να αλλοιώνονται τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα ο οποίος εμπλουτίζεται. Ως χαρακτηριστικά εννοούνται το PH, η θερμοκρασία και η χημική του σύσταση. Αυτό βέβαια είναι μία αρχή που πρέπει να τηρείται για όλες τις μεθόδους τεχνητού εμπλουτισμού.
- Σε κάθε περίπτωση πάντως τα φρεάτια πρέπει να παρακολουθούνται, να ελέγχεται η αποτελεσματικότητά τους λαμβάνοντας συνεχώς δείγματα και μάλιστα για κάθε εποχή, ενώ θα πρέπει να οριστεί κάποια αρχή υπεύθυνη για αυτά τα φρεάτια. Η αρχή αυτή θα έχει τον πλήρη έλεγχο και θα φροντίζει για την ορθή λειτουργία τους.



Σχήμα 3.5 Εμπλουτισμός σε α) Ελεύθερο κα β) αρτεσιανό υδροφορέα Πηγή[7]

Μία παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου είναι η εναλλάξ χρήση των φρεατίων για άντληση και εμπλουτισμό. Ανάλογα με την εποχή τα φρεάτια χρησιμοποιούνται για άντληση κυρίως το καλοκαίρι, ενώ αντίστοιχα το χειμώνα εμπλουτίζονται. Η χρήση κάθε λειτουργίας είναι εποχιακή και ενδείκνυται για άμεση επαναχρησιμοποίηση του αποθηκευμένου στον υπόγειο υδροφορέα ύδατος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός



Σχήμα 3.6 Φρεάτια άντλησης και εμπλουτισμού Πηγή[7]

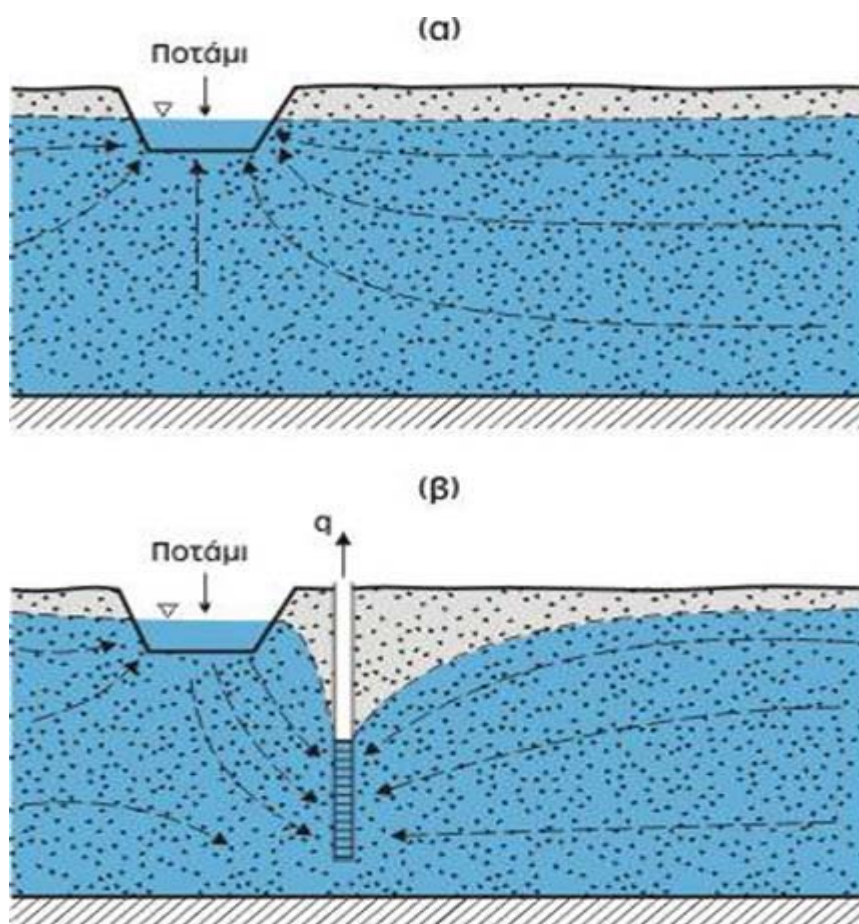
3.4.2 Έμμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός

Στον έμμεσο τεχνητό εμπλουτισμό δεν υπάρχει άμεση εισαγωγή νερού στον υδροφορέα. Η επαναφόρτισή του πραγματοποιείται με έμμεσες παρεμβάσεις που οδηγούν στη μεταβολή των υδρολογικών χαρακτηριστικών του υπόγειου υδροφορέα και έχουν ως συνέπεια την αύξηση των υδάτων του ή τη μείωση των διαρροών προς άλλους υδροφορείς ή υδρορέματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές έμμεσες μέθοδοι. [6]

3.4.2.1 Μέθοδος διευθέτησης υδρορεύματος

Στη μέθοδο αυτή τοποθετούνται μια σειρά από φρεάτια παράλληλα στην κοίτη ενός ποταμού και σε κοντινή απόσταση από αυτή. Χωρίς τα πηγάδια θα υπήρχε ανεμπόδιστη ροή από τον υπόγειο υδροφορέα προς το ποτάμι.(σχήμα3.7α) Όμως τα πηγάδια γύρω από το ποτάμι κατακρατούν κάποιο ποσοστό νερού, με αποτέλεσμα το ποσοστό του νερού που καταλήγει στο ποτάμι να μειώνεται. (σχήμα3.7β) Έτσι το επιφανειακό νερό από το ποτάμι αναγκάζεται να διεισδύσει στον υδροφορέα και να περάσει μέσα στα φρεάτια. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν το ποτάμι διαχωρίζεται με τον υδροφορέα με εδαφικά στρώματα χαμηλής διαπερατότητας τότε η διήθηση είναι τόσο μικρή που το σύστημα δεν είναι λειτουργικό. Το νερό το οποίο βρίσκεται μέσα στα φρεάτια προέρχεται εξ ολοκλήρου από φυσικά υπόγεια ύδατα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός



Σχήμα 3.7 (α) ανεμπόδιστη ροή, (β) ροή με διευθέτηση από φρεάτια. Πηγή[7]

3.4.2.2 Μέθοδος των Συνθετικών (Ενωτικών Φρεατίων)

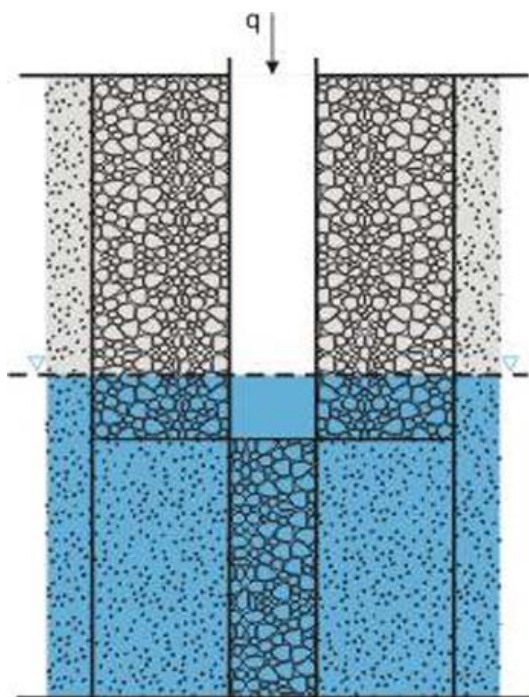
Ένα τέτοιο φρεάτιο ενώνει ένα ρηχό περιορισμένο υδροφορέα με ένα βαθύτερο αρτεσιανό. Το νερό αντλείται από τον βαθύτερο υδροφορέα και αν η στάθμη του πέσει χαμηλότερα από αυτήν του ρηχού, τότε το νερό κινείται από το ρηχό προς το βαθύ υδροφορέα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι μειώνει την εξάτμιση του νερού από τον ρηχό υδροφορέα ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μειώνει και τα φαινόμενα πλημμύρας. Προσοχή όμως πρέπει να δοθεί στις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεθόδου. Υπάρχει κίνδυνος μείωσης της ροής, ενώ η ανάμειξη υδάτων διαφορετικής χημικής σύστασης μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

3.4.2.3 Μέθοδος των Πηγαδιών για εμπλουτισμό

Στη μέθοδο αυτή δημιουργούνται πηγάδια τα οποία εμπλουτίζονται με το νερό της βροχής και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετέπειτα χρήση. Σε κάθε

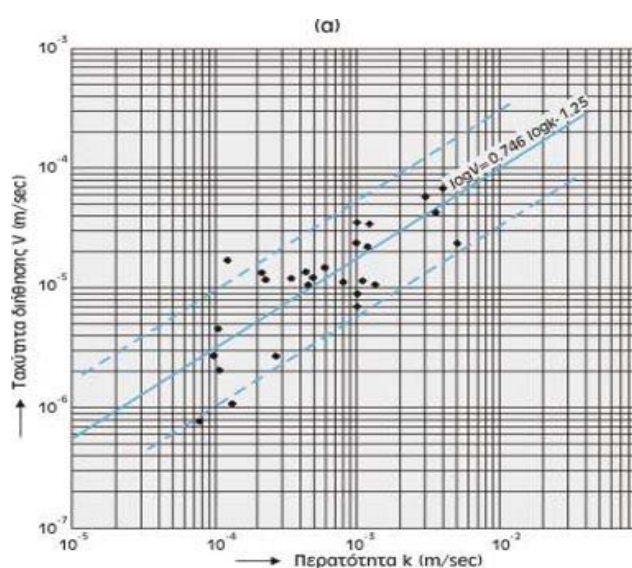
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

περίπτωση πάντως αναφέρεται ότι ιδιαίτερη σημασία παίζει η διαπερατότητα των υπερκείμενων εδαφών. Ένα τέτοιο πηγάδια απεικονίζεται παρακάτω.

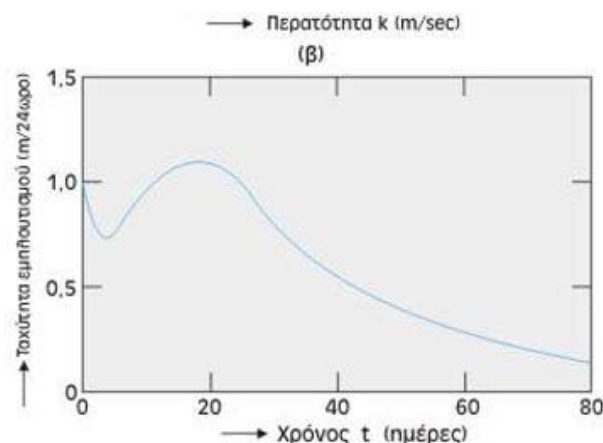


Σχήμα 3.8 Μέθοδος των Πηγαδιών για εμπλουτισμό Πηγή[7]

Το παρακάτω νομογράφημα απεικονίζει τη σχέση ταχύτητας διήθησης του νερού σε σχέση με τη διαπερατότητα του εδάφους η οποία ορίζεται από το συντελεστή διαπερατότητας k . Όπως προκύπτει από το νομογράφημα όσο αυξάνει ο συντελεστής διαπερατότητας k του εδάφους, τόσο αυξάνει και η ταχύτητα διήθησης του νερού.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός



Σχήμα 3.9 (α): Νομόγραμμα που δείχνει την ταχύτητα διήθησης V κατά την εμπλουτισμό σε σχέση με την περατότητα k (κατά Bize, J. -Bourguet, L.-Lemoine, J. 1972) και (β): τη μείωση της ταχύτητας εμπλουτισμού (διήθησης) με το χρόνο t (κατά Καλλέργη, Γ. 2001)

3.5 Γενικές προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου

Η εφαρμογή της μεθόδου του τεχνικού εμπλουτισμού προϋποθέτει και κάποιες συνθήκες για να μπορεί να πραγματοποιηθεί με επιτυχία. Αυτές οι συνθήκες έχουν κυρίως σχέση με το περιβάλλον και οι πιο σημαντικές από αυτές είναι [5]:

- **Οι κλιματολογικές συνθήκες.** Συγκεκριμένα η βροχόπτωση πρέπει να καλύπτει τις ανάγκες της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής ενώ στις περιπτώσεις που υπερβαίνεται ο βαθμός διήθησης του εδάφους, το νερό σε περίσσεια απορρέει επιφανειακά. Ο βαθμός φυσικής ανανέωσης των υδροφορέων διαφέρει ποσοτικά και χρονικά εξαρτώμενος από το κλίμα και διάφορες άλλες υδρολογικές παραμέτρους. Έτσι στα υγρά κλίματα η φυσική επαναφόρτιση των υδροφορέων αγγίζει συνήθως το 30-50% της βροχόπτωσης, ποσοστό που μειώνεται στο 10-20% στα μεσογειακά κλίματα και αγγίζει μόλις το 0-2% στα ξηρά κλίματα. Στα υγρά κλίματα οι βροχοπτώσεις συνήθως επαρκούν για το φυσικό εμπλουτισμό των υδάτων αν και σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης συνήθως κατά τη θερινή περίοδο, ο τεχνητός εμπλουτισμός μοιάζει η λύση του προβλήματος. Ιδιαίτερα σε περιοχές ξηρών κλιμάτων θεωρείται τελείως απαραίτητος.
- **Το υδατικό ισοζύγιο.** Μία πρώτη εκτίμηση για την ανάγκη εφαρμογή του τεχνικού εμπλουτισμού είναι η σχέση του υδατικού ισοζυγίου δηλαδή αν η βροχόπτωση επαρκεί για την εξάτμιση, την εξατμισοδιαπνοή, την επιφανειακή απορροή και για το φυσικό εμπλουτισμό των υδάτων. Έτσι για

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

παράδειγμα σε μία περιοχή όπου η ετήσια εξάτμιση υπερβαίνει κατά πολύ την ετήσια βροχοπτώση δεν φαίνεται να υπάρχει περίσσεια νερού για φυσικό ή τεχνικό εμπλουτισμό. Αξίζει βέβαια να αναφέρουμε ότι αύξηση των βροχοπτώσεων δεν είναι τελείως ανάλογη με το φυσικό εμπλουτισμό. Έτσι ένας υδροφορέας με ποσοστό φυσικού εμπλουτισμού 2% της συνολικής βροχοπτώσεως, θα παρουσιάσει αύξηση στάθμης κατά 250 χιλιοστά σε μία επιπλέον αύξηση βροχοπτώσεων της τάξης του 1%.

- **Οι κατάλληλες υδρογεωλογικές συνθήκες.** Ο βαθμός διήθησης ενός υδροφορέα εξαρτάται από την κάθετη διαπερατότητα της ακόρεστης ζώνης. Όταν το διηθούμενο νερό φτάσει τον υδροφόρο ορίζοντα το ποσοστό του νερού που θα συγκρατηθεί εξαρτάται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα όπως το πορώδες και η ικανότητα η αποθήκευσής του. Μάλιστα το βάθος του υδροφορέα θα καθορίσει ποια μέθοδος εμπλουτισμού θα εφαρμοστεί.
- **Η ποιότητα των υπόγειων υδάτων.** Γενικά τα υπόγεια ύδατα τείνουν να έχουν υψηλή ποιότητα, γεγονός που έχει αλλοιωθεί λόγω των ανθρώπινων επεμβάσεων, όπως η αστικοποίηση και η γεωργία. Η κύρια απειλή των υπόγειων υδάτων είναι η υφαλμύρωση, φαινόμενο που εμφανίζεται πολύ συχνά σε παράκτιους υδροφορείς λόγω υπερεκμετάλλευσής τους. Στις περιπτώσεις αυτές η μέθοδος του τεχνητού εμπλουτισμού που θα εφαρμοστεί πρέπει όχι μόνο να αποσκοπεί στην αναχαίτιση της υφαλμύρωσης αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας των υδάτων.
- **Η τοπογραφία της περιοχής.** Πρόκειται για μία πολύ σημαντική παράμετρος γιατί καθορίζει πολύ έντονα το βαθμό και το ποσοστό διήθησης και ιδιαίτερα σε καρστικοποιημένους σχηματισμούς.
- **Η επάρκεια επιφανειακού νερού.** Εάν η περιοχή έχει επιφανειακό νερό σε επάρκεια μπορεί να αποτελέσει πηγή για εμπλουτισμό.
- **Οι έντονες βροχοπτώσεις της περιοχής.** Ιδιαίτερα σε περιοχές όπου εμφανίζονται συχνές και σύντομες καταιγίδες, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί, συλλέγοντάς το νερό σε χαντάκια και χρησιμοποιώντας το αργότερα.
- **Η επάρκεια υπόγειων υδάτων.** Υπάρχει το ενδεχόμενο σε μία περιοχή να εμφανίζει πρόβλημα πτώσης στάθμης ένας υδροφορέας ο οποίος βρίσκεται χαμηλότερα από κάποιον άλλον. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατό να

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

αποσπασθεί νερό από το υπερκείμενο στρώμα και να εμπλουτισθεί το υποκείμενο.

Σε κάθε περίπτωση πάντως θα πρέπει να μελετηθεί σωστά και να βρεθεί η κατάλληλη μέθοδος που θα εφαρμοσθεί. Σημαντικό είναι επίσης το κόστος της μεθόδου αλλά και η ύπαρξη τυχόν αντιδράσεων από την τοπική κοινωνία.

3.6 Επιπτώσεις τεχνικού εμπλουτισμού

Αν θεωρήσουμε ως κύριο πρόβλημά μας την υφαλμύρωση των υπόγειων υδάτων, μία σωστή εφαρμογή του τεχνικού εμπλουτισμού θα είχε τις εξής επιπτώσεις[5]:

- **Κοινωνικές- Οικονομικές επιπτώσεις:** Διατήρηση του πληθυσμού στα παράκτια μέτωπα και συνέχιση οικονομικής ανάπτυξης της περιοχής. Η συνεχής υφαλμύρωση των παράκτιων υδάτων θα σήμαινε σταδιακή εγκατάλειψη της περιοχής τόσο τουριστικά, όσο και από αγροτικά. Μία τέτοια περιοχή δεν θα αποτελούσε πλέον πόλο έλξης γεγονός που θα οδηγούσε στη σταδιακή κοινωνική και οικονομική υποβάθμιση της. Ταυτόχρονα η συνεχής ξήρανση των καλλιεργειών θα οδηγούσε τους καλλιεργητές σε οικονομικό πλήγμα, ενώ θα αναγκαζόντουσαν να στραφούν στην αναζήτηση άλλου χώρου για ανάπτυξη των δραστηριοτήτων τους
- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.** Η διατήρηση του υδατικού ισοζυγίου σε μία περιοχή σημαίνει και περιβαλλοντική ισορροπία. Μια πιθανή ξήρανση ενός υδροφορέα θα σήμαινε επιπτώσεις τόσο στην πανίδα όσο και στη χλωρίδα. Η εγκατάλειψη της περιοχής σε συνδυασμό με τα υφάλμυρα ύδατα θα οδηγούσε στην ξήρανση της υπάρχουσας βλάστησης και στη διατάραξη της πανίδας.
- **Πολιτικές επιπτώσεις:** Η αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος σημαίνει και πολιτική ηρεμία της περιοχής. Στη αντίθετη περίπτωση ένα τέτοιο φαινόμενο θα προκαλούσε έντονες διαταραχές στην περιοχή, κινητοποιήσεις, πολιτικές εξάρσεις και έντονα η ζήτηση της εύρεσης κάποιας λύσης, γεγονός που θα προκαλούσε πρόβλημα στην ίδια την πολιτεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-Τεχνητός εμπλουτισμός

3.1	Γενικά – ορισμός	38
3.2	Σκοπός του τεχνητού εμπλουτισμού	39
3.3	Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα	40
3.4	Κατηγορίες και μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού	41
3.4.1	Άμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός.....	41
3.4.1.1	Μέθοδος λεκάνης (spreading basin)-επιφανειακή κατάκλιση	42
3.4.1.2	Μέθοδος της πλημμύρας επιφανειών.....	43
3.4.1.3	Μέθοδος φυσικών ανοιγμάτων (pit and shaft).....	44
3.4.1.4	Μέθοδος των αυλακιών (ditch).....	44
3.4.1.5	Μέθοδος με φρεάτια εμπλουτισμού (με έγχυση).....	45
3.4.2	Έμμεσος Τεχνητός Εμπλουτισμός.....	48
3.4.2.1	Μέθοδος διευθέτησης υδρορεύματος.....	48
3.4.2.2	Μέθοδος των Συνθετικών (Ενωτικών Φρεατίων)	49
3.4.2.3	Μέθοδος των Πηγαδιών για εμπλουτισμό.....	49
3.5	Γενικές προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου	51
3.6	Επιπτώσεις τεχνικού εμπλουτισμού	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

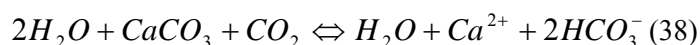
4.1 Γενικά για τους καρστικούς υδροφορείς

Σε πολλές χώρες της Μεσογείου υπάρχουν πολλοί καρστικοί υδροφορείς, των οποίων η εκμετάλλευσή δεν είναι πλήρης με αποτέλεσμα να προτιμάται η αξιοποίηση των επιφανειακών υδάτων. Παρ όλη την πολυπλοκότητα των καρστικών υδροφορέων και τις άγνωστες παραμέτρους που τους χαρακτηρίζουν, οι καρστικοί υδροφορείς είναι οι πιο κατάλληλοι για εκμετάλλευση.

Καρστικά χαρακτηριστικά εμφανίζουν κυρίως οι ανθρακικοί σχηματισμοί όπως οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες οι οποίοι είναι γνήσια καρστικά πετρώματα. Υπάρχουν όμως κι άλλα πετρώματα όπως ο γύψος και ο ανυδρίτης οι οποίοι αν και έχουν διαφορετική χημική σύσταση, όταν βρεθούν κάτω από τις κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες αποκτούν καρστικό χαρακτήρα. Πολλά πετρώματα ανθρακικής σύστασης καρστικοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των αιώνων. Γενικά τα καρστικά πετρώματα θεωρούνται τα πιο διαδεδομένα μαζί με τις αλλουβιακές αποθέσεις δεδομένου ότι καταλαμβάνουν το 7-10% των πετρωμάτων του πλανήτη μας. Δυστυχώς όμως τα χαρακτηριστικά των καρστικών σχηματισμών και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αναπτύχθηκαν δεν τους καθιστούν πάντα εκμεταλλεύσιμους. [8]

4.1.1 Η προέλευση των καρστικών σχηματισμών.

Οι καρστικοί σχηματισμοί είναι αποτέλεσμα της διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται καρστικοποίηση. Η διάλυση του άνθρακα πραγματοποιείται επειδή το νερό είναι όξινο όταν περιέχει διαλυμένο CO₂ και το φαινόμενο που λαμβάνει χώρα περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση[8]:



Ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τις διαδικασίες καρστικοποίησης θεωρείται το κλίμα αφού η συγκέντρωση του διαλυμένου CO₂ καθορίζεται από τη θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση. Μέχρι πρόσφατα το CO₂ ήταν άφθονο στο υπέδαφος όπου παραγόταν είτε από βιολογική δραστηριότητα, είτε υπήρχε σε πολύ μεγάλο βάθος λόγω γεωλογικών διαδικασιών. Στην πραγματικότητα η διάλυση των ανθρακικών σχηματισμών πραγματοποιείται μόνο όταν υπάρχει υπόγεια ροή η οποία παρασύρει τα προϊόντα της διάλυσης δημιουργώντας υπόγεια κενά. Τα κενά αυτά δημιουργούν ένα δίκτυο, μία δομή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

στην ακόρεστη ζώνη μέσα στην οποία αναπτύσσονται συνθήκες ροής κλειστών αγωγών κάτω από συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η υπόγεια ροή να καθορίζει τη υδρογεωλογική δομή του καρστικού μέσου, το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλει τις συνθήκες ροής. Γενικά καρστικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται μόνο όταν υπάρχουν οι παρακάτω συνθήκες[8]:

- Η δυνατότητα διάλυσης του ανθρακικού σχηματισμού όπως για παράδειγμα η ύπαρξη ενός διαλυτή.
- Η ύπαρξη υπόγειας ροής λόγω υδραυλικής κλίσης.

Οι συνθήκες αυτές καθορίστηκαν ως το ενδεχόμενο για καρστική ανάπτυξη «potential for Karstification» και καθορίζει τη ροή ενός διαλυτή δια μέσω κάποιου σχηματισμού. Το ενδεχόμενο αυτό επηρεάζεται πολύ έντονα από τις βροχοπτώσεις, αυξάνεται με την επιφανειακή απορροή των υδάτων, την περιεκτικότητα σε διαλυμένο CO₂ στο έδαφος και την υδραυλική κλίση, η οποία δημιουργείται από τη διαφορά στο υψόμετρο μεταξύ της περιοχής επαναφόρτισης και την περιοχή εκτόνωσης. Ως περιοχή εκτόνωσης θεωρείται η βάση δηλαδή το μέρος όπου η ροή εκτονώνεται, το οποίο μπορεί να είναι κάποια κοιλάδα είτε κάποιο αδιαπέρατο σημείο του ανθρακικού σχηματισμού. Συνήθως τα καρστικά πετρώματα εκτείνονται κάτω από την περιοχή εκτόνωσης, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται καρστικά χαρακτηριστικά κάτω από το βάθος της.

Οι καρστικοί σχηματισμοί αναπτύσσονται γρήγορα σε σχέση με τους υπόλοιπους γεωλογικούς σχηματισμούς. Γενικά απαιτούνται χιλιάδες χρόνια για τη δημιουργία ενός καρστικού σχηματισμού, γεγονός που έχει τις εξής συνέπειες[8]:

- Οι ανθρακικοί υδροφορείς να αποτελούν μία διπολική δομή, να αποτελούνται δηλαδή από ένα μέρος το οποίο δεν έχει καρστικοποιηθεί, και από ένα δεύτερο το οποίο έχει υποστεί καρστικοποίηση. Μεταξύ αυτών των δύο τμημάτων υπάρχουν όλα τα στάδια της καρστικοποίησης.
- Τη μεγάλη ευαισθησία της καρστικής δομής στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Μάλιστα αυτή είναι και η αιτία ύπαρξης πολλών διαφορετικών καρστικών δομών στον κόσμο.

4.1.2 Η περιοχή εκτόνωσης

Εκτός από τις περιβαλλοντικές αλλαγές και οποιαδήποτε αλλαγή που συντελείται στην περιοχή εκτόνωσης έχει σημαντικές υδρογεωλογικές επιπτώσεις. Η πτώση στάθμης της περιοχής εκτόνωσης λόγω κάποιου τεκτονικού ρήγματος ή κάποιας θαλάσσιας αναταραχής μπορεί να δημιουργήσει ένα καρστικό πέτρωμα με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η περιοχή εμπλουτισμού παραμένει λειτουργική όπως πριν την αλλαγή ενώ τα χαρακτηριστικά που θα αποκτούσε ο καρστικός σχηματισμός στην περιοχή εκτόνωσης αλλοιώνονται. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί στην περίπτωση πτώσης στάθμης της περιοχής εκτόνωσης να σχηματίζονται σπηλιές, μέσα στις οποίες εγκλωβίζεται το υπόγειο νερό και δεν προλαβαίνει να εκτονωθεί. [8]

Αντίθετα όταν η περιοχή εκτόνωσης ανυψώνεται, λόγω κάποιας κατάρρευσης του εδάφους ή θαλάσσιας διαταραχής, τότε τα σημεία στα οποία γίνεται η εκτόνωση γεμίζουν με ιζήματα ή μπλοκάρονται από κάποιο μέτωπο νερού, με αποτέλεσμα το χαμηλότερο τμήμα της καρστικής δομής να πλημμυρίζει και να μετατρέπεται σε μη λειτουργικό.[8]

4.2 Χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων

Οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ετερογένεια ενώ εντύπωση προκαλεί το γεγονός των μεγάλων διαφορών που παρουσιάζουν με το πέτρωμα από το οποίο προέρχονται. Αν και παλιότερα επικρατούσε η αντίληψη ότι οι καρστικές διαδικασίες χαρακτηρίζονταν από άναρχη μορφή, αργότερα αναιρέθηκε. Έχει πλέον αποδειχθεί ότι στα καρστικά εδάφη η ετερογένεια οργανώνεται σταδιακά και ιεραρχείται με τον ίδιο τρόπο όπως συμβαίνει στις αλλουβιακές αποθέσεις, δηλαδή από την επιφάνεια προς τα κάτω. Χαρακτηριστικά του αρχικού πετρώματος εντοπίζονται στα καρστικά εδάφη όπως είναι κάποιες ασυνέχειες και το πορώδες. Τα εδάφη αυτά εμφανίζουν πολύ έντονες ρηγματώσεις οι οποίες έχουν πλάτος πολλών μέτρων και μήκος πολλών χιλιομέτρων. Σε αυτές τις ρηγματώσεις οι συνθήκες ροής μοιάζουν να είναι ίδιες με αυτές των επιφανειακών ποταμών με ελεύθερη επιφάνεια ροής, υψηλή ταχύτητα και υψηλό ρυθμό. Κατά τη διάρκεια των υγρών εποχών είναι δυνατόν να παρατηρηθούν και συνθήκες περιορισμένης ροής. Έχει αποδειχθεί ότι το δίκτυο των ρωγμών καθορίζεται από τις δύο παρακάτω συνθήκες[8]:

1. Τον τύπο του πορώδους και τη δομή του εδάφους.
2. Τον τύπο του εμπλουτισμού του εδάφους.

Βασικά δύο ακόμα συνθήκες μπορούν να ληφθούν υπόψη και αυτές είναι[8]:

3. Η σημασία της υδραυλικής κλίσης δηλαδή η υψομετρική διαφορά μεταξύ της περιοχής εμπλουτισμού και της περιοχής εκτόνωσης.
4. Η σχέση μεταξύ της υδραυλικής κλίσης και των μέσων απορροής.

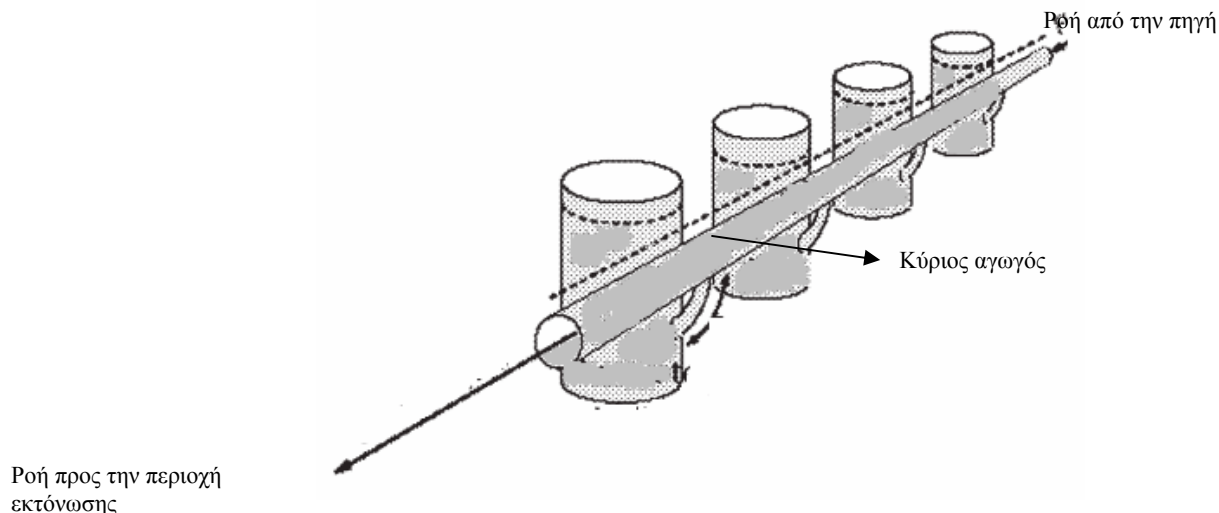
Οι δύο πρώτες συνθήκες καθορίζουν το πλέγμα των ασυνεχειών σε τοπική κλίμακα ενώ οι δύο τελευταίες σε μία ευρύτερη περιοχή. Με τον όρο μέσα απορροής εννοούνται οι ασυνέχειες ή οι ρωγμές μέσω των οποίων πραγματοποιείται η υπόγεια ροή. Όταν η κύρια κατεύθυνση των μέσων αυτών ταυτίζεται με αυτή της υδραυλικής κλίσης, αναπτύσσεται ένα γραμμικό σύστημα ροής το οποίο έχει μεγαλύτερο μήκος παρά πλάτος. Αντίθετα όταν οι δύο κατευθύνσεις είναι κάθετες μεταξύ τους, το σύστημα ροής που αναπτύσσεται είναι πολύπλοκο και στις τρεις διευθύνσεις.[8]

Στην κορεσμένη ζώνη το καρστικό δίκτυο δημιουργεί τοπικά μία πολύ υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Ουσιαστικά λειτουργεί ως ένα σύστημα κλειστών σωληνώσεων μέσα από το οποίο ρέει αποθηκευμένο νερό της κορεσμένης ζώνης και το οποίο καταλήγει στην ακόρεστη. Στην περίπτωση των καρστικών εδαφών είναι πολύ δύσκολο να εξεταστεί η λειτουργία της αποθήκευσης. Η αποθήκευση σε ένα πορώδες μέσο είναι γνωστό ότι υλοποιείται μέσω των κενών και συνδέεται με τις γεωλογικές και τις υδραυλικές συνθήκες της περιοχής, γεγονός που αμφισβητείται πολύ έντονα στην περίπτωση των καρστικών εδαφών. Η αποθήκευση στα καρστικά εδάφη φαίνεται να είναι μία λειτουργία ανεξάρτητη από την απορροή. Στην περίπτωση των καρστικών έχουν προταθεί τρία μοντέλα οργάνωσης της υπόγειας ροής στη κορεσμένη ζώνη. [8]

- Το πρώτο που υιοθετήθηκε από τον Drogue το 1974 θεωρεί ότι το υπόγειο νερό αποθηκεύεται σε κενά του υπεδάφους που λειτουργούν ως σωλήνες για τη ροή του. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή η κορεσμένη ζώνη είναι υδραυλικά συνεχής με σχετικά χαμηλή διαπερατότητα. Συνεπώς ο καρστικός υδροφορέας μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μέσο το οποίο αποτελείται από δύο τμήματα, τη κορεσμένη ζώνη και τις σωληνώσεις- ασυνέχειες που τη διέπουν.
- Στο δεύτερο μοντέλο θεωρείται ότι το νερό αποθηκεύεται μεταξύ των καρστικών κενών τα οποία αναπτύσσονται γύρω από τις εδαφικές ασυνέχειες. Δεδομένου ότι υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά διαπερατότητας μεταξύ του κυρίου εδάφους και των ασυνεχειών είναι αδύνατη η αποθήκευση ύδατος στο κύριο έδαφος. Συνεπώς στην περίπτωση αυτή η κορεσμένη ζώνη θεωρείται υδραυλικά ασυνεχής. Μάλιστα στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σχηματικά απεικόνιση της μεθόδου, σύμφωνα με την

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

οποία η καρστική κορεσμένη ζώνη αποτελείται από ένα σύστημα επικοινωνούντων σωληνώσεων. Σύμφωνα πάντα με το μοντέλο αυτό, η κορεσμένη ζώνη εμφανίζεται υδραυλικά συνεχής όταν ο κύριος αγωγός αναπτύσσεται κάτω από το επίπεδο εκτόνωσης.



Σχήμα 4.1 Το σύστημα των επικοινωνούντων σωληνώσεων Πηγή[8]

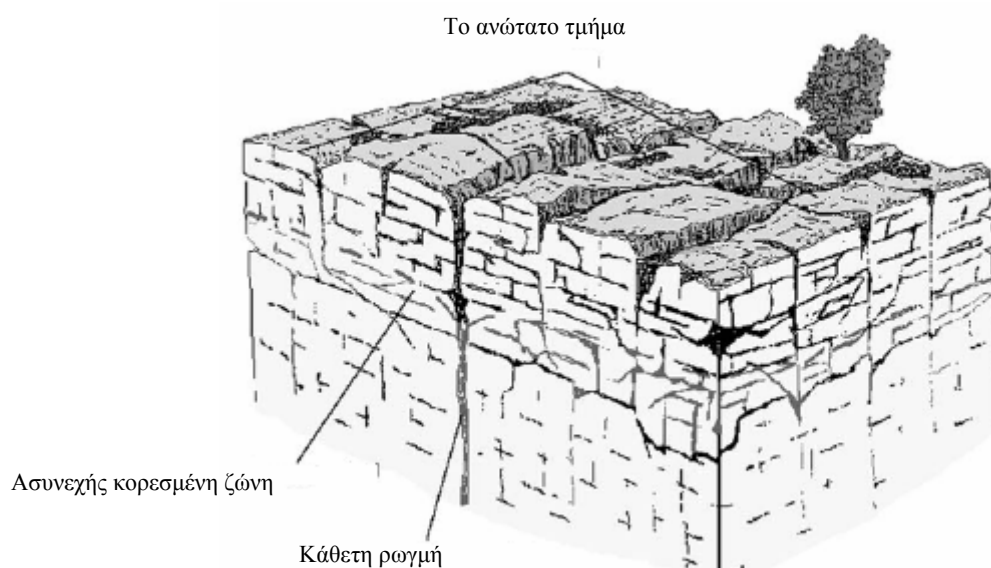
- Στο τρίτο μοντέλο γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχει αποθήκευση νερού στην κορεσμένη ζώνη. Το καρστικό δίκτυο αντλεί νερό από την ακόρεστη ζώνη. Η ιδιαίτερα υψηλή ετερογένεια στη ζώνη διήθησης λειτουργεί ως εμπόδιο για εμπλουτισμό. Στο μοντέλο αυτό πολύ σπουδαίο ρόλο στον εμπλουτισμό παίζει το επικαρστικό μέρος με το κορεσμένο μέρος του. Ως επικαρστικό μέρος εννοείται το ανώτατο μέρος του καρστικού υδροφορέα.

Είναι φανερό ότι ένα από αυτά τα μοντέλα μπορεί να γενικευτεί σε οποιονδήποτε καρστικό υδροφορέα. Η χρήση οποιαδήποτε μοντέλου εξαρτάται από τη δομή του εδάφους και τη γεωλογική ιστορία του σχηματισμού. Έτσι για παράδειγμα, η αποθήκευση σε ένα καρστικό έδαφος το οποίο αναπτύσσεται σε ένα καλά κρυσταλλοποιημένο Παλαιοζωικό άνθρακα στον ευρωπαϊκό χώρο δεν μπορεί να είναι επαρκής εξαιτίας της μικρής διαπερατότητας του εδάφους. Αντίθετα η αποθήκευση σε ένα καρστικό υδροφορέα ο οποίος αναπτύσσεται σε ένα κοραλιακό άνθρακα είναι αρκετά υψηλή λόγω της υψηλής διαπερατότητας του εδάφους.

Η ζώνη διήθησης και το επικαρστικό τμήμα δίνουν κάποια ιδιαίτερα υδρολογικά χαρακτηριστικά στους καρστικούς υδροφορείς. Το επικαρστικό τμήμα αντιμετωπίζεται ως

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

η επιδερμίδα του υδροφορέα, πρόκειται δηλαδή για μία ζώνη ανταλλαγής μεταξύ της βιο-ατμόσφαιρας και του ίδιου του σχηματισμού. Το τμήμα αυτό έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει νερό τοπικά και εποχιακά σε μία κορεσμένη ζώνη. Στη ζώνη αυτή, παράγεται CO_2 το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται διαλυμένο σε ένα μίγμα που περιέχει αέρα και νερό, και καταλήγει στην κορεσμένη ζώνη και στη ζώνη διήθησης. Ο εμπλουτισμός πραγματοποιείται είτε απευθείας μέσω της ζώνης διήθησης από σημεία που διασχίζουν το επικαρστικό μέρος, όπως ρηχές τρύπες είτε μέσω του επικαρστικού τμήματος. Το κορεσμένο κομμάτι του επικαρστικού τμήματος καθυστερεί τη διήθηση και ουσιαστικά ο ρόλος του περιορίζεται στην κάλυψη των αναγκών του εδάφους και της εξατμισοδιαπνοής των φυτών. Μάλιστα κατά τη διάρκεια των βροχερών περιόδων εκτονώνεται μέσω των κάθετων ρωγμών. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι δυνατόν κάθε υδροφορέας να έχει διαφορετική ροή, γεγονός που οφείλεται στα διαφορετικά χημικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Σχηματική απεικόνιση του επικαρστικού τμήματος με τα χαρακτηριστικά του μπορούμε να δούμε παρακάτω. [8]



Σχήμα 4.2 Το επικαρστικό τμήμα Πηγή [8]

4.2.1 Συνέπειες των καρστικών χαρακτηριστικών

Τα κενά ενός καρστικού εδάφους παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ετερογένεια σε σχέση με οποιονδήποτε άλλον υδροφορέα. Για αυτό τα κενά των καρστικών υδροφορέων ανάγονται σε ένα αντιπροσωπευτικό στοιχειώδες όγκο 'representative elementary volume' πράγμα που δεν γίνεται για άλλο υδροφορέα. Τα καρστικά εδάφη παρουσιάζουν και μία

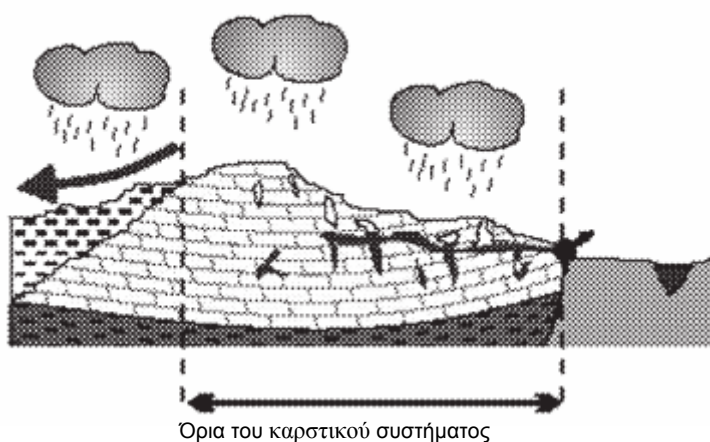
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

άλλη ιδιαιτερότητα, τις πολλές ρηγματώσεις τους, οι οποίες δημιουργούν και ένα είδος πρόσθετης ετερογένειας. Για να υπολογιστεί αυτή η ετερογένεια, οι ρωγμές αντιμετωπίζονται ως σύνολο, το οποίο περιλαμβάνει όλο το σύστημα της απορροής, από την πηγή εμπλουτισμού μέχρι και το σημείο εκτόνωσης. Όλο αυτό το σύστημα ονομάζεται καρστικό και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε υδρολογική μελέτη.

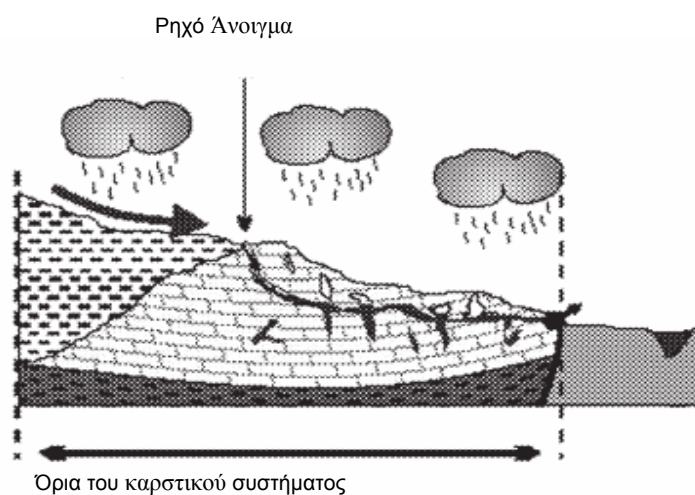
Τις περισσότερες φορές η υδραυλική ετερογένεια που προκαλείται από ρωγμές δεν μπορεί να παρατηρηθεί από κάποιον χάρτη. Μάλιστα η πιθανότητα ένα πηγάδι να διασχίζει μία ρωγμή είναι γενικά τόσο χαμηλή ώστε τα καρστικά εδάφη εμφανίζονται ως συνεχή, χωρίς κάποια εμφανή τοπική επιρροή στο σύστημα απορροής. Αυτό είναι ιδιαίτερα γνωστό σε μη καρστικούς υδροφορείς όταν κατά τη διάρκεια κάποιων τεστ ανιχνεύσεως προκύπτουν συνθήκες ροής κλειστών σωληνώσεων και όταν εργασίες εκσκαφής αποκαλύπτουν την ύπαρξη μεγάλων κοιλοτήτων. [8]

Ένα καρστικό σύστημα είναι παρόμοιο με μία παραποτάμια περιοχή με συγκρίσιμα μεγέθη όπως το μήκος, το περίγραμμα και οι οριακές συνθήκες. Το μήκος και το περίγραμμα καθορίζονται από τη γεωλογία και τη γεωμορφολογία, ενώ γενικότερα δεν μπορούν να καθοριστούν άμεσα από τους γεωλογικούς χάρτες και από τους χάρτες με τις στάθμες του νερού.

Μεταξύ των οριακών συνθηκών, ο τύπος της επαναφόρτισης είναι η σημαντικότερη παράμετρος. Σημειακή και συγκεντρωμένη επαναφόρτιση είναι δυνατόν να μην πραγματοποιηθεί από επιφανειακούς ποταμούς μέσω ρηχών ανοιγμάτων. Έτσι σύμφωνα με την ανάλυση συστήματος ένα καρστικό σύστημα μπορεί να είναι δυαδικό ή μοναδιαίο (binary or unary). Στο δυαδικό σύστημα υπάρχει ένα μη καρστικό τμήμα το οποίο προσφέρει στον εμπλουτισμό του υδροφορέα, ενώ κάτι τέτοιο δεν υπάρχει στο μοναδιαίο. Μάλιστα στο δυαδικό σύστημα ο καρστικός υδροφορέας θεωρείται τμήμα του καρστικού τμήματος. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το καρστικό τμήμα εξαρτάται όχι μόνο από το είδος της ρωγμής που το διασχίζει και τη λειτουργία του υδροφορέα αλλά και από το βαθμό εκμετάλλευσής του και προστασίας του. Παρακάτω μπορούμε να δούμε σχηματικά το μοναδιαίο και το δυαδικό σύστημα. [8]



Σχήμα 4.3 Το μοναδιαίο καρστικό σύστημα Πηγή [8]



Σχήμα 4.4 Το δυναμικό καρστικό σύστημα Πηγή [8]

4.3 Προσέγγιση του καρστικού συστήματος

4.3.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Οι περισσότερες υδρογεωλογικές μελέτες βασίζονται στα κλασικά εργαλεία της υδρογεωλογίας τα οποία είναι οι πιεζομετρικές μετρήσεις από φρεάτια παρατηρήσεων, οι μετρήσεις αντλήσεων, στοιχεία από χάρτες και από διάφορα υδραυλικά τεστ. Πολλοί υδρογεωλόγοι θεωρούν ότι τα πηγάδια παρατήρησης και τα τεστ αντλήσεων είναι πολύ σημαντικές παρατηρήσεις για τη λειτουργία ολόκληρου του υδροφορέα, ενώ αντίθετα άλλοι θεωρούν αυτές τις πληροφορίες καθαρά τοπικές και συχνά να μην έχουν καμία

σχέση με το υπόλοιπο σύστημα. Αυτή η αντίληψη υιοθετείται ιδιαίτερα για τους καρστικούς υδροφορείς, στους οποίους η ύπαρξη ρωγμών ενδέχεται να μην ανιχνευθεί. Είναι γεγονός ότι στους καρστικούς υδροφορείς η συμβατική υδρογεωλογία δεν είναι λειτουργική. [8]

4.3.2 Προσέγγιση της δομής του συστήματος

Η κύρια δυσκολία του καρστικού δικτύου έγκειται από το ίδιο το δίκτυο. Το πρόβλημα για να λυθεί θα πρέπει πρώτα να αποσαφηνιστεί η ύπαρξη του δικτύου, η τοποθεσία του και ποιο ρόλο παίζει στη λειτουργία όλου του συστήματος. Στην κλασική υδρογεωλογία η πιο σωστή προσέγγιση είναι η λεπτομερής περιγραφή του γεωλογικού υποστρώματος και η εύρεση της διανομής των ρωγμών. Με βάση την κοινή υδρολογική ανάλυση η ανάπτυξη του καρστικού δικτύου ακολουθεί την κατανομή των ρωγμών.

Η προσέγγιση αυτή αναπτύχθηκε στη Γαλλία το 1970 και βοήθησε στη μοντελοποίηση της κλασικής υδρολογίας. Το 1986 αποδείχθηκε ότι η λογική αυτή δεν ήταν ορθή, γιατί η υπόγεια ροή επιλέγει ουσιαστικά την πορεία της με βάση την επικοινωνία των ασυνεχειών και την υδραυλική κλίση μεταξύ περιοχής εμπλουτισμού και περιοχής εκτόνωσης. Οι υπαρκτές περιπτώσεις απέδειξαν τη δυσκολία να εξηγηθεί η καρστική δομή, το ρόλο της στο γεωλογικό υπόστρωμα και στη διανομή των ασυνεχειών. [8]

4.3.3 Προσέγγιση της λειτουργίας του συστήματος

Στα καρστικά συστήματα, ένα τεστ ανίχνευσης δίδει πολύ σημαντικότερες πληροφορίες από ότι η μελέτη χιλίων φρεατίων. Αυτό σημαίνει ότι η πιο καλή προσέγγιση σε ένα καρστικό σύστημα είναι η εύρεση του δικτύου ρωγμών με όλα τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Μάλιστα επειδή το καρστικό σύστημα μοιάζει πολύ με ένα παραποτάμιο σύστημα, η καρστική υδρολογία πρέπει να αντιμετωπιστεί με τον ίδιο τρόπο.

Η προσέγγιση αυτή αναπτύχθηκε πολύ κατά τη δεκαετία του 1970 κατά την οποία προτάθηκε ότι η ανάλυση ενός καρστικού συστήματος το οποίο λειτουργεί υπό υδροδυναμική κατάσταση πρέπει να αναζητηθεί μέσω των φυσικών χαρακτηριστικών του. Τέτοια φυσικά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι οι υδρόβια μικροπανίδα, κάποια ανόργανα διαλυμένα στερεά ακόμα και κάποια ισότοπα. Αυτές οι μέθοδοι βρίσκουν πλέον ευρεία χρήση στην Ευρώπη. [8]

4.4 Μεθοδολογία της ανάλυσης

Η καρστική υδρολογία έχει πλέον στη διάθεσή της μεθόδους οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τη λειτουργία και τη δομή των καρστικών υδροφορέων. Αυτές οι μέθοδοι είναι[8]:

- Χαρακτηρισμός της δομής τους ύστερα από γεωλογικές και μορφολογικές αναλύσεις.
- Απομόνωση του καρστικού συστήματος με βάση τα γεωλογικά δεδομένα, τα τεστ ανίχνευσης και το ισοζύγιο του νερού.
- Χαρακτηρισμός της μεμονωμένης λειτουργίας τους χρησιμοποιώντας[8]:
 - Υδροδυναμικές μεθόδους: Ανάλυση ετησίων υδρολογικών δεδομένων και ανάπτυξη χρονικών σειρών.
 - Υδρογεωχημικές και ισότοπες μεθόδους για την ανάλυση φυσικών χαρακτηριστικών.
- Χαρακτηρισμός της τοπικής λειτουργίας τους χρησιμοποιώντας[8]:
 - Τεχνητά τεστ ανίχνευσης
 - Τεστ άντλησης

Ένα καρστικό σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί από τη δομή και τη λειτουργία του, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στους υδρογεωλόγους να εκτιμήσουν το δίκτυο των ρωγμών του και τη δυνατότητα του αποθήκευσης νερού. Ακόμα και αν δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλες οι παραπάνω μέθοδοι, δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν, αν στόχος είναι τα ορθά συμπεράσματα για τους καρστικούς υδροφορείς. Είναι απαραίτητο να συγκεντρωθούν στοιχεία κατά την περίοδο του εμπλουτισμού αλλά και κατά την περίοδο χαμηλής στάθμης υδάτων, ώστε να υπάρχουν πληροφορίες για τη διαδικασία διήθησης και επαναφόρτισης τόσο κατά την ξηρή όσο και κατά τη βροχερή περίοδο. Σε πολλές χώρες οι κύριες περιοχές εκτόνωσης παρακολουθούνται, δυστυχώς όμως όχι τόσο συχνά όσο θα έπρεπε ώστε να υπάρχουν ορθά συμπεράσματα για τη διακύμανση της ροής. Επίσης κάποιες τοπικές πληροφορίες όπως η στάθμη του νερού σε ένα πηγάδι ή σε μία σπηλιά, η χημική σύνθεση του νερού και κάποια αποτελέσματα ιχνηθετών πρέπει να συγκρίνονται και ανάγονται στο όλο σύστημα. [8]

Είναι φανερό ότι δεν υπάρχει μία υδρογεωλογική μέθοδο η οποία να δίνει αμέσως απαντήσεις. Αντίθετα η κατανόηση και η πρακτική έρευνα ενός καρστικού συστήματος απαιτούν πολύ χρόνο και πολλές ειδικότητες.

4.5 Μοντελοποίηση του καρστικού συστήματος

Όλα τα παραπάνω αποτελούν το πρώτο βήμα της υδρογεωλογικής μελέτης ενός καρστικού συστήματος κατά το οποίο απομονώνεται το σύστημα και χαρακτηρίζεται ως προς τη δομή και τη λειτουργία του. Σε δεύτερο στάδιο πρέπει να βρεθεί ένα ιδεατό μοντέλο το οποίο να περιλαμβάνει όλη τη γνώση για το καρστικό σύστημα και τη σχέση του με το γεωλογικό και το ανθρώπινο περιβάλλον. Αυτό το μοντέλο πρέπει να περιγράφει όλους τους τύπους επαναφόρτισης και λειτουργίας της κορεσμένης ζώνης. Για να μπορέσει όμως ένα μοντέλο να δώσει αριθμητικά αποτελέσματα, θα πρέπει να του έχουν εισαχθεί ποσοτικοποιημένα τα κατάλληλα δεδομένα. [8]

Τέτοιο δεδομένο αποτελεί κυρίως η ροή η οποία καταγράφεται σε ποτάμια και σε πηγές χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα χημικά μέσα, ανάλογα με το είδος ροής. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να εφαρμοσθεί γιατί οι βασικές υποθέσεις δεν είναι ίδιες σε όλους τους καρστικούς υδροφορείς. Απαραίτητη προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου είναι η γραμμικότητα του συστήματος και οι μόνιμες συνθήκες ροής, αν και το 2001 προτάθηκε μία εξέλιξη της μεθόδου κατά την οποία οι παραπάνω συνθήκες δεν ήταν απαραίτητες. Η παραπάνω ανάλυση γίνεται με βάση την ετήσια υδρογράφηση από την οποία προκύπτει ο ρυθμός απόκρισης χρησιμοποιώντας σειριακές τεχνικές. Στη συνέχεια ο ρυθμός απόκρισης αποκωδικοποιείται σε διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία εντοπίζεται με τη χρήση κάποιου ιχνηθέτη. Πρόκειται για μία πολύ καλή μέθοδο η οποία εφαρμόζεται ευρέως αλλά απαιτεί την ύπαρξη πολλών δεδομένων. [8]

Τα κλασικά μοντέλα της υδρολογίας χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων, τα οποία ήταν να μην απλά στη χρήση τους αλλά δεν έδιναν δεσυστά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται πλέον αναλυτικά μοντέλα με τη δυνατότητα όμως προσομοίωσης διαφορετικών τιμών πορώδους, ώστε να μπορεί να ληφθεί υπόψη και η ύπαρξη ρηγματώσεων και των καρστικοποιημένων περιοχών. [8]

4.6 Μέθοδοι εκμετάλλευσης και προστασίας των καρστικών υδροφορέων

Το τελευταίο βήμα στη μελέτη των καρστικών υδροφορέων αφορά την εφαρμογή σχεδίων εκμετάλλευσης και προστασίας τους. Όλα τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν για τους καρστικούς υδροφορείς είναι πολύ δύσκολο να μελετηθούν και ακόμα δυσκολότερο να συγκεντρωθούν. Δύο είναι τα κυριότερα προβλήματα που εντοπίζονται σε σχέση με τους καρστικούς υδροφορείς[8]:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

- Η επικινδυνότητα της άντλησής τους και
- Η υψηλή ευαισθησία τους στη ρύπανσή τους.

Έχει αποδειχθεί ότι οι καρστικοί υδροφορείς έχουν τη δυνατότητα για πολύ μεγάλο βαθμό εκμετάλλευσης τους. Έτσι παρά το μεγάλο βαθμό εποχιακής αποφόρτισης τους, μπορούν να εκμεταλλευθούν σύμφωνα με το ρυθμό ροής τους, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα υψηλότερο. Αυτή η εποχιακή εκμετάλλευση μπορεί να επιτευχθεί εξαιτίας δύο παραμέτρων[8]:

- Την υψηλή αποθηκευτική ικανότητα του υδροφορέα
- Τον ετήσιο εμπλουτισμό ο οποίος μπορεί κάποια περίοδο να υπερβαίνει το μέσο όρο.

Οι παραπάνω παράμετροι καθιστούν τους καρστικούς υδροφορείς τους πλέον κατάλληλους για μία καλή διαχείριση υπόγειων υδάτων. Το κύριο πρόβλημα παραμένει ο εντοπισμός της κατάλληλης θέσης για την διάνοιξη ενός πηγαδιού. Πρακτικά καμία γεωφυσική μέθοδο δεν είναι ικανή να εντοπίσει ένα ρήγμα το οποίο βρίσκεται σε βάθος άνω των 40-50 μέτρων. Η μόνη μέθοδος που έχει ανακαλυφθεί και χρησιμοποιείται ευρέως στη Γαλλία είναι η τοποθέτηση ηλεκτρομαγνητικής συσκευής η οποία τοποθετείται σε πιθανή θέση ρήγματος από κάποιον δύτη. Η μέθοδος είναι αρκετά ακριβής για να εντοπιστούν ρήγματα μέχρι και βάθους 300 μέτρων. [8]

Όμως το μεγάλο θέμα που παραμένει είναι η ευαισθησία των καρστικών υδροφορέων. Η ευαισθησία αυτή έχει πολύ μεγάλη σχέση με το μικρό χρόνο παραμονής του νερού εμπλουτισμού στον υδροφορέα. Έτσι τα υπόγεια νερά ανανεώνονται συνεχώς, με αποτέλεσμα τα αίτια κάποιας πιθανή ρύπανσης, δεν κρατούν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Ακόμα και η χρήση κάποιων ιχνηθετών δεν αλλοιώνει για μεγάλο διάστημα τα υπόγεια νερά τα οποία επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση πολύ σύντομα. Όσον αφορά στη ρύπανση των καρστικών υδροφορέων δε φαίνεται να υπάρχει κάποιο μόνιμο και συγκεντρωτικό πρόβλημα κυρίως λόγω του γρήγορου εμπλουτισμού τους. Η χρήση φυτοφαρμάκων ή επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων φαίνεται να μεταβάλλει πολύ γρήγορα την ποιότητα των νερών. Το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μεγάλη ευαισθησία τους σχετίζεται πολύ έντονα με τη δυνατότητα γρήγορου εμπλουτισμού τους και την ασυνεχή αποθήκευσή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Η σχηματική απεικόνιση της ευαισθησίας των καρστικών υδροφορέων αποτελεί μία πρόκληση της σύγχρονης υδρολογίας. Για την προσέγγιση της ευαισθησίας τους χρησιμοποιούνται πλέον δύο μέθοδοι οι οποίες βασίζονται σε πολυκριτηριακές αναλύσεις. Οι δύο αυτές μέθοδοι βασίζονται σε κριτήρια που έχουν σχέση με το επικαρστικό τμήμα, το προστατευτικό δηλαδή κομμάτι, και με χαρακτηριστικά όπως η διήθηση και η ανάπτυξη καρστικού δικτύου στο τμήμα αυτό. Η διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι η πρώτη μέθοδος εξετάζει αυτά τα κριτήρια πιο λεπτομερώς στο επικαρστικό τμήμα και λιγότερο στο υπόλοιπο μέρος, ενώ η δεύτερη κάνει μία πιο γενική περιγραφή του επικαρστικού τμήματος και αναλύει περισσότερο το υπόλοιπο κομμάτι. [8]

4.7 Ιδιαίτερα σημεία στη δομή και λειτουργία των καρστικών υδροφορέων

4.7.1 Προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων

Αν και η γνώση για τους καρστικούς υδροφορείς έχει βελτιωθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, η προσομοίωσή τους παραμένει μία δύσκολη διαδικασία. Είναι πλέον γνωστό ότι οι καρστικοί σχηματισμοί αναπτύσσουν ρωγμές ιεραρχικά, σε ένα πολύ οργανωμένο δίκτυο. Το ερώτημα όμως αν το δίκτυο των ρωγμών καθορίζει πλήρως την υπόγεια ροή ή αν καθορίζεται και εν μέρει από κάποια άλλα χαρακτηριστικά του εδάφους, παραμένει. [8]

Οι περισσότεροι καρστικοί υδροφορείς κατανέμονται σε φάσεις εξαιτίας της αλλαγής της βάσης τους. Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της βάσης τους αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης στην καρστική τους ζώνη. Σημαντικό όμως ρόλο στην αύξηση της αποθηκευτικής τους ικανότητας παίζει και η παράμετρος της διήθησης. Δεδομένου αυτού του φαινομένου, για την εξέταση ενός καρστικού υδροφορέα κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή ενός μοντέλου που να μπορεί να προσομοιώσει παραπάνω από δύο είδη πορώδους. Ανακαλύφθηκε όμως ότι υπάρχει και ένα άλλο μοντέλο το οποίο μπορεί να εξηγήσει αυτά τα δεδομένα με διαφορετικό τρόπο, θεωρώντας ιξώδης ροή μέσα στη ρωγμή. Αυτό το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει ένα ιξώδες στρώμα μεταξύ της ροής και του φρεατίου που το διασχίζει. Μία τέτοια προσομοίωση είναι πολύ προηγμένη και θα βοηθήσει σε μελλοντικές έρευνες. [8]

Στις περισσότερες περιπτώσεις η λειτουργία των υδροφορέων είναι μη γραμμική. Αυτή η μη γραμμικότητα συνδέεται πολλές φορές με τη λειτουργία του επικαρστικού τμήματος ή την ασυνέχεια των ρωγμών. Υπάρχει όμως και το ενδεχόμενο να συνδέεται και με αλλαγές που προκύπτουν στο καθεστώς της ροής. Έτσι μπορούμε να έχουμε τυρβώδη αντί

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

στρωτή ροή, τη μη εφαρμογή του νόμου του Darcy και γενικά ροή μέσω των ρωγμών και όχι μέσω του πορώδους μέσου. Όλα αυτά απαιτούν μελέτη βέβαια για να επιβεβαιωθούν.

Τα παραπάνω σημεία έχουν άμεση σχέση με την προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων. Για το λόγο αυτό έχουν γίνει διαφορετικές προσεγγίσεις στο θέμα αυτό και έχουν προταθεί διαφορετικά μοντέλα τα οποία προσπαθούν να προσομοιώσουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι έχουμε [8]:

- Μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία των καρστικών υδροφορέων
- Μοντέλα που προσομοιώνουν την καρστική δομή

Υπάρχουν βέβαια και άλλες προσεγγίσεις που είναι ακόμα υπό μελέτη. Όσον αφορά στην προσομοίωση της λειτουργίας των καρστικών υδροφορέων, αυτή προσομοιώνεται ως εξής[8]:

- Μία κατανεμημένη προσέγγιση του συστήματος, χρησιμοποιώντας μοντέλα με μαύρα και γκρι κουτιά για να προσομοιώσουν τις περιοχές εκτόνωσης, την κλιματική διακύμανση και τις επιπτώσεις της εκμετάλλευσης των υδροφορέων.
- Μία πιο ομαδοποιημένη προσέγγιση του συστήματος προσομοιώνοντας την τοπική συμπεριφορά των υδροφορέων.

Η μοντελοποίηση και στα δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η εγκυρότητα κάποιων υποθέσεων και να για να παρέχει εργαλεία για τη διαχείριση και αποθήκευση των υπόγειων υδάτων. Υπάρχουν κλασικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στους καρστικούς υδροφορείς και μάλιστα τα αποτελέσματά που προκύπτουν συμβαδίζουν με τις πραγματικές παρατηρήσεις και μετρήσεις.

Η καλύτερη προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων ξεκινάει από την προσομοίωση του δικτύου των ρωγμών. Προς το παρόν, τα υπάρχοντα μοντέλα μπορούν να προσομοιώσουν τη ροή και τη μεταφορά ύδατος σε μία ρωγμή αλλά δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα για ολόκληρο το δίκτυο. [8]

4.7.2 Πρακτικά προβλήματα των καρστικών υδροφορέων

Προς το παρόν ο υπολογισμός της αποθηκευτικής ικανότητας ενός καρστικού υδροφορέα δεν μπορεί να υπολογισθεί από κάποια ανεξάρτητη μέθοδο. Σε κάθε περίπτωση υπεισέρχεται και η μελέτη της ροής. Οι πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι θα πρέπει να υπάρχει μία υποτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας η οποία εξαρτάται από το σε ποιο σημείο του επιπέδου εκτόνωσης υπολογίζεται. Ο πιθανός όγκος αποθήκευσης θα πρέπει να γνωρίζεται τουλάχιστον προσεγγιστικά, για να μπορεί να προταθεί ένα σχέδιο εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων με άντληση. [8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Όσον αφορά στην άντληση των καρστικών υδροφορέων, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, λόγω των ρωγμών και των ασυνεχειών που εμφανίζουν. Πλέον, υπάρχουν γεωλογικές μέθοδοι όπως η γεωφυσική, οι οποίες βοηθούν στον εντοπισμό των κατάλληλων ζωνών για άντληση, με αποτέλεσμα η αντίληψη ότι οι καρστικοί υδροφορείς δεν είναι κατάλληλοι για άντληση να τείνει να εγκαταλειφθεί. Η άποψη αυτή ενισχύεται ακόμα περισσότερο δεδομένου ότι παρατηρείται η αύξηση της αποθηκευτικής τους ικανότητας. Μάλιστα η δημιουργία ρηχών ανοιγμάτων σε ποτάμια εντείνει αυτή την αύξηση. [8]

Πάντως για δύο τουλάχιστον δεκαετίες η ευαισθησία των καρστικών υδροφορέων και η δυσκολία υπολογισμού της αποθηκευτικής τους ικανότητας παραμένει μία πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Το καρστικό μέσο είναι αρκετά πολύπλοκο με αποτέλεσμα μέχρι πρόσφατα να θεωρείτο ότι κάθε καρστικός υδροφορέας ήταν και κάτι το μοναδικό. Αυτό θα σήμαινε ότι δεν μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους αλλά και ότι η εκμετάλλευσή τους είναι μάλλον αμφίβολη. Ευτυχώς από πειράματα προέκυψε ότι αυτή η αντίληψη όχι μόνο δεν ισχύει, αλλά ότι οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά τόσο στη δομή των ρωγμών τους όσο και στις συνθήκες ροής τους. Αυτό επιτρέπει την ανάπτυξη κοινών μεθόδων εξερεύνησης και εκμετάλλευσης. Όποια όμως γεωφυσική ή γεωλογική μέθοδο και αν χρησιμοποιηθεί, δεν μπορεί ποτέ να καθοριστεί πλήρως η λειτουργία ενός δικτύου ρωγμών οι οποίες λειτουργούν ως κλειστοί αγωγοί. Για το λόγο αυτό η προσομοίωση του υδροφορέα δεν μπορεί να γίνει με ένα απλό καταναμημένο μοντέλο (distributed model) αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολύ καλή προσέγγιση, ένα ψηφιακό καταναμημένο μοντέλο, αν και οι συνθήκες που επικρατούν στους καρστικούς υδροφορείς δεν συμβαδίζουν με τις βασικές υποθέσεις του μοντέλου. [8]

Η καλύτερη προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων μπορεί να επιτευχθεί με τα ομαδοποιημένα μοντέλα (lumped models) τα οποία είναι ιδιαίτερα εύχρηστα και απαιτούν λιγότερα δεδομένα. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσφέρουν μία καλή διαχείριση των υπόγειων υδάτων και χωρίς μάλιστα να γνωρίζουν ιδιαίτερα τη γεωμετρία και τις συνθήκες ροής τους. Αυτό θα ήταν άλλωστε αδύνατο, δεδομένου ότι στα καρστικά συστήματα οι συνθήκες αυτές μεταβάλλονται πολύ γρήγορα, σε λιγότερο μάλιστα από ένα υδρολογικό έτος. Αν και είναι πολύ δύσκολο να συλλεχθούν πληροφορίες για τη λειτουργία του καρστικού συστήματος και τις συνθήκες ροής του, μία πρώτη ένδειξη παρέχεται από το σημείο εκτόνωσης του υδροφορέα. Η παρατήρηση στο σημείο αυτό, μπορεί να δώσει πολλές πληροφορίες για το σύστημα των ρωγμών. [8]

4.8 Τεχνητός εμπλουτισμός σε καρστικά εδάφη

Για τον εμπλουτισμό των καρστικών υδροφορέων είναι απαραίτητη η γνώση των εξής [10]:

- Η ηλικία των καρστικών σχηματισμών. Ανάλογα με την ηλικία τους μεταβάλλεται και ο ρυθμός διήθησης τους και κατά συνέπεια και του εμπλουτισμού τους.
- Το στάδιο της καρστικοποίησης. Το φαινόμενο της καρστικοποίησης έχει κάποια ενδιάμεσα στάδια πριν το τελικό καρστικοποιημένο τμήμα. Το στάδιο αυτό πρέπει να γνωρίζεται σε μία μελέτη των υπόγειων υδάτων δεδομένου ότι το μέγεθος των ρωγμών ενός εδάφους επηρεάζει και το βαθμό εμπλουτισμού του.
- Το βάθος των καρστικών σχηματισμών. Οι καρστικοί σχηματισμοί μπορούν να κατασκευαστούν κάτω από το επίπεδο της γης αλλά και πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Η γνώση του βάθους τους είναι απαραίτητη γιατί αποτελεί μία παράμετρο κόστους.

Όσον αφορά στον ελληνικό χώρο, εκεί δεν συναντώνται μεμονωμένα καρστικά πετρώματα. Μάλιστα, φιλοξενούνται από ανθρακικού χαρακτήρα πετρώματα όπως ασβεστόλιθους, δολομίτες και μάρμαρο, γεγονός που δυσχεραίνει το φαινόμενο του εμπλουτισμού. Αν και στην Ελλάδα εντοπίζονται αδιαπέρατα πετρώματα σε μεγάλη έκταση κατά το 40% του συνόλου, είναι πολύ έντονη και η παρουσία νεοτεκτονικών ιζημάτων. Τα περισσότερα από αυτά τα νεοτεκτονικά ιζήματα έχουν αποθεθεί σε κοιλάδες και παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά για εμπλουτισμό. Για τον εντοπισμό των κατάλληλων θέσεων για τεχνητό εμπλουτισμό είναι απαραίτητη η γεωλογική μελέτη μιας περιοχής. Έτσι παρουσιάζεται παρακάτω μία πρώτη γεωλογική προσέγγιση των περιοχών της Ελλάδας που είναι κατάλληλες για τη μέθοδο αυτή. [10]

4.8.1 Νεοτεκτονική Δομή

Η δημιουργία του ελληνικού τόξου πραγματοποιήθηκε τη νεοτεκτονική περίοδο κατά την οποία υπήρχαν έντονες οριζόντιες κινήσεις της γης. Δημιουργήθηκαν πολλά μοντέλα τα οποία περιγράφουν το Ελληνικό Τόξο και σε ένα από αυτά (Μαριολάκος & Παπανικολάου 1981) η Ελληνική περιοχή χωρίζεται στις εξής περιοχές[10]:

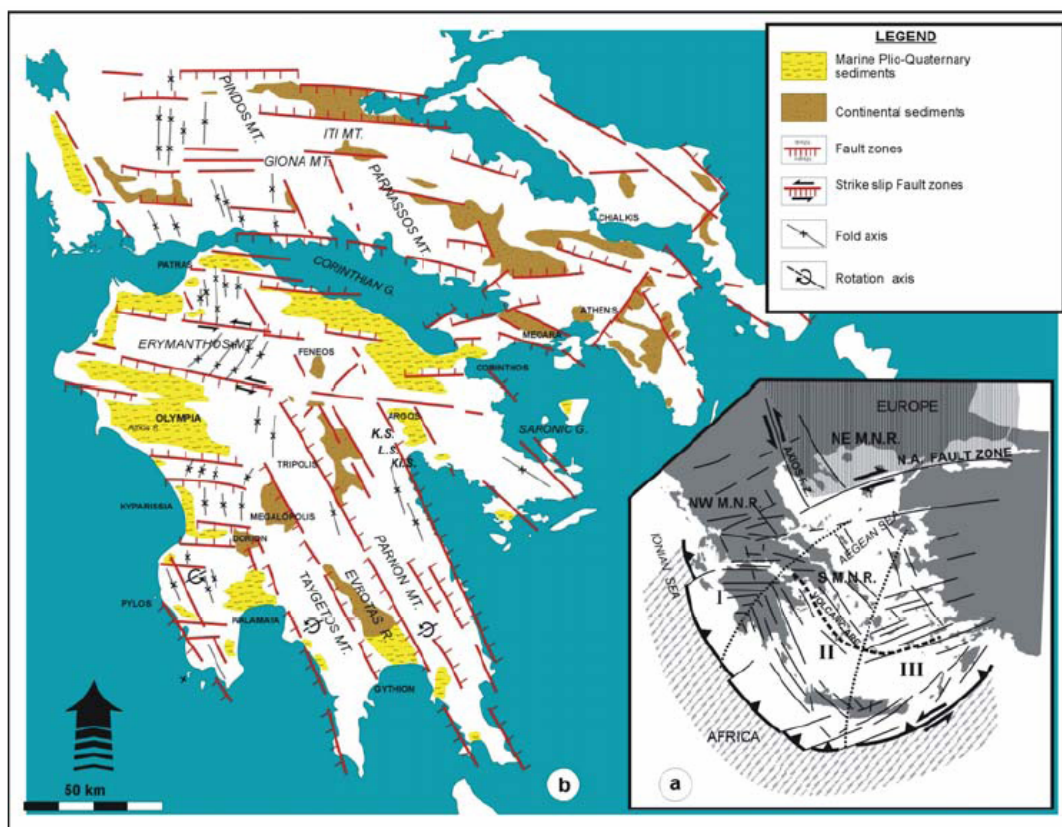
- Στην περιοχή από Ανατολικά και μέχρι τη ζώνη του Αξιού ποταμού.
- Στην περιοχή μεταξύ του Αξιού, της Ιόνιας θάλασσα και του Αμβρακικού κόλπου.
- Και τέλος στην περιοχή μεταξύ της ανατολής του Αμβρακικού κόλπου και νότια του νησιού Κρήτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Όσον αφορά στον τεχνητό εμπλουτισμό της Ελληνικής περιοχής πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα εξής χαρακτηριστικά[10]:

- Είναι τεκτονικά, σεισμικά και ηφαιστειακά ενεργή.
- Σε όλη την ελληνική περιοχή έχουν δημιουργηθεί ρήγματα κατά τη διάρκεια της νεοτεκτονικής περιόδου.
- Τα νεοτεκτονικά ρήγματα έχουν αποπροσανατολίσει και μεταφέρει τα παλαιότερα ρήγματα
- Τα νεοτεκτονικά ρήγματα έχουν επανειλημμένως δραστηριοποιηθεί.
- Έχει εμφανιστεί κατά τόπους δραστηριοποίηση παλαιότερων ρηγμάτων.
- Έχει παρουσιαστεί κάθετη κίνηση με φορά είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω.
- Ο ρυθμός κίνησης είναι περίπου 0,1-1 χιλιοστά το χρόνο. Έχει αποδειχθεί ότι οι ρυθμοί κίνησης μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του χρόνου, ενώ εξαρτώνται και από τη γεωλογική δομή της περιοχής.

Παρακάτω παρουσιάζεται το ελληνικό τόξο και οι νεοτεκτονικές περιοχές της Ελλάδας.



Σχήμα 4.5 Οι νεοτεκτονικές περιοχές και τον Ελληνικό τόξο. Πηγή [10]

Η γνώση του υδρογεωλογικού και του φυσικού περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται ο υδροφορέας προς εμπλουτισμό, είναι απαραίτητη. Οι νεοτεκτονικές περιοχές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

αντιπροσωπεύουν φυσικογεωγραφικά συστήματα τα οποία μπορούν να είναι κλειστά ή ανοικτά. Γενικά χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [10]:

- Υδρολογικά και γεωλογικά κλειστά συστήματα, όταν δεν είναι ούτε επιφανειακά ούτε υπόγεια. Θεωρητικά μία τέτοια περιοχή θα μπορούσε να είναι μία λίμνη.
- Υδρολογικά κλειστό σύστημα, χωρίς να διαφεύγει νερό εξωτερικά από τη λεκάνη, αλλά γεωλογικά ανοικτό σύστημα όταν το νερό διαφεύγει μέσω διαπερατών σχηματισμών του υπεδάφους.
- Υδρολογικά και γεωλογικά ανοικτό σύστημα όταν το νερό απορρέει και επιφανειακά και υπόγεια.
- Υδρολογικά ανοικτό σύστημα και γεωλογικά κλειστό σύστημα.

Αναμφισβήτητα η ταξινόμηση αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί ακριβώς στην πράξη. Γενικά έχει αποδειχθεί ότι οι καρστικοί υδροφορείς γύρω από νεοτεκτονικές περιοχές είναι ιδανικοί για εμπλουτισμό. Μάλιστα οι συνθήκες γίνονται ακόμη πιο ευνοϊκές όταν δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια. Ένα βασικό πλεονέκτημα των καρστικών υδροφορέων είναι ότι το ‘φράξιμο’ του υπερκείμενου στρώματος δεν είναι δεδομένο εξαιτίας της υψηλής υδραυλικής πίεσης και της υψηλής ταχύτητας της ροής. Αντίθετα ένα βασικό μειονέκτημα είναι ότι το νερό δεν φιλτράρεται φυσικά και ο κίνδυνος ρύπανσης του υδροφορέα είναι υψηλός. Γιαυτό το νερό προς διήθηση θα πρέπει να φιλτράρεται τεχνητά, ενώ θα πρέπει να παρακολουθείται πριν κατά και μετά τον εμπλουτισμό.

4.8.2 Βασικά Βήματα του Καρστικού Εμπλουτισμού.

Ο εμπλουτισμός των καρστικών υδροφορέων αποτελεί μία ξεχωριστή μεθοδολογία. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν κατά τη μεθοδολογία αυτή είναι τα εξής[10]:

- Η συγκέντρωση των απαιτούμενων δεδομένων.
- Ο εντοπισμός της κατάλληλης μέθοδος εμπλουτισμού που θα εφαρμοσθεί.
- Η παρακολούθηση του υδροφορέα κατά τον εμπλουτισμό, γεγονός που δημιουργεί κάποιους πρόσθετους προβληματισμούς. Αυτοί οι προβληματισμοί είναι[10]:
 - Η εύρεση των σωστών θέσεων τοποθέτησης φρεατίων παρακολούθησης, με βάση τα γεωλογικά και υδραυλικά δεδομένα της περιοχής.
 - Η εγκατάσταση των φρεατίων στις επιλεγμένες θέσεις. Η ενέργεια αυτή περιλαμβάνει τη μεταφορά και την επεξεργασία των μετρήσεων.
- Η ταξινόμηση ως προς την καταλληλότητα για εμπλουτισμό των εν δυνάμει περιοχών. Κριτήρια αυτής της ταξινόμησης αποτελεί η φυσική επανατροφοδότηση της περιοχής και ο βαθμός καρστικοποίησης της.

- Η εύρεση εναλλακτικής μεθόδου εμπλουτισμού σε σχέση με την αρχική για κάθε ενδεχόμενο.
- Η εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων, οικονομικών, περιβαλλοντικών, ακόμα και κοινωνικών.
- Συνεχής καταγραφή των μετρήσεων και εκτίμησής τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα εμπλουτισμού καρστικών υδροφορέων τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε ελληνικό επίπεδο και εκτίμηση των αποτελεσμάτων τους.

4.9 Μοντέλα προσομοίωσης της ροής των καρστικών υδροφορέων & παραδείγματα εφαρμογής τους

Η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων σε ένα καρστικό υδροφορέα είναι αρκετά προβληματική, λόγω της υψηλής ετερογένειάς τους. Αυτοί οι υδροφορείς παρουσιάζουν κυρίως τυρβώδη ροή γεγονός που προκαλεί πρόβλημα στα περισσότερα μοντέλα τα οποία βασίζονται στο νόμο του Darcy και προϋποθέτουν γραμμική ροή. [11]

Πάντως ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες τα μοντέλα ροής μπορούν να φανούν πολύ χρήσιμα αρκεί να εκτιμώνται κατάλληλα οι ικανότητες τους. Γι αυτό όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο είναι απαραίτητο να διευκρινιστεί για τι είδος μοντέλο πρόκειται, ροής ή μεταφοράς. Τα μοντέλα μεταφοράς δεν εφαρμόζουν πολύ καλά στους καρστικούς υδροφορείς γεγονός που δεν προκαλεί έκπληξη. Οι υποθέσεις του μοντέλου μεταφοράς απαιτούν βαθιά γνώση της δομής του υδροφορέα και του συστήματος των ρωγμών, γεγονός που δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα καρστικοποιημένο υδροφορέα. Μάλιστα στα καρστικοποιημένα συστήματα εισάγεται η ιδέα του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου, όπου η περιοχή μελέτης είναι πολύ μεγάλη για να μπορεί να προσομοιώσει το ισοδύναμο πορώδες μέσο. Αν και η προσομοίωση της μεταφοράς είναι προβληματική υπάρχει η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν υδραυλικά ύψη και γενικές κατευθύνσεις ροής. Πρέπει όμως αυτό να γίνει σε τοπική κλίμακα, γιατί όσο μεγαλύτερη η περιοχή εξέτασης τόσο η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλοιώνεται. Μία από τις πιο απλές προσεγγίσεις αυτού του είδους είναι τα μοντέλα ομαδοποιημένων παραμέτρων (lumped parameter models) ή όπως ονομάζονται κοινώς τα μοντέλα του μαύρου κουτιού. Το μοντέλο αυτό μπορεί να επιλύσει μόνο γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί ως ένα ισοδύναμο πορώδες μέσο. Το πλεονέκτημα χρήσης τέτοιων μοντέλων είναι ότι απαιτούν ελάχιστα δεδομένα και ότι οι υποθέσεις τους είναι γρήγορες. Αντίθετα

το κύριο μειονέκτημα τους είναι η έλλειψη πληροφοριών στη διακύμανση υδραυλικών υψών και της διεύθυνσης της ροής.

Από την άλλη μεριά τα μοντέλα κατανεμημένων παραμέτρων (distributed parameter model) αναμένονται να δώσουν περισσότερες πληροφορίες στη διακύμανση της υπόγειας ροής. Το ισοδύναμο πορώδες μέσο αυτού του μοντέλου περιλαμβάνει και μονή και διπλή προσέγγιση του συνεχούς πορώδους μέσου. Σε πολλούς υδροφορείς η μονή προσέγγιση του συνεχούς μέσου αποδείχθηκε αρκετή για να προσομοιωθεί η τοπική υπόγεια ροή, γεγονός που δεν ισχύει για τους καρστικούς υδροφορείς, για τους οποίους αποδείχθηκε ότι τους ταιριάζει η διπλή προσέγγιση. Το ένα μέσο αντιπροσωπεύει τις χαμηλού βαθμού καρστικοποιημένες περιοχές του υδροφορέα, με υψηλή ικανότητα αποθήκευσης και χαμηλή αγωγιμότητα. Αντίστοιχα το άλλο αντιπροσωπεύει τις έντονα καρστικοποιημένες περιοχές του υδροφορέα με υψηλή αγωγιμότητα και χαμηλό βαθμό αποθήκευσης. Αυτή η διπλή προσέγγιση του συνεχούς μέσου παραπέμπει στην προσέγγιση του διπλού πορώδους. Πάντως και στις δύο προσεγγίσεις η ροή θεωρείται γραμμική. Το διπλό μέσο χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιωθεί η εκτόνωση της ροής και οι διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου ύδατος. Η χρήση όμως ενός τέτοιου μοντέλου απαιτεί πάρα πολλά δεδομένα όπως τη θέση, τη γεωμετρία και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της δομής του υδροφορέα. Για το λόγο αυτό η προσέγγιση του μοντέλου περιορίζεται σε τοπική μόνο κλίμακα. [11]

Είναι γεγονός ότι εμπλέκονται πολλοί παράγοντες στη σωστή επιλογή της προσομοίωσης της υπόγειας ροής σε ένα καρστικό υδροφορέα. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς θεωρούνται οι εξής[11]:

1. Ο βαθμός καρστικοποίησης. Γενικά οι υδροφορείς ταξινομούνται σε αυτούς που επικρατεί κυρίως η διάχυση και σε αυτούς που επικρατεί η ροή μέσω των ρωγμών – κλειστών σωληνώσεων. Όμως το ισοδύναμο πορώδες μέσο του μοντέλου της κατανεμημένης παραμέτρου εφαρμόζεται κυρίως στους υδροφορείς που επικρατεί η διάχυση. Παρόμοιες προσεγγίσεις μπορούν να γίνουν αρκετά κατάλληλες και για τα συστήματα των ρωγμών αν και είναι λίγο δύσκολο. Βέβαια μερικοί υδρολόγοι θεωρούν ότι όσον αφορά στους ανθρακικούς υδροφορείς, η ταξινόμηση αυτών που επικρατεί η διάχυση και αυτών που επικρατεί το σύστημα των ρωγμών – σωληνώσεων αντιπροσωπεύει απλώς το επίκεντρο της μελέτης.
2. Η αντικειμενικότητα της μελέτης προσομοίωσης. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική στη σωστή επιλογή του μοντέλου προσομοίωσης. Για να είναι μία μελέτη ολοκληρωμένη είναι απαραίτητη η εκτίμηση της τοπικής υπόγειας ροής, η

ανάλυση της μεταφορά ρύπων από σημειακές και μη πηγές, και η εκτίμηση της ευαισθησίας του υδροφορέα σε ρύπανση. Το ισοδύναμο πορώδες μέσο χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει την τοπική υπόγεια ροή και μεταφορά ρύπων από μη σημειακές πηγές. Αντίστοιχα το διπλό ισοδύναμο μέσο μπορεί να προσομοιώσει καλύτερα τη μεταφορά ιχνηθετών. Τέτοια μοντέλα απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες για τη θέση των ρωγμών και είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστούν.

3. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων, η οποία μπορεί να καθορίσει τον τύπο του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί.
4. Η διαθεσιμότητα των κωδίκων που επίσης επηρεάζει την επιλογή του μοντέλου. Γενικά δεν υπάρχουν κώδικες που να προσομοιώνουν την τυρβώδη ροή σε καρστικούς υδροφορείς, γεγονός που δυσκολεύει την κατάσταση.

Παρακάτω παρουσιάζεται μία εφαρμογή των μοντέλων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε ένα τμήμα του υδροφορέα Edward του Τέξας, στο Barton για μία δεκαετή πρόβλεψη.

4.9.1 Το παράδειγμα του υδροφορέα Edward στο Τέξας.

Η περιοχή μελέτης επικεντρώνεται στην περιοχή Barton που βρίσκεται κοντά στην πόλη Austin στο Τέξας και είναι το μέρος εκφόρτισης του ευρύτερου υδροφορέα Edward. Το τμήμα αυτό είναι υδραυλικά ανεξάρτητο και έχει έκταση 330km². Η περιοχή αποτέλεσε ιδιαίτερο τμήμα μελέτης, ύστερα από την ιδιαίτερη αύξηση του πληθυσμού και τις παρατεταμένες περιόδους ανυδρίας που επικράτησαν στην περιοχή. [11]

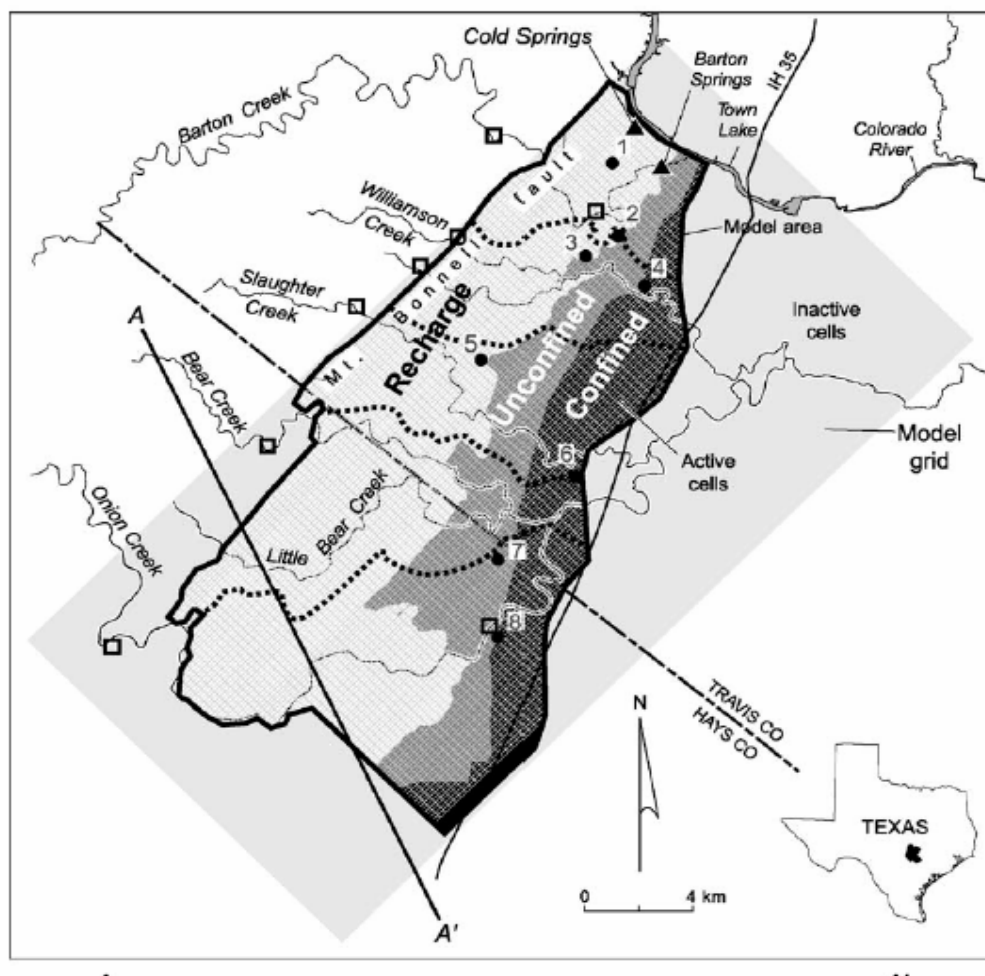
Οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου προέκυψαν από την υδρολογική κατάσταση της περιοχής. Έτσι στα Δυτικά υπήρχε το βουνό Bonell το οποίο αποτέλεσε συνθήκη διακοπής ροής (non-flow condition), ενώ στα Ανατολικά την "Γραμμή Κακού ύδατος" όπως ονομάζεται. Το υπόγειο ύδωρ διαχωρίζεται στη Νότια πλευρά και τέλος στη Βόρεια πλευρά υπάρχει ο ποταμός Κολοράντο. Χαρακτηριστικό του υπόγειου νερού είναι ότι αυξάνεται το σύνολο των διαλυμένων στερεών (Total Dissolved solids-TDS). Μάλιστα, η γραμμή κακού ύδατος όπως ονομάστηκε σηματοδοτεί τη ζώνη όπου τα TDS υπερβαίνουν την τιμή των 1000mg/lit. [11]

Ο υδροφορέας Edward έχει πάχος 165 μέτρα και υπερκείμενα αυτού βρίσκεται ο σχηματισμός του Del Rio ο οποίος αποτελείται κυρίως από πηλό και δημιουργεί ένα κορεσμένο στρώμα.. Γενικά το 80% του υδροφορέα είναι μη περιορισμένο και το υπόλοιπο περιορισμένο. Η περιοχή μελέτης είναι στην τροπική και υγρή κλιματική ζώνη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Η μέση διήθηση στην περιοχή είναι 825mm με μεγάλες βροχοπτώσεις κυρίως κατά την άνοιξη.

Η περιοχή μελέτης ήταν έντονα καρστικοποιημένη γεγονός που επαληθεύτηκε από τα 20 τεστ ιχνηθετών που έγιναν κατά το φυσικό εμπλουτισμό. Αυτά τα τεστ έδειξαν ότι η κυρίαρχη κατεύθυνση της ροής είναι βόρεια προς ανατολικά. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η περιοχή του πειράματος με όλα τα χαρακτηριστικά της. [11]



Σχήμα 4.6 Η περιοχή μελέτης με όλα τα χαρακτηριστικά Πηγή [11]

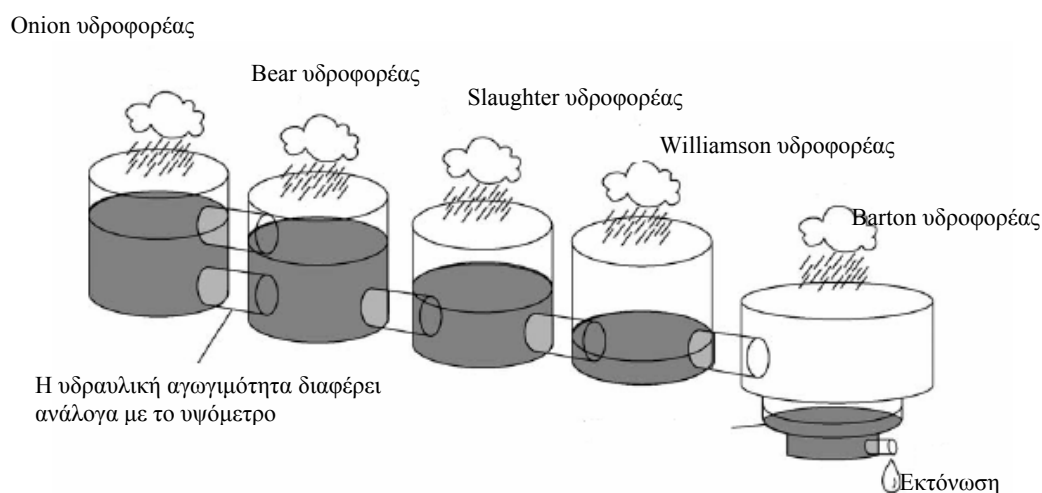
4.9.2 Μεθοδολογία του πειράματος- Περιγραφή του μοντέλου

Η μελέτη αυτή επικεντρώνεται κυρίως στο μοντέλο της ομαδοποιημένης παραμέτρου. Ως κύρια πηγή επαναφόρτισης θεωρήθηκε η διήθηση που πραγματοποιούνταν από ρυάκια που υπήρχαν στη ζώνη εμπλουτισμού του υδροφορέα. Ο σχηματισμός του Del Rio στα ανατολικά απέκλειε τη δυνατότητα εμπλουτισμού στην περιοχή αυτή. Υπήρχαν πέντε μικροί υδροφορείς (Barton, Williamson, Slaughter, Bear και Onion) οι οποίοι συντελούσαν

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

στην επαναφόρτιση του υδροφορέα και που κάθε ένας από αυτούς τους υδροφορείς αποτελούσε ένα ξεχωριστό κελί για το μοντέλο. Στη συγκεκριμένη μελέτη ο ετήσιος εμπλουτισμός υπολογίστηκε με ένα χρονοδιάγραμμα 19 ετών και με ένα ρυθμό $2,35 \text{ m}^3/\text{sec}$. [11]

Η εκτόνωση του υδροφορέα πραγματοποιείται κυρίως στην περιοχή του Barton Creek και ο ρυθμός εκτόνωσης έχει υπολογισθεί στα $1,5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Εκτόνωση όμως του υδροφορέα επιτυγχάνεται και μέσω της άντλησης. Ο ετήσιος ρυθμός άντλησης ξεκίνησε από $0,11 \text{ m}^3/\text{h}$ το 1989 και καταλήγει σε $0,18 \text{ m}^3/\text{h}$ το 1998, ενώ ο μέσος όρος άντλησης αυτών των χρόνων ήταν $0,14 \text{ m}^3/\text{h}$. Αντίστοιχα ο ετήσιος ρυθμός άντλησης ξεκινά από το 3% και φτάνει μέχρι και το 138% του εμπλουτισμού. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η προσομοίωση του πειράματος, ενώ στον πίνακα φαίνονται οι πληροφορίες για τις βροχοπτώσεις και τον εμπλουτισμό της περιοχής.



Σχήμα 4.7 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου της ομαδοποιημένης παραμέτρου Πηγή [11]

Χρόνος	Βροχοπτώσεις (mm)	Εμπλουτισμός (m^3/h)	Άντληση (m^3/h)	Εμπλουτισμός ως %της άντλησης
1989	657	0,82	0,14	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

1990	722	0,59	0,11	19
1991	1326	3,99	0,11	3
1992	1170	4,77	0,11	3
1993	673	1,87	0,13	8
1994	1045	0,95	0,15	16
1995	863	2,35	0,15	6
1996	751	0,12	0,15	138
1997	1195	3,61	0,16	4
1998	993	4,35	0,16	4

Πίνακας 4.1Υδρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης. Πηγή [11]

Το μοντέλο αποτελείτο από ένα στρώμα το οποίο είχε 120 γραμμές και 120 στήλες δηλαδή στο σύνολο 14.400 κελιά, ενώ εισήχθηκαν και τα απαραίτητα υδρολογικά δεδομένα. Στα κελιά που αντιπροσώπευαν τις περιοχές επαναφόρτισης εισήχθηκαν οι τιμές του εμπλουτισμού, ενώ η άντληση εισήχθηκε στα κελιά που βρισκόταν στη βάση των πηγαδιών. Επίσης τοποθετήθηκαν τα υψόμετρα της περιοχής, καθώς και η υδραυλική αγωγιμότητα του πεδίου που όπως βρέθηκε ήταν 93.000 m²/d. Το στρώμα του μοντέλου διαχωρίστηκε σε περιορισμένο και μη, ενώ το ίδιο το μοντέλο ορίστηκε ώστε να μπορεί να υπολογίζει τη μεταφορά και την αποθηκευτικότητα στη βάση του μοντέλου. Ως αρχικό υδραυλικό ύψος ορίστηκε η άνω στάθμη του υδροφορέα. Οι τιμές του εμπλουτισμού και της εκτόνωσης λήφθηκαν αυτές του μέσου όρου για την περίοδο της δεκαετίας. Ο εμπλουτισμός θεωρήθηκε δεδομένος και δεν αλλοιώθηκε κατά τη βαθμονόμηση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η περιοχή μελέτης και πως εισήχθηκε στο μοντέλο. [11]



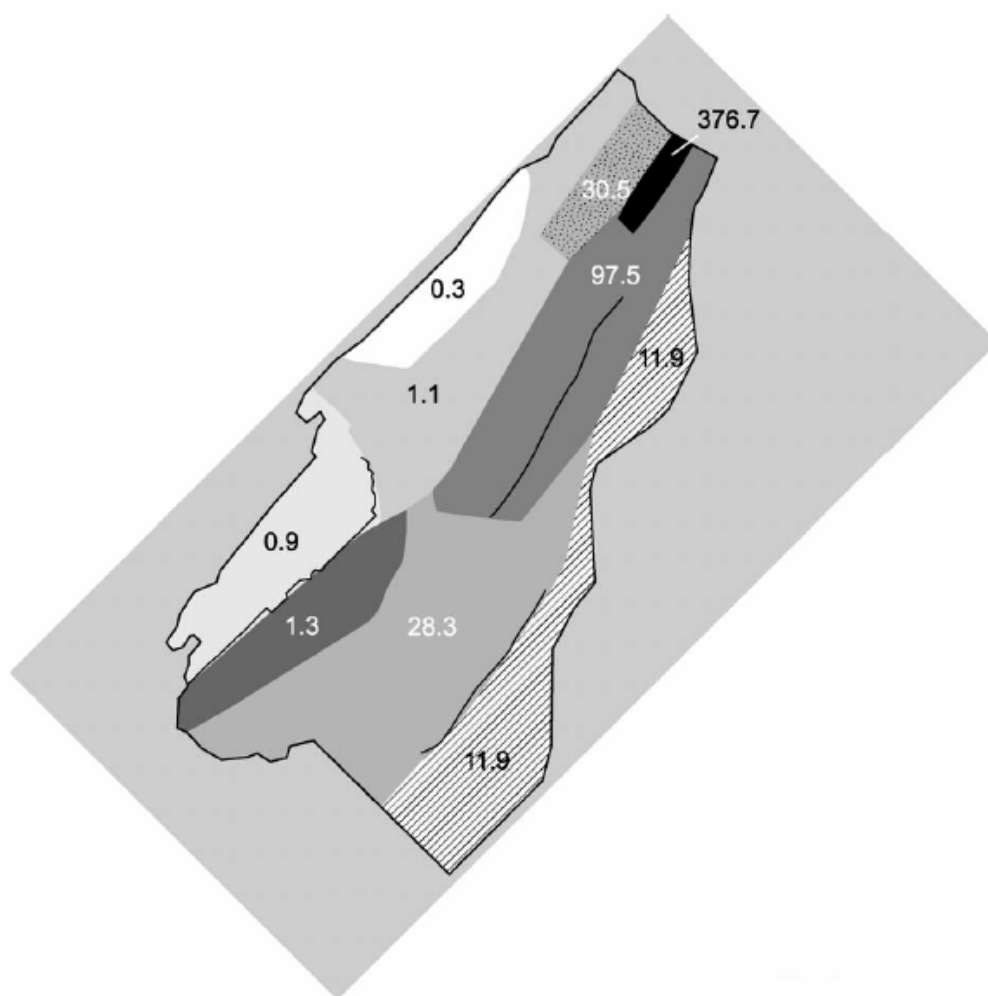
Σχήμα 4.8 Η περιοχή μελέτης και η βαθμονόμηση της Πηγή [11]

Αν και υπήρχαν μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα από τεστ που είχαν γίνει στην περιοχή, όλες αυτές οι μετρήσεις θεωρήθηκαν αναξιόπιστες, γιατί η περιοχή καλύπτεται από αγωγή χαρακτηριστικά όπως είναι οι ρηγματώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι υδραυλικές αγωγιμότητες από μετρήσεις πηγαδιών να υποεκτιμούν την πραγματική αγωγιμότητα.

Έτσι για τον καθορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική κλίση. Στη δυτική πλευρά του μοντέλου όπου υπήρχε απότομη υδραυλική κλίση εισήχθηκε χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, ενώ στην αντίθετη πλευρά λόγω υψηλής υδραυλικής κλίσης εισήχθηκε υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα. Η σχέση αυτή βρέθηκε σε πολλούς καρστικούς υδροφορείς και έχει χρησιμοποιηθεί για να γραμμικοποιηθεί η χωρική κατανομή της υδραυλικής τους αγωγιμότητας. [11]

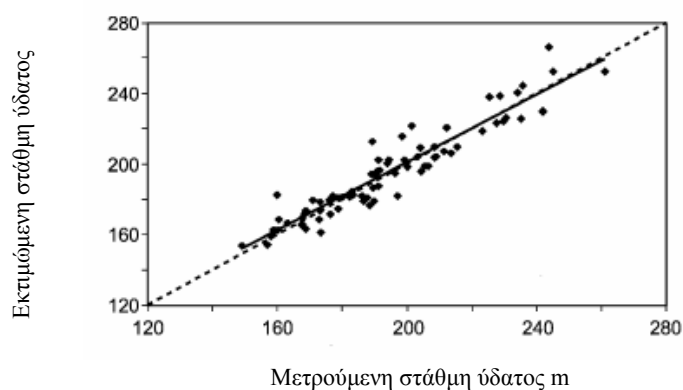
4.9.3 Αποτελέσματα

Οι υδραυλικές αγωγιμότητες ήταν γενικά χαμηλές και έξω από την επίμαχη περιοχή κυμαίνονταν από 0,3-1,3m/d. Γενικά υψηλές τιμές αγωγιμότητας εντοπίστηκαν στις περιοχές εκτόνωσης ως αποτέλεσμα των ρηγματώσεων. Η σύγκριση των υδραυλικών υψών του μοντέλου με των μετρούμενων πειραματικά υδραυλικών υψών έδωσε μία διαφορά της τάξης των 11 μέτρων (σχήμα 4.10). Τελικά η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας κατέληξε όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



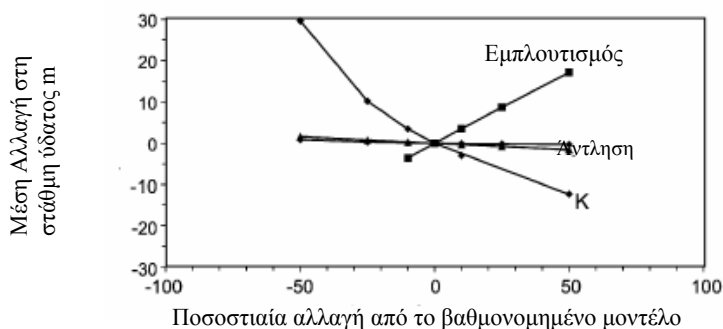
Σχήμα 4.9 Κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης Πηγή [11]

Η διακύμανση των υδραυλικών υψών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [11]

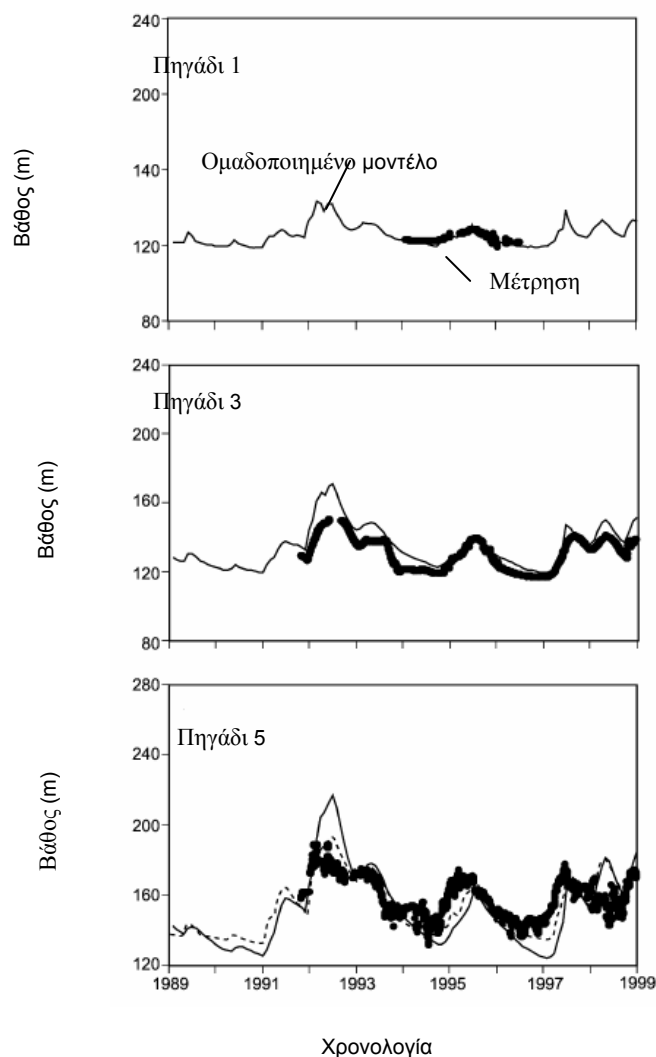


Σχήμα 4.10 Σύγκριση των μετρούμενων με τα εκτιμώμενα υδραυλικά ύψη Πηγή [11]

Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι η στάθμη των υδάτων είναι πιο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις του εμπλουτισμού και της υδραυλικής αγωγιμότητας, ενώ αντίστοιχα οι διακυμάνσεις του ρυθμού άντλησης ήταν αμελητέες. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο μέσος όρος του αντλούμενου νερού ήταν ένα πολύ μικρό ποσοστό του υδρολογικού ισοζυγίου. Τα εκτιμώμενα επίπεδα του νερού αυξανόταν όταν αυξανόταν ο εμπλουτισμός και μειωνόταν όταν μειωνόταν η υδραυλική αγωγιμότητα. Για μείωση του εμπλουτισμού κατά 25% και 50% το μοντέλο δεν έδινε αποτελέσματα γιατί τα κελιά ήταν τελείως στεγνά. Η ευαισθησία της στάθμης του νερού απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.11 Ευαισθησία της εκτιμώμενης στάθμης ύδατος Πηγή [11]



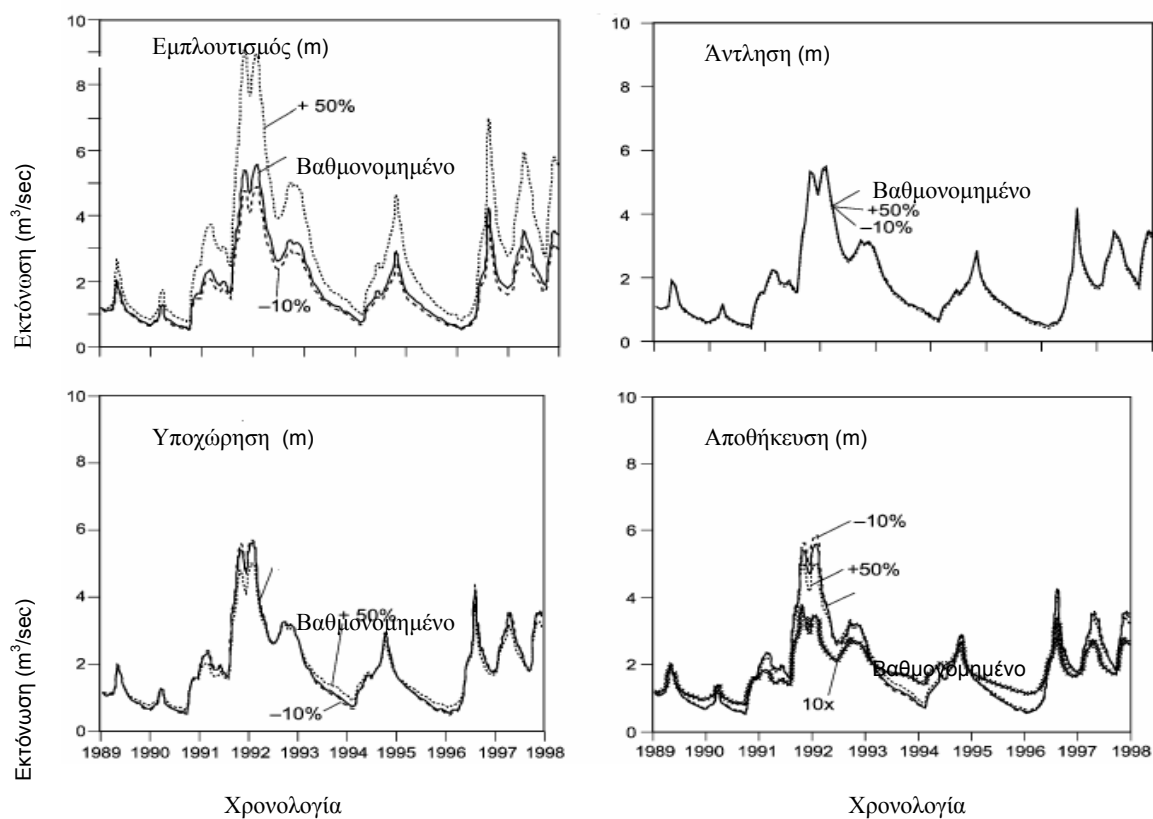
Σχήμα 4.12 Σύγκριση της προσομοιωμένης στάθμης ύδατος με τη μετρούμενη από επιλεγμένα πηγάδια. Τα πηγάδια φαίνονται στο σχήμα 4.6 Πηγή [11]

Όπ. Στο σχήμα 4.12 απεικονίζονται οι μετρούμενες στάθμες σε επιλεγμένα πηγάδια. Μάλιστα επειδή το πηγάδι 5 είναι προσκείμενο σε μία σπηλιά η στάθμη του παραμένει σταθερή. Αυτή η περίπτωση δεν προσομοιώνεται στο μοντέλο γιατί δεν μπορεί να αναπαραστήσει ροή σε σπηλιά. [11]

Η ανάλυση ευαισθησίας περιορίστηκε στην κλίμακα από -10 ως +50% για όλες τις παραμέτρους γιατί δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί καμία προσομοίωση όταν οι τιμές των παραμέτρων μειωνόταν κάτω από το 10%. Τη μεγαλύτερη επιρροή στην εκτόνωση και στη στάθμη των πηγαδιών την είχε ο εμπλουτισμός. Μάλιστα η αύξηση του εμπλουτισμού κατά 50% σήμαινε περίπου ίση αύξηση και στη μέση εκτόνωση. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο γιατί για μεγάλες περιόδους η εκτόνωση είναι ίση με τον εμπλουτισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Μάλιστα η αύξηση του εμπλουτισμού είχε μεγαλύτερη επιρροή στις υψηλές ροές παρά στις χαμηλές, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Μάλιστα η προσομοιωμένη στάθμη νερού στα πηγάδια ήταν το ίδιο ευαίσθητη στις διακυμάνσεις του εμπλουτισμού όσο και ο ρυθμός εκτόνωσης, ενώ η μείωση του εμπλουτισμού είχε ακριβώς το αντίθετο αποτέλεσμα και στις δύο παραμέτρους. Αντίθετα τόσο ο ρυθμός εκτόνωσης όσο και η στάθμη νερού στα πηγάδια δεν επηρεάστηκαν σχεδόν καθόλου από την άντληση και το ρυθμό αποθήκευσης. Μάλιστα όταν οι τιμές των παραμέτρων αυτών αυξήθηκαν κατά 50% ο ρυθμός εκτόνωσης αυξήθηκε μόλις κατά 2%, ενώ η στάθμη του νερού μειώθηκε κατά 5%. Όλες αυτές οι αναλύσεις αποτελούν στοιχεία για τη μελλοντική διαχείριση του υδροφορέα [11]



Σχήμα 4.13 Ευαισθησία της εκτόνωσης στον εμπλουτισμό, στην άντληση, στην υποχώρηση, και στην αποθήκευση. Πηγή [11]

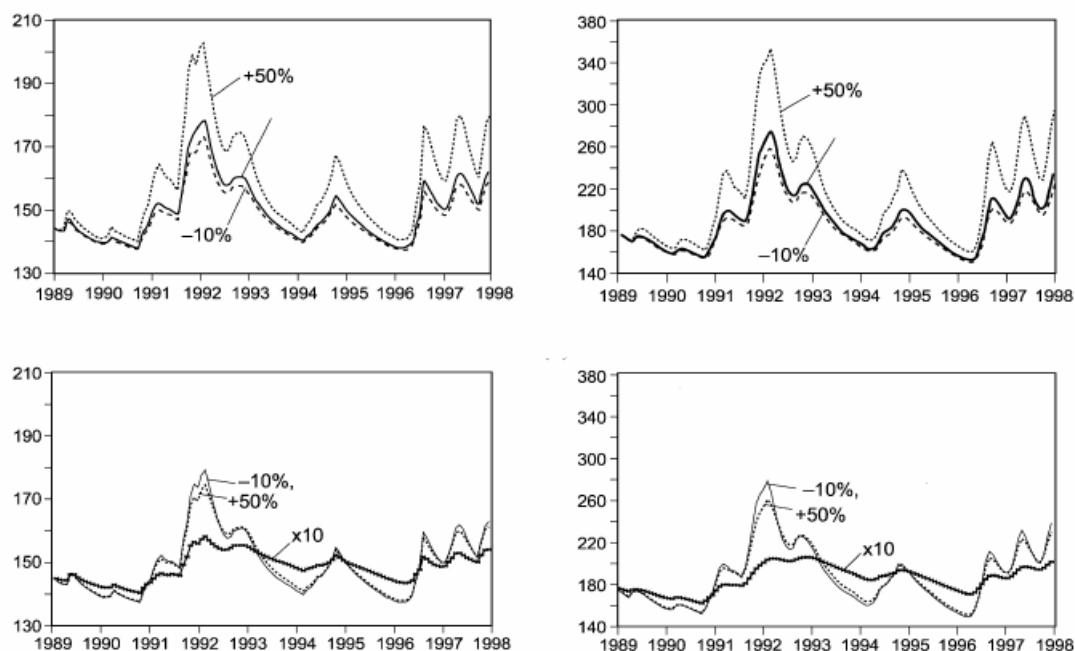
Πηγάδι 4-Εμπλουτισμός (m)

Πηγάδι 8-Εμπλουτισμός (m)

Στάθμη ύδατος (m)

Βαθμονομημένο

Βαθμονομημένο



Σχήμα 4.14 Ευαισθησία της στάθμης των υδάτων στον εμπλουτισμό και στην αποθήκευση Πηγή [11]

4.9.4 Γενικά συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές η μελέτη αυτή έδειξε ένα μοντέλο ισοδύναμου πορώδους μέσου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την τοπική υπόγεια ροή σε ένα αρκετά καρστικοποιημένο υδροφορέα. Παρακάτω παρουσιάζονται και άλλα παραδείγματα τεχνητού εμπλουτισμού σε καρστικά εδάφη και αξιολογείται η συμπεριφορά τους.

4.10 Το παράδειγμα του υδροφορέα Crestatx στην Ισπανία

4.10.1 Εισαγωγή

Η εποχιακή αύξηση της ζήτησης του νερού στην περιοχή λόγω έντονης τουριστικής ανάπτυξης οδήγησε στην ιδιαίτερη πίεση των πηγών νερού. Αυτό οδήγησε στην αναζήτηση μέτρων αντιμετώπισης του προβλήματος. Ο σκοπός του πειράματος υπήρξε διπλός[12]:

- Η βιώσιμη διαχείριση του υδροφορέα
- Η αναχαίτιση της υπαλμύρωσης της κοιλάδας της Sa Pobla.

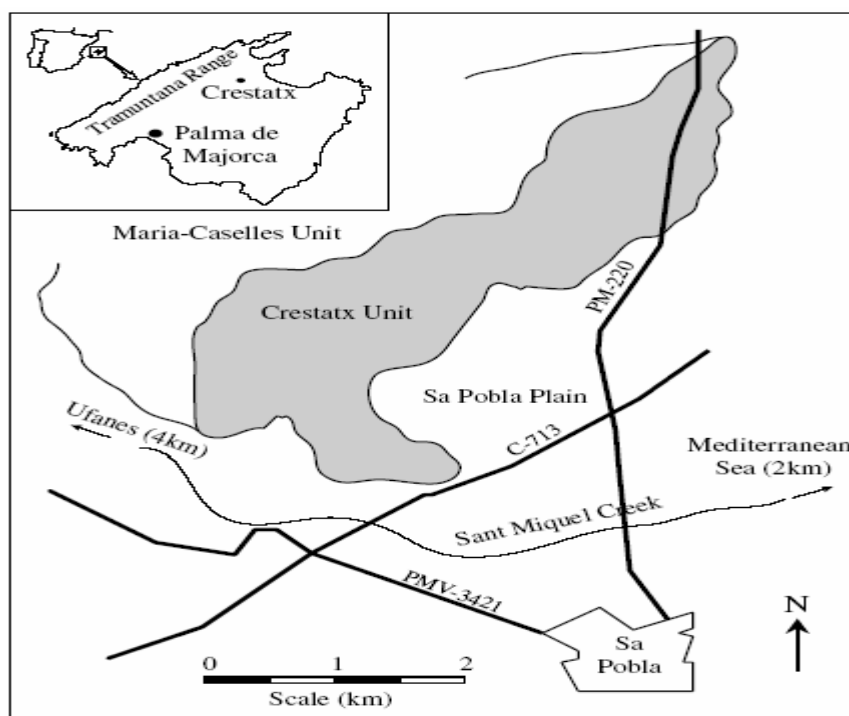
Και οι δύο στόχοι θα μπορούσαν να επιτευχθούν λαμβάνοντας ως πηγή εμπλουτισμού του υδροφορέα τις έντονες περιοδικές βροχοπτώσεις. Γενικά πάντως η δυνατότητα του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

υδροφορέα για εμπλουτισμό παραμένει ένα θέμα διαμάχης. Προς το παρόν, η μελέτη αυτή αφορά μία πρώτη προσέγγιση του ζητήματος.

4.10.2 Περιγραφή του υδροφορέα

Ο ασβεστολιθικός υδροφορέας Fangar καταλαμβάνει μία έκταση περίπου 30Km² στα βουνά της Tramuntana της Μαγιόρκας της Ισπανίας περίπου 40χιλμ βορειοανατολικά από τη Μαδρίτη. Ο υδροφορέας χωρίζεται υδρογεωλογικά σε δύο ανεξάρτητες μονάδες περίπου ίσες σε μέγεθος. Μάλιστα δεδομένου την τοπογραφική δυσκολία του πρώτου μόνο ο δεύτερος υδροφορέας προσφέρεται για διαχείριση των υπόγειων υδάτων του. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η περιοχή μελέτης.



Σχήμα 4.15. Η περιοχή μελέτης Πηγή [12]

Η περιοχή χαρακτηρίζεται γενικά από μεσογειακό κλίμα, με σύντομους, ήπιους χειμώνες και θερμά, ξηρά καλοκαίρια. Ο μέσος όρος των μηνιαίων θερμοκρασιών είναι μεταξύ των 15-25 βαθμών Κελσίου, ενώ ο μέσος όρος βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης είναι 600-700mm/ χρόνο. Σποραδικά η περιοχή διακατέχεται από έντονες βροχοπτώσεις, η απορροή των οποίων καταλήγει τις περισσότερες φορές στη θάλασσα. Το πάχος του υδροφορέα βρέθηκε περίπου 500 μέτρα, οπότε ο συνολικός όγκος του όγκος υπολογίστηκε στα 1300Mm³. Τα τεστ άντλησης έδειξαν ότι το πορώδες του υδροφορέα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

κυμαίνεται μεταξύ του 1% και του 3%, ότι η αποθηκευτική του ικανότητα είναι μεταξύ 13-38 Mm³ και ότι η υδραυλική του αγωγιμότητα είναι μεταξύ 0,5-2m/d. [12]

Κάτω από φυσικές συνθήκες ο υδροφορέας εκτονώνεται στο νότιο τμήμα του. Αυτή η εκτόνωση μαζί με τις ποσότητες νερού που αντλούνται από τα πηγάδια αποτελούν τη συνολική εκφόρτιση του υδροφορέα. Αντίθετα η μόνη πηγή φυσικού εμπλουτισμού του είναι η βροχόπτωση.

4.10.3 Οριακές συνθήκες

Για τη μοντελοποίηση του φαινομένου η περιοχή χωρίστηκε σε ένα κάρναβο 100x100μ. Ένα στρώμα πάχους 500 μέτρων αντιπροσώπευε το αδιαπέρατο στρώμα στην κάθετη διεύθυνση ενώ οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ήταν εξής [12]:

- Ένα συνεχές όριο των 11 μέτρων το οποίο αντιπροσώπευε τα πιεζομετρικά επίπεδα στην κοιλάδα Sa Pobla στο νότιο άκρο του υδροφορέα.
- Μία συνθήκη κλειστού αγωγού σε μία απόσταση 30 μέτρων πάνω από το επίπεδο της θάλασσας για να προσομοιωθεί η καρστική περιοχή με τις στοές.
- Αδιαπέρατες συνθήκες γύρω από τον υπόλοιπο τον υδροφορέα.
- Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα ίση με 0,5m/day εκτός από την καρστική περιοχή όπου η υδραυλική αγωγιμότητα ορίστηκε στα 2m/day σύμφωνα με τα τεστ άντλησης.
- Φυσικός εμπλουτισμός ίσος με το 30% των επίπεδων βροχοπτώσεων για την περίοδο 1996-2003.

Δύο ακόμα συνθήκες προστέθηκαν στο προσωρινό καθεστώς προσομοίωσης. Αυτές ήταν[12]:

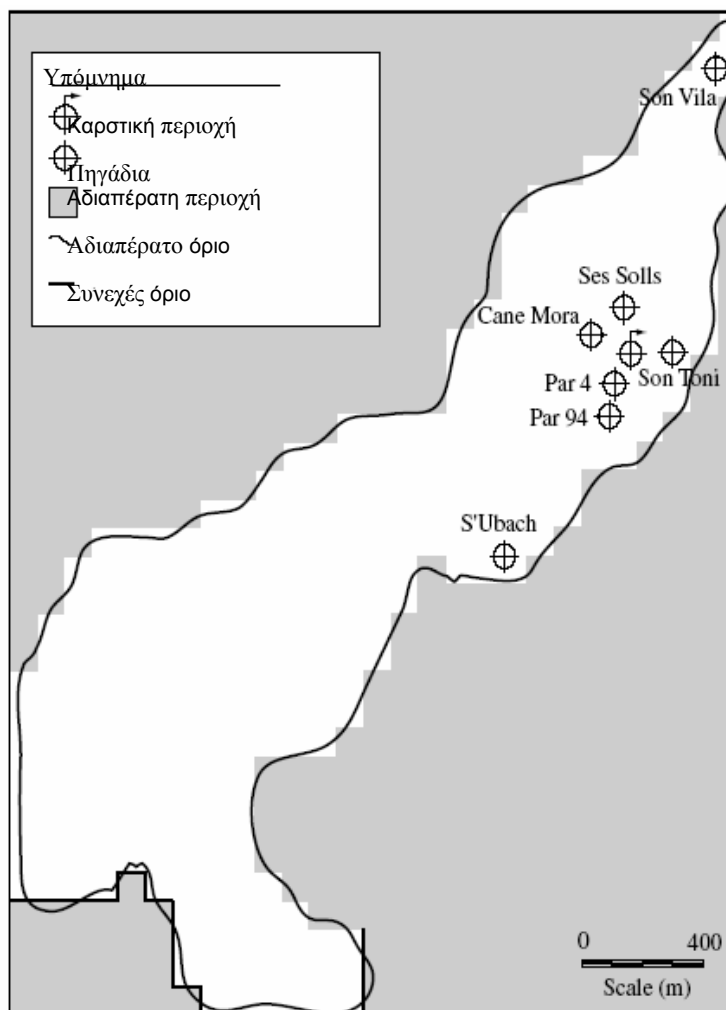
- Τα χρονικά βήματα του μοντέλου ορίστηκαν σε τριμηνιαία.
- Τοποθετήθηκαν επτά πηγάδια παρακολούθησης για να παρακολουθείται η εκμετάλλευση του υδροφορέα.

4.10.4 Καθεστώς μόνιμης προσομοίωσης

Η πρώτη προσομοίωση του υδροφορέα έγινε σε μόνιμο καθεστώς χωρίς δηλαδή πηγάδια άντλησης με σκοπό να αναπαρασταθούν οι φυσικές συνθήκες του υδροφορέα. Βρέθηκε η εκφόρτιση του υδροφορέα τόσο μέσω των καρστικών στοών όσο και από το νότιο τμήμα του υδροφορέα προς την κοιλάδα. Στην πρώτη περίπτωση ο ρυθμός εκφόρτισης βρέθηκε στα 0,05Mm³/year ενώ στη δεύτερη στα 0,9 Mm³/year. Το άθροισμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

των δύο αυτών τιμών ήταν ίσο με τον εμπλουτισμό του υδροφορέα από τη βροχόπτωση. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απεικόνιση του μοντέλου.



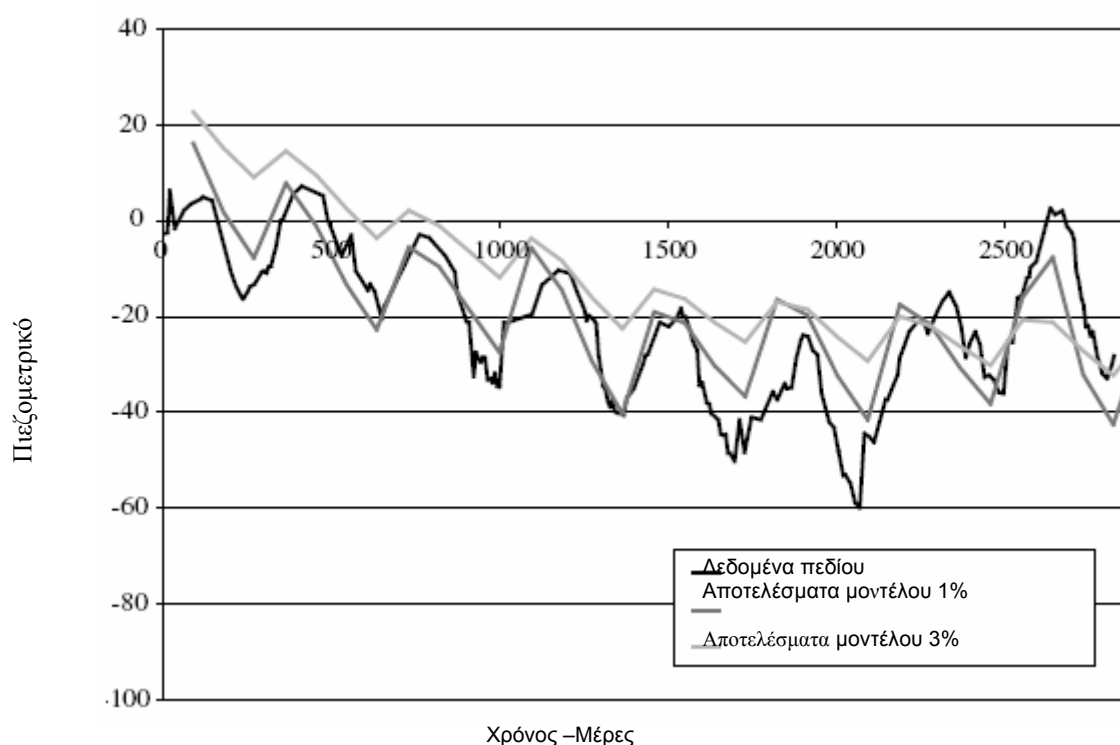
Σχήμα 4.16.Μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης Πηγή [12]

4.10.5 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Έγιναν δύο προσομοιώσεις για δύο διαφορετικές τιμές πορώδους, η μία για 1% και η άλλη για 3%. Η οκτάχρονη περίοδος (1996-2003) μοντελοποιήθηκε σε τριμηνιαία χρονικά βήματα ενώ ο φυσικός εμπλουτισμός λήφθηκε ίσος με το 30% των βροχοπτώσεων. Ο ετήσιος μέσος όρος βροχόπτωσης λήφθηκε ίσος με 600mm. Η άντληση ήταν το κύριο σύστημα εξαγωγής νερού και μάλιστα για την περίοδο μελέτης οι ρυθμοί άντλησης κυμαίνονταν μεταξύ 1 και 1,5 Mm³. Σχεδόν το 75% της άντλησης πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών (Απρίλιο-Σεπτέμβριο), το 23% πραγματοποιείται από Ιανουάριο μέχρι Μάρτιο και μόλις το 4% στο τελευταίο τρίμηνο κάθε έτους. [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου, δηλαδή η πιεζομετρική στάθμη τόσο από τις μετρήσεις πεδίου, όσο και αυτή που προέκυψε από το μοντέλο και για τις δύο διαφορετικές τιμές του πορώδους. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται οφείλονται στη μη καθημερινή παρακολούθηση των φρεατίων παρακολούθησης, αν και γενικά η βαθμονόμηση κρίθηκε επαρκής σε σχέση με τα υπάρχοντα δεδομένα.



Σχήμα 4.17.Αποτελέσματα –πιεζομετρική στάθμη μοντέλου Πηγή [12]

4.10.6 Υποθέσεις της προσομοίωσης

Εκτός από το μόνιμο καθεστώς κατά το οποίο δεν προβλεπόταν η ύπαρξη πηγαδιών, όταν προστέθηκε η άντληση έγιναν κάποιες επιπλέον υποθέσεις. Αυτές ήταν[12]:

- Η περίοδος προσομοίωσης η οποία θεωρήθηκε 30 χρόνια.
- Ο μέσος όρος βροχόπτωσης ήταν αυτός που ανταποκρινόταν τα τελευταία 30 χρόνια.
- Τα πηγάδια άντλησης θεωρήθηκαν ότι άγγιζαν τον πάτο του υδροφορέα.
- Στο Παρ 4 (σχήμα 4.16) τοποθετήθηκε ένα σημείο παρατήρησης λόγω της κατάλληλης γεωγραφικής του θέσης.

Τέλος υπολογίστηκε η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Εισαγωγή} - \text{Εξαγωγή} = \text{διαφορά στην αποθήκευση}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

Η εξίσωση εκφράζεται ως : $R - R_p - (P + D_p) = \Delta S$ όπου[12]:

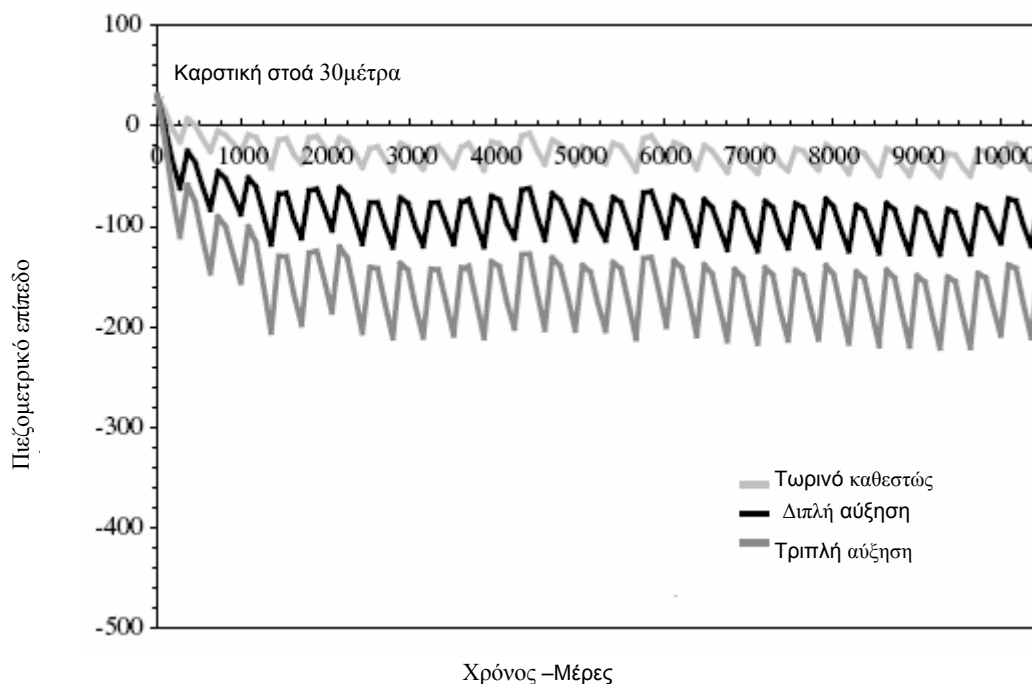
- R η βροχύπτωση
- R_p ο ενδεχόμενος εμπλουτισμός από την κοιλάδα προς τον υδροφορέα.
- P ο συνολικός όγκος που έχει αντληθεί από τα πηγάδια.
- D_p η εκφόρτιση του υδροφορέα προς την κοιλάδα
- ΔS η αλλαγή στην αποθηκευτικότητα του υδροφορέα.

Έτσι ελέγχθηκαν τα εξής σενάρια[12]:

1. Το τωρινό αντλητικό καθεστώς για τα επόμενα 30 χρόνια.
2. Μία διπλή αύξηση του ρυθμού άντλησης για τα επόμενα 30 χρόνια.
3. Μία τριπλή αύξηση του ρυθμού άντλησης για τα επόμενα 30 χρόνια.
4. Μία τετραπλή αύξηση του ρυθμού άντλησης για τα επόμενα 30 χρόνια.

4.10.7 Αποτελέσματα

Στο παρακάτω σχήμα σχ4.18 απεικονίζονται τα πιεζομετρικά επίπεδα για όλα τα σενάρια. Ανάλογα με το σενάριο βλέπουμε τη στάθμη του υδροφορέα να υποχωρεί από 40 ως και 250 μέτρα από την αρχική κατάσταση. Παρατηρήθηκε ότι μία τετραπλή αύξηση του ρυθμού άντλησης θα οδηγούσε σε ξήρανση πολλών πηγαδιών γιαυτό η τριπλή αύξηση χαρακτηρίζει και το όριο του συστήματος. [12]



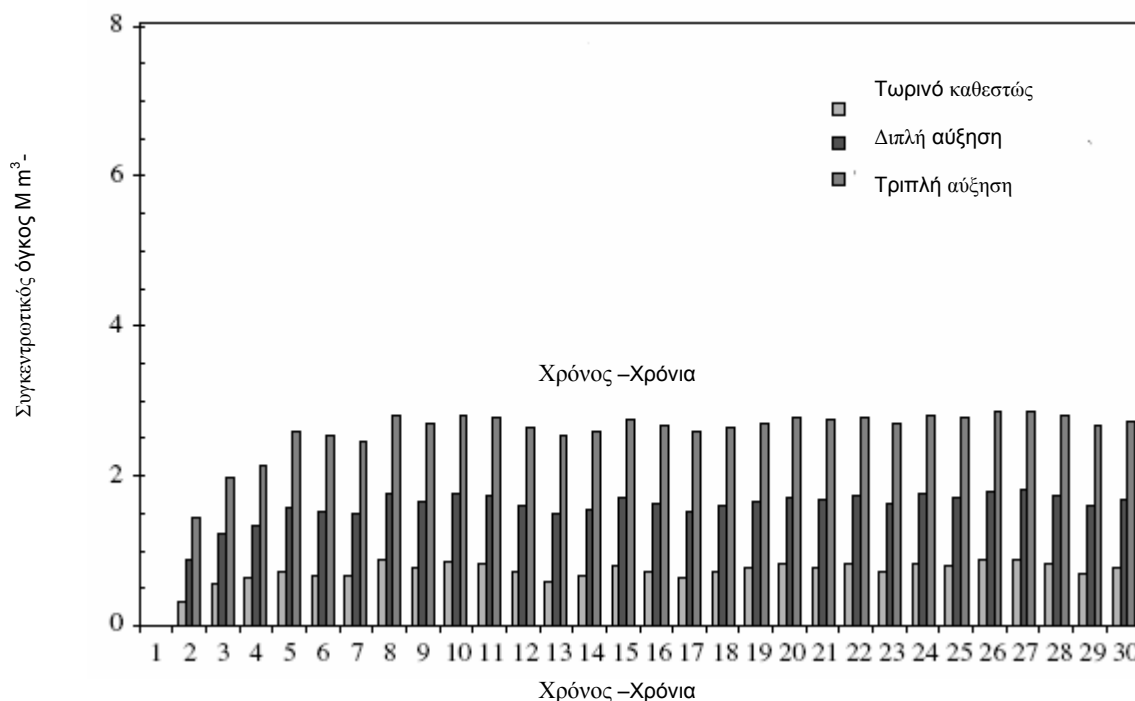
Σχήμα 4.18. Πιεζομετρικές στάθμες για τα διάφορα σενάρια. Πηγή [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

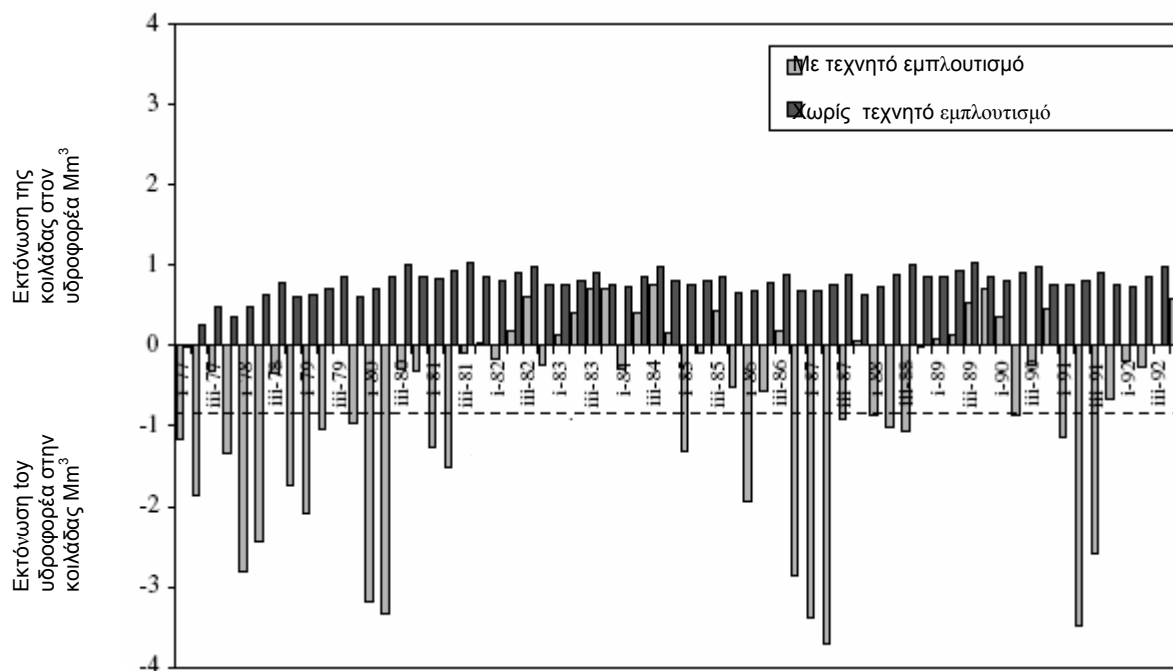
Στο σχήμα 4.19 απεικονίζεται ο συγκεντρωτικός όγκος επαναεμπλουτισμού του υδροφορέα για όλα τα σενάρια. Για τα δεδομένα της περιοχής μελέτης, ο όγκος αυτός αγγίζει μία μέγιστη τιμή κάθε εφτά ή οχτώ χρόνια και μόλις 1Mm^3 . Μάλιστα το μοντέλο θεωρεί ότι μόλις ο υδροφορέας επαναφορτιστεί πλήρως επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. [12]

Η τελευταία υπόθεση περιλαμβάνει τεχνητό εμπλουτισμό ακόμα και κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες άντλησης. Γιαυτό υπάρχει και ένα ακόμα χειρότερο σενάριο σύμφωνα με το οποίο το νερό για εμπλουτισμό παρέχεται μόνο από σποραδικές έντονες βροχοπτώσεις. Το σχήμα 4.20 δείχνει αντίστοιχα τη σχέση ροής του υδροφορέα με την περιοχή εκτόνωσης του, με και χωρίς εμπλουτισμό.

Αυτό που προκύπτει είναι ότι ο τεχνητός εμπλουτισμός εμποδίζει την αντιστροφή της ροής στα δύο τρίτα του χρόνου υπό ακραίες συνθήκες άντλησης. Μάλιστα στα 11 από τα 16 χρόνια ο τεχνητός εμπλουτισμός δίδει ένα υδροφορέα ο οποίος εκφορτίζει στην κοιλάδα έναν όγκο νερού υψηλότερο από ότι σε κανονικές συνθήκες. Τέλος το μοντέλο δείχνει ότι για το 25% του χρόνου η περίσσεια νερού χάνεται μέσω των καρστικών στοών του. [12]



Σχήμα 4.19. Σχέση ροής μεταξύ των δύο υδροφορέων για όλα τα σενάρια Πηγή [12]



Σχήμα 4.20. Σχέση ροής μεταξύ των δύο υδροφορέων με ή χωρίς τεχνητό εμπλουτισμό Πηγή[12]

Δυστυχώς το πρόβλημα της υφαλμύρωσης δεν έχει αφήσει ανέπαφη ούτε την Ελλάδα. Αρκετοί παράκτιοι υδροφορείς αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα λόγω υπερεκμετάλλευσής τους. Παρακάτω παρουσιάζεται μία τέτοια περίπτωση και η προσπάθεια αντιμετώπισής της.

4.11. Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στην Ελλάδα –παράδειγμα

4.11.1 Γενικά

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες στην Ελλάδα οι αυξημένες απαιτήσεις σε νερό σε συνδυασμό με τις μεγάλες περιόδους ξηρασίας και την παντελή έλλειψη διαχείρισης υπόγειων υδάτων οδήγησαν σε δραματική πτώση της στάθμης των υπόγειων υδροφορέων. Αυτή η πτώση που σε πολλές περιπτώσεις άγγιξε τα 50 μέτρα προκάλεσε όξυνση του φαινομένου της υφαλμύρωσης.

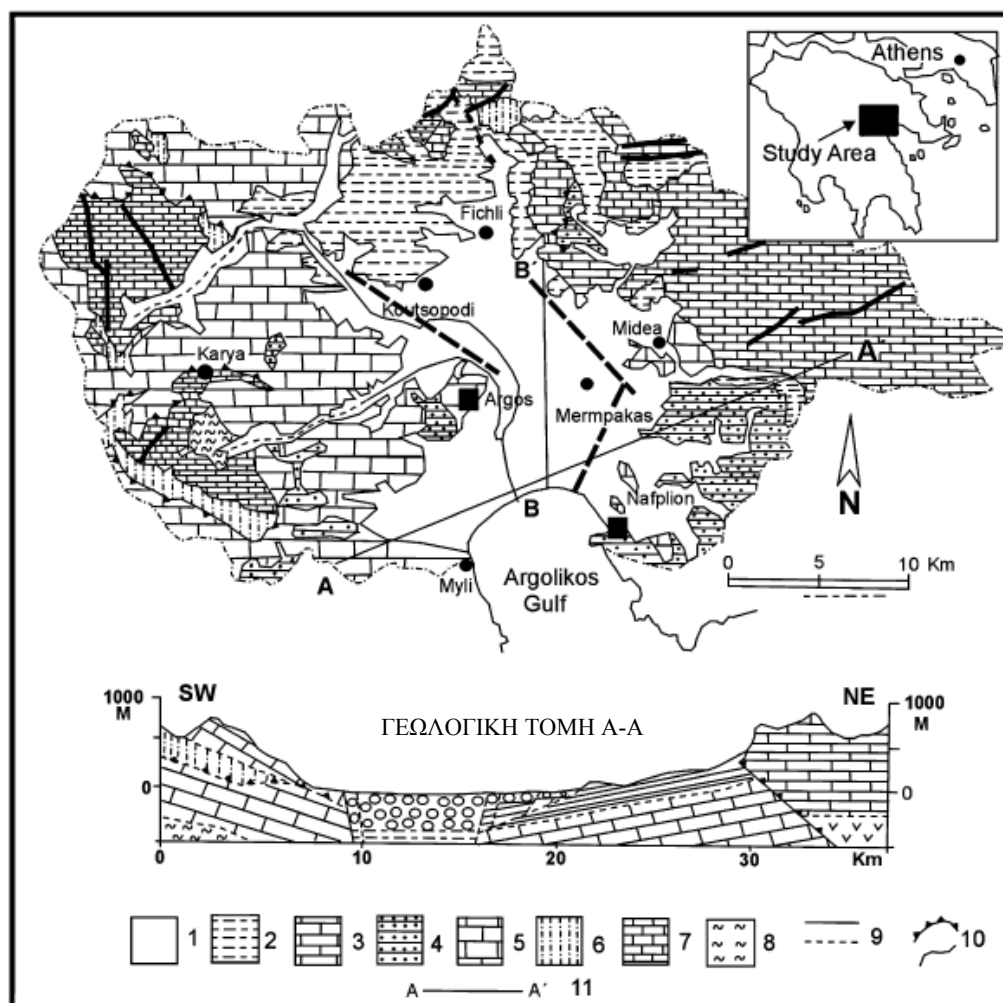
Μία τέτοια περίπτωση αποτελεί αυτή του Άργους. Η άντληση στην περιοχή αυτή ξεκίνησε το 1950, και ενώ είχε ξεκινήσει η υφαλμύρωση του ρηχού υδροφορέα, τώρα το φαινόμενο άγγιξε και τα βαθύτερα στρώματα. Υπολογίζεται μάλιστα ότι στην περιοχή υπάρχουν περίπου 15.000 γεωτρήσεις, ενώ η αυξημένη χρήση φυτοφαρμάκων οδήγησε σε υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Λόγω της σπουδαιότητας της περιοχής ήδη από το 1960 ξεκίνησαν οι πρώτες προσπάθειες διάσωσης του υδροφορέα μέσω της μεθόδου του τεχνητού εμπλουτισμού. Έτσι η πρώτη προσπάθεια περιελάμβανε ένα πείραμα εμπλουτισμού διάρκειας 270 ημερών κατά την περίοδο 1965-1967 και τα αποτελέσματα

ήταν πολύ ικανοποιητικά. Η έντονη εκμετάλλευση του υδροφορέα συνεχίστηκε με αποτέλεσμα η υφαλμύρωση να προχωρήσει οπότε σχεδιάστηκε ένα νέο πείραμα εμπλουτισμού. Το πείραμα ξεκίνησε το 1990 και διάρκεσε μέχρι το 1998 και υπολογίζεται ότι κατά την περίοδο αυτή $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ γλυκού νερού εισήχθηκε στον υδροφορέα. [13]

4.11.2 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η κοιλάδα του Άργους απαρτίζεται κυρίως από πέτρες του Αλπικού συστήματος. Το βαθύτερο στρώμα είναι αυτό της Τρίπολης και το ακολουθεί η ζώνη της Πίνδου. Το όλο σύστημα έχει πάχος εκατοντάδων μέτρων και έχει επηρεαστεί από τεκτονικές δυνάμεις και καρστικά φαινόμενα. Στην άκρη της κοιλάδας υπάρχουν πολλές καρστικές πηγές, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί μέσω ανθρακικών σχηματισμών.

Στο βόρειο μέρος της κοιλάδας υπάρχουν λοφώδεις περιοχές καλυμμένες με ιζήματα μαρμάρου. Αντίστοιχα στο μέσο περίπου της κοιλάδας υπάρχουν κυρίως πηλώδη εδάφη που φτάνουν μέχρι και βάθος 200 μέτρων. Στην περιοχή συναντώνται γενικότερα χημικά, βιοκλαστικά και οργανικά ιζήματα με περιορισμένη όμως κατανομή. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γεωλογική τομή της περιοχής μαζί με κάποια γενικότερα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 4.21. Γεωλογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης Πηγή [13]

Τα στρώματα που υπάρχουν στην γεωλογική τομή είναι τα εξής[13]:

1. Διάφορες αποθέσεις.
2. Αποθέσεις Νεογενικής περιόδου
3. Άνθρακας
4. Φλύσχης της Πίνδου
5. Άνθρακας της Πίνδου
6. Φλύσχης της Τρίπολης
7. Άνθρακας της Τρίπολης
8. Φυλλίτης της Πίνδου

4.11.3 Υδρογεωλογία της κοιλάδας του Άργους

Το κλίμα της περιοχής είναι γενικά ήπιο με μακριά και ξηρά καλοκαίρια με τη μέση θερμοκρασία των ζεστών μηνών να αγγίζει τους 22 °C. Η μέση βροχόπτωση στην περιοχή αγγίζει τα 500mm, από τα οποία 350 ικανοποιούν τις ανάγκες της εξατμισοδιαπνοής, ενώ τα υπόλοιπα 150 χρησιμεύουν για την επαναφόρτιση του υδροφορέα. Οι πιο σημαντικοί υδροφορείς στην περιοχή έχουν αναπτυχθεί σε ανθρακικούς σχηματισμούς, και εκτονώνονται κυρίως σε καρστικές παράκτιες πηγές ή σε άλλους αλλουβιακούς υδροφορείς. Το συνολικό πάχος του υδροφορέα ποικίλει από 50-60μέτρα με ένα μέσο όρο στα 56 μέτρα. Ο φυσικός εμπλουτισμός του υδροφορέα γίνεται κατευθείαν από τη διήθηση των βροχοπτώσεων κυρίως στα μη περιορισμένα τμήματά του. [13]

Η εκμετάλλευση του υδροφορέα ξεκίνησε το 1950, με τον αριθμό των πηγαδιών να αυξάνει συνεχώς, ώσπου ο φυσικός εμπλουτισμός δεν μπόρεσε να καλύψει το ρυθμό άντλησης. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πεδίου από το 1960 και πέρα, βγήκε το συμπέρασμα ότι η στάθμη του υδροφορέα άρχισε να διαταράσσεται αισθητά μετά το 1969 ενώ μέχρι το 1963 υπήρχε κάποια ισορροπία. Το φθινόπωρο του 1990 παρατηρήθηκαν αρνητικές πιεζομετρικές τιμές από την ακτή προς το νησί που έφταναν μέχρι και τα 30 μέτρα. Το ίδιο φαινόμενο εμφανίστηκε ξανά την άνοιξη του 1995. [13]

Από την κατανομή των ιόντων Cl⁻ που έχει καταγραφεί από το 1965 είναι εμφανές ότι από εκείνη την περίοδο και μετά ξεκίνησε να παρουσιάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Το 1975 η ζώνη υφαλμύρωσης εντοπιζόταν σε απόσταση από την ακτή στα 3,5km ενώ το 1995 η ζώνη αυτή εντοπίστηκε στα 6km από την ακτή. Γενικά ο μέσος όρος βήματος της υφαλμύρωσης υπολογίστηκε ότι ήταν 0,5 md⁻¹. [13]

4.11.4 Νέο πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού.

Το νέο πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού πραγματοποιήθηκε το φθινόπωρο του 2000 με ένα δίκτυο 40 πηγαδιών κατανεμημένα στην περιοχή. Τα πηγάδια επιλέχθηκαν ώστε να έχουν περίπου το ίδιο βάθος μεταξύ 80-100 μέτρων. Στον πάτο των πηγαδιών τοποθετήθηκαν ειδικά συστήματα παρακολούθησης και η ποσότητα άντλησης νερού κυμαινόταν από 80-120m³ h⁻¹.

Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο λογισμικό το οποίο ήταν ικανό να προσομοιώνει τις γεωχημικές αντιδράσεις όπως την ανάμειξη διαφορετικών ποιοτήτων νερών, τα αποτελέσματα της διαφορετικής θερμοκρασίας ή τις αντιδράσεις λόγω ανταλλαγής ιόντων. Μάλιστα το τέλος της ζώνης υφαλμύρωσης υπολογίστηκε

χρησιμοποιώντας ως ποιοτικό κριτήριο την περιεκτικότητα σε ιόντα χλωρίου ίση με αυτήν του θαλασσινού νερού. [13]

4.11.5 Αποτελέσματα

4.11.5.1 Ποιότητα νερού

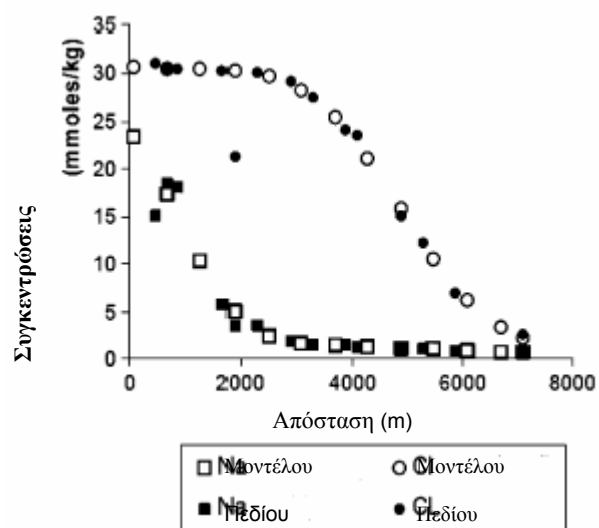
Οι έντονες αγροτικές δραστηριότητες όπως η άντληση και η χρήση φυτοφαρμάκων οδήγησαν στην υποβάθμιση της ποιότητας του νερού του υδροφορέα. Μάλιστα από το 1965 ξεκίνησε η χαρτογράφηση της περιοχής σε σχέση με την κατανομή των ιόντων χλωρίου και νιτρικών. Όπως ήταν αναμενόμενο το πρόβλημα παρουσιάζεται πιο έντονο πλησιέστερα της ακτής γεγονός που μαρτυρεί και το πρόβλημα της υφαλμύρωσης. [13]

Χαρακτηριστικό είναι πάντως και η υψηλή συγκέντρωση των NO_3^- , λόγω χρήση φυτοφαρμάκων, σε σημείο που οι τιμές αυτές να υπερβαίνουν συχνά το μέγιστο όριο που ορίζει η Ε.Ε. για το πόσιμο νερό. [13]

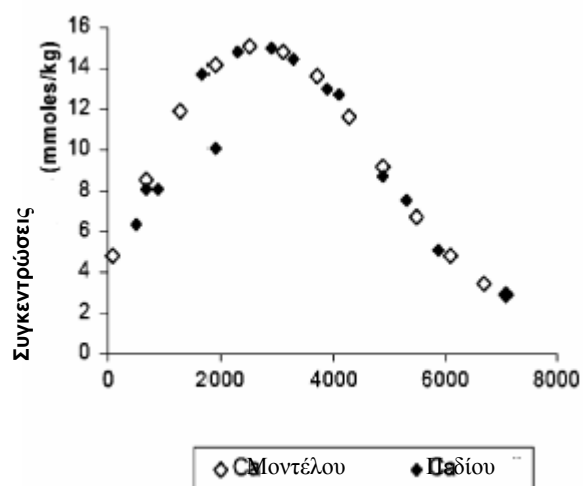
4.11.6 Φαινόμενα υφαλμύρωσης

Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η ανάπτυξη της γραμμής υφαλμύρωσης λόγω υπερβολικής άντλησης. Όταν το νερό βρισκόταν στη ζώνη ανάμειξης γλυκού-αλμυρού θεωρήθηκε ότι είχε σταθερή χημική σύνθεση. Στα παρακάτω διαγράμματα υπήρξε μία πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των προσομοιούμενων καμπυλών και αυτών του πεδίου, οπότε και θεωρήθηκε πολύ καλή. Η ταύτιση αυτή υπήρχε μόνο όταν χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιώνει δύο διαφορετικές τιμές πορώδους. Αυτό έγινε υπό την υπόθεση ότι ο υδροφορέας παριστά ένα μέσο με δύο διαφορετικά πορώδη. Παρακάτω απεικονίζεται σε διαγραμματική μορφή η συγκέντρωση των ιόντων σε σχέση με την απόσταση ακτής-γραμμής υφαλμύρωσης. [13]

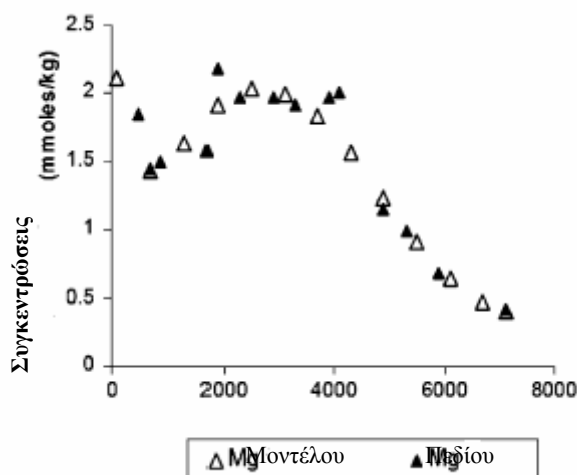
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός



Σχήμα 4.22. Συγκέντρωση Na, Cl, Πηγή [13]



Σχήμα 4.23. Συγκέντρωση Ca Πηγή [13]



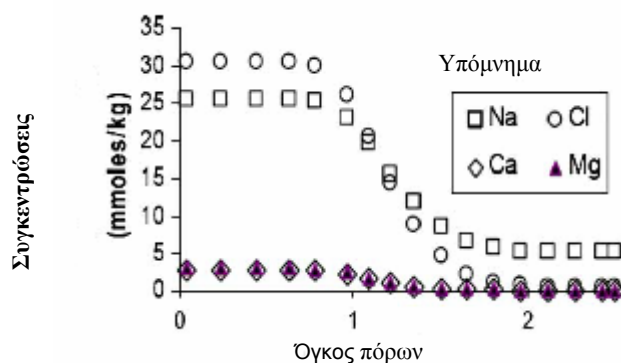
Σχήμα 4.24. Συγκέντρωση Mg Πηγή [13]

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση του ασβεστίου και του μαγνησίου και μείωση στη συγκέντρωση του νατρίου. Για τα ιόντα μαγνησίου και ασβεστίου οι τιμές των συγκεντρώσεων ήταν ακόμα υψηλότερες και από αυτές του υφάλμυρου νερού που υπήρχαν περίπου στο μέσο της απόστασης. Κατά την ανάμειξη των νερών το ασβέστιο και το μαγνήσιο ανταλλάχτηκαν με το νάτριο και έτσι το NaCl του υφάλμυρου ύδατος έγινε CaCl_2 και οι τιμές των συγκεντρώσεών τους αυξήθηκαν.

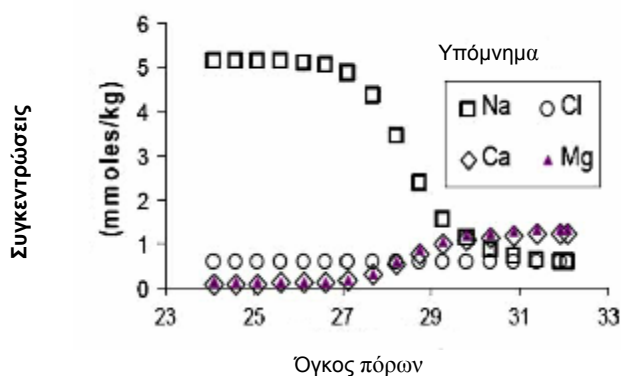
4.11.6.2 Φαινόμενα ανανέωσης υδάτων

Σε μία δεύτερη φάση έγινε μία προσομοίωση της ανανέωσης των υδάτων λόγω τεχνητού εμπλουτισμού. Γενικά η ανανέωση των υδάτων των ελληνικών αλλουβιακών παράκτιων υδροφορέων είναι μία πολύ αργή διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει και εκατοντάδες χρόνια, ενώ ο ρυθμός ανανέωσης εξαρτάται πολύ έντονα από την ικανότητα ανταλλαγής ιόντων του υδροφορέα και λιγότερο από τη διάχυση.

Στα παρακάτω διαγράμματα περιγράφεται η χημική διακύμανση κοντά στην ακτή από την αρχή της περιόδου της ανανέωσης μέχρι ώστε το υπόγειο νερό να αποκτήσει τα χαρακτηριστικά του ανανεώσιμου. Υπάρχει μία αισθητή πτώση στις τιμές των συγκεντρώσεων όλων των ιόντων μετά τη ζώνη υφαλμύρωσης. Κατά τη διάρκεια της ανανέωσης των υδάτων το Ca αντικαθίσταται με το Na. [13]



Σχήμα 4.25. Διάλυση των ανταλλάξιμων κατιόντων κατά την ανανέωση των υδάτων στην αρχή του εμπλουτισμού Πηγή [13]



Σχήμα 4.26. Διάλυση των ανταλλάξιμων κατιόντων κατά την ανανέωση των υδάτων στο τέλος του εμπλουτισμού Πηγή [13]

Μετά από την αρχική μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων, η συγκέντρωσή τους παρέμεινε πολύ χαμηλή υπό το συνεχή εμπλουτισμό των υδάτων. Αφού πέρασε η περίοδος έντονης μείωσης, οι συγκεντρώσεις των ιόντων αυξήθηκαν και ήταν συγκρίσιμες με τις τιμές του καθαρού νερού. Μάλιστα η συγκέντρωση του μαγνησίου ήταν υψηλότερη από αυτήν του νερού που χρησιμοποιήθηκε για εμπλουτισμό, γιατί το ασβέστιο του νερού προς εμπλουτισμό ανταλλάσσεται με το μαγνήσιο του υπόγειου ύδατος. Τα ιόντα χλωριδίου δεν εξετάστηκαν γιατί θεωρήθηκαν ανενεργή στις συνθήκες που μελετήθηκε ο υδροφορέας. Οι κύριοι παράγοντες που επηρέασαν το μοντέλο ήταν οι οριακές συνθήκες, το πορώδες και η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων του υδροφορέα. Είναι γεγονός ότι η πλήρη αποκατάσταση ενός υφάλμυρου υδροφορέα είναι μάλλον αδύνατη όχι μόνο γιατί απαιτούνται τεράστιες ποσότητες νερού αλλά γιατί και οι υδρολογικές συνθήκες της περιοχής μπορούν να μην το επιτρέπουν. [13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Καρστικοί υδροφορείς και τεχνητός εμπλουτισμός

4.1	Γενικά για τους καρστικούς υδροφορείς.....	54
4.1.1	Η προέλευση των καρστικών σχηματισμών.....	54
4.1.2	Η περιοχή εκτόνωσης.....	56
4.2	Χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων.....	56
4.2.1	Συνέπειες των καρστικών χαρακτηριστικών.....	59
4.3	Προσέγγιση του καρστικού συστήματος.....	61
4.3.1	Μεθοδολογική προσέγγιση.....	61
4.3.2	Προσέγγιση της δομής του συστήματος.....	62
4.3.3	Προσέγγιση της λειτουργίας του συστήματος.....	62
4.4	Μεθοδολογία της ανάλυσης.....	63
4.5	Μοντελοποίηση του καρστικού συστήματος.....	64
4.6	Μέθοδοι εκμετάλλευσης και προστασίας των καρστικών υδροφορέων.....	64
4.7	Ιδιαίτερα σημεία στη δομή και λειτουργία των καρστικών υδροφορέων.....	66
4.7.1	Προσομοίωση των καρστικών υδροφορέων.....	66
4.7.2	Πρακτικά προβλήματα των καρστικών υδροφορέων.....	67
4.8	Τεχνητός εμπλουτισμός σε καρστικά εδάφη.....	69
4.8.1	Νεοτεκτονική Δομή.....	69
4.8.2	Βασικά Βήματα του Καρστικού Εμπλουτισμού.....	71
4.9	Μοντέλα προσομοίωσης της ροής των καρστικών υδροφορέων & παραδείγματα εφαρμογής τους.....	72
4.9.1	Το παράδειγμα του υδροφορέα Edward στο Τέξας.....	74
4.9.2	Μεθοδολογία του πειράματος- Περιγραφή του μοντέλου.....	75
4.9.3	Αποτελέσματα.....	79
4.9.4	Γενικά συμπεράσματα.....	83
4.10	Το παράδειγμα του υδροφορέα Crestatx στην Ισπανία.....	83
4.10.1	Εισαγωγή.....	83
4.10.2	Περιγραφή του υδροφορέα.....	84
4.10.3	Οριακές συνθήκες.....	85
4.10.4	Καθεστώς μόνιμης προσομοίωσης.....	85
4.10.5	Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	86
4.10.6	Υποθέσεις της προσομοίωσης.....	87
4.10.7	Αποτελέσματα.....	88
4.11	Το πρόβλημα της υφαλμύρωσης στην Ελλάδα –παράδειγμα.....	90
4.11.1	Γενικά.....	90
4.11.2	Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	91
4.11.3	Υδρογεωλογία της κοιλάδας του Άργους.....	93
4.11.4	Νέο πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού.....	93
4.11.5	Αποτελέσματα.....	94
4.11.5.1	Ποιότητα νερού.....	94
4.11.6	Φαινόμενα υφαλμύρωσης.....	94
4.11.6.2	Φαινόμενα ανανέωσης υδάτων.....	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-

Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης με τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή της Χερσονήσου.

5.1 Το μοντέλο προσομοίωσης

Ο υπολογισμός της ροής των υπογείων υδάτων στη μελέτη αυτή έγινε με χρήση του υπολογιστικού μοντέλου PTC (Princeton Transport Model). Η εισαγωγή των γεωγραφικών δεδομένων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης PTC, έγινε με το λογισμικό ArgusONE. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές για τη διακριτοποίηση στο κάθετο επίπεδο και πεπερασμένα στοιχεία για την οριζόντια διακριτοποίηση.

Για την προσομοίωση της ροής, το PTC επιλύει την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) - S\frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=0}^r Q_i \delta(x-x_i)d(y-y_i)d(z-z_i) = 0$$

(39)

όπου:

- h το υδραυλικό ύψος (L)
- K_{xx} η υδραυλική αγωγιμότητα στη x οριζόντια κατεύθυνση (LT^{-1})
- K_{yy} η υδραυλική αγωγιμότητα στη y οριζόντια κατεύθυνση (LT^{-1})
- K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στη z κάθετη κατεύθυνση (LT^{-1})
- S ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας (L^{-1})
- Q_i ο όρος της πηγής στη θέση i (π.χ πηγάδια) (L^3T^{-1})
- δ η συνάρτηση Δέλτα
- r ο αριθμός των σημείων πηγών

5.1.1 Οριακές συνθήκες μοντέλου

Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής, οι οποίοι είναι [14]:

- **Πρώτο Είδος:** Όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, στα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο (*Specified head boundaries-Dirichlet conditions*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

- **Δεύτερο Είδος:** Όρια συγκεκριμένης ροής, στα οποία η παράγωγος του υδραυλικού ύψους-ροή είναι δεδομένη. (*Specified flow boundaries-Neumann conditions*).
- **Τρίτο Είδος:** Οριακές συνθήκες ροής εξαρτημένες από το υδραυλικό ύψος, στις οποίες υπολογίζεται η ροή κατά μήκος των ορίων από μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται και mixed διότι συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής (*Head-dependent flow boundaries-Cauchy or mixed boundary conditions*).

5.2 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης αφορά ένα τμήμα του Δήμου Χερσονήσου που βρίσκεται στα βόρεια παράλια του Ν. Ηρακλείου. Από το 1998 περιλαμβάνει τα δημοτικά διαμερίσματα Λιμένας Χερσονήσου, Χερσόνησος, Ποταμιές, Αβδού, Γωνιές και Κερά με τους επιμέρους οικισμούς που περιλαμβάνει καθένα από αυτά. Πρόκειται για ένα καθαρά παραθαλάσσιο μέρος στο οποίο υπάρχει πολύ έντονη τουριστική και γεωργική ανάπτυξη.

5.2.1 Κλιματολογικά στοιχεία

Το κλίμα της Κρήτης θεωρείται εύκρατο μεσογειακό αν και στις ορεινές περιοχές της μετατρέπεται σε λίγο πιο ψυχρό. Ο ετήσιος μέσος όρος θερμοκρασίας είναι 14-15°C, ενώ οι χειμώνες είναι γενικά ήπιος με ψυχρότερους μήνες τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος αν και η ηλιοφάνεια διαρκεί όλο το χρόνο στην Κρήτη. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από την παράκτια ζώνη στην ορεινή. [15]

Αντίστοιχα το κλίμα στην περιοχή της Χερσονήσου είναι τυπικά μεσογειακό με ήπιους χειμώνες και θερμά καλοκαίρια. Βροχοπτώσεις στην περιοχή εμφανίζονται από τον Οκτώβριο μέχρι και το Μάρτιο. Η μέση θερμοκρασία στην περιοχή ανέρχεται στους 19°C, αν και υπάρχει σημαντική διακύμανση ανάλογα με την εποχή [15]. Στον παρακάτω πίνακα 5.1 απεικονίζονται οι μέσες θερμοκρασίες για το σταθμό του Ηρακλείου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

Σταθμός Ηρακλείου Κρήτης 754							
Γεωγραφικό μήκος 25,11/ Γεωγραφικό πλάτος 35,2							
Μήνας	Ωρες Ηλιοφάνειας	Βαρομετρική πίεση	Μέση θερμοκρασία	Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία	Σχετική υγρασία	Μέση νέφωση	Ταχύτητα ανέμου
	h	mmHg	⁰ C	⁰ C	%		m/sec
1	108,8	1017,1	12,2	24,8	71	5,3	3,8
2	128,4	1016	12,5	29,2	69	5,1	4
3	170,3	1014,9	13,8	34,8	66	4,8	4
4	234,5	1013,3	16,8	36	64	3,7	3,4
5	314,3	1013,6	20,8	39	64	2,9	2,3
6	353,3	1012,6	24,4	45,7	59	1,4	3
7	384,7	1011	26,4	41	59	0,6	4
8	356,7	1011,4	26,3	40,7	60	0,7	4
9	285,2	1014,6	23,7	38,5	63	1,8	3,4
10	197,2	1016,7	20,3	7,9	3,6	64,9	3,2
11	161,5	1017,5	17,1	31,9	70	4,7	3
12	121,1	1016,8	13,9	26,7	70	5,1	4

Πίνακας 5.1 Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά περιοχής μελέτης Πηγή [17]

5.2.2 Χλωρίδα και πανίδα

Οι επικρατούσες εδαφοκλιματικές συνθήκες στο νομό Ηρακλείου ευνοούν την ανάπτυξη μιας πλούσια σε είδη χλωρίδας. Η μεγάλη ποικιλία της μορφολογίας, η συχνή και πολλές φορές απότομη εναλλαγή του εδάφους, από ψηλά βουνά σε κοιλάδες πεδιάδες, φαράγγια και βραχώδεις εκτάσεις και σε συνδυασμό με την άμεση σχέση με τη θάλασσα δημιουργούν ιδιαίτερες μικροκλιματικές συνθήκες ανά

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

περιοχή. Η χλωρίδα της Κρήτης περιλαμβάνει περισσότερα από 2000 είδη από τα οποία τα 8% είναι ενδημικά. [15] Εντός της περιοχής μελέτης εμφανίζονται τα εξής είδη:

- **Δένδρα:** Αλμυρίκια σε μεγάλη πυκνότητα που βρίσκονται κατά μήκος της παραλίας, φοίνικες, λεύκες μαύρες και λευκές, ακακίες κυανόφιλες, λεμονιές, ρογδιές νερατζιές, ελιές, συκιές και ευκάλυπτοι.
- **Θάμνοι:** Σφάκες, Φίκοι, εβόνιμα, Ιβίσκοι, πικροδάφνες, δάφνες, δενδρολίβανα.
- **Αναρριχώμενα:** αγγελικές, αμπέλια, τριανταφυλλιές, αγιόκλημα, γιασεμί, καζάνες, σερενάρια, πετούγιες, μαστιχάκια, μπουζιά, κισσοί, βάτοι, σκυλάκια, γεράνια, μπαξέδες, βιολέτες, βοκαμβίλιες, γαζιές, ντουράντες, μαργαρίτες, βασιλικοί, λιγούστρος και διάφορα σπαρτά.

Όσον αφορά στην **πανίδα** της περιοχής, τα είδη που συναντώνται είναι τα εξής:

- **Θηλαστικά:** αγριοκούνελα, ζουρίδες κουνάβια, νυφίτσες, άρκαλοι, σκαντζόχοιροι και διάφορα τρωκτικά όπως αρουραίοι και ποντίκια.
- **Πουλιά:** Υπάρχουν διάφορα ωδικά πτηνά, όπως αηδόνια, καρδερίνες, κοτσύφια, κορυδαλοί, χελιδόνια, σπουργίτια, αγριοπερίστερα, πέρδικες, τσίχλες, μπεκάτσες, τρυγόνια ακόμα και ορτύκια.
- **Ερπετά:** Υπάρχουν διάφορα είδη όπως σαύρες, φίδια και λιάνκια.
- **Έντομα:** Τέλος υπάρχουν έντομα όπως η μέλισσα και η λυμάντριά.

5.2.3 Γεωλογία της περιοχής

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή της Χερσονήσου είναι κυρίως καρστικοί και διακρίνονται σε: [15]

1.Υδροπερατοί σχηματισμοί στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι και οι ψαμμίτες .

2.Αδιαπέρατοι σχηματισμοί στους οποίους ανήκουν οι ψυλλίτες, οι χαλαζίτες, ο φλύσχης, οι μάργες, και τα αργιλικά πετρώματα.

Οι υδροπερατοί σχηματισμοί έχουν ιδιαίτερη σημασία για την υδρογεωλογική έρευνα καθώς εντός αυτών αναπτύσσονται οι υπόγειοι υδροφορείς. Παρ' όλα αυτά όμως για την διαμόρφωση, την διακίνηση και την κατανομή τόσο του υπόγειου όσο και του επιφανειακού νερού ιδιαίτερο ρόλο παρουσιάζουν και οι υδατοστεγείς σχηματισμοί. [15]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

5.2.4 Οι υδρογεωλογικές ενότητες

Η διαμόρφωση υδροφόρων οριζόντων και υδρογεωλογικών ενοτήτων εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: την βροχόπτωση, το γεωλογικό σχηματισμό, και το στεγανό υπόβαθρο. Στη συγκεκριμένη λεκάνη μελέτης, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δύο ορεινοί όγκοι που είναι οι κύριοι τροφοδότες των υπόγειων υδροφορέων είναι ο Ψηλορείτης και Δίκτη, οι υδρογεωλογικές ενότητες που σχηματίζονται είναι οι εξής [15]:

- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Ψηλορείτη
- Υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη
- Υδρογεωλογική ενότητα Ταλλαίων ορέων
- Υδρογεωλογική ενότητα λεκάνης Ηρακλείου

Η υδρογεωλογική ενότητα που επηρεάζει άμεσα την περιοχή της Χερσονήσου είναι η υδρογεωλογική ενότητα καρστικού υδροσυστήματος Δίκτη. Ο ορεινός όγκος Δίκτη ανήκει κατά το μεγαλύτερο μέρος του στο Νομό Λασιθίου, ενώ στο νομό Ηρακλείου ανήκει μόνο το Δυτικό τμήμα. Αποτελείται κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς του προνεογενούς, ενώ είναι ένα από τα κυριότερα καρστικά υδροσυστήματα της Κρήτης μετά τα Λευκά Όρη και τον Ψηλορείτη.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης δεν είναι εντελώς ανεξάρτητες από αυτές που επικρατούν στο σύνολο του ορεινού όγκου της Δίκτη, ωστόσο η περιοχή χωρίζεται στις εξής ενότητες[15]:

- Στις υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Πίνδου.
- Στις υπόγειες υδροφορίες των ανθρακικών σχηματισμών της γεωλογικής ενότητας Τρίπολης.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή Ανώπολης –Γουρνών και νοτιότερα μέχρι τις κοινότητες Γαλιπέ – Σκοτεινό.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται νότια της Χερσονήσου – Χαρασό – Κόξαρης – Καλού Χωριού.
- Στους ανθρακικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου και τέλος
- στους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής Μαλίων.

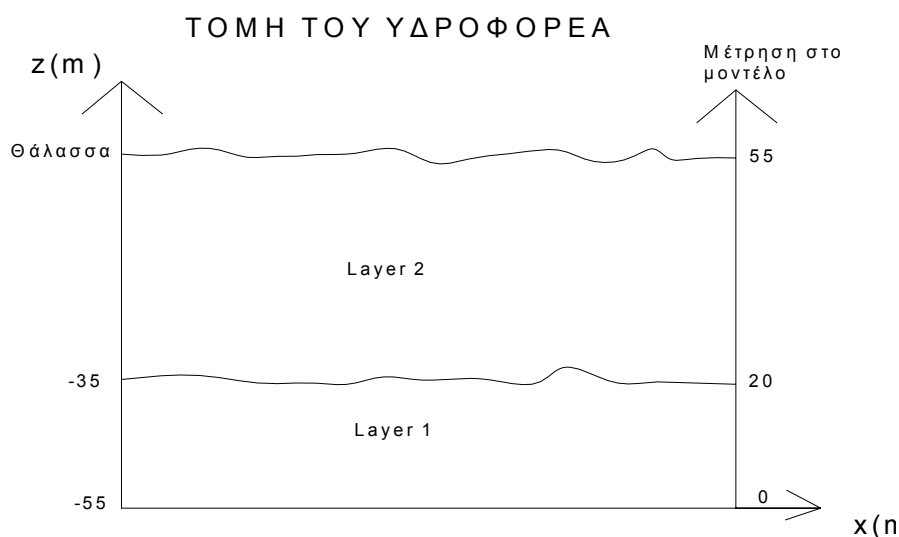
Από αυτούς τους σχηματισμούς η μελέτη αφορά άμεσα τους καρστικούς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην περιοχή της κοινότητας Χερσονήσου. Πιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

συγκεκριμένα όλες οι ερευνητικές γεωτρήσεις που έχουν γίνει στην προσπάθεια της κοινότητας για τον εντοπισμό υπόγειων υδροφορέων με σκοπό την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών, έδωσαν υφάλμυρο νερό. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι του Ιουρασικού της Ζώνης Τρίπολης που έρχονται σε άμεση επαφή με τη θάλασσα, καθώς και το ρήγμα στην επαφή των ασβεστολιθικών του Ιουρασικού και των ασβεστόλιθων του Κρητιδικού λειτουργούν θετικά για την είσοδο του θαλάσσιου νερού στα καρστικά και τεκτονικά διάκενα των ανθρακικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής.[15]

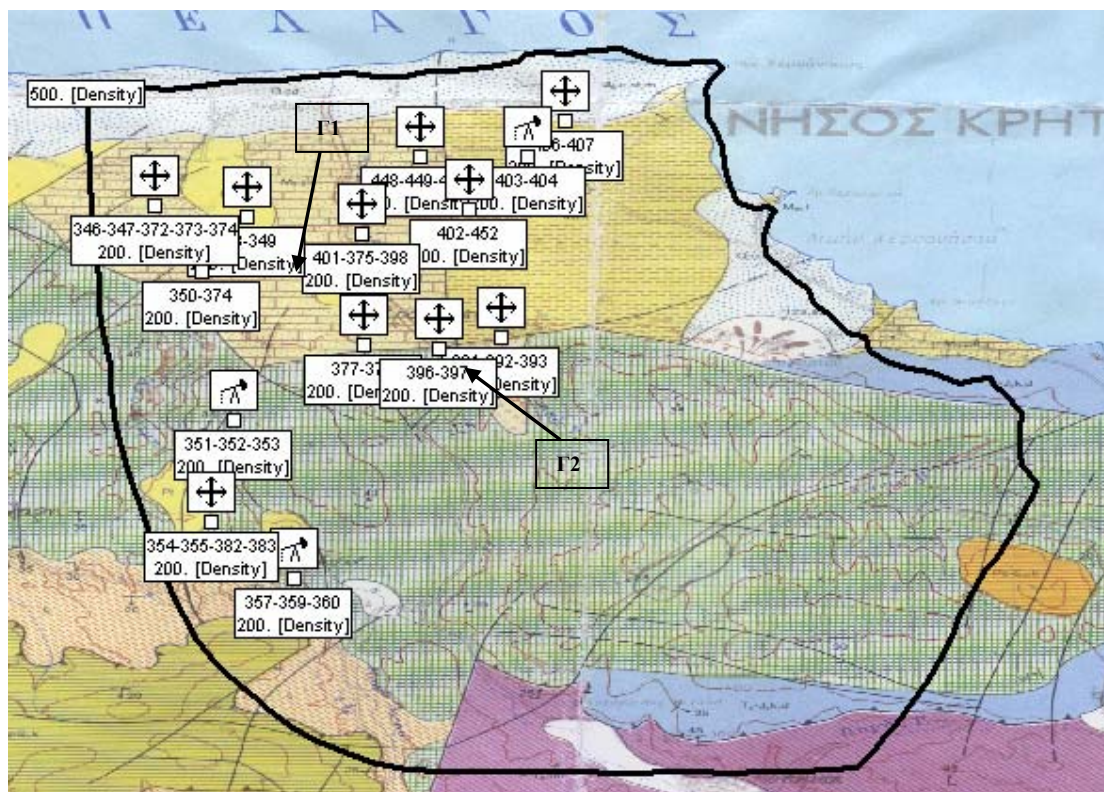
5.3 Κατάστρωση μοντέλου- περιοχή μελέτης.

Αρχικά καταστρώθηκε το μοντέλο το οποίο οριοθετήθηκε χωρικά. Η προσομοίωση αφορά την περιοχή της Χερσονήσου και την ευρύτερη ζώνη της. Με βάση δύο υδρογεωτρήσεις (Γ1, Γ2) που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή τον Ιούλιο του 2005 και σε σημεία που φαίνονται στον παρακάτω χάρτη (σχήμα5.2), συλλέχθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες για το μοντέλο όπως το γεωλογικό υπόστρωμα, το πορώδες και η διαπερατότητα του υδροφορέα. Το χωρικό μοντέλο χωρίστηκε σε δύο στρώματα (layers) όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Τομή του υδροφορέα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.2 Περιοχή μελέτης-Γεωλογικά χαρακτηριστικά

5.3.1 Χάρτες

Οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο γεωλογικός ο οποίος απεικόνιζε τα γεωλογικά στρώματα και ο υδρολογικός ο οποίος περιείχε τις γεωτρήσεις της περιοχής. Η κλίμακα των δύο χαρτών ήταν 1:50.000. Οι γεωτρήσεις οι οποίες υπήρχαν στον υδρολογικό χάρτη παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5.2.

Α/Α	ΑΡΙΘ.ΠΡΩΤ.	ΒΑΘΟΣ(m)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /h)
1	Γ346	90	15
2	Γ347	68	15
3	Γ348	98	40
4	Γ349	165	65
5	Γ350	160	40
6	Γ351	160	40
7	Γ352	190	40
8	Γ353	170	15
9	Γ354	170	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

10	Γ355	200	30
11	Γ357	270	30
12	Γ359	320	25
13	Γ360	300	25
14	Γ368	120	30
15	Γ372	90	35
16	Γ373	90	30
17	Γ374	100	15
18	Γ375	40	20
19	Γ377	40	30
20	Γ379	90	10
21	Γ382	140	30
22	Γ383	160	30
23	Γ391	148	40
24	Γ392	180	15
25	Γ393	148	35
26	Γ396	170	20
27	Γ397	140	30
28	Γ401	80	40
29	Γ402	80	40
30	Γ403	65	25
31	Γ404	40	30
32	Γ406	25	60
33	Γ407	25	40
34	Γ448	25	20
35	Γ449	26	20
36	Γ450	26	20
37	Γ452	100	20

Πίνακας 5.2: Γεωτρήσεις της περιοχής[15]

Ο αριθμός των υφισταμένων γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης είναι αρκετά μεγάλος και δημιουργεί πρόβλημα στη διακριτοποίηση της περιοχής. Για το λόγο αυτό οι γεωτρήσεις ομαδοποιήθηκαν ανάλογα με το βάθος τους κατατάχτηκαν στο αντίστοιχο στρώμα και αθροίστηκαν. Ως μονάδα μέτρησης των παροχών λήφθηκε m³/d (κμ/ ημέρα). Ως στρώμα 1 και 2 ονομάστηκαν τα γεωλογικά στρώματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

μετρούμενα από τη βάση και προς τα άνω. Η ομαδοποίηση των γεωτρήσεων παρουσιάζεται στον πίνακα 5.3.

A/A	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	ΣΤΡΩΜΑ (LAYER)	ΠΑΡΟΧΗ (m ³ /d)
1	Γ346-Γ347-Γ372- Γ373	1	2280
2	Γ403-404	1	1320
3	Γ402-452	1	1440
4	Γ401-Γ375	1	1440
5	Γ357-Γ359-Γ360	1	1920
6	Γ377-Γ379	1	960
7	Γ348-Γ349	1	2520
8	Γ351-Γ352-Γ353	1	2280
9	Γ391-Γ392-Γ393	1	1800
10	Γ396-Γ397	1	1200
11	Γ354-Γ355-Γ382- Γ383	1	2880
12	Γ350-Γ374	1	1800
13	Γ406-Γ407	2	2280
14	Γ448-Γ449-Γ450	2	1440

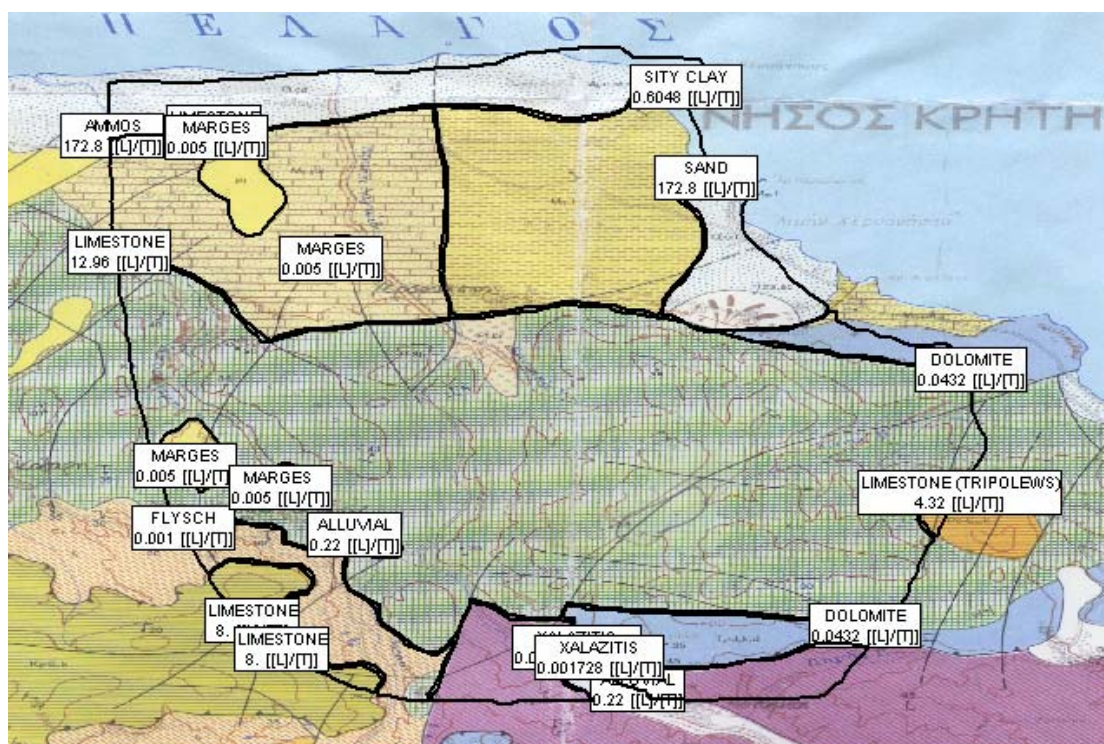
Πίνακας 5.3: Ομαδοποιημένες γεωτρήσεις της περιοχής

Αντίστοιχα τα πετρώματα που κυριαρχούν στην περιοχή μελέτης είναι κυρίως ασβεστολιθικά με μεγάλες υδραυλικές αγωγιμότητες όπως φαίνονται στο σχήμα 5.3. Συγκεκριμένα, στο κέντρο της περιοχής υπάρχουν βιοκλαστικοί λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι (πορτοκαλί χρώμα), μέσα στους οποίους υπάρχουν τμήματα από μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους (έντονο κίτρινο). Επίσης ανατολικά υπάρχουν ιλυούχες άργιλοι και καλά διαβαθμισμένες άμμοι (ελαφρύ κίτρινο) ενώ κατά μήκος της ακτής υπάρχουν άμμοι ακτών και χαλαρά αργιλοαμμώδη (άσπρο με γαλάζιο). Τα πετρώματα ήταν τα ίδια και για τα δύο στρώματα (layers). Οι υδραυλικές αγωγιμότητες των πετρωμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 5.4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (m ³ /d)
Άμμος-θαλάσσιες αποθέσεις	172,8
Αργίλος	0,6048
Ασβεστόλιθος	12,96
Χαλαζίτης	0,001728
Αλουβιακές αποθέσεις	0,22
Δολομίτης	0,0432
Ασβεστόλιθος (Τριπόλεως)	4,32
Μάργες	0,005
Φλύσχις	0,001

Πίνακας 5.4: Υδραυλικές αγωγιμότητες πετρωμάτων



Σχήμα 5.3 Γεωλογική διακριτοποίηση περιοχής

5.3.2 Οριακές συνθήκες

Στο μοντέλο εισήχθηκαν οι απαραίτητες οριακές συνθήκες. Οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους εφαρμόστηκε κατά μήκος της ακτής όπου το υδραυλικό ύψος είναι ίσο με 55m, αφού το επίπεδο αναφοράς είναι 55m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Από

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

τα οριοθετημένα όρια της περιοχής στα οποία υπάρχουν πετρώματα με υψηλή αγωγιμότητα θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται εισροή νερού οπότε και εφαρμόστηκε συνθήκη 2^{ου} είδους. Το μέγεθος της εισροής του νερού προσαρμόζεται στο μοντέλο ανάλογα με τη χρονική περίοδο, καθώς το χειμώνα θα είναι μεγαλύτερη από ότι το καλοκαίρι. Οριακή συνθήκη 2^{ου} είδους αποτελούν και τα πηγάδια άντλησης των οποίων η άντληση έχει προσαρμοστεί ανάλογα με τη χρονική περίοδο. Το καλοκαίρι η άντληση το καλοκαίρι είναι αυξημένη λόγω της τουριστικής κίνησης, ενώ το χειμώνα περιορίζεται στο 30% της θερινής τιμής τους. Οι οριακές συνθήκες ήταν ίδιες και για τα δύο στρώματα.

5.3.4 Υψόμετρο – Αρχικές συνθήκες

Από το γεωλογικό χάρτη σχεδιάστηκαν και εισήχθησαν στο μοντέλο οι ισοϋψείς της περιοχής και στη συνέχεια εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρεμβολής, (interpolation method) για να μπορέσει το μοντέλο να προσομοιώσει όσο το δυνατόν καλύτερα το ανάγλυφο της περιοχής. Στα απόλυτα υψόμετρα της περιοχής προστέθηκαν 55 μέτρα δεδομένου ότι το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται 55 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το μοντέλο για να προσομοιώσει τη περιοχή και να δώσει μια κατάσταση του υδροφορέα χρειάζεται και κάποιες άλλες αρχικές συνθήκες, όπως το αρχικό υδραυλικό ύψος. Η τιμή αυτή δόθηκε στα 50 μέτρα και για τα δύο στρώματα.

5.3.5 Βροχόπτωση

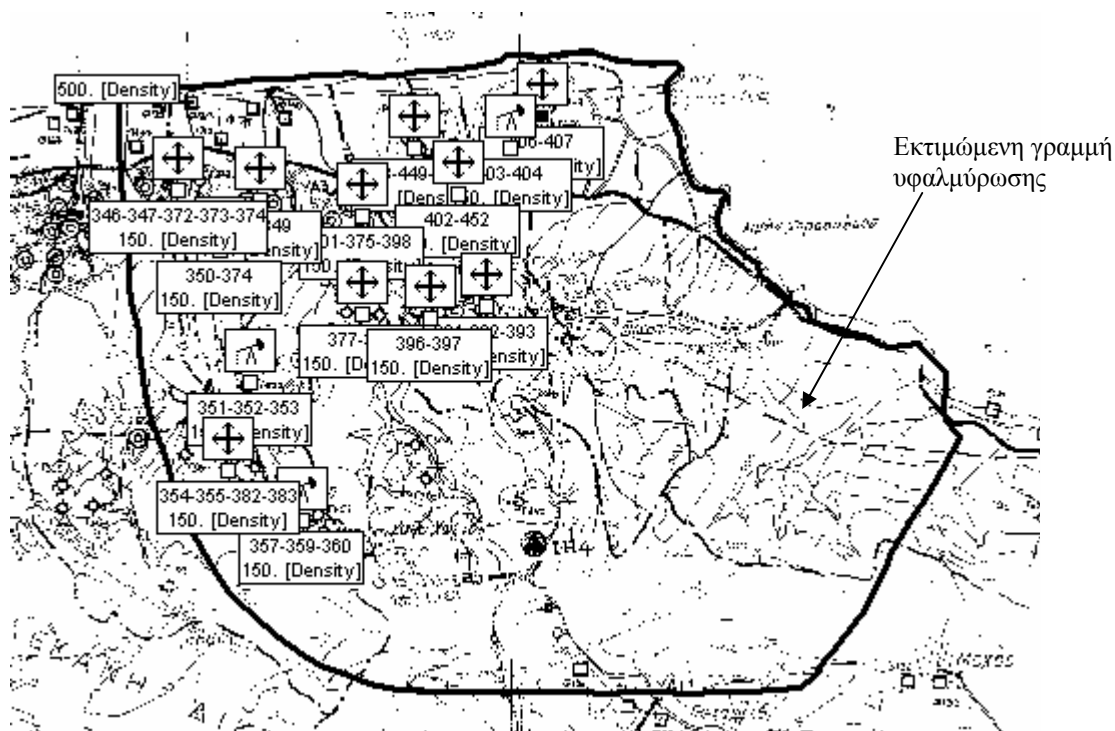
Από το 1931 λειτουργεί βροχόμετρο στην περιοχή του Καστελίου η οποία είναι πολύ κοντά στην περιοχή μελέτης. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του έτους 2004-2005 οι οποίες ήταν στα 103,7mm για τη χειμερινή περίοδο και μηδενική για τη θερινή. Οι τιμές μετατράπηκαν σε m/d για να είναι σε συμφωνία με τις υπόλοιπες.

5.3.6 Βαθμονόμηση του μοντέλου

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των παραμέτρων στο μοντέλο, ήταν απαραίτητη η βαθμονόμηση του, πριν υλοποιηθεί οποιοδήποτε σενάριο και προκύψουν εσφαλμένα συμπεράσματα. Η βαθμονόμηση ήταν μια δύσκολη διαδικασία καθώς δεν υπήρχαν πολλά στοιχεία παρά μόνο για περιορισμένο αριθμό πηγαδιών που βρίσκονται μέσα στη ζώνη υφαλμύρωσης. Η ζώνη υφαλμύρωσης είχε

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

εκτιμηθεί αρχικά από το Ι.Γ.Μ.Ε, και σημειώνεται στον υδρολογικό χάρτη όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Μετά την επιλογή κατάλληλων οριακών και αρχικών συνθηκών, προσδιορίστηκε η αρχική ζώνη υφαλμύρωσης η οποία ποιοτικά έδινε τα ίδια αποτελέσματα με την αρχική υπολογισθείσα ζώνη.



Σχήμα 5.4 Εκτιμώμενη γραμμή υφαλμύρωσης από Ι.Γ.Μ.Ε.

Το υδραυλικό έτος έχει χωριστεί σε δυο περιόδους, τη χειμερινή και την καλοκαιρινή. Η θερινή θεωρήθηκε ότι είχε διάρκεια 8 μήνες ενώ η χειμερινή 4 μήνες. Υπολογίστηκε ένα μελλοντικό αρχικό σενάριο όπου τα πηγάδια αντλούν συνεχώς για 5 χρόνια χωρίς καμία επέμβαση στον υδροφορέα. Για όλα τα σενάρια που ακολούθησαν το χρονικό όριο της προσομοίωσης ήταν τα 5 χρόνια.

Σύμφωνα με τη προσέγγιση Ghyben – Herzgerg, για κάθε 1m πάνω από τη θάλασσα η διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού βρίσκεται 40m κάτω από τη θάλασσα. Επειδή το πάχος του υδροφορέα στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 55 μέτρα, το σημείο όπου θα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης θα έχει υδραυλικό ύψος $56,375\text{m}$ ($=55+55/40$). Όλα τα σημεία που έχουν μικρότερο υδραυλικό ύψος από αυτό θα βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης.

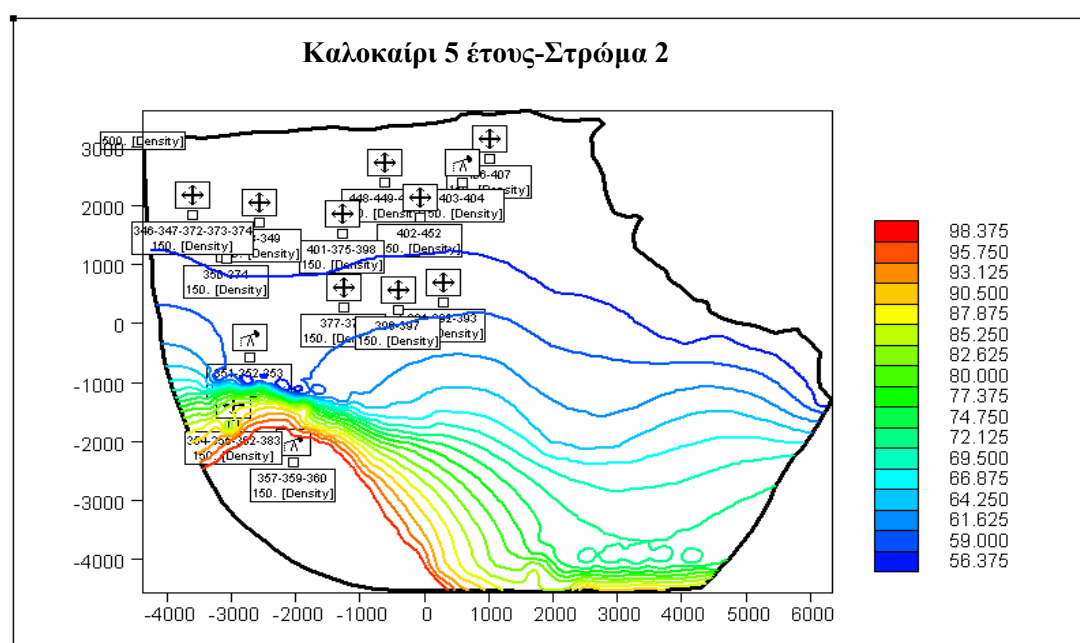
Στα διαγράμματα της αρχικής κατάστασης καθώς και των μελλοντικών σεναρίων, οι ισοδυναμικές γραμμές του υδραυλικού ύψους παρουσιάζονται με

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

κλίμακα που αρχίζει από τα 56,375 μέτρα (το μέτωπο της υφαλμύρωσης) και με σταθερό βήμα το 2,625 μέτρα καταλήγει στα 100 μέτρα. Αντίθετα, στα διαγράμματα της ταχύτητας δεν υπάρχει σταθερό βήμα και σε κάθε περίπτωση οι ταχύτητες είναι διαφορετικές και παρουσιάζονται στα υπομνήματα του εκάστοτε διαγράμματος.

5.4 Υπολογισμός της αρχικής κατάστασης του υδροφορέα.

Μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου προσδιορίστηκε η αρχική κατάσταση του υδροφορέα η οποία θεωρήθηκε ότι ήταν το τέλος του πέμπτου έτους. Τα αποτελέσματα του μοντέλου απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 5.3



Σχήμα 5.5 Υδραυλικά ύψη (m)-καλοκαίρι 5 έτους

Όπου:

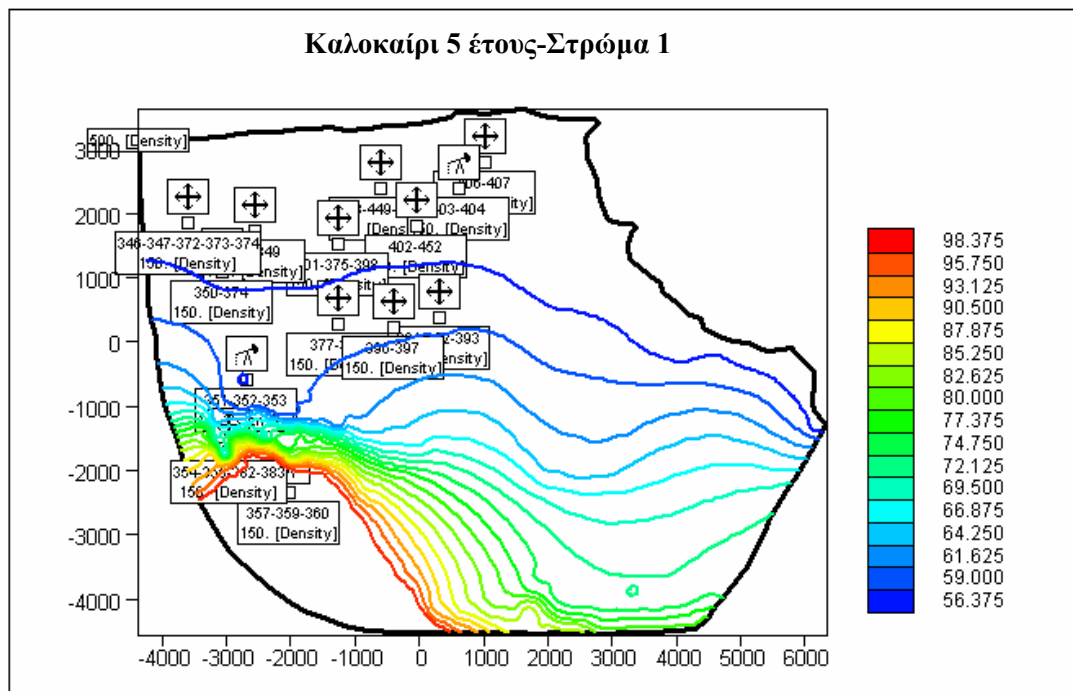


Ιδιωτικό πηγάδι άντλησης

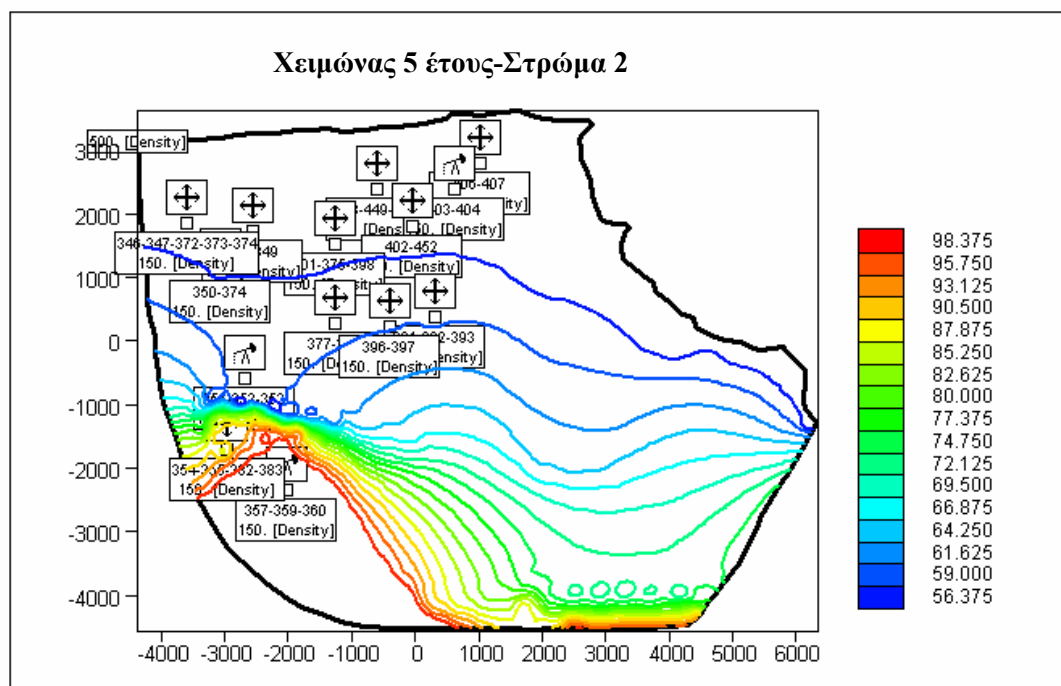


Δημοτικό πηγάδι άντλησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναγκάιτση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

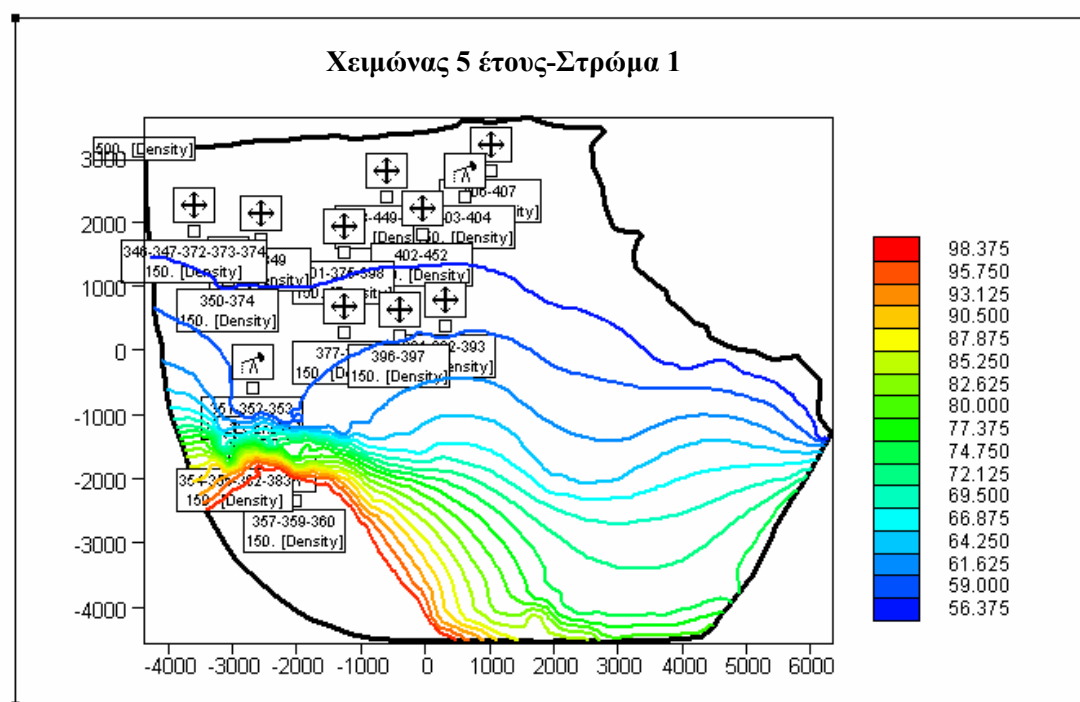


Σχήμα 5.6 Υδραυλικά ύψη (m)-καλοκαίρι 5 έτους- Layer 1



Σχήμα 5.7 Υδραυλικά ύψη (m)-χειμώνας 5 έτους- Layer 2

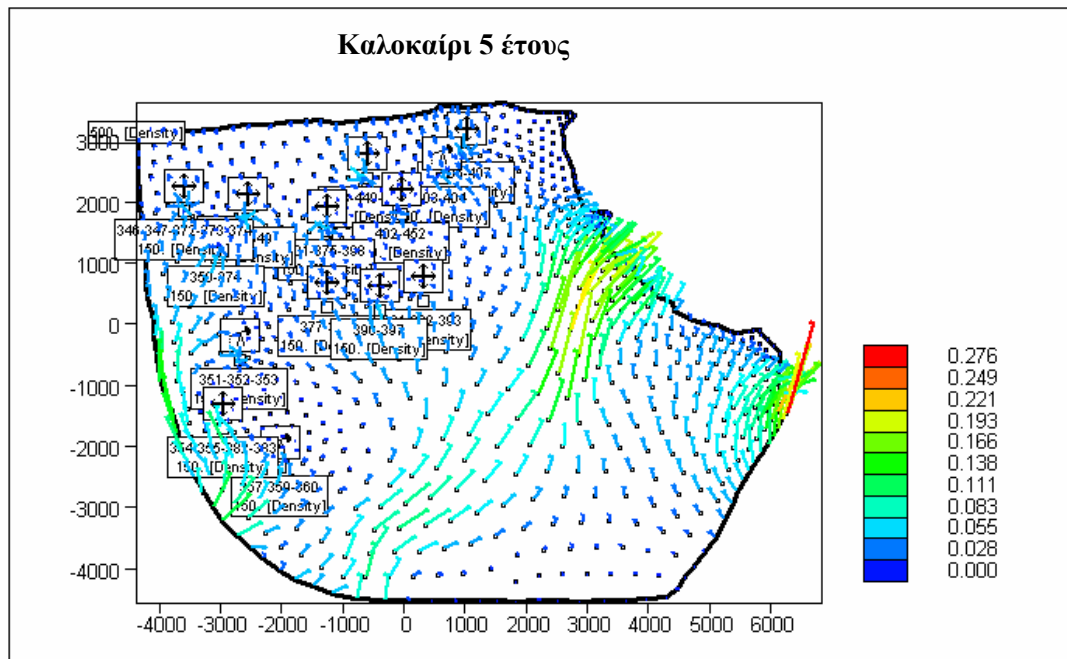
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



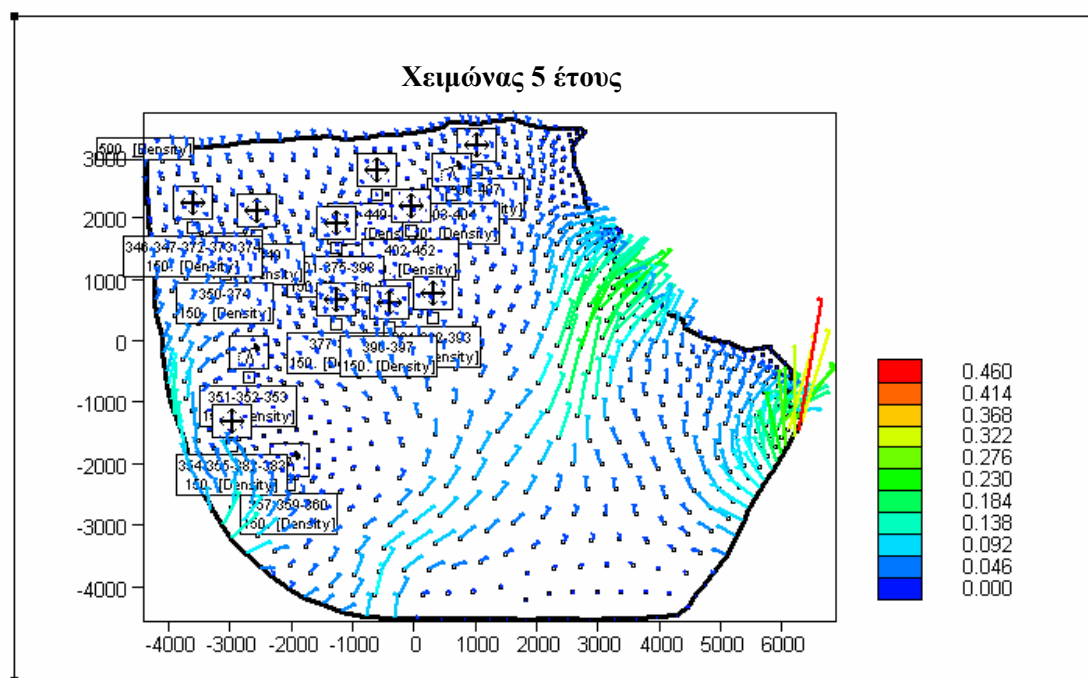
Σχήμα 5.8 Υδραυλικά ύψη (m)–χειμώνας 5 έτους- Layer 1

Είναι φανερό ότι η ζώνη υφαλμύρωσης έχει προχωρήσει αρκετά προς την ενδοχώρα ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο. Η διαφορά μεταξύ των δύο στρωμάτων δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη και ποιοτικά οδηγούν στο ίδιο συμπέρασμα. Πολλά πηγάδια βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης ενώ η κατανομή των υδραυλικών υψών δεν είναι και τόσο ομοιόμορφη ιδιαίτερα στο αριστερό τμήμα της περιοχής όπου υπάρχει η μεγάλη άντληση. Το χειμώνα είναι λίγο βελτιωμένη η κατάσταση και η ζώνη υφαλμύρωσης είναι λίγο υψηλότερα σε σχέση με τη θερινή θέση της. Το φαινόμενο αποδίδεται τόσο στη μείωση της άντλησης όσο και στην αύξηση των βροχοπτώσεων. Σε καμία όμως περίπτωση η κατάσταση αυτή δεν είναι η επιθυμητή. Η ζώνη υφαλμύρωσης είναι αρκετά υψηλά και πρέπει να περιοριστεί. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ταχύτητες του νερού για κάθε περίοδο. Τονίζεται ότι στα σχήματα παρουσιάζεται η κατάσταση του ανώτερου στρώματος δεδομένου ότι και για το κατώτερο στρώμα τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ίδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.9 Ταχύτητες του νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 5.10 Ταχύτητες του νερού(m/d) κατά τη χειμερινή περίοδο.

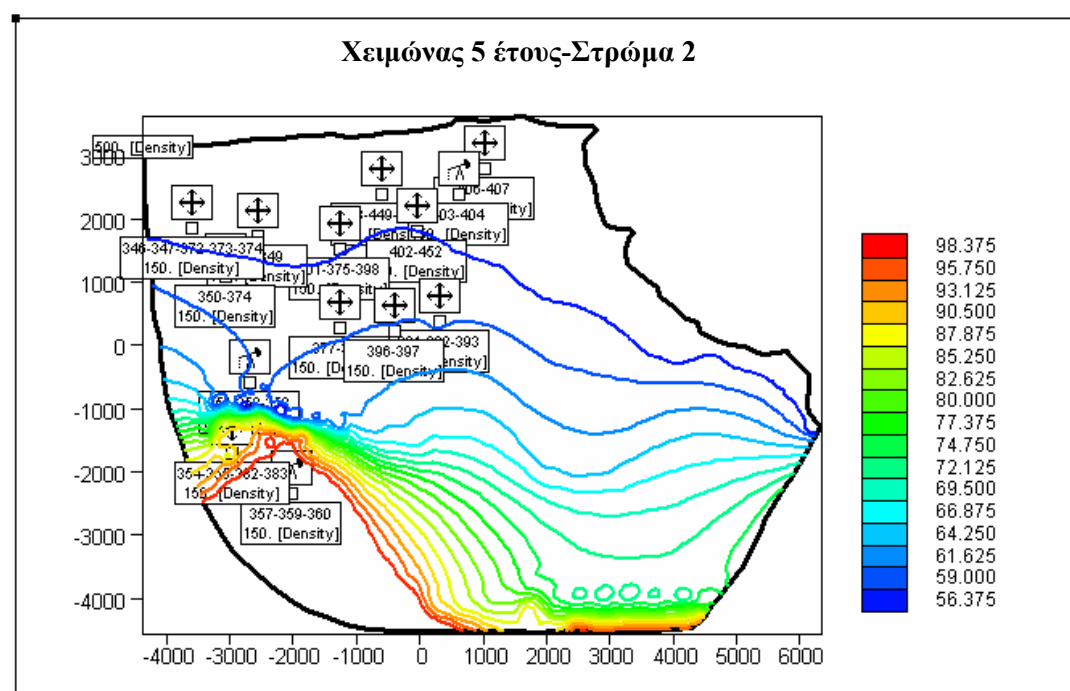
Στα σχήματα 5.9 & 5.10 παρατηρούμε την κίνηση του νερού η οποία η οποία ακολουθεί την πορεία από εδαφικά υλικά με τη χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα σε αυτά με την υψηλότερη. Η κατάσταση κρίνεται δυσμενής και πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Παρακάτω παρουσιάζονται μια σειρά προτεινόμενων λύσεων και αξιολογούνται τα αποτελέσματά τους. Αρχικά παρουσιάζονται κάποιες λύσεις οι οποίες προτείνουν απλώς την παύση λειτουργίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

κάποιων πηγαδιών άντλησης ανάλογα με τις θέσεις τους, ενώ στη συνέχεια οι λύσεις αυτές συνδυάζονται και με τον εμπλουτισμό του υδροφορέα.

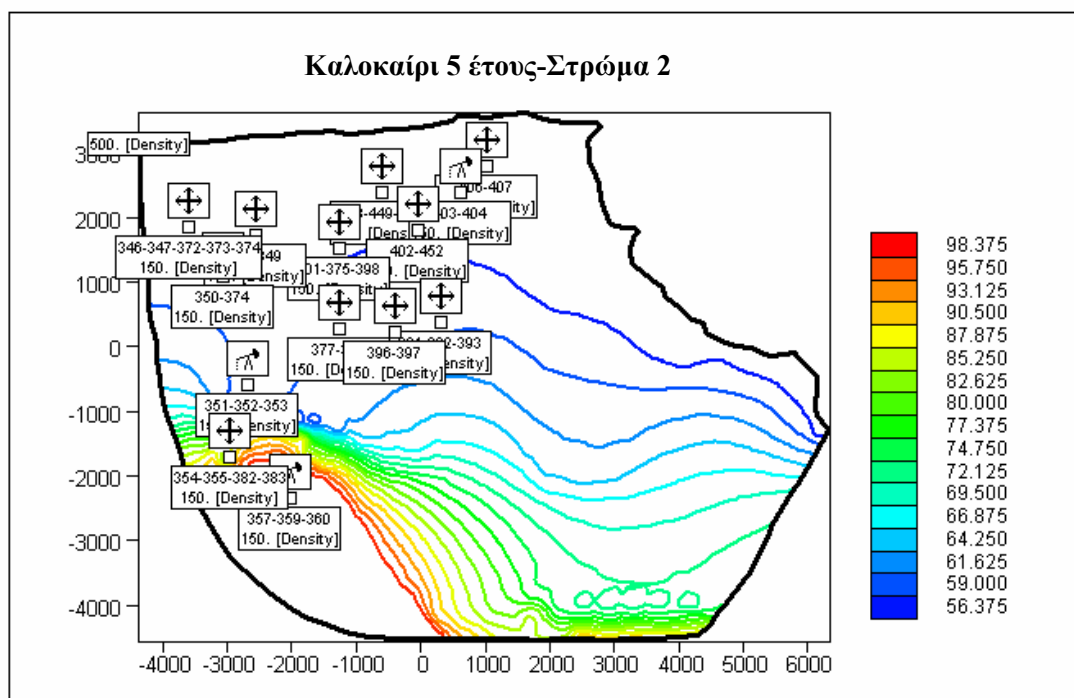
5.5 Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος χωρίς εμπλουτισμό του υδροφορέα.

Σενάριο1: Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια τα οποία βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης παραμένουν κλειστά χειμώνα-καλοκαίρι, ενώ τα υπόλοιπα λειτουργούν κανονικά. Παρακάτω φαίνονται τα σχήματα των υδραυλικών υψών και τα αντίστοιχα των ταχυτήτων.



Σχήμα 5.11 Σενάριο 1-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη χειμερινή περίοδο.

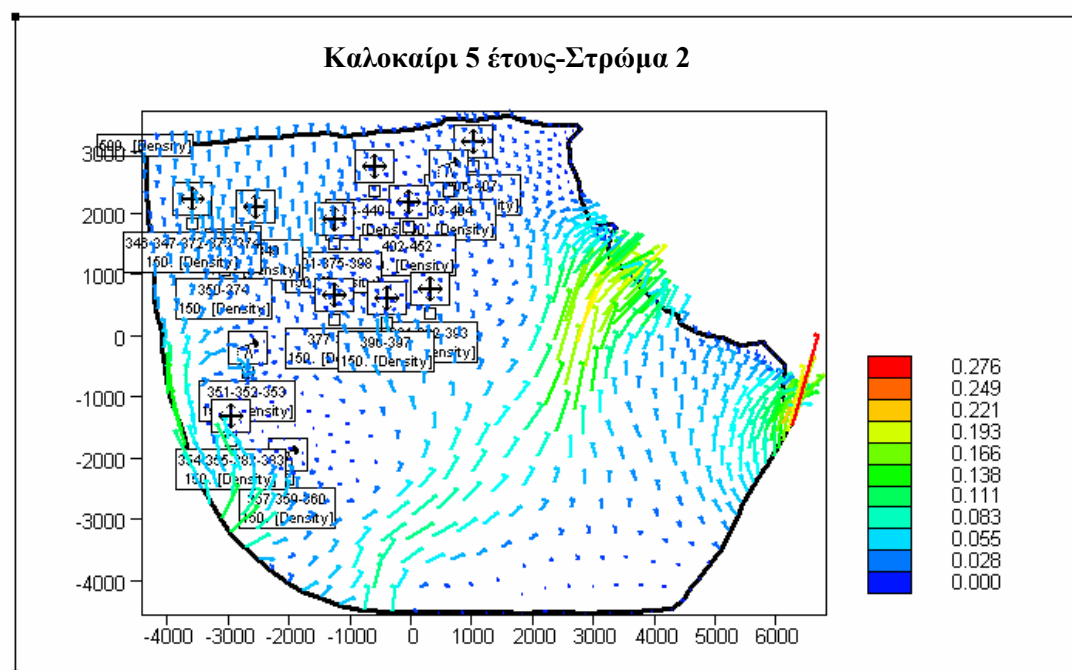
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.12 Σενάριο 1-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη θερινή περίοδο.

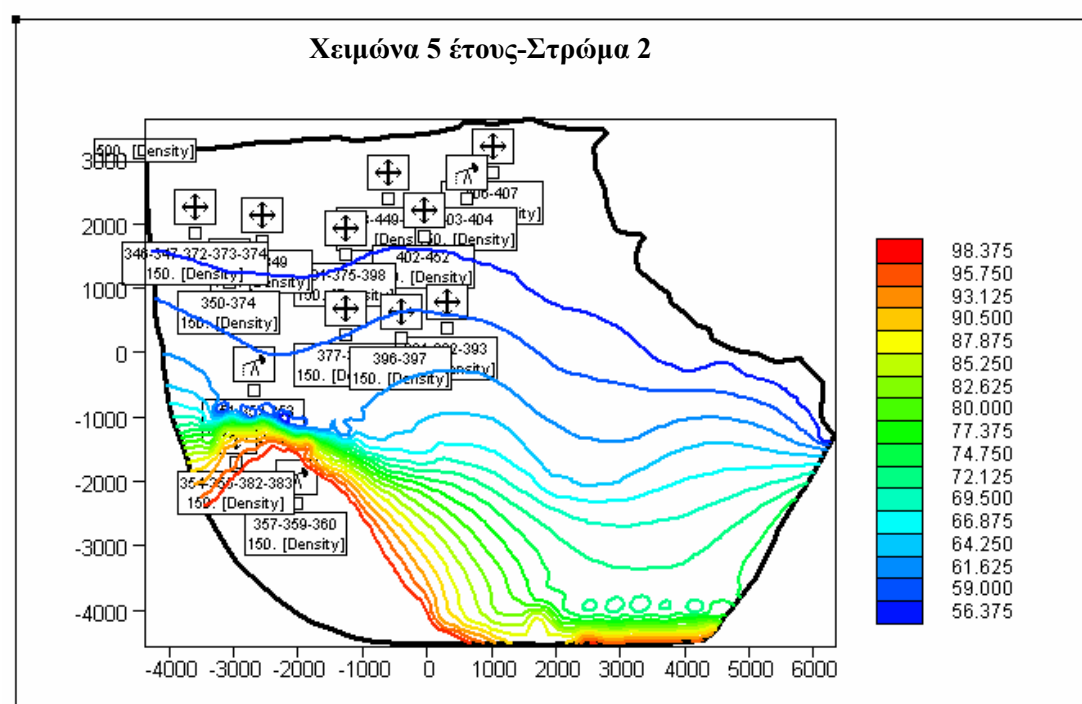
Τα αποτελέσματα της λύσης αυτής είναι αισθητά σε σχέση με την αρχική κατάσταση του υδροφορέα, γεγονός που είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι από την περιοχή αυτή αντλείται σχεδόν η μισή ποσότητα άντλησης. Μάλιστα, ενώ η συνολική ποσότητα άντλησης αγγίζει τα $25560\text{m}^3/\text{d}$, τα $12720\text{m}^3/\text{d}$ αντλούνται από τη ζώνη υφαλμύρωσης. Στο σχήμα 5.11 παρατηρείται ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει μετακινηθεί προς την ακτή, ενώ τοπικά υπάρχει άνοδος των τιμών των υδραυλικών υψών. Συγκρίνοντας τις δύο περιόδους χειμερινή –θερινή, φαίνεται ότι κατά το χειμώνα η γραμμή υφαλμύρωσης είναι κατά 100 περίπου μέτρα πλησιέστερα προς την ακτογραμμή. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω της μειωμένης άντλησης και της βροχόπτωσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η λύση αυτή δεν κρίνεται επαρκής για τη λύση του προβλήματος αφού όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών 5.11 & 5.12 πολλά πηγάδια παραμένουν ακόμη εντός υφάλμυρης ζώνης. Γεγονός είναι πάντως ότι και η πρόταση να παραμείνουν κλειστά κάποια πηγάδια άντλησης θα προκαλέσει αντιδράσεις στην τοπική κοινωνία. Παρακάτω ακολουθούν το διάγραμμα των ταχυτήτων νερού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



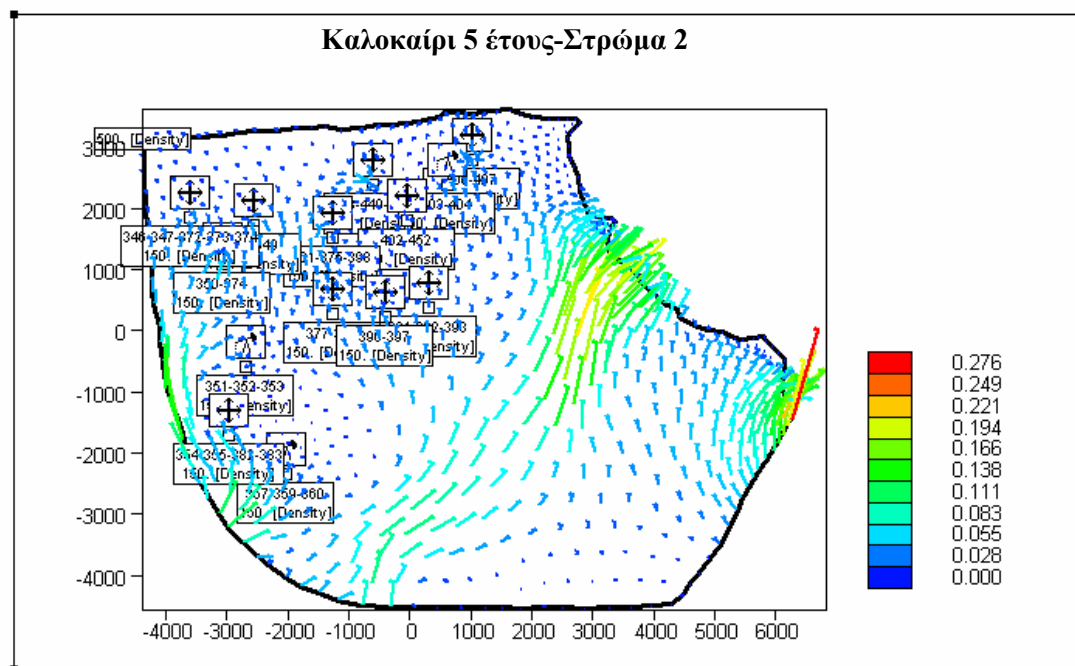
Σχήμα 5.13 Σενάριο 1-Ταχύτητες νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.

Σενάριο 2: Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια λειτουργούν χειμώνα-καλοκαίρι και για τα πέντε χρόνια αλλά η άντλησή τους έχει περιοριστεί στο μισό της αρχικής τιμής τους. Στα σχήματα 5.14 & 5.15 απεικονίζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών.



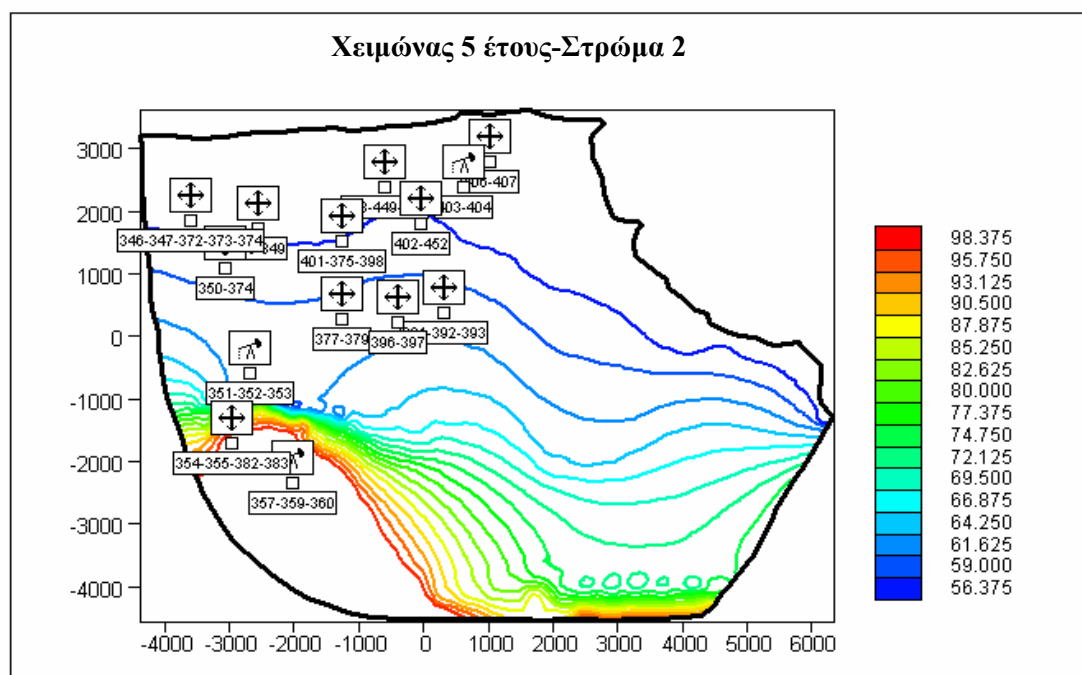
Σχήμα 5.14 Σενάριο 2-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη χειμερινή περίοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



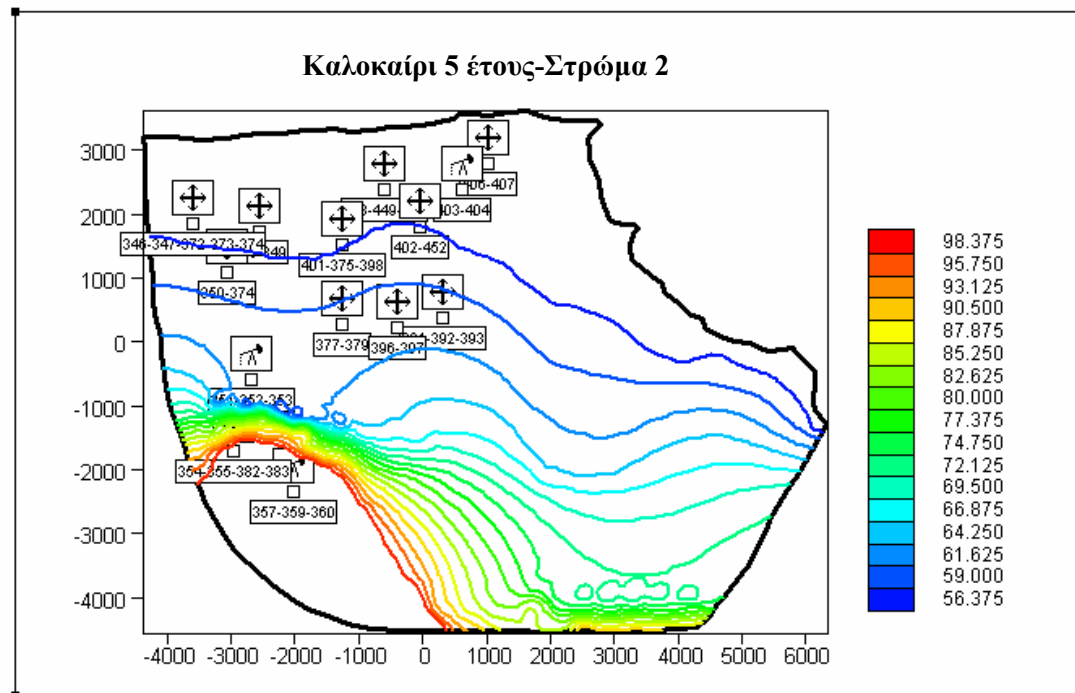
Σχήμα 5.16 Σενάριο 2-Ταχύτητες νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.

Σενάριο 3: Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι όλα τα πηγάδια παραμένουν τελείως κλειστά και για τα πέντε χρόνια. Αν και πρόκειται για μία τελείως ουτοπική κατάσταση η προσέγγιση αυτή έγινε για να εκτιμηθεί αν η φυσική αναπλήρωση του υδροφορέα μπορεί να τον επαναφέρει στην αρχική του κατάσταση. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω.



Σχήμα 5.17 Σενάριο 3-Υδραυλική ύψη (m)-κατά τη χειμερινή περίοδο.

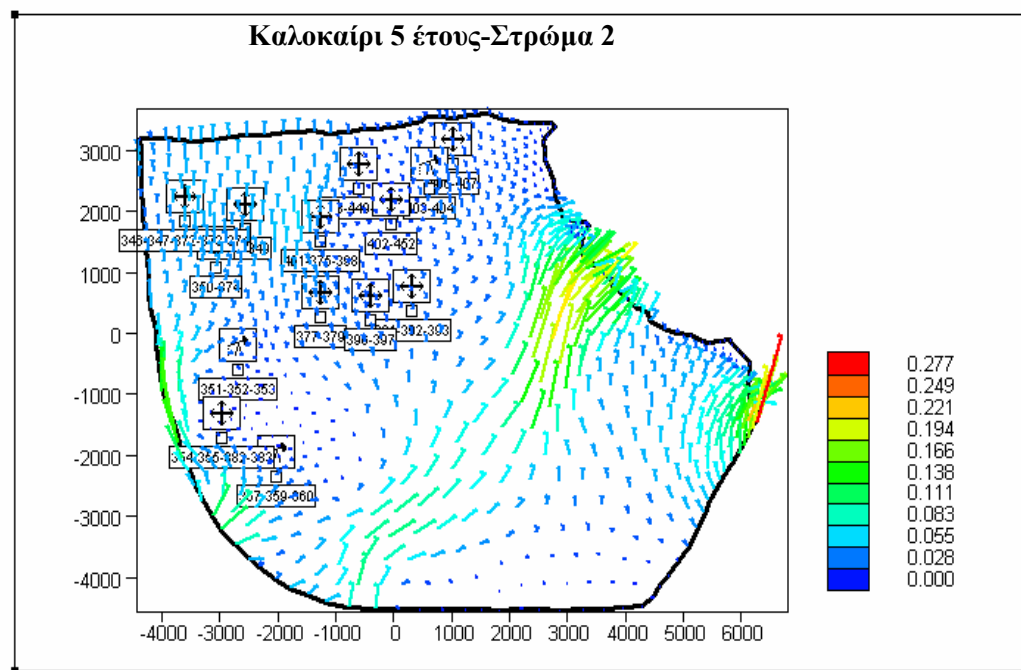
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.18 Σενάριο 3-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη θερινή περίοδο.

Η βελτίωση που παρατηρείται δεν είναι αισθητή και δε διαφέρει ιδιαίτερα από τις προηγούμενες λύσεις. Υπάρχει φυσικά κάποια άνοδο στις τιμές των υδραυλικών υψών όχι όμως πολύ σημαντική. Υποθέτοντας ολοκληρωτική παύση όλων των πηγαδιών άντλησης ο υδροφορέας δε θα μπορέσει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Έχει πληγεί ανεπανόρθωτα και χρειάζονται δραστικά μέτρα για να επιλυθεί το πρόβλημα. Στο σημείο αυτό έρχεται η μέθοδος του τεχνητού εμπλουτισμού. Με δεδομένο ότι η κατάσταση δε βελτιώνεται απλώς με την παύση λειτουργίας κάποιων πηγαδιών άντλησης θα δοκιμαστεί ο εμπλουτισμός του υδροφορέα στα παρακάτω σενάρια. Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα της ταχύτητας του καλοκαιριού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.19 Σενάριο 3-Ταχύτητες νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.

5.6 Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος με εμπλουτισμό του υδροφορέα.

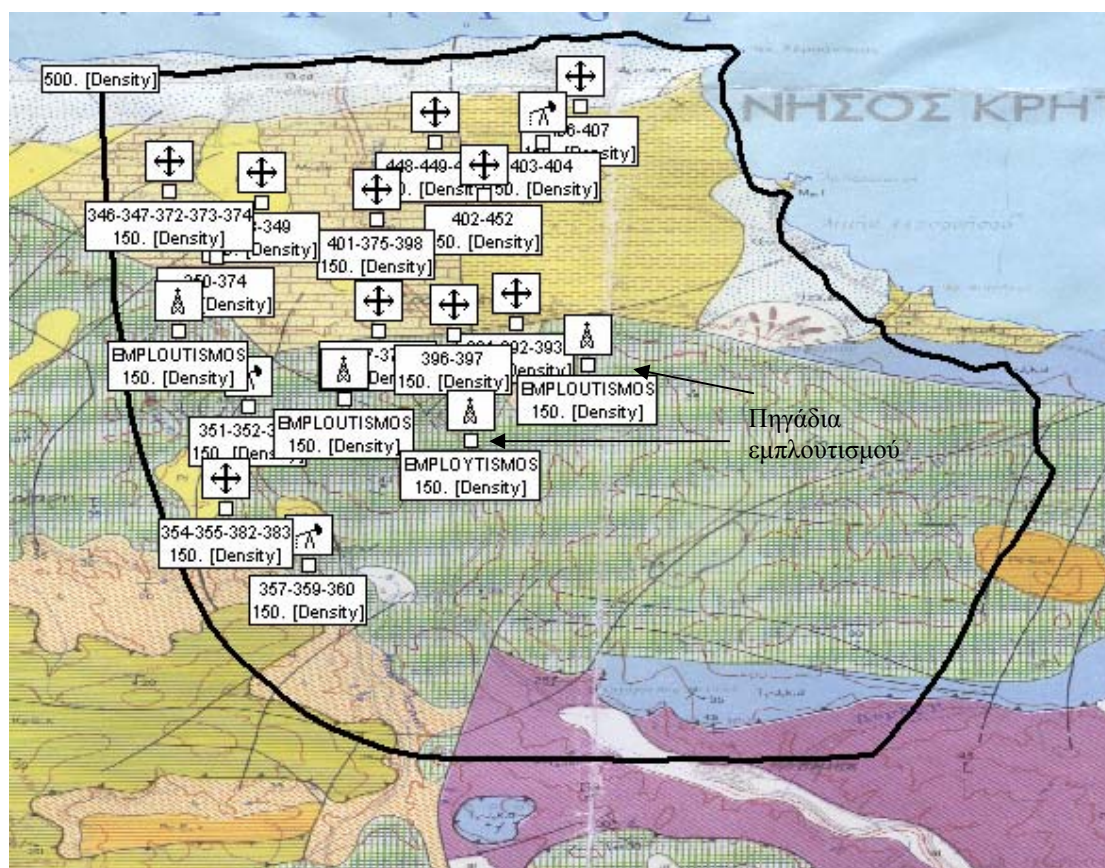
Στα σενάρια αυτά γίνεται συνδυασμός των παραπάνω σεναρίων με ταυτόχρονο όμως εμπλουτισμό του υδροφορέα με φρεάτια εμπλουτισμού. Ένας από τους στόχους είναι η εύρεση της καλύτερης θέσης των πηγαδιών αυτών για να υπάρξουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Σε κάθε από τα παρακάτω σενάρια χρησιμοποιήθηκαν πηγάδια εμπλουτισμού τα οποία κατανεμήθηκαν στην περιοχή



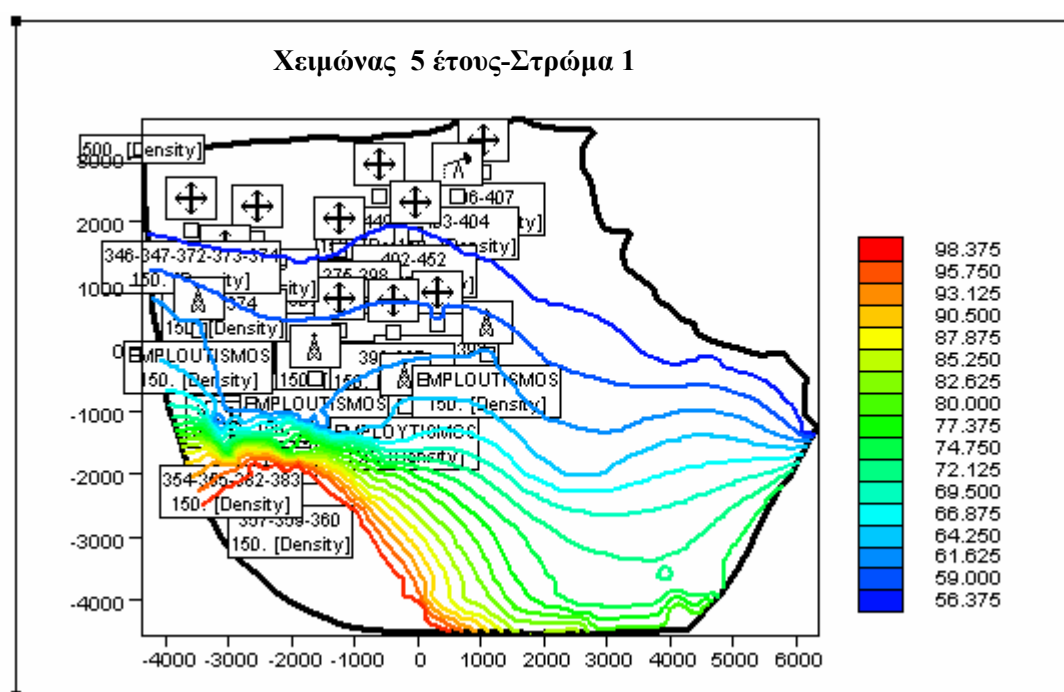
μελέτης. Τα πηγάδια εμπλουτισμού συμβολίζονται ως εξής:

Σενάριο 4: Στο σενάριο αυτό έμειναν κλειστά όλα τα πηγάδια που βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης όπως στο σενάριο 1. Τα πηγάδια εμπλουτισμού τοποθετήθηκαν ομοιόμορφα στο εσωτερικό της περιοχής, σε σημεία όπου υπήρχε ασβεστόλιθος ο οποίος έχει υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα πηγάδια εμπλουτισμού με παροχή το καθένα $1000\text{m}^3/\text{d}$. Τα διαγράμματα υδραυλικών υψών και ταχυτήτων που προκύπτουν για το πρώτο στρώμα στο οποίο γίνεται ο εμπλουτισμός, απεικονίζονται παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

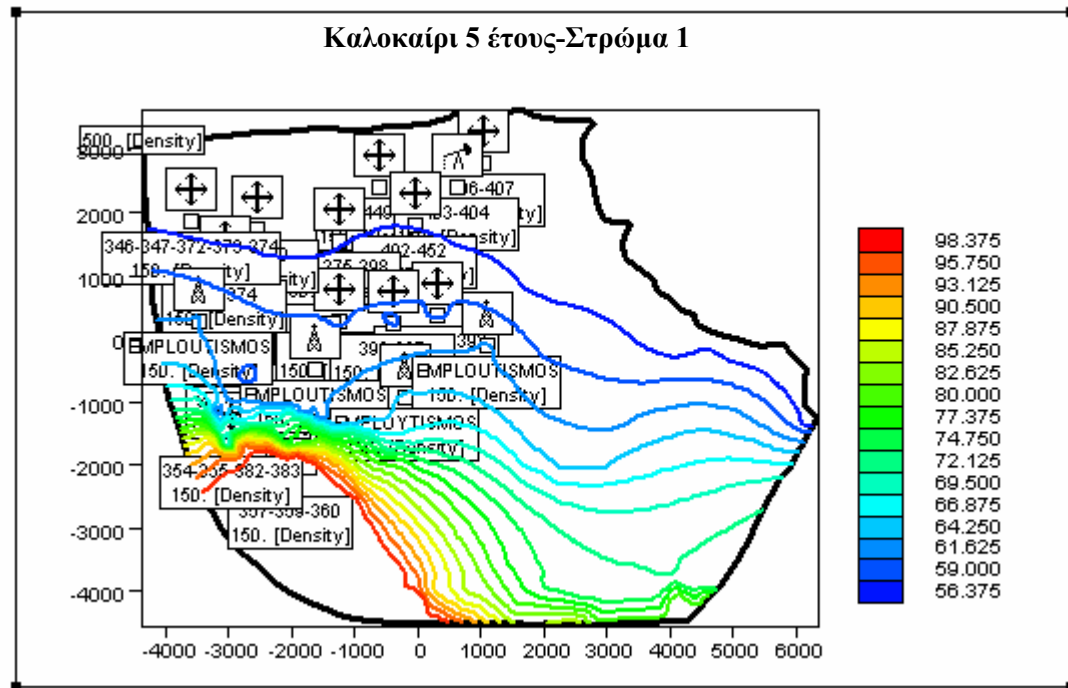


Σχήμα 5.20 Χωροθέτηση πηγαδιών εμπλουτισμού.

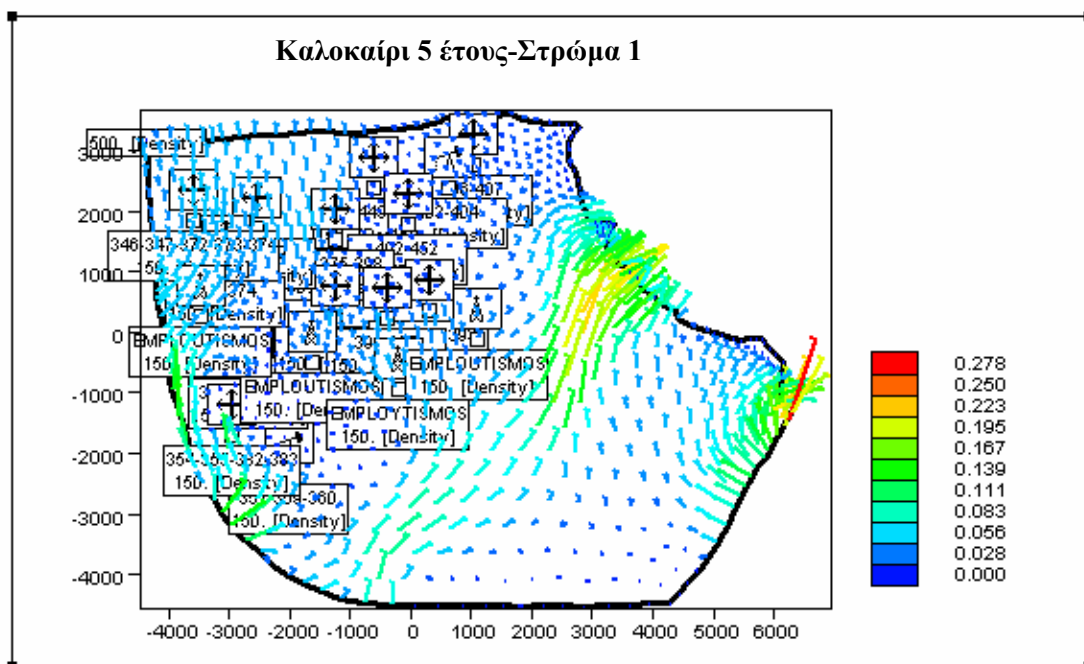


Σχήμα 5.21 Σενάριο 4-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη χειμερινή περίοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναγκαιότητα του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



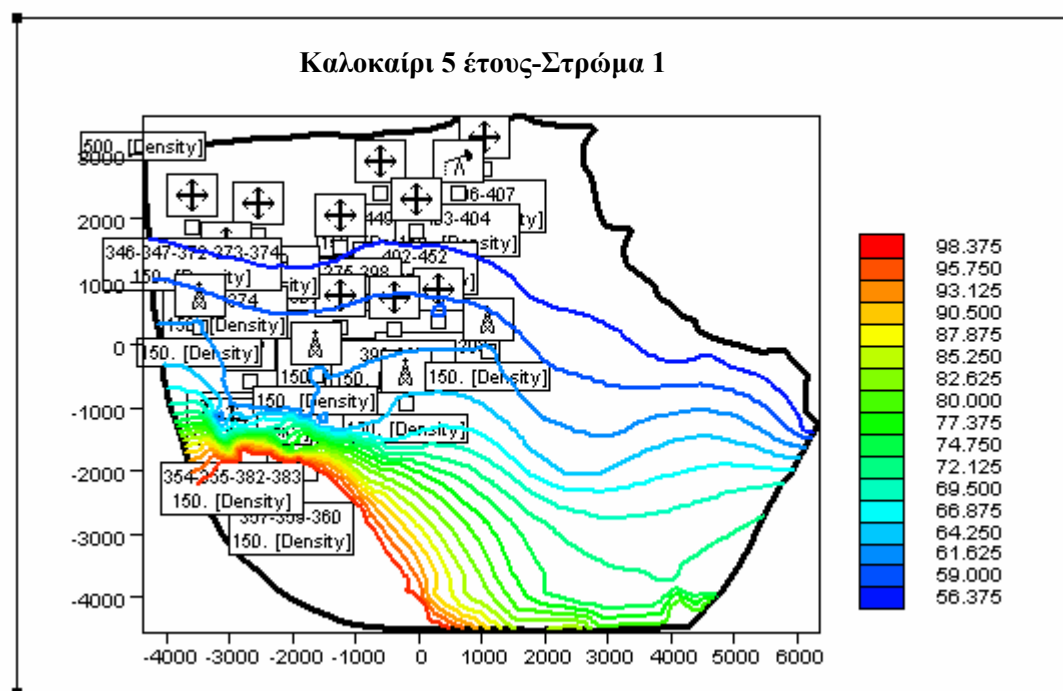
Σχήμα 5.22 Σενάριο 4-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη θερινή περίοδο.



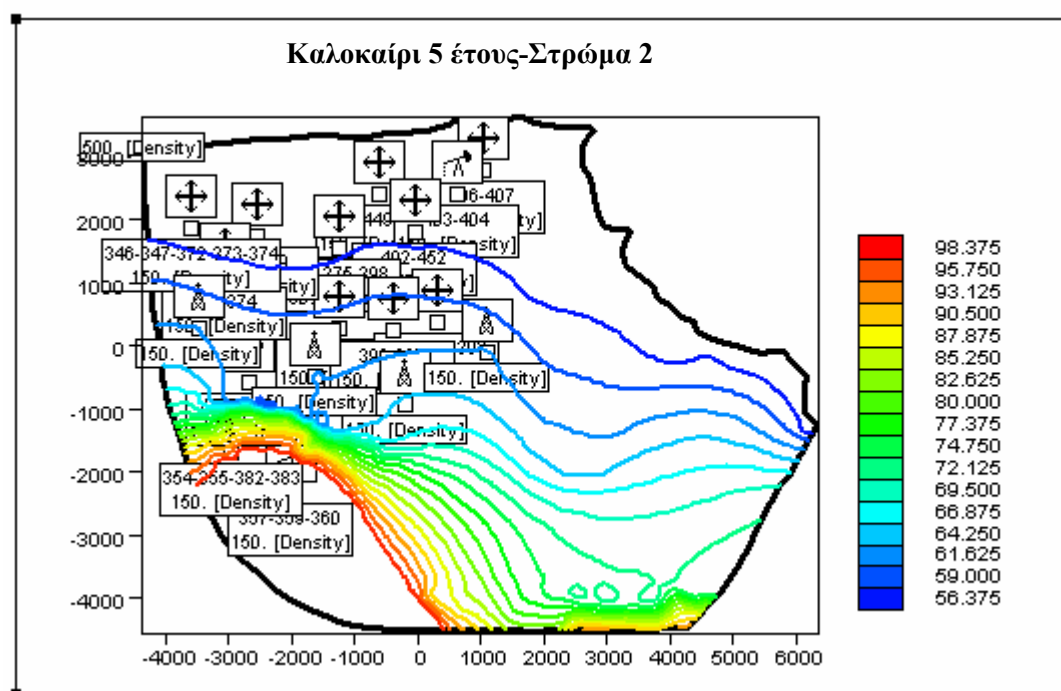
Σχήμα 5.23 Σενάριο 4-Ταχύτητες νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.

Από τα σχήματα 5.21 & 5.22 γίνεται αντιληπτή η μικρή και κυρίως τοπική βελτίωση της κατάστασης. Το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει ανέβει προς την ακτογραμμή ακόμη και κατά τη θερινή περίοδο που οι συνθήκες είναι δυσμενείς. Δυστυχώς πολλά πηγάδια παραμένουν εντός της ζώνης υφαλμύρωσης, ενώ όλη η

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναγκαιότητα του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

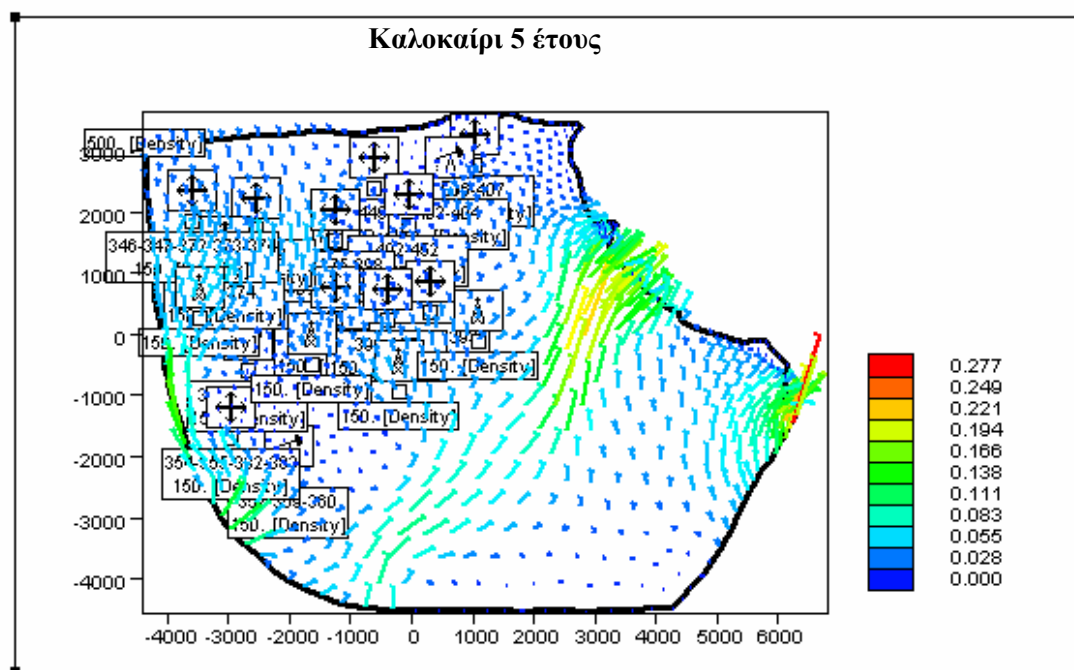


Σχήμα 5.25 Σενάριο 5-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 5.26 Σενάριο 5-Υδραυλικά ύψη (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο του στρώματος 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



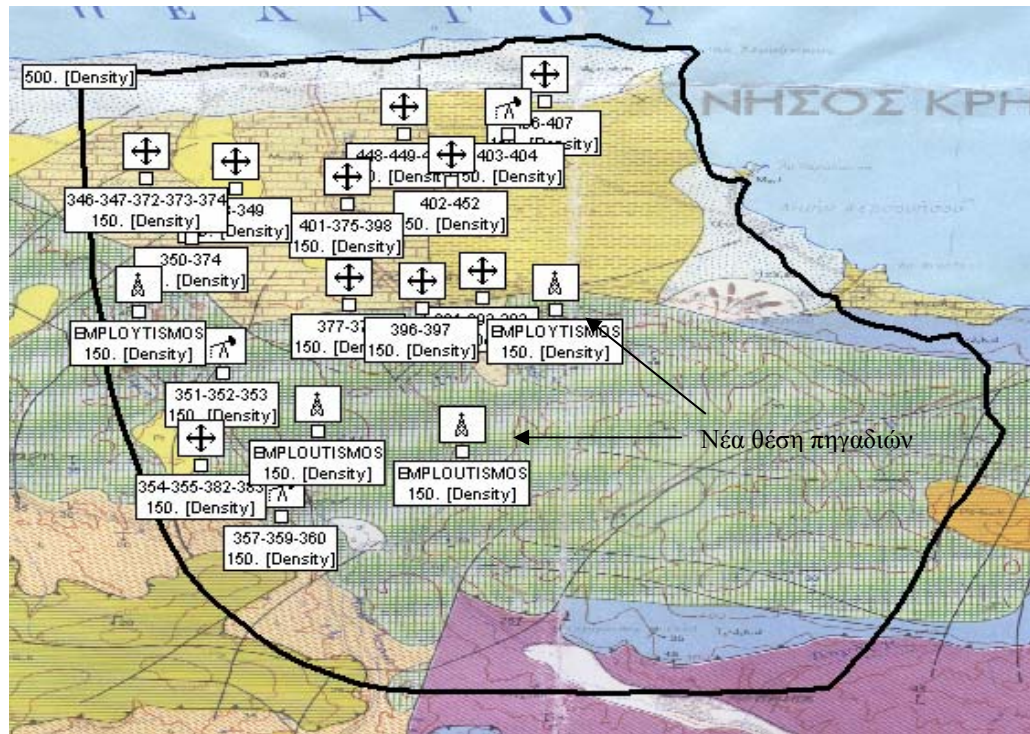
Σχήμα 5.27 Σενάριο 5-Ταχύτητες νερού (m/d)-κατά τη θερινή περίοδο.

Αν και στο σενάριο αυτό υπάρχει βελτίωση της κατάστασης, υστερεί σε σχέση με σενάριο 4. Στη λύση αυτή, 8 πηγάδια παραμένουν εντός ζώνης υφαλμύρωσης ενώ στην περιοχή αυτή συνεχίζεται η άντληση με αποτέλεσμα η ποιότητα του αντλούμενου νερού να είναι χαμηλή. Το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει πλησιάσει την ακτογραμμή και στις δύο περιόδους όχι όμως περισσότερο από το σενάριο 4. Οι ταχύτητες κίνησης του νερού δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές και ακολουθούν τα αποτελέσματα του 4ου σεναρίου. Μάλιστα η μισή ποσότητα άντλησης προέρχεται από τη ζώνη υφαλμύρωσης οπότε και η επιλογή της διακοπής της άντλησης στην περιοχή αυτή οδηγεί στην άντληση καλύτερου ποιοτικά νερού από την υπόλοιπη περιοχή.

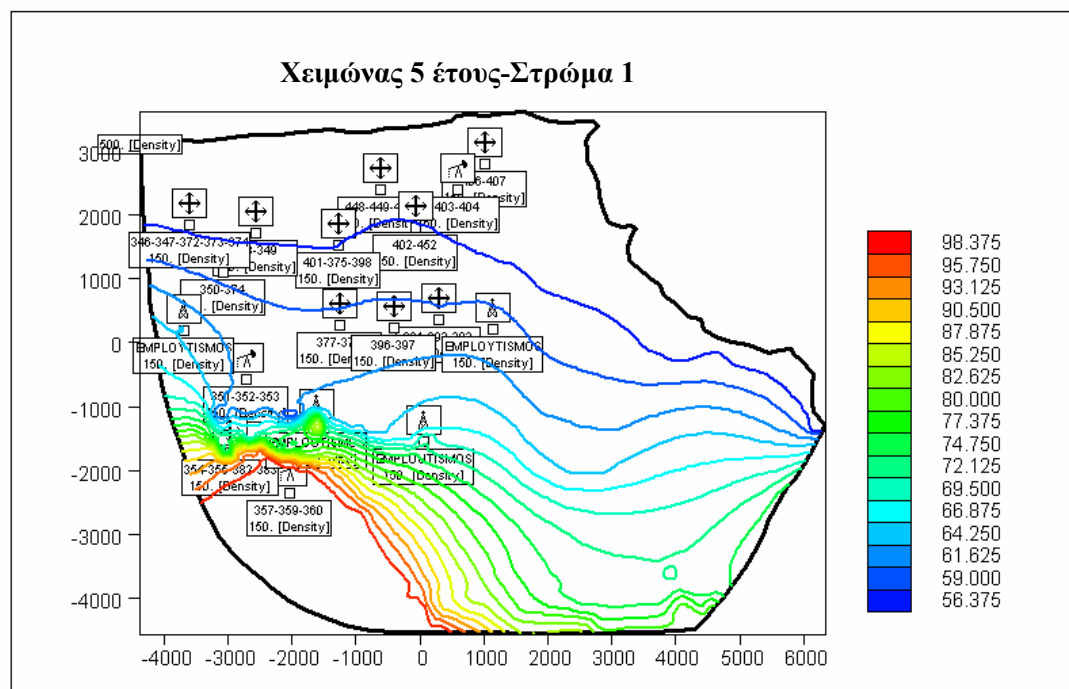
Σενάριο 6: Δεδομένου ότι η 4^η λύση δίδει καλύτερα από την 5^η ποιοτικά αποτελέσματα, ακολουθεί μια παραλλαγή της. Στο σενάριο αυτό παραμένουν κλειστά τα πηγάδια άντλησης της ζώνης υφαλμύρωσης, τα πηγάδια εμπλουτισμού αλλάζουν θέση και παροχή αλλά εξακολουθούν να εμπλουτίζουν το πρώτο στρώμα. Η παροχή τους αγγίζει τα 1100 m³/d και μετατοπίζονται τα δύο λίγο υψηλότερα ως προς την αρχική τους θέση και τα άλλα δύο παραμένουν στο εσωτερικό της περιοχής όπως φαίνεται στο σχήμα 5.28. Ο εμπλουτισμός όμως εξακολουθεί να γίνεται στον

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

ασβεστόλιθο. Η παροχή τους παραμένει σταθερή για όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης. Παρακάτω απεικονίζονται τα διαγράμματα υδραυλικών υψών και ταχυτήτων που προκύπτουν.

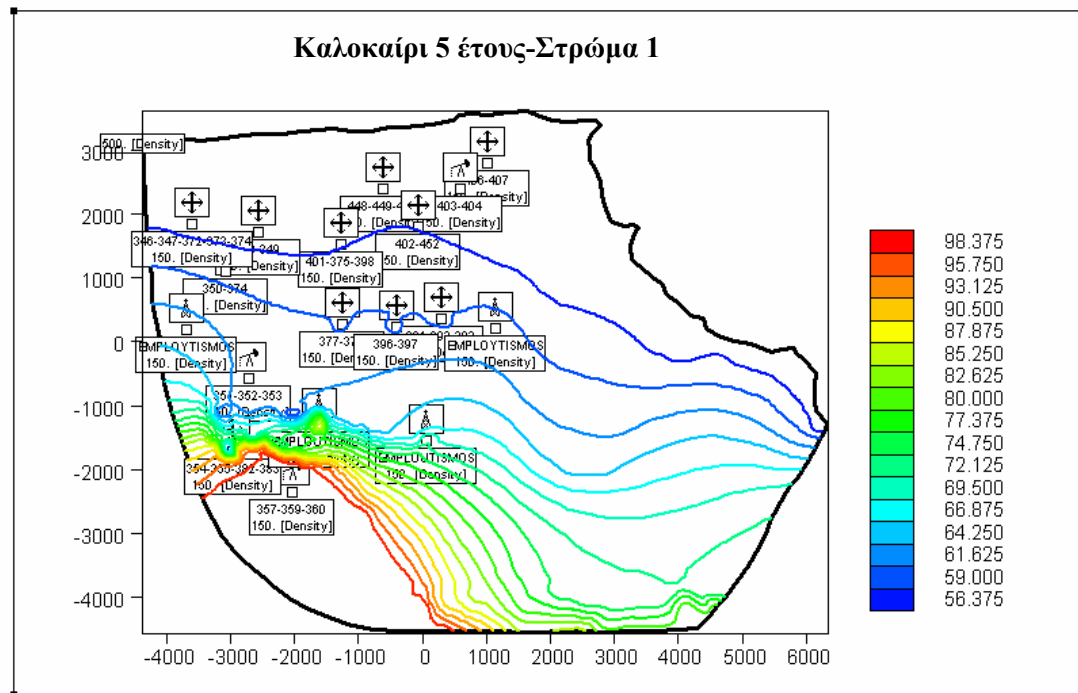


Σχήμα 5.28 Νέα χωροθέτηση πηγαδιών εμπλουτισμού.

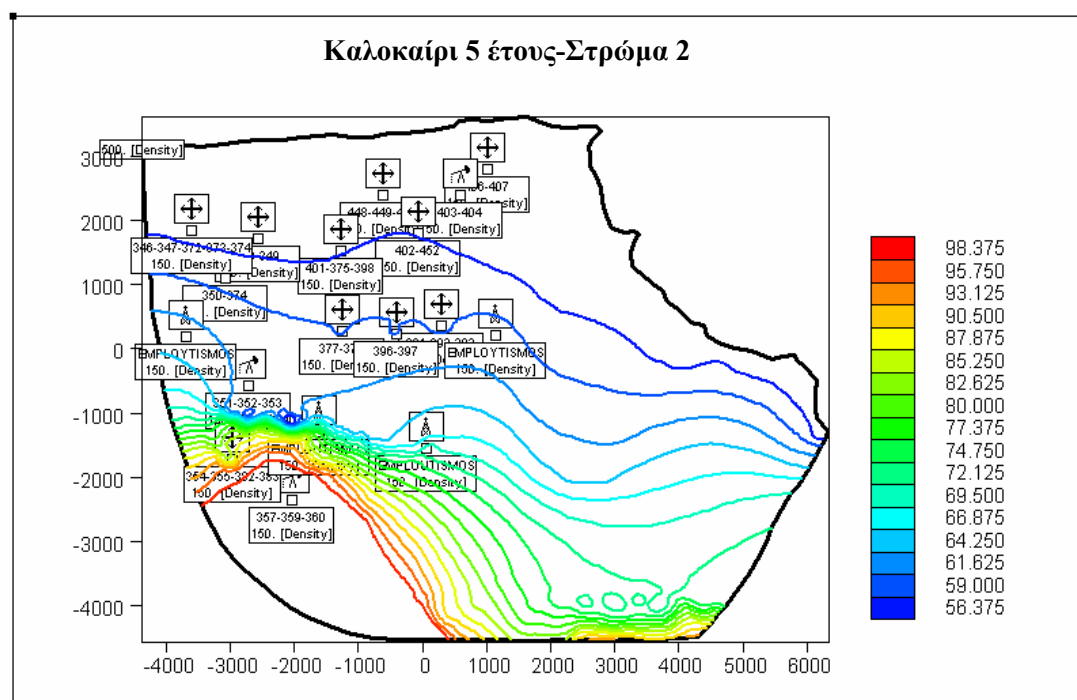


Σχήμα 5.29 Σενάριο 6-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη χειμερινή περίοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

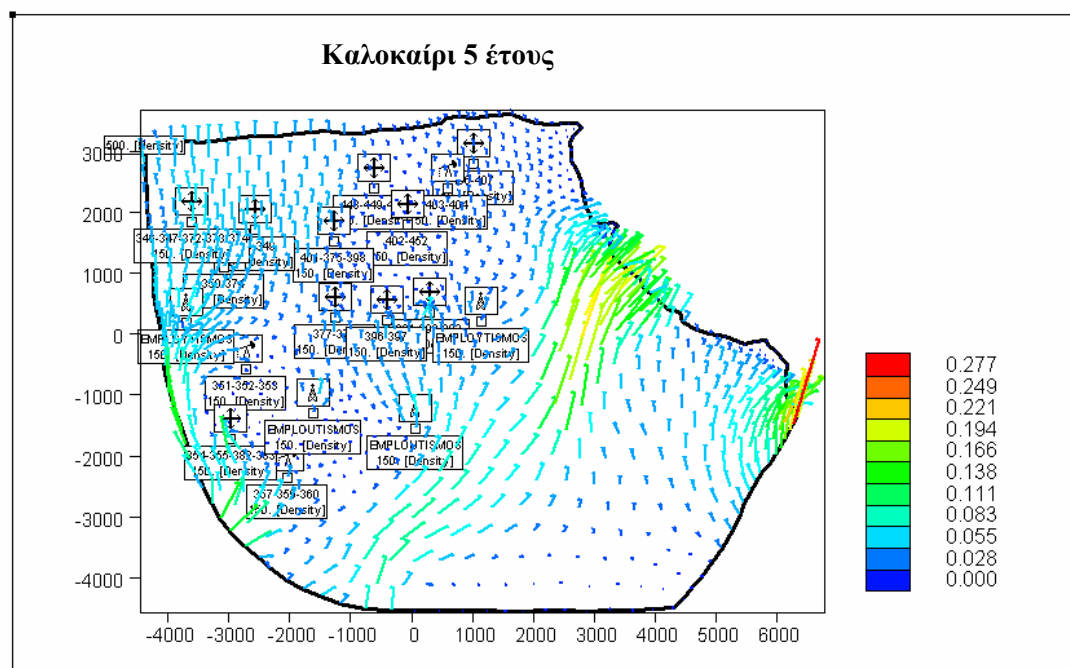


Σχήμα 5.30 Σενάριο 6-Υδραυλικά ύψη(m)- κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 5.31 Σενάριο 6-Υδραυλικά ύψη (m)-κατά τη θερινή περίοδο του στρώματος 2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

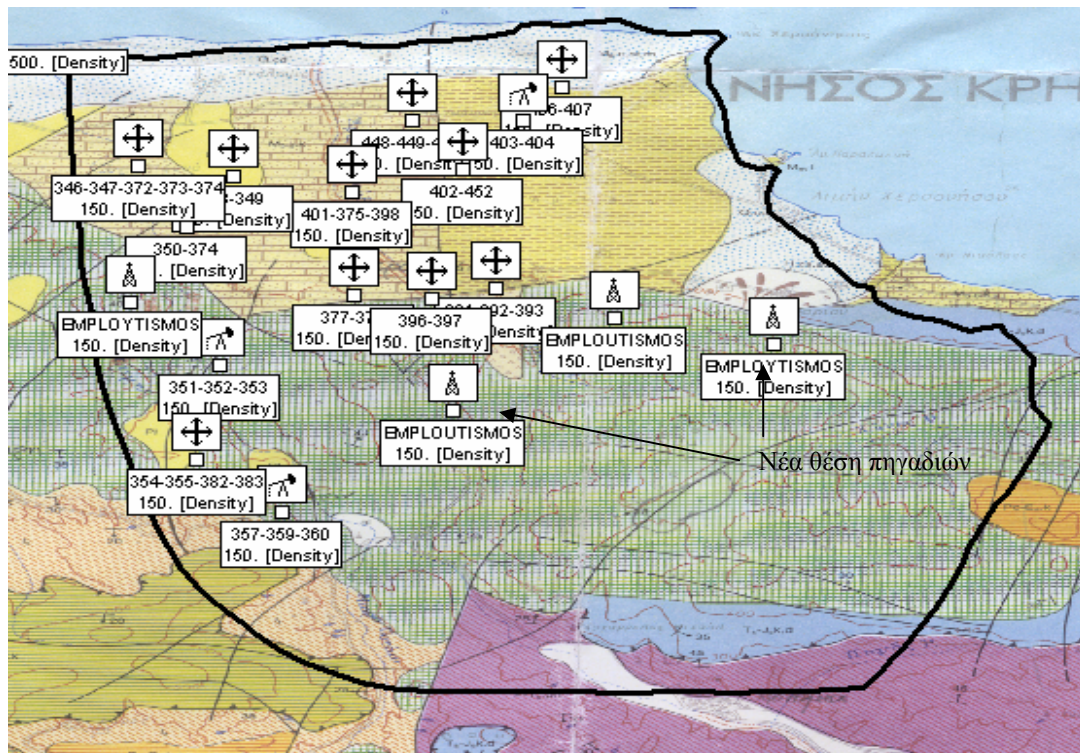


Σχήμα 5.32 Σενάριο 6-Ταχύτητες (m/d)- κατά τη θερινή περίοδο.

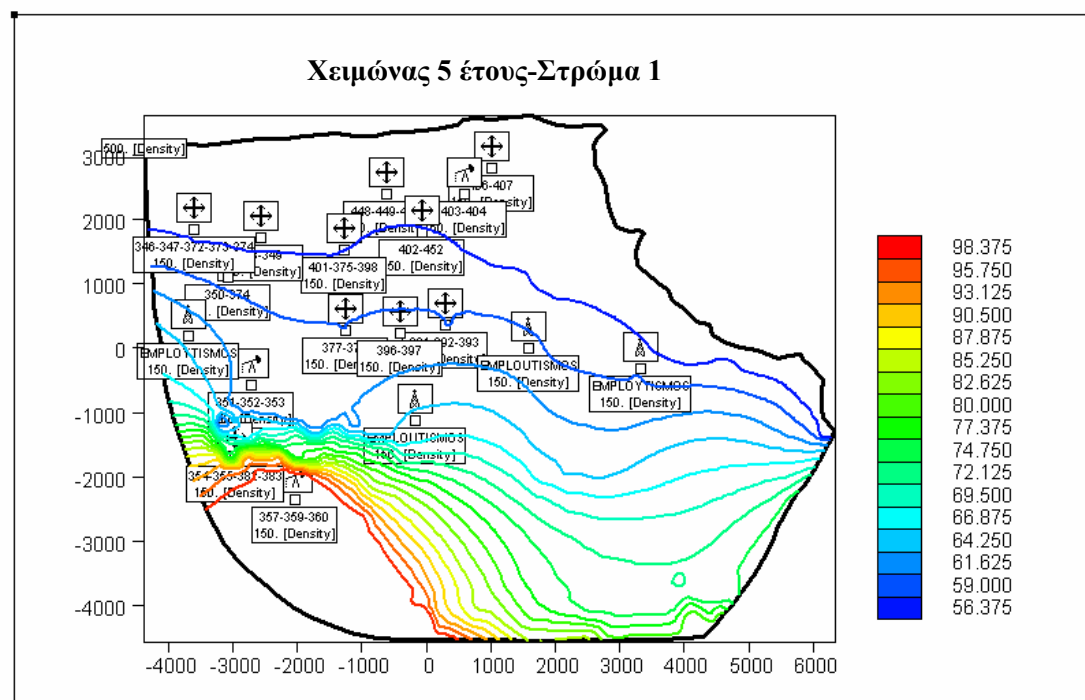
Το σενάριο αυτό εμφανίζει λίγο καλύτερα αποτελέσματα. Η βελτίωση αυτή οφείλεται τόσο στην αλλαγή της θέσης των πηγαδιών όσο και στην αύξηση της παροχής τους. Η γραμμή υφαλμύρωσης παρουσίασε άνοδο. Χαρακτηριστική είναι επίσης η αυξημένη ταχύτητα κίνησης του νερού τόσο από τα πηγάδια εμπλουτισμού προς το εσωτερικό της περιοχής όσο και προς την ακτογραμμή. Είναι πάντως γεγονός ότι ακόμα και με την αυξημένη παροχή των πηγαδιών εμπλουτισμού τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για την αποκατάσταση του υδροφορέα.

Σενάριο 7: Στο σενάριο αυτό τα πηγάδια εμπλουτισμού αλλάζουν και πάλι θέση. Η παροχή τους παραμένει ίση με $1100 \text{ m}^3/\text{d}$ αλλά η θέση τους μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

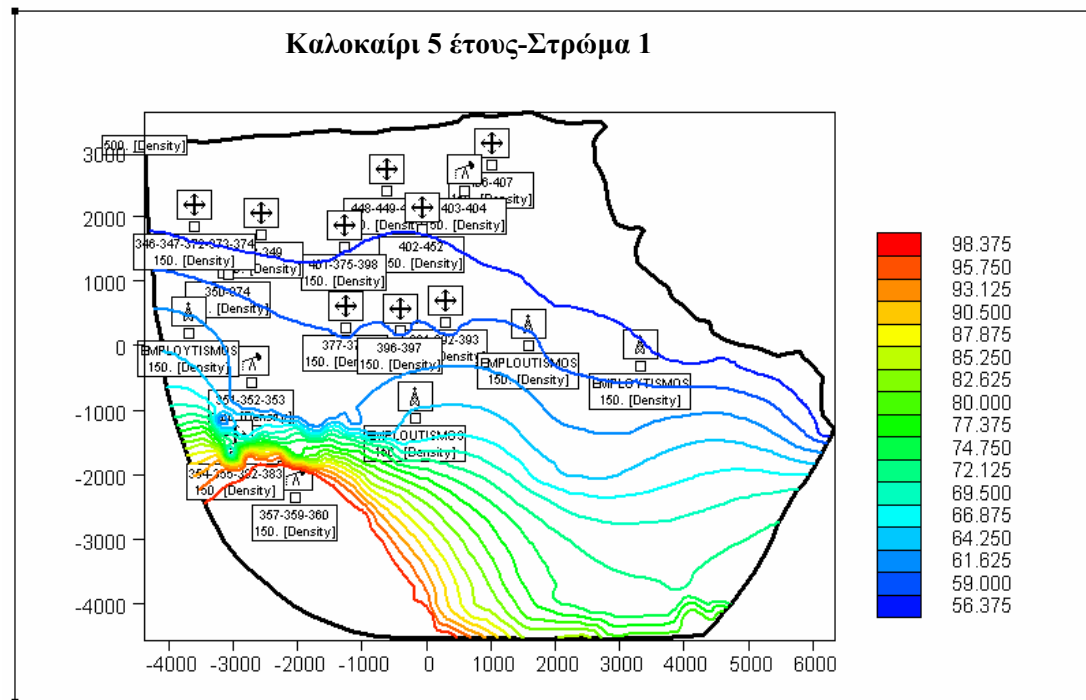


Σχήμα 5.33 Νέα χωροθέτηση πηγαδιών εμπλουτισμού.

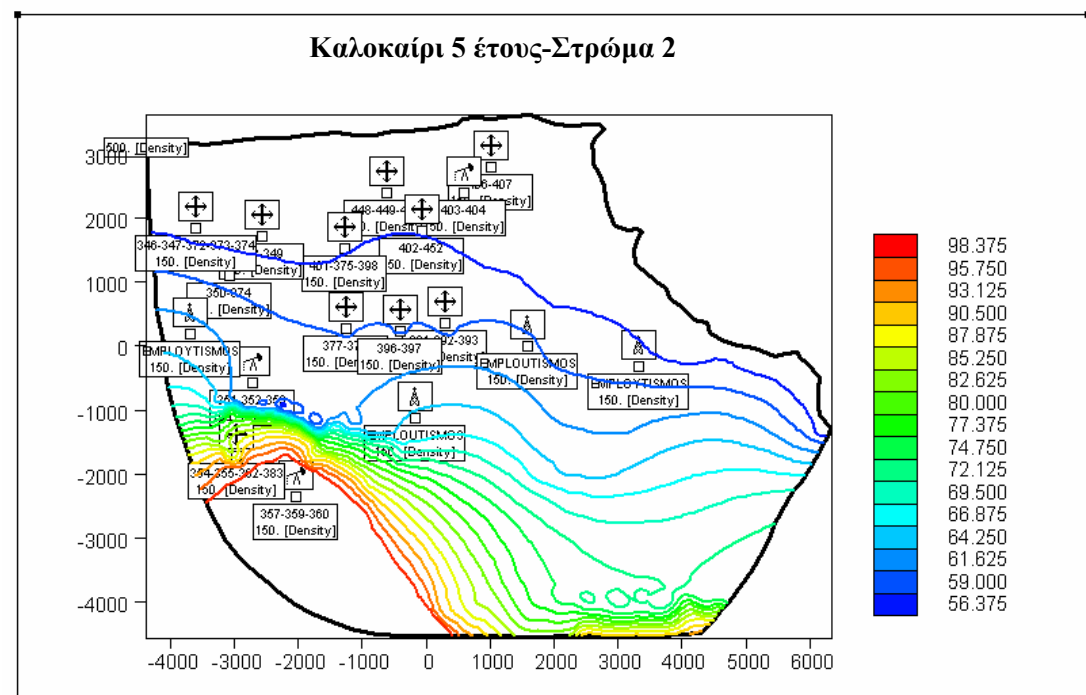


Σχήμα 5.34 Σενάριο 7-Υδραυλικά ύψη (m)- κατά τη χειμερινή περίοδο του στρώματος 1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

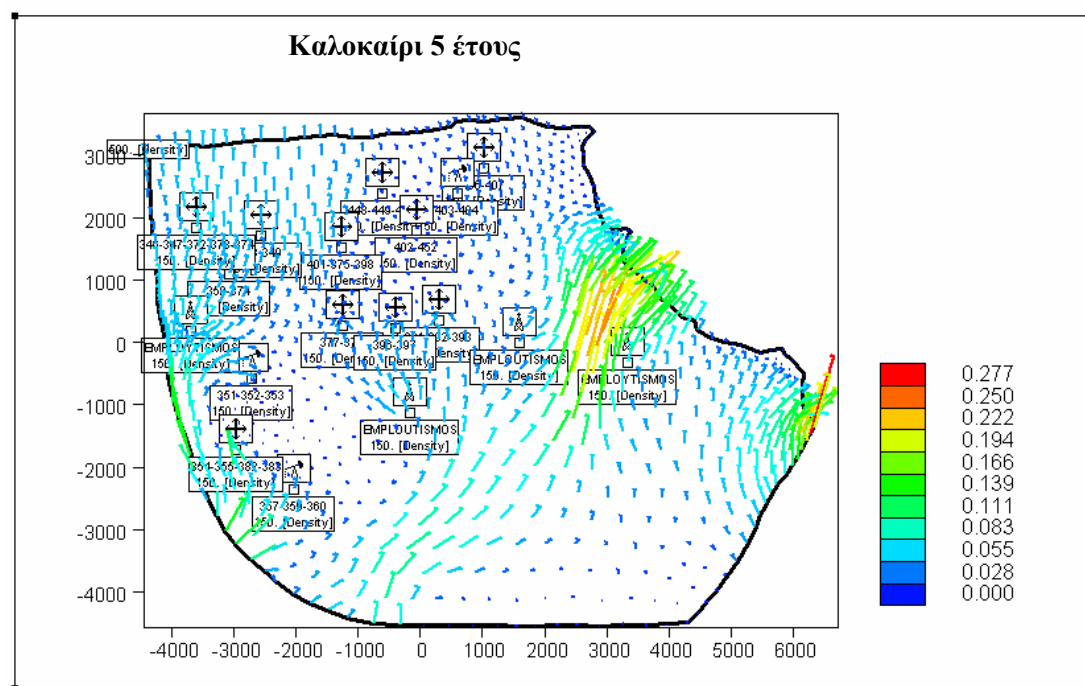


Σχήμα 5.35 Σενάριο 7-Υδραυλικά ύψη (m)- κατά τη θερινή περίοδο του στρώματος 1.

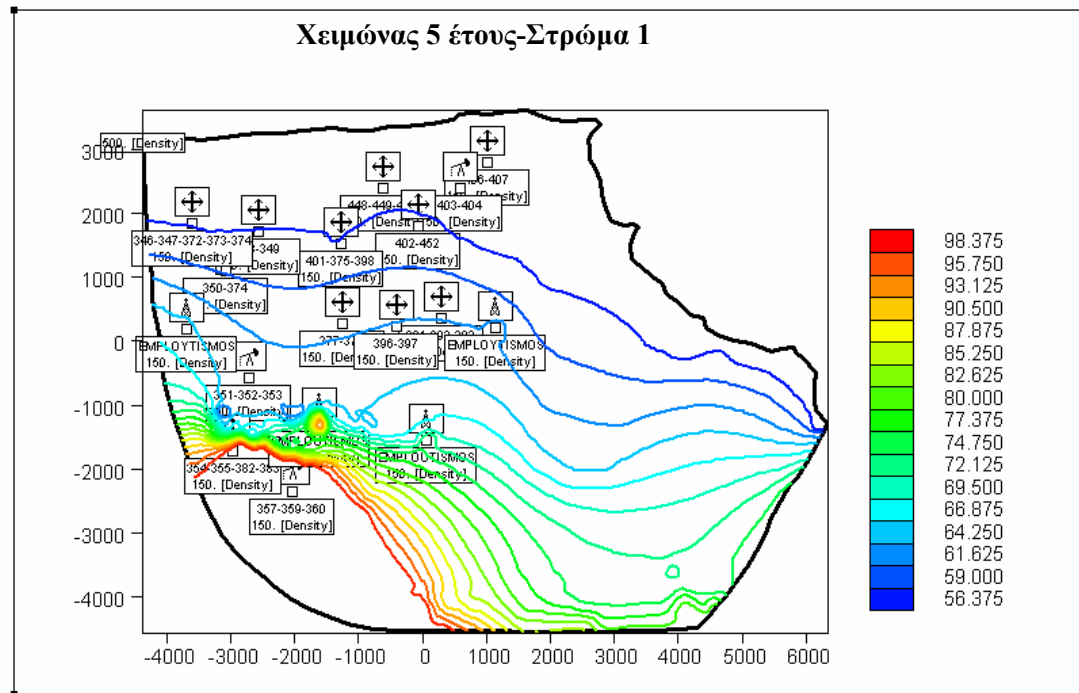


Σχήμα 5.36 Σενάριο 7-Υδραυλικά ύψη (m)- κατά τη θερινή περίοδο του στρώματος 2.

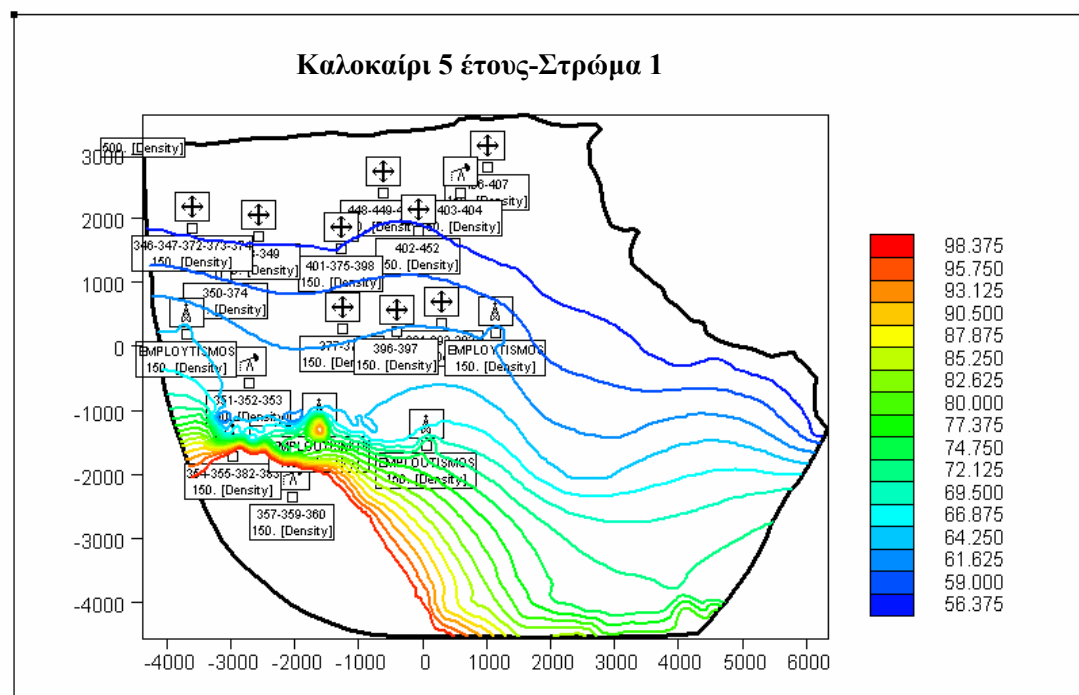
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναγκαιότητα του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

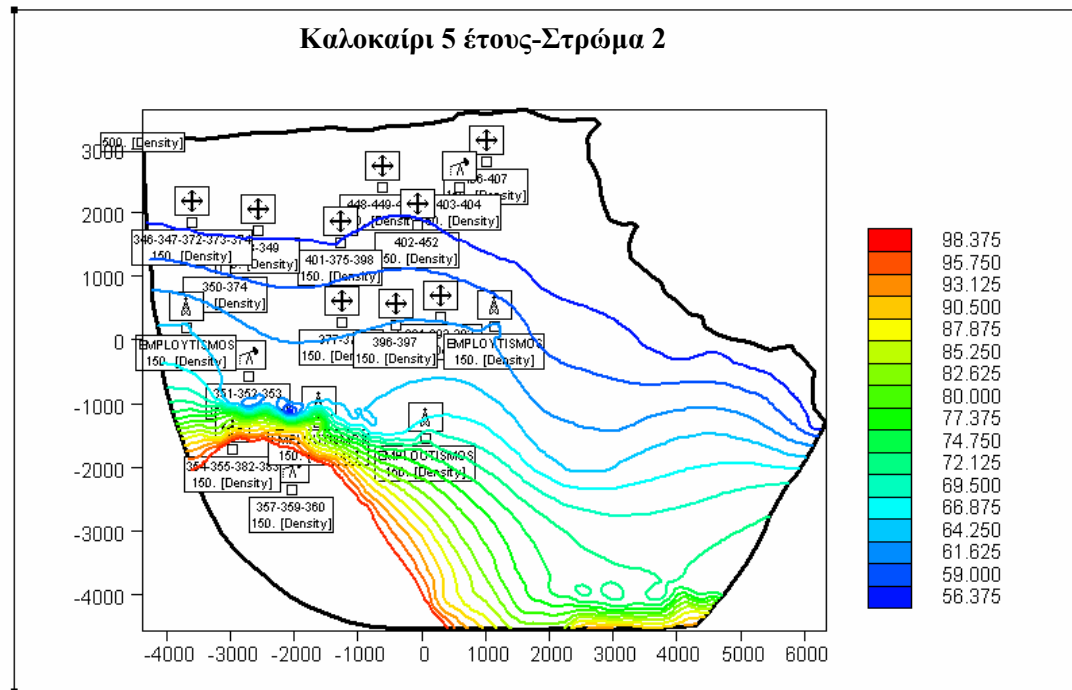


Σχήμα 5.38 Σενάριο 8-Υδραυλικά ύψη (m)- κατά τη χειμερινή περίοδο. Ο

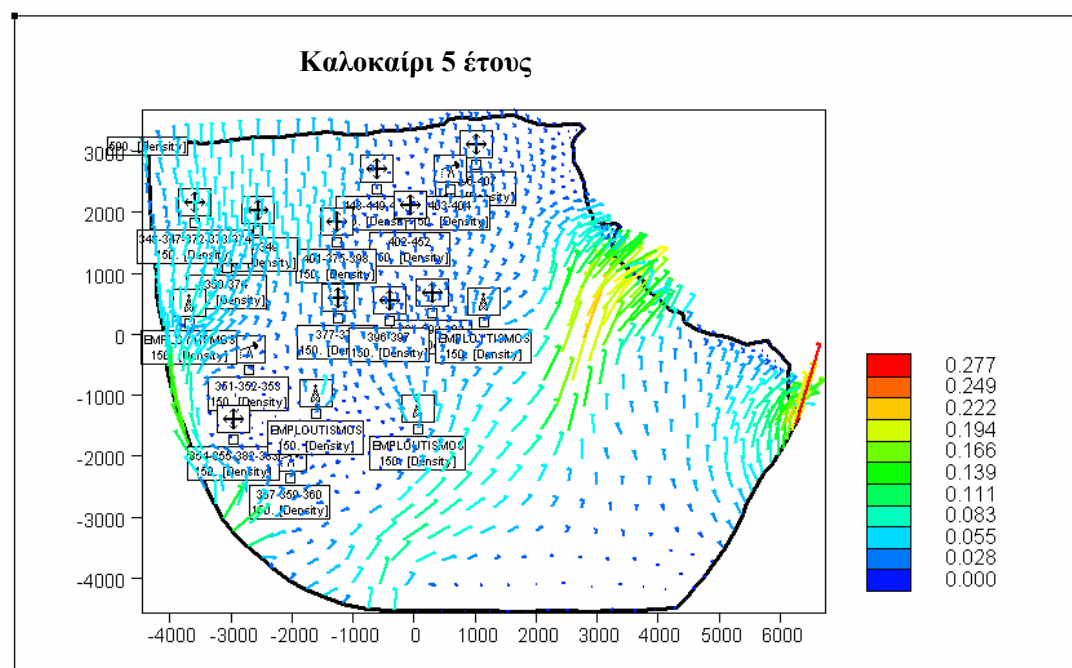


Σχήμα 5.39 Σενάριο 8-Υδραυλικά ύψη (m)- κατά τη θερινή περίοδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχίτηση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου



Σχήμα 5.35 Σενάριο 8-Υδραυλικά ύψη(m)- κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 5.36 Σενάριο 8-Ταχύτητες νερού (m/d)- κατά τη θερινή περίοδο.

Παρά το γεγονός που η γραμμή υφαλμύρωσης έχει ανέβει αρκετά κατά 300μέτρα περίπου η λύση αυτή δε διαφέρει ιδιαίτερα από τα προηγούμενα σενάρια εμπλουτισμού. Το γεγονός αυτό μαρτυρεί τη κατάσταση στην οποία έχει έλθει ο υδροφορέας και η οποία πλέον είναι μη αναστρέψιμη. Ακόμα και κάτω από τις πιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

ακραίες συνθήκες δηλαδή την αναστολή λειτουργίας όλων των γεωτρήσεων και υπό τον εμπλουτισμό του με τεράστιες ποσότητες νερού, δεν πρόκειται να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Η ζημιά που έχει υποστεί λόγω υπερεκμετάλλευσής του είναι ανεπανόρθωτη.

5.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Όπως γίνεται αντιληπτό από το τελευταίο και το πιο ακραίο σενάριο, ο υδροφορέας έχει πληγεί ανεπανόρθωτα και η επαναφορά του στην αρχική του κατάσταση είναι αδύνατη. Παρ'όλ'αυτά, η λήψη μέτρων είναι απαραίτητη ώστε να αποτραπεί η περαιτέρω επιδείνωση της κατάστασης. Από τα παραπάνω σενάρια πολύ καλές λύσεις αποτελούν αυτά με τον εμπλουτισμό. Τα σενάρια που περιορίζονται απλώς στην παύση της λειτουργίας κάποιων γεωτρήσεων παρουσιάζουν ελάχιστα βελτιωμένα αποτελέσματα σε σχέση με την αρχική κατάσταση του υδροφορέα. Στα σενάρια με εμπλουτισμό η συνολική παροχή εμπλουτισμού δεν ξεπέρασε συνολικά τα $185\text{m}^3/\text{h}$, μία αρκετά ικανοποιητική ποσότητα, εκτός από το τελευταίο σενάριο όπου χρησιμοποιήθηκε συνολική παροχή $250\text{ m}^3/\text{h}$. Η συνολική άντληση στην περιοχή ήταν περίπου $25.000\text{ m}^3/\text{d}$ ($1042\text{m}^3/\text{h}$) από την οποία η μισή ποσότητα εντοπίζεται στη ζώνη υφαλμύρωσης. Μάλιστα σε κανένα σενάριο η ποσότητα εμπλουτισμού δεν υπερβαίνει το 25% της συνολικής άντλησης. Από τα παραπάνω σενάρια αυτά με τα καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν τα 4,5 και 6, εκ των οποίων θεωρούνται αξιόλογα το 4 και το 6. Στο 5 σενάριο όπου κάθε γεώτρηση αντλεί τη μισή από την αρχική ποσότητα, υπάρχει άνοδος της υφάλμυρης γραμμής κατά 150-200 μέτρα περίπου αλλά το γεγονός ότι η άντληση συνεχίζεται και στην υφάλμυρη ζώνη οδηγεί στην άντληση υφάλμυρου νερού και γιαυτό απορρίπτεται.

Αντίστοιχα στα σενάρια 4 και 6 η άντληση από την υφάλμυρη ζώνη έχει διακοπεί τελείως και περιορίζεται μόνο στο εσωτερικό της περιοχής. Στο σενάριο 4 τα πηγάδια εμπλουτισμού είναι όλα στο εσωτερικό της περιοχής, ενώ στο 6 σενάριο τα δύο από αυτά είναι λίγο υψηλότερα και έχουν και λίγο μεγαλύτερη παροχή εμπλουτισμού. Ο εμπλουτισμός γίνεται πάντα στον ασβεστόλιθο και στο πρώτο στρώμα στο οποίο εντοπίζονται οι περισσότερες γεωτρήσεις. Τα δύο σενάρια δίνουν εξίσου καλά αποτελέσματα ίσως λίγο πιο βελτιωμένα το 6 λόγω της αυξημένης παροχής. Δεδομένου της κατάστασης του υδροφορέα προτείνεται τελικά η διακοπή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

της άντλησης στην υφάλμυρη ζώνη και εμπλουτισμός του στις θέσεις που προτείνουν τα δύο σενάρια.

Μία άλλη παράμετρος όμως στην οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι τα χαρακτηριστικά του νερού που θα χρησιμοποιηθεί για εμπλουτισμό. Το νερό αυτό δεν πρέπει να διαφέρει στα γεωφυσικά του χαρακτηριστικά από αυτά του υδροφορέα. Μερικά χαρακτηριστικά όπως η θερμοκρασία και το pH του υδροφορέα πρέπει να ταυτίζονται με αυτά του νερού προς εμπλουτισμό, διαφορετικά ο υδροφορέας κινδυνεύει με αλλοίωση. Επειδή οι ποσότητες νερού που απαιτείται για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα είναι μεγάλες, θα μπορούσαν να βρεθούν από τη βιολογική επεξεργασία υγρών αποβλήτων ή από περιοχές με περίσσεια υδατικού ισοζυγίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου

5.1	Το μοντέλο προσομοίωσης.....	99
5.1.1	Οριακές συνθήκες μοντέλου.....	99
5.2	Περιγραφή της περιοχής μελέτης.....	100
5.2.1	Κλιματολογικά στοιχεία.....	100
5.2.2	Χλωρίδα και πανίδα.....	101
5.2.3	Γεωλογία της περιοχής.....	102
5.2.4	Οι υδρογεωλογικές ενότητες.....	103
5.3	Κατάστρωση μοντέλου- περιοχή μελέτης.....	104
5.3.1	Χάρτες.....	105
5.3.2	Οριακές συνθήκες.....	108
5.3.4	Υψόμετρο – Αρχικές συνθήκες.....	109
5.3.5	Βροχόπτωση.....	109
5.3.6	Βαθμονόμηση του μοντέλου.....	109
5.4	Υπολογισμός της αρχικής κατάστασης του υδροφορέα.....	111
5.5	Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος χωρίς εμπλουτισμό του υδροφορέα.....	115
5.6	Προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος με εμπλουτισμό του υδροφορέα.....	121
5.7	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	135

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δημήτριος Κ. Τολίκας, Υπόγεια Υδραυλική, Εκδοτικός Οίκος Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη 1997.
2. Γεώργιος Π. Καρατζάς, Υπόγεια Υδραυλική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης 2002.
3. Gualbert H.P., Oude Essink, Improving fresh groundwater supply-problems and solutions, *Ocean & Coastal Management* 44 (2001) p429-449.
4. C.P.Kumar, Management of Groundwater in saltwater ingress coastal aquifers, National Institute of Hydrology, Roorkee-247667 (Uttaranchal)
5. C.L. Huxley, T.S. Gill, L.S. Carroll, A.Thompson, Optimising the Efficiency of Recharge Features as a Mechanism for Mitigating the impacts of Quarry Dewatering, Research Report, Mineral Industry Sustainable Technology, March 2004.
6. I.Gale, I.Neumann, R.Calow, M.Moench, The effectiveness of Artificial Recharge of groundwater: a review, British Geological Survey 2002.
7. Κουτάντου Παρασκευή, Φλουρή Ευαγγελία, Τεχνητός Εμπλουτισμός Υδροφορέων, Μεταπτυχιακή Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος Ρύπανση & εξυγίανση υπόγειων υδάτων, Ακαδημαϊκό έτος 2004-2005.
8. M.Bakalowicz, Karst groundwater: a challenge for new sources- *Hydrogeology Journal* (2005) vol.13 p 148-160
9. P.E.LaMoreaux-W.J.Powell-H.E.LeGrand, Environmental and legal aspects of karst areas-*Environmental Geology* 29 (1/2) January 1997.
10. Mariolakos.I, Fountoulis.I, Spyridonos.E, Dritsa.C., Capourani.E, Andreadakis.EM, A Holistic Methodology For Sustainable Water Management In Karstic Circum-Mediterranean Regions.- Proceedings of the 10th Biennial Symposium on the Artificial Recharge of Groundwater, Tucson, AZ, June 7-9, 2001.
11. Bridget R. Scanlon, Robert E. Mace, Michael E. Barrett, Brian Smith, Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA- *Journal of Hydrology* 276 (2003) 137–158.

12. P. Martinez-Santos P. Martinez-Alfaro J. M. Murillo, A method to estimate the artificial recharge capacity of the Crestatx aquifer (Majorca, Spain)- Environmental Geology (2005) 47: 1155–1161.
13. Nikolaos Lambrakis, Multicomponent heterovalent chromatography in aquifers Modelling salinization and freshening phenomena in field conditions. Journal of Hydrology (2005) 1–14.
14. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.
15. Υδρογεωλογική Μελέτη Βόρειου Νομού Ηρακλείου. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης .
16. Υ.Ε.Β. Ηρακλείου
17. www.emmy.gr