

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

" ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΖΩΝΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ
ΝΗΣΟΥ ΖΑΚΥΝΘΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΡΟΗΣ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ"

ΣΤΑΜΑΤΕΛΟΥ ΤΑΤΙΑΝΑ – ΕΥΣΤΡΑΤΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Καρατζά Γεώργιο για την πολύτιμη συνεργασία και τη συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφερε στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ. Διαμαντόπουλο Ευάγγελο και τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ ακόμα, την οικογένεια μου και το φιλικό μου περιβάλλον για την υποστήριξή τους και τη βοήθειά τους στη συλλογή πληροφοριών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ

1.1. Εισαγωγή	8
1.2. Υδρολογικός κύκλος	9
1.3. Υδατικό Ισοζύγιο	11
1.4. Ενεργειακό Ισοζύγιο	12
1.5. Υδροφορείς	13
1.5.1. Παράμετροι υδροφορέων	14
1.6. Γενική μορφή του Νόμου Darcy	15
1.7. Υδραυλική Αγωγιμότητα	17
1.8. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας	18
1.9. Ομοιογένεια και Ισοτροπία	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

2.1. Σκοπός του εγχειριδίου	21
2.2. Κύριες εξισώσεις	21
2.3. Επίλυση του αλγορίθμου PTC	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΑΤΟΣ

3.1. Κύρια εξίσωση	24
3.2. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	25
3.3. Εφαρμογή της πεπερασμένης - διαφορικής μεθόδου	27
3.3.1. Η κάθετη παράγωγος	27
3.3.2. Η παράγωγος του χρόνου	29
3.4. Οριακές συνθήκες	30
3.4.1. Οριακές συνθήκες καθορισμένου Υδραυλικού Ύψους.....	30
3.4.2. Οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής	31
3.4.3. Οριακές συνθήκες τρίτου είδους	32
3.4.4. Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα	32
3.5. Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων - Κύριες εξισώσεις	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

4.1.Εισαγωγή	36
4.2. Συνθήκες Ύδρευσης	37
4.3. Μορφολογία -Υδρολογία	38
4.4. Γεωλογία	39
4.4.1. Στρωματογραφία	39
4.4.1.1. Ζώνη Παξών (Προαπούλιος)	40
4.4.1.2. Ιόνιος Ζώνη	41
4.4.2. Τεκτονική	43
4.5. Υδρογεωλογία	45
4.5.1. Γενικά	45
4.5.2. Υδροφορία προσχώσεων	46
4.5.3. Υδροφορία Πλειστοκαινικών σχηματισμών	46
4.5.4. Υδροφορία Πλειοκαινικών σχηματισμών	46
4.5.5. Μειοκαινικοί σχηματισμοί	47
4.5.6. Υδροφορία καρστικών σχηματισμών	47
4.5.7. Τριαδική σειρά Ιονίου ζώνης	48
4.6. Απογραφή Υδροσημείων	48
4.6.1. Πηγές	48
4.7. Υδροχημεία	49
4.7.1. Γενικά	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

5.1. Τι είναι Μοντέλο	51
5.2. Πρωτόκολλο του Μοντέλου	52
5.3. Απόψεις και θεμελιώδης εξισώσεις συστημάτων υπογείων νερών	53
5.4. Εννοιολογικό μοντέλο και Σχεδιασμός πλέγματος	57
5.4.1. Τύποι μοντέλων	57
5.4.2. Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου	58
5.5. Τύποι πλεγμάτων	59
5.5.1. Σχεδιασμός πλέγματος	59
5.5.2. Πεπερασμένη διαφορά πλεγμάτων	60
5.5.3. Προσανατολισμός του πλέγματος	61
5.6. Χρήσιμα δεδομένα	62

5.7. Οριακές συνθήκες	63
5.7.1. Τύποι οριακών συνθηκών	63
5.8. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων	64
5.8.1. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών	64
5.8.2. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	
ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	
6.1. Διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων της περιοχής στο μοντέλο	66
6.2. Οριακές συνθήκες	69
6.3. Βροχόπτωση	71
6.4. Βαθμονόμηση του μοντέλου	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ	
ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
7.1. Γραφήματα Υδραυλικών Ψών και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο υπό κανονικές συνθήκες.....	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ	
ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	
8.1. Εισαγωγή	82
8.2. Μηχανισμός της υφαλμύρινσης	83
8.3. Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού - γλυκού νερού.....	84
8.3.1. Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους.....	84
8.3.2. Απότομη διεπιφάνεια	85
8.4. Προσέγγιση Ghyben- Herzberg	86
8.5. Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας	88
8.6. Ακίνητη διεπιφάνεια σε κατακόρυφο επίπεδο	88
8.7. Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρινσης	89
8.8. Οι εξισώσεις του μηχανισμού της υφαλμύρινσης	91
8.9. Εκτίμηση της Ζώνης Υφαλμύρινσης	96
8.10. Γραφήματα της ζώνης Υφαλμύρινσης	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΛΟΥΜΕΝΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ

9.1. Σενάριο 1 ^ο – Αύξηση της αντλούμενης ποσότητας κατά 25% της αρχικής.....	101
9.2. Γραφήματα Υδραυλικών Υψών και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο, 1 ^ο Σενάριο.....	103
9.3. Σενάριο 2 ^ο – Μείωση της αντλούμενης ποσότητας κατά 25% της αρχικής	107
9.4. Γραφήματα Υδραυλικών Υψών και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο, 2 ^ο Σενάριο	108
9.5. Συμπεράσματα - Προτάσεις	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	116

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην διπλωματική εργασία αυτή παρουσιάζεται η υδρογεωλογία της Νότιας και ΝοτιοΑνατολικής πλευράς της Ζακύνθου και προσομοιώνεται η υπόγεια ροή της περιοχής με χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου ροής υπογείων υδάτων και μεταφοράς ρύπων PTC (Princeton Transport Code). Αρχικά, παρατίθενται κάποιες βασικές έννοιες της υπόγειας υδρολογίας. Περιγράφεται το μοντέλο PTC και το γενικό υπόβαθρο, όπου στηρίζεται η μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Στη συνέχεια, δίνεται μια γενική εικόνα της νήσου Ζακύνθου καθώς και των μορφολογικών, υδρολογικών και γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Αφού βαθμονομηθεί το μοντέλο, παρουσιάζονται τα γραφήματα και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης για την παρούσα κατάσταση. Ακόμα, περιγράφεται το φαινόμενο της υφαλμύρινσης και βλέπουμε σε ποιες περιοχές εντοπίζεται αυτό. Επίσης, παρουσιάζεται ένα σενάριο αύξησης της αντλούμενης παροχής κατά 25 % και ένα σενάριο μείωσης της αντλούμενης παροχής κατά 25 %. Σχολιάζονται τα αποτελέσματα και προτείνονται διάφορες λύσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και την καλύτερη ποιότητα ζωής των κατοίκων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Υπόγεια Υδραυλική

1.1. Εισαγωγή

Το νερό είναι από τα πολυτιμότερα αγαθά της φύσης και απαραίτητο στοιχείο ζωής για τον άνθρωπο, τα ζώα και τη φύση. Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη εκτιμάται ότι είναι γύρω στα 1360 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα ($1360 \cdot 10^6 \text{ km}^3$). Το νερό διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο. Το επιφανειακό νερό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ το υπόγειο νερό είναι οι υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Η εκμεταλλεύσιμη ποσότητα σε υπόγεια νερά ανέρχεται σε ποσοστό 98%, ενώ των λιμνών και των ποταμών σε ποσοστό 2%.

Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα εδαφών ή πετρωμάτων που λέγονται διαπερατά. Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών στα οποία μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό λέγονται υδροφορείς.

Παρ' όλο που η ποσότητα νερού φαίνεται υπεραρκετή και ανεξάντλητη, ωστόσο στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρή. Το μεγαλύτερο μέρος του νερού της γης (περίπου το 98%) είναι αλμυρό, δηλαδή ακατάλληλο να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, αγροτική και βιομηχανική χρήση. Ακόμα, το 50% περίπου του υπογείου νερού είναι αποθηκευμένο σε πολύ μεγάλα βάθη από την επιφάνεια της γης (πάνω από 800 μέτρα), η περιεκτικότητά του σε άλατα είναι πολύ μεγάλη και η άντληση του υπερβολικά δαπανηρή.

Τα τελευταία χρόνια, η πληθυσμιακή αύξηση και η βιομηχανική ανάπτυξη έκαναν τις ανάγκες του νερού να αυξηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης, η κατανομή των υδατικών πόρων δεν είναι ομοιόμορφη τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη μεταφοράς και αποθήκευσης του νερού σε περιοχές και περιόδους όπου παρουσιάζεται ζήτηση νερού μεγαλύτερη από τα διαθέσιμα αποθέματά του.

Όμως, πολλές φορές η ζήτηση νερού από δεδομένο αποδέκτη υπερβαίνει τις διαθέσιμες από αυτόν ποσότητες ή η κακή του ποιότητα λόγω ρύπανσης περιορίζει την δυνατότητα εκμετάλλευσής του. Από την άλλη πλευρά, η υπεράντληση νερού απειλεί τη βιωσιμότητα ενός μεγάλου αριθμού υδροφορέων ενώ σε παραλιακές ζώνες εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρινσης λόγω της εισροής θαλάσσιου ύδατος.

Ένας άλλος παράγοντας που υποβαθμίζει την ποιότητα των υδάτων είναι η ρύπανση τους με νιτρικά ιόντα από γεωργικές δραστηριότητες, προκαλώντας ευτροφισμό πολλών παράλιων ζωνών και αναταραχή της τροφικής αλυσίδας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η ανάγκη για ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων. Πριν μερικά χρόνια έγιναν κάποια βήματα για την ενίσχυση της αειφορίας του περιβάλλοντος με την χρήση οικονομικών μέσων. Θεμελιώδης αρχές της Κοινοτικής Περιβαλλοντικής Πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι οι αρχές της πρόληψης, της προφύλαξης, της επανόρθωσης των καταστροφών του περιβάλλοντος κατά προτεραιότητα στην πηγή και "ο ρυπαίνων πληρώνει".

Πηγές: Μαριά Ε., Σημειώσεις μαθήματος Περιβαλλοντική και Τεχνική Νομοθεσία, Χανιά, Φεβρουάριος 2005 και

Διαδίκτυο www.google.com, Λέκκας Δημήτρης, Παράκτια Γεωλογία, Διάλεξη 2^η, Λεκάνες Απορροής και Μεταφορά Ιζημάτων.

1.2. Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει σχηματικά μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ θάλασσας, ξηράς και ατμόσφαιρας. Το νερό παρουσιάζεται σε όλες τις καταστάσεις: υγρό, αέριο (υδρατμός) και στερεό (χιόνι/χαλάζι).

Η σειρά των εμφανίσεων του νερού δεν έχει πρακτικά αρχή και τέλος. Όμως, ως αρχή του υδρολογικού κύκλου θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το νερό συγκεντρώνεται στην ατμόσφαιρα με μορφή υδρατμών που προέρχονται από την εξάτμιση του νερού προς τις θάλασσες, τις λίμνες, τους ποταμούς, το έδαφος, τη βλάστηση κ.τ.λ.

Οι υδρατμοί μεταφέρονται από αέριες μάζες και μπορεί κάτω από κατάλληλες συνθήκες να συμπυκνωθούν σε σύννεφα και να επανεμφανιστούν στην επιφάνεια της γης με μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

Ένα μέρος του νερού που φτάνει στην επιφάνεια της γης συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Ένα άλλο μέρος νερού διηθείται στο έδαφος και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα που καταλήγουν σε λίμνες και θάλασσες. Κατά την πορεία αυτή ένα μέρος του νερού εξατμίζεται.

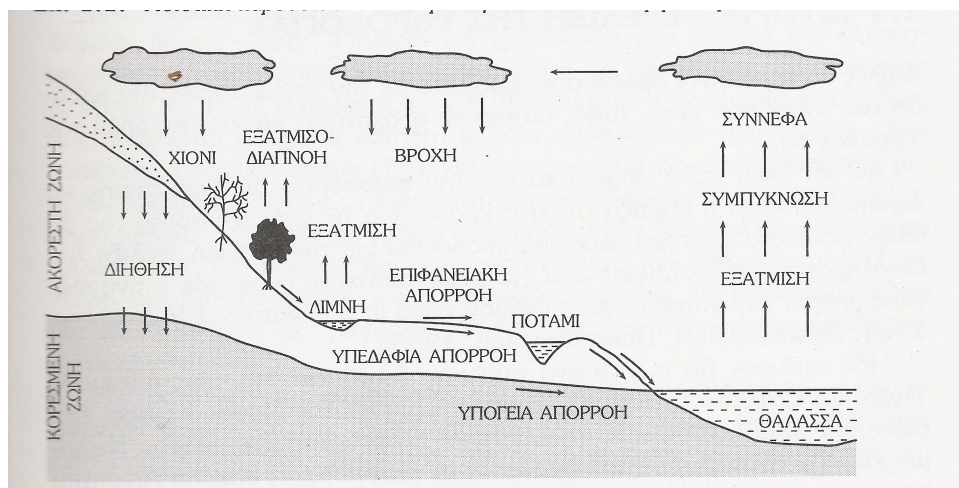
Το υπόλοιπο του νερού που διηθείται, αποθηκεύεται ως υπόγειο νερό και συχνά εμφανίζεται στην επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα σημεία και στη συνέχεια καταλήγει επιφανειακά ή υπόγεια.

Τέλος, το νερό της θάλασσας με την εξάτμιση επανέρχεται στην ατμόσφαιρα κι έτσι κλείνει ο υδρολογικός κύκλος.

Μέσω του υδρολογικού κύκλου μπορεί να συμβεί:

- Μεταφορά νερού
- Προσωρινή αποθήκευση
- Ματαβολή της κατάστασης νερού

Γραφική απεικόνιση του υδρολογικού κύκλου



Σχήμα: 1.1. Απλοποιημένη γραφική απεικόνιση του Υδρολογικού κύκλου.

Πηγή: Τσακίρης Γ., Υδατικοί πόροι: Ι.Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα 1995.

1.3. Υδατικό Ισοζύγιο

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες είτε από γυμνές ή φυτοκαλυμμένες επιφάνειες της γης είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Ο υδρολογικός κύκλος ξεκινά με τη διαρκή προσφορά νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης υπό τη μορφή υδρομετεώρων που καταλήγουν στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες είτε μέσα από διήθηση των υπογείων νερών είτε άμεσα σαν επιφανειακή απορροή. Ο κύκλος κλείνει με την επαναφορά του νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης. Το νερό εισερχόμενο στη φάση της εξάτμισης του υδρολογικού κύκλου είναι πλέον μη προσιτό και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω. Ακόμα, η εξατμισοδιαπνοή από διάφορες επιφάνειες της γης και η βροχόπτωση καθορίζουν το ποσόν της επιφανειακής απορροής των κοιλάδων ή των λεκανών των ποταμών και προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τα χαρακτηριστικά των λεκανών που μπορούν να προκαλέσουν ραγδαία επιφανειακή απορροή ή πλημμύρες σε περίπτωση μεγάλων βροχοπτώσεων. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή πολλές φορές θεωρείται ως η απαιτούμενη παροχή νερού στο σχεδιασμό των προτεινομένων αρδευτικών συστημάτων.

Το ποσόν και ο ρυθμός εξάτμισης από υδατικές επιφάνειες είναι απαραίτητη πληροφορία για το σχεδιασμό φραγμάτων, την εκτίμηση των φυσικών λιμνών που απαιτούνται για την οικιακή και βιομηχανική παροχή νερού, την άρδευση των καλλιεργουμένων εκτάσεων, της ναυτιλίας κ.α.

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου εκφράζει τη διατήρηση της μάζας σε μια εδαφική κατανομή και διατυπώνεται ως εξής:

$$P + I + \Delta SW \pm RO - D - ET = 0$$

Όπου P : η βροχόπτωση,

I : η άρδευση,

ΔSW : η αλλαγή του περιεχόμενου νερού της εδαφικής κατανομής,

RO: η επιφανειακή απορροή,

D: η βαθιά διήθηση,

ET: η εξατμισοδιαπνοή.

Πηγή: Τσακίρης Γ., Υδατικοί πόροι: Ι.Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα 1995.

1.4. Ενεργειακό ισοζύγιο

Το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης "ολικής" ακτινοβολίας απορροφάται πλησίον της επιφάνειας της γης και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια. Αυτή η εσωτερική ενέργεια μοιράζεται σε ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που επανεκπέμπεται προς την ατμόσφαιρα, σε θερμότητα που μεταφέρεται προς ή από την ατμόσφαιρα, σε εξάτμιση του νερού και σε μεταφορά θερμότητας προς την επιφάνεια. Η θέρμανση μεγάλης κλίμακας, ρυθμίζει την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Ο αέρας ακόμα και όταν είναι κορεσμένος περιέχει μικρά μόνο ποσά υδρατμών, που μπορούν εύκολα να συμπυκνώνονται σε υψηλότερα επίπεδα και ο ίδιος να γίνεται ξηρός. Αυτή η απελευθέρωση ενέργειας μέσω συμπύκνωσης και βροχόπτωσης αποτελεί την μεγαλύτερη πηγή θερμότητας για την ατμόσφαιρα.

Ανάμεσα στο υδατικό και ενεργειακό ισοζύγιο, ο συνδετικός κρίκος είναι η εξάτμιση. Έτσι, αγνοώντας τη φωτοσύνθεση, το λιώσιμο του χιονιού και τις οριζόντιες μεταφορές το ενεργειακό ισοζύγιο είναι το εξής:

$$R_N = LE + H + G$$

Όπου R_N : η πυκνότητα ροής της καθαρά εισερχόμενης ακτινοβολίας,

L : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης,

E : ο ρυθμός της εξάτμισης,

H : η πυκνότητα ροής της αισθητής θερμότητας προς ή από την ατμόσφαιρα,

G : η πυκνότητα ροής της θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος.

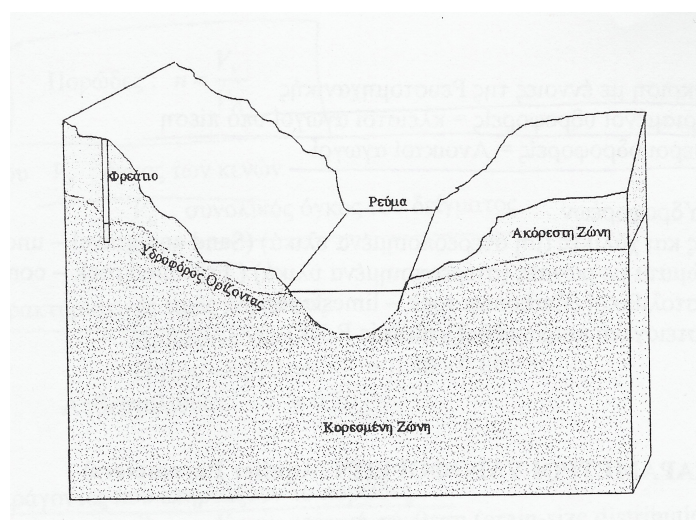
Πηγή: Τσακίρης Γ., Υδατικοί πόροι: Ι.Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα 1995.

1.5. Υδροφορείς

Υδροφορέας είναι ένας υπέδαφος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες.

Για την ταξινόμηση των υδροφορέων βασικό κριτήριο αποτελεί η θέση της ανώτατης στάθμης του νερού στο έδαφος. Έτσι, διακρίνονται σε ελεύθερους και περιορισμένους υδροφορείς.

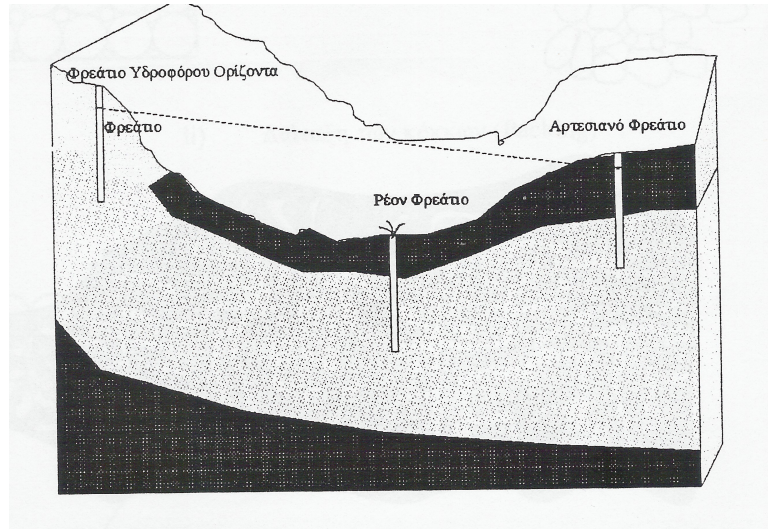
Ελεύθερος υδροφορέας: η ανώτερη επιφάνειά του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.



Σχήμα: 1.2. Ελεύθερος Υδροφορέας .

Πηγή: Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

Περιορισμένος υδροφορέας: περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα.



Σχήμα: 1.3. Περιορισμένος Υδροφορέας.

Πηγή: Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

1.5.1. Παράμετροι υδροφορέων

Οι υδροφορείς έχουν την ικανότητα να συγκρατούν νερό και αυτό μετριέται με το πορώδες.

Πορώδες

Το πορώδες είναι το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά και ορίζεται ως:

$$\text{Πορώδες: } n = \frac{V_v}{V_o}$$

Όπου V_v : ο όγκος των κενών,

V_o : ο συνολικός όγκος του δείγματος.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

- Η κοκκομετρική σύνθεση
- Η διάταξη των κόκκων
- Το σχήμα των κόκκων

Το ενεργό πορώδες είναι 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.

Ενεργό πορώδες:
$$n_e = \frac{V_v}{V_o}$$

Όπου V_v : ο όγκος του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων,

V_o : ο συνολικός όγκος του εδάφους.

Πηγή : Τσότσος Στέφανος, Εδαφομηχανική, Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη 1991.

1.6. Γενική μορφή του Νόμου Darcy

Ο Darcy μετά από μελέτες κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) δια μέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, του συντελεστή της υδραυλικής αγωγιμότητας K που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους πορείας της ροής.

Δηλαδή:
$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

Όπου Q: η παροχή [L^3/T],

A: η επιφάνεια [L^2],

K: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T],

Δh : η απώλεια φορτίου [L],

L: το μήκος της στήλης [L],

q: η ταχύτητα του Darcy [L/T].

Ο νόμος του Darcy για τις τρεις διευθύνσεις είναι:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Ο νόμος του Darcy ισχύει για αριθμούς Reynolds < 1 .

Σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ορίζεται ως εξής:

$$q_p = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl}$$

Όπου :

q_p : είναι η ταχύτητα διήθησης [L/T],

K: είναι η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T],

n: το πορώδες,

dh: η απώλεια φορτίου [L],

dl: το μήκος της στήλης [L].

Πηγή: Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

1.7. Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίζεται ως εξής:

$$\text{Υδραυλική αγωγιμότητα: } K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

Όπου ρ : η πυκνότητα,

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας,

μ : το δυναμικό ιξώδες,

k : ορίζεται ως η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου και

$k = Cd^2$, όπου C είναι ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη

την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων, την σφαιρικότητα

των κόκκων και την διάταξή τους.

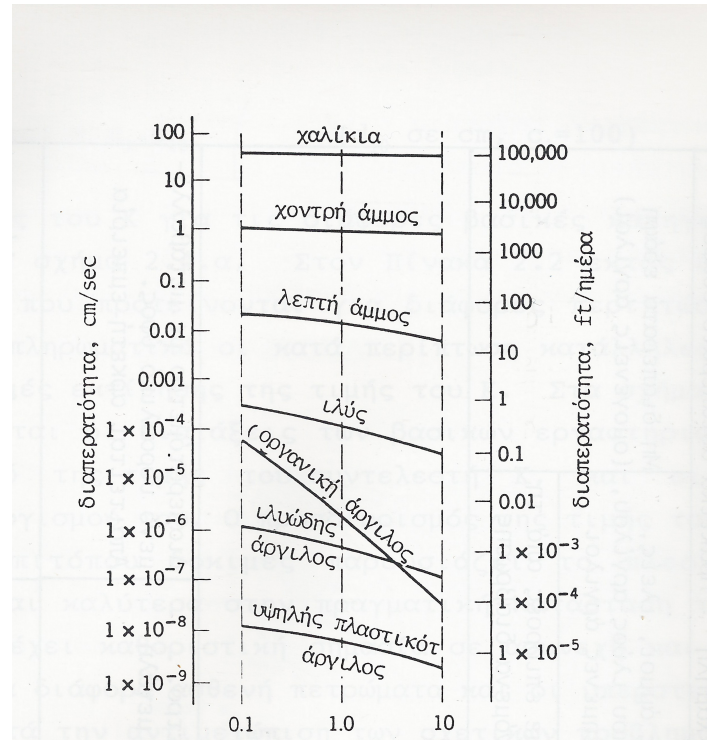
Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας μερικών τύπων εδαφών:

Τύπος εδάφους	Υδραυλική Αγωγιμότητα, K (cm/s)
Άργιλος	$10^{-9} - 10^{-6}$
Ιλύς	$10^{-7} - 10^{-3}$
Άμμος	$10^{-5} - 10^{-1}$
Χαλίκι	$10^{-1} - 10^2$

Πίνακας : 1.1. Χαρακτηριστικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

Πηγή: Freeze and Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1979.

Στο σχήμα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε ενδεικτικές τιμές του Συντελεστή Διαπερατότητας K για διάφορα εδάφη.



Πίνακας 1.2.: Ενδεικτικές τιμές του Συντελεστή Διαπερατότητας K για διάφορα τυπικά εδάφη.

Πηγή: Τσότσος Στέφανος, Εδαφομηχανική, Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη 1991.

1.8. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο το νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται δια μέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση.

Συντελεστής μεταβιβασιμότητας: $T=Kb$

Όπου K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T],

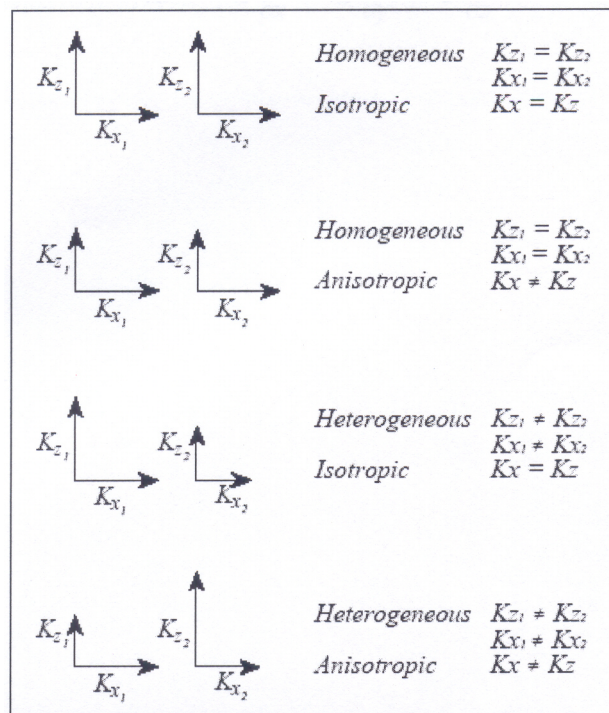
b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [L].

Πηγή: Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

1.9. Ομοιογένεια και Ισοτροπία

Όταν η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο, τότε εμφανίζεται η ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας. Ενώ όταν η υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα δεδομένο σημείο μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση, τότε εμφανίζεται η ιδιότητα της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας.

- Ομοιογενής χαρακτηρίζεται ένας υδροφορέας που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- Ετερογενής χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.
- Ισότροπος χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας, ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Ανισότροπος χαρακτηρίζεται ο υδροφορέας με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση.



Σχήμα 1.4.: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας.

Πηγή: Freeze and Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1979.

Πηγή: Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC

2.1. Σκοπός του εγχειριδίου

Σκοπός του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code) είναι να εισάγει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων. Το Argus One είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Χρησιμοποιείται κυρίως από πρακτικούς υδρολόγους παρά από θεωρητικούς για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης διάφορων υδροφορέων.

Το PTC είναι ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, που προσομοιώνει την υπόγεια ροή και μεταφορά.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

2.2. Κύριες εξισώσεις

Το PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαραστήσει την υπόγεια ροή του ύδατος, η οποία περιγράφεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

-Υδραυλικό ύψος h

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (2.1)$$

-Συνιστώσες της ταχύτητας ροής του υπογείου ύδατος

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.2)$$

-Μεταφορά του ρυπαντή που περιγράφεται από την συγκέντρωση C

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0$$

Όπου:

h: το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x,y και z αντίστοιχα [LT^{-1}],

S: η ειδική αποθηκευτικότητα [L^{-1}],

D_{ii} : ο φαινομενικός συντελεστής μοριακής διασποράς,

c: η συγκέντρωση του ρύπου

θ : το πορώδες του εδάφους

$E(c)$: η συνάρτηση προσρόφησης στο έδαφος

Οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από την Αρχή Διατήρησης της Μάζας και από τον νόμο του Darcy .

Η σειρά επίλυσης των παραπάνω εξισώσεων είναι: Πρώτα, λύνουμε την εξίσωση (2.1) για να βρούμε το υδραυλικό ύψος h, μετά υπολογίζουμε τις συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy V_x, V_y, V_z από την εξίσωση (2.2) και τέλος λύνουμε την (2.3) για να βρούμε την συγκέντρωση C.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

2.3. Επίλυση του αλγορίθμου PTC

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 2.1 έως 2.3 για πολύπλοκα φυσικά συστήματα γενικά απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια συμπεριλαμβανομένου της επίλυσης αυτών των τρισδιάστατων αριθμητικών εξισώσεων, είναι μεγάλη.

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί έναν μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού για ακριβή επίλυση τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει σημαντικά τα υπολογιστικά εμπόδια.

Ο αλγόριθμος διαχωρίζει την περιοχή σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα μέσα στα οποία χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία για την ακριβή αναπαράσταση του ακανόνιστου χώρου. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με πεπερασμένες διαφορές. Αυτή η υβριδική σύζευξη του πεπερασμένου στοιχείου και η πεπερασμένη διαφορά μεθόδων παρέχει την ευκαιρία εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά την διάρκεια μιας επανάληψης δεδομένης χρονικής περιόδου, όλοι οι υπολογισμοί διαιρούνται σε δυο βήματα. Στο πρώτο βήμα, επιλύονται όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων, ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Ενώ στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις, οι οποίες συνδέουν τα στρώματα μεταξύ τους.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΎΔΑΤΟΣ

3.1. Κύρια εξίσωση

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός συστήματος ροής υπογείων υδάτων λύνοντας την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση ως προς το υδραυλικό ύψος:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \\ \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Όπου:

h : το υδραυλικό ύψος [L],

K_{xx} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην x-διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην y-διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} : η υδραυλική αγωγιμότητα στην z-διεύθυνση [LT^{-1}],

S : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [L^{-1}],

Q_i : ο όρος πηγή/δεξαμενή στη θέση i (π.χ. θετική τιμή στην περίπτωση εμπλουτισμού) [L^3T^{-1}],

$\delta(\)$: είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac,

r : ο αριθμός των σημείων πηγών/ δεξαμενών.

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (3.1) θα συμβολίζεται με Q .

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.2. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Ο κώδικας PTC για να λύσει την εξίσωση (3.1), προσεγγίζει τους όρους που περιέχουν τις παραγώγους ως προς την x και y διεύθυνση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Πεπερασμένα στοιχεία στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιούνται ευρέως.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρεί ότι υπάρχει ένα άθροισμα από μη-πεπερασμένες λειτουργίες, οι οποίες θα αντιπροσωπεύουν ακριβώς την λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων περιγράφοντας τη ροή των υπογείων υδάτων.

Μια πεπερασμένη προσεγγιστική φόρμα είναι:

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (3.2)$$

Όπου:

h : το υδραυλικό ύψος [L],

\hat{h} : η προσεγγιστική σειρά του h [L],

h_i : ένας απροσδιόριστος συντελεστής [L],

w_i : μια βασική (ή παρεμβολική) συνάρτηση (αδιάστατη) και

N : ο αριθμός των κόμβων του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (3.2) παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση καθώς το N προσεγγίζει το άπειρο. Με μια βασική επιλογή των βασικών λειτουργιών w_i οι απροσδιόριστοι συντελεστές h_i , γίνονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x, y, z) . Ένα κλειδί στην αποδοτικότητα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση βασικών συνεχών τμηματικών λειτουργιών, οι οποίες είναι διαφορετικές από το μηδέν, πέρα από μια μόνο μικρή υποπεριοχή της συνολικής περιοχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προχωρά με τη σημείωση ότι, αν και ο διαφορικός χειριστής L που αναπτύσσει δραστηριότητες στο h ισούται με μηδέν, όταν το L τείνει στην προσεγγιστική συνάρτηση τότε εισάγεται κάποιο σφάλμα.

Μαθηματικά ,η εξίσωση (3.2) γράφεται ως:

$$L(h) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Καθώς , } L(\hat{h}) = R \quad (3.4)$$

Όπου R είναι το υπολειμματικό σφάλμα.

Για να λύσουμε την σχέση (3.2) χρησιμοποιώντας μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το υπολειμματικό σφάλμα R.

Πριν ολοκληρώσουμε, πρώτα εξετάζουμε ένα πλήρες σύνολο λειτουργιών W_j . Αν τώρα αναγκάσουμε το υπολειμματικό R να είναι ορθογώνιο σε όλες τις πιθανές τιμές του W_j , στην πραγματικότητα αναγκάζουμε το R να τείνει στο μηδέν και μ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνουμε μια λύση.

Με άλλα λόγια

$$L(\hat{h}) = L(h) , \text{ όταν } R=0 \quad (3.5)$$

Το PTC χρησιμοποιεί το ίδιο σύνολο λειτουργιών με τις λειτουργίες στάθμισης W_j , όπως για τις λειτουργίες βάσης W_i . Αυτή η λειτουργία λέγεται μέθοδο του Galerkin. Συνεπώς, τα W_j και W_i χρησιμοποιούνται εναλλακτικά σε όλο το υπόλοιπο αυτής της εργασίας.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.3. Εφαρμογή της πεπερασμένης- διαφορικής μεθόδου

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών με χρήση διανυσμάτων είναι η εξής:

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (3.6)$$

Όπου A και B είναι πίνακες (NxN) και h, $\partial h / \partial t$, v και f είναι διανύσματα στηλών του μήκους N.

Τα στοιχεία A, B, v και f είναι :

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} [K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y}] dx dy \quad (3.7.a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (3.7.b)$$

$$f_i = \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} [K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y] w_i d\sigma \quad (3.7.c)$$

$$v_i = \sum_{j=1}^N [\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} (k_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z}) w_i w_j dx dy] \quad (3.7.d)$$

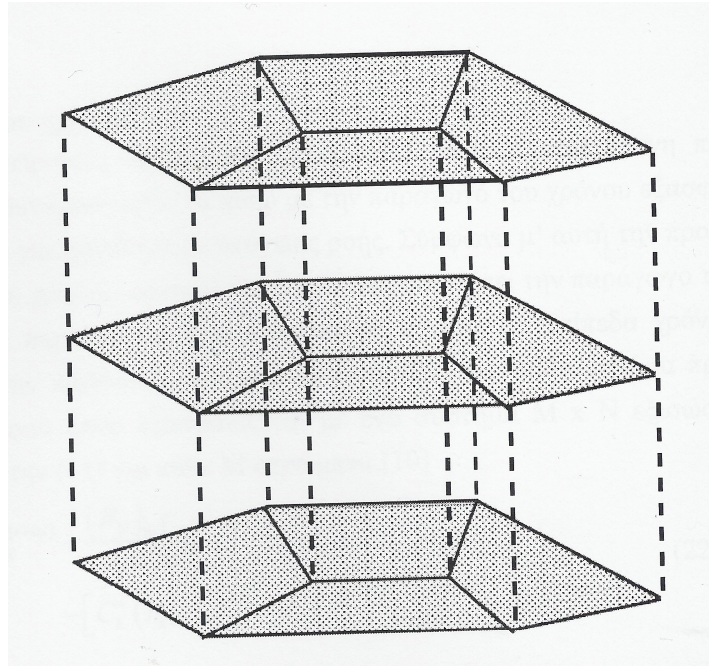
Όπου στο f περιέχονται οι γνωστές οριακές συνθήκες.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.3.1. Η κάθετη παράγωγος

Το κεντρικό χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του κώδικα υπολογιστών είναι η χρήση ενός κεντρικού διαφορικού σχεδίου για τα χωρικά παράγωγα στην κατεύθυνση z. Κάθετος διαχωρισμός ολοκληρώνεται με την απαίτηση ότι οριζόντια πλέγματα

πεπερασμένων στοιχείων ξαναδιπλώνονται στα στρώματα με τους κόμβους να συσσωρεύονται ο ένας πάνω στον άλλον.



Σχήμα 3.1. Σχηματική αναπαράσταση ενός οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία αντικαθίστανται από στρώματα με κόμβους τον έναν πάνω στον άλλον και παίρνουν τρισδιάστατη μορφή.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μια μονοδιάστατη πεπερασμένη διαφορική εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά προσέγγιση. Χρησιμοποιώντας το k ως κάθετο δείκτη ,με $k=1$ ως κατώτατο στρώμα, αυτή η προσέγγιση γράφεται ως:

$$v \cong C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad (3.8)$$

Όπου ο αρμονικός μέσος των παρακείμενων ιδιοτήτων του στρώματος χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν τα στοιχεία των C_k^+ , ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και του στρώματος $k+1$, και C_k^- ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και του στρώματος $k-1$.

$$C_{ij,k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta z_k [\Delta z_{k\pm 1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k\pm 1}]} w_i w_j dx dy \quad (3.9)$$

Όπου Δz_k είναι το πάχος του στρώματος k στο σημείο προσέγγισης.

Ο αρμονικός μέσος δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις ετερογενείς καταστάσεις που συναντώνται συνήθως .

Η αντικατάσταση από την (3.6) στην (3.8) παράγει την παρακάτω έκφραση για ένα τυπικό στρώμα k

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (3.10)$$

Όπου το h_k αντιπροσωπεύει το διάνυσμα h των υδραυλικών υψών στο στρώμα k , $k=1,2,3 \dots M$, και M είναι ο αριθμός των στρωμάτων στην z διεύθυνση.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.3.2. Η παράγωγος του χρόνου

Η προσέγγιση διαφοράς κατευθυνόμενης προς τα πίσω με την παράγωγο του χρόνου εξασφαλίζει την πιο ακριβή λύση για προβλήματα υπόγειας ροής. Σύμφωνα με αυτήν, ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται είναι για να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους που δίνονται σε καινούρια επίπεδα χρόνου. Έτσι, εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην εξίσωση (3.10) για κάθε στρώμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση που εξασφαλίζεται με ένα σύστημα $M \times N$ εξισώσεων με N αγνώστους για κάθε M στρώματα.

$$A_K h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_K}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{(k+1)} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (3.11)$$

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.4. Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις τύποι είναι: οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένου υδραυλικού ύψους), του Neumann (καθορισμένης ροής) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (για διαρροή). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν από τον χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και η προεπιλεγμένη συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει περιορισμένος υδροφορέας με αδιαπέρατο πυθμένα και αδιαπέρατα στρώματα γύρω από αυτόν. Ακόμα, επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

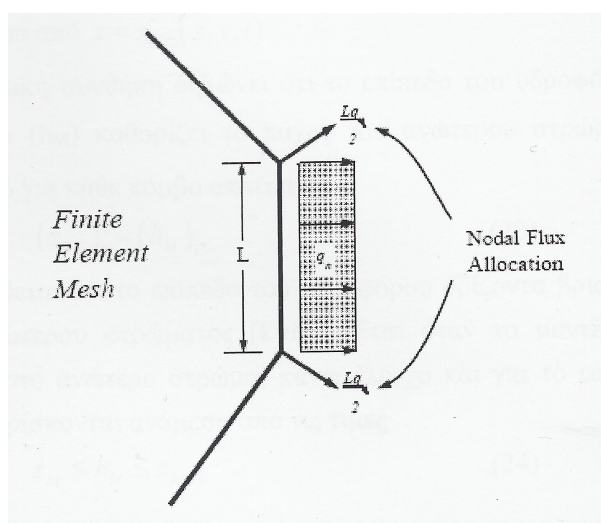
3.4.1. Οριακές συνθήκες καθορισμένου Υδραυλικού Ύψους

Οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους καθορίζονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους που έχει οριστεί από αυτούς. Αυτόματα ο κώδικας ταξινομεί τις γραμμές και τις στήλες στο μητρώο συντελεστών που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Έτσι, αφού οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους απαλείφονται από το μητρώο των εξισώσεων, απομένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους.

Όπου, N_c ο συνολικός αριθμός των κόμβων που εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους μέσα στην περιοχή ροής.

3.4.2. Οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα απλό μέσο για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου με μήκος L η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2. Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L .
Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος έχει ισοδύναμη βαρύτητα.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

Ο χρήστης χρειάζεται να ορίσει μόνο την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται κατά τον ίδιο τρόπο μαθηματικά. Το πρόγραμμα για να διευκολύνει την εισαγωγή ομοιόμορφης διήθησης επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και γίνεται αυτομάτως ολοκλήρωση της περιοχής για τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.4.3. Οριακές συνθήκες τρίτου είδους

Οι οριακές συνθήκες διαρροής προκύπτουν αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.7.c), την τιμή

$$Q = k_L (h'_{j,L} - h'_{j,k}) \quad (3.12)$$

Όπου :

$h'_{j,k}$: το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j
του στρώματος k τη χρονική στιγμή t,

$h'_{j,L}$: το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς
της διαρροής,

k_L : η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα
προς απόσταση).

Ο όρος της αγωγιμότητας ολοκληρώνεται επιφανειακά κι έτσι αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Έτσι, με κατάλληλο προσδιορισμό της καθοριζόμενης σταθεράς k_L από τον χρήστη, μπορεί να προσδιοριστεί η διαρροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση .

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.4.4. Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα

Οι οριακές συνθήκες που απαιτούνται σε έναν ελεύθερο υδροφορέα είναι δυο κι εφαρμόζονται στο πάνω στρώμα του υδροφόρου ορίζοντα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας που υπόκειται σε διήθηση μεγέθους $R(x, y, t)$.

Το σταθερό υψόμετρο του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση :

$$z = z_{M+1}(x, y, t),$$

ενώ το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα από τη σχέση

$$z = z_{WT}(x, y, t).$$

Η πρώτη οριακή συνθήκη ορίζει ότι η στάθμη του νερού στο πάνω στρώμα (h_M) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα του πάνω στρώματος

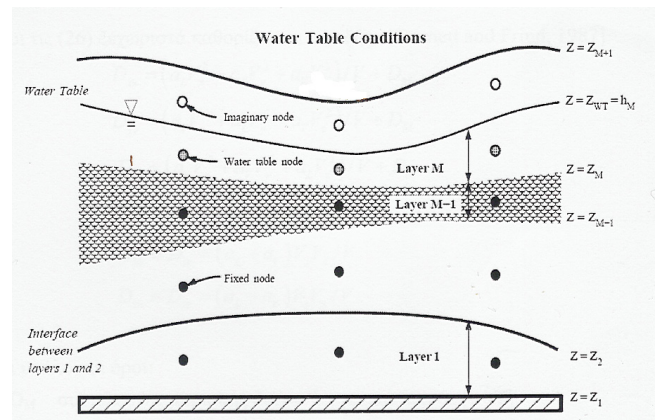
$$(z_{WT} - z_M).$$

Οπότε σε κάθε κόμβο απαιτείται:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (3.13)$$

Υποθέτουμε ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα εντός του πάνω στρώματος ($k=M$). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα ύψη στο πάνω στρώμα, ελέγχει αν οι τιμές h_M στους κόμβους βρίσκονται μεταξύ των υψομέτρων

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.3. Ο υδροφόρος ορίζοντας και οι συνθήκες που επικρατούν στο πάνω όριο. Η επιφάνεια δηλώνεται με $z=z_1$ και $z=z_2$. Είναι καθορισμένα όρια στον χώρο και ορίζουν τα στρώματα.

Ακόμα, ορίζοντας $z=z_{WT}$ ο κινούμενος υδροφόρος πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την προσωρινή ανταπόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διείσδυση. Ορίζοντας ως S_y την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, οι εξισώσεις γράφονται ως εξής:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (3.15)$$

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3.5. Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων - Κύριες εξισώσεις

Η εξίσωση μεταφοράς είναι:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & Q(c^w - c) - (V_x \frac{\partial C}{\partial X} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z}) - \theta[1 + E(c)](\frac{\partial c}{\partial t}) = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Οι όροι διασποράς στην (3.1) καθορίζονται ως :

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\ D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_v) V_y V_z / V \\ D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_v) V_z V_x / V \end{aligned} \quad (3.17)$$

Και οι όροι που παραμένουν είναι:

D_M : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, που συνήθως έχει μικρή τιμή $[L^2/T]$,

α_L : ο συντελεστής διαμήκους διασποράς $[L]$,

α_T : ο συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς $[L]$,

α_v : ο συντελεστής κάθετης εγκάρσιας διασποράς $[L]$,

V : το μέτρο του διανύσματος της ταχύτητας $[L/T]$ ($V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$),

c : η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) τη χρονική στιγμή t $[M/L^3]$,

θ : το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),

$E(c)$: η συνάρτηση που αναπαριστά τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης,

Q : η ισχύς της άντλησης (πηγή/δεξαμενή) $[T^{-1}]$

($Q \equiv Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i)$),

Q_i : ο ρυθμός ογκομετρικής άντλησης ή εμπλουτισμού $[L^3/T]$ στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

C^w : η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στο σημείο (x_i, y_i, z_i) ,

$\delta()$: η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i < 0$) , υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου (ρευστού) νερού C^w στην αντλία ισούται με την συγκέντρωση του περιβάλλοντος νερού C . Οπότε, χρησιμοποιώντας τις αντλίες, ο όρος $Q(C^w - C)$ ισούται με μηδέν (στην σχέση 3.16). Έτσι εξασφαλίζεται ο όρος Q στην εξίσωση (3.1) μόνο όταν το πηγάδι αντλεί ($Q_i > 0$) τη διαλυμένη ύλη με συγκέντρωση C^w που υποδηλώνει τη συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού.

Πηγή: D.K. Badu, G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

4.1. Εισαγωγή

Η Ζάκυνθος είναι το Νοτιότερο και τρίτο σε έκταση και πληθυσμό νησί των Ιονίων Νήσων. Βρίσκεται 8,5 ναυτικά μίλια Νότια της Κεφαλλονιάς, 9,5 μίλια Δυτικά της Πελοποννήσου και 300 περίπου χιλιόμετρα Δυτικά της Αθήνας.

Νησί γεμάτο αντιθέσεις η Ζάκυνθος είναι στο μεγαλύτερο μέρος της ορεινή, με χαμηλά πευκόφυτα βουνά και εύφορους κάμπους. Στα Βόρεια, Ανατολικά και Νότια έχει αμέτρητες γραφικές παραλίες. Διαθέτει μια ιδιαίτερα πλούσια χλωρίδα και πανίδα. Ο υψηλός δείκτης βροχοπτώσεων δημιούργησε ένα πλούσιο περιβάλλον κατάφυτο από δέντρα και δάση με ποικιλία σπάνιων ανθέων και λουλουδιών.

Το κλίμα της Ζακύνθου είναι ήπιο μεσογειακό με πολλές βροχές από Νοέμβριο μέχρι Ιανουάριο και μεγάλη ηλιοφάνεια όλο το έτος. Είχε ανέκαθεν πλούσια βλάστηση και είναι ένα νησί με πλούσια αγροτική παραγωγή, στηριγμένη κυρίως στην καλλιέργεια της ελιάς, των εσπεριδοειδών και της σταφίδας καθώς και των ανθοκομικών. Επίσης, έχει ανεπτυγμένη επιχειρηματική δραστηριότητα κυρίως στον τομέα του τουρισμού.

Στις Νότιες ακτές του νησιού αναπαράγεται η θαλάσσια χελώνα *Caretta – Caretta*, ένα σπάνιο είδος που προστατεύεται από διεθνείς συμβάσεις και την Ελληνική νομοθεσία. Ακόμα, στις Δυτικές ακτές του νησιού ζει και αναπαράγεται η φώκια *monachus - monachus*.

Πηγή: Διαδίκτυο www.google.com, "Travel guide of Zakynthos island in Greece".



Εικόνα: 4.1.: Χάρτης Ζακύνθου

Πηγή: Ιστοσελίδα www.google.com, "Travel guide of Zakynthos island in Greece ".

4.2. Συνθήκες Ύδρευσης

Οι συνθήκες ύδρευσης του Δήμου Ζακυνθίων και των Κοινοτήτων του Νομού Ζακύνθου, απεικονίζονται στο παράρτημα στον επισυναπτόμενο χάρτη "Χάρτης συνθηκών ύδρευσης Δήμου και Κοινοτήτων Ν. Ζακύνθου", κλίμακας 1: 150000.

Στον αυτόν τον χάρτη φαίνεται σε ποια Δημοτικά και Κοινοτικά Διαμερίσματα του Νομού υπάρχει επάρκεια νερού όλο τον χρόνο, επάρκεια τον χειμώνα, έλλειψη το καλοκαίρι ή έλλειψη νερού όλο το χρόνο.

Σε γενικές γραμμές διαπιστώνουμε ότι στο μεγαλύτερο μέρος του νησιού υπάρχει επάρκεια νερού το χειμώνα αλλά το καλοκαίρι οι κάτοικοι αντιμετωπίζουν οξύ πρόβλημα.

Πηγή: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999.

4.3. Μορφολογία-Υδρολογία

Γεωμορφολογικά η Νήσος Ζάκυνθος διακρίνεται σε τέσσερις μεγάλες μονάδες.

α)Δυτική ορεινή:

Η περιοχή αυτή εκτείνεται από το Κερί μέχρι το ακρωτήριο Σχινάρι. Είναι βραχύδης και κύριο γνώρισμά της είναι η επικράτηση των ασβεστολιθικών ιζημάτων που προσφέρουν χαρακτηριστικό ασβεστολιθικό τοπίο και ισχυρό ανάγλυφο.

β)Νοτιοανατολική ορεινή

Η περιοχή αυτή καταλαμβάνει τη χερσόνησο του Σκοπού. Δομείται από γύψο, ανυδρίτη και ασβεστόλιθους και το ανάγλυφο είναι έντονο.

γ)Λοφώδης

Η περιοχή αυτή εκτείνεται από τις παρυφές των ορεινών όγκων καθώς και το Α.ΒΑ. τμήμα του νησιού. Γεωλογικά εκεί αναπτύσσονται μετααλπικά ιζήματα, τα οποία λόγω της εύκολης διάβρωσης σχετικά με τα ασβεστολιθικά πετρώματα επέτρεψαν τη δημιουργία ηπιότερου αναγλύφου.

δ)Πεδινή περιοχή

Η περιοχή αυτή εντοπίζεται στο κεντροανατολικό τμήμα του νησιού και αποτελείται από εύφορο έδαφος που προήλθε από τα προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων του περιβάλλοντος της προσχωματικής λεκάνης.

Στην Δυτική πλευρά του νησιού φαίνεται καθαρά ο έντονος οριζόντιος διαμελισμός που επικρατεί, όπου διαμορφώνονται πολλοί όρμοι, κολπίσκοι, ακρωτήρια και μικροί χερσόνησοι.

Ο κάθετος διαμελισμός είναι επίσης έντονος με ψηλά βουνά (Βραχίονας 756 m, Κακή Ράχη 680 m, Μακρυά Ράχη 606 m, Μεγάλο Βουνό 604 m κ.α.).

Το υδρογραφικό δίκτυο της Ζακύνθου είναι σχετικά πυκνό εκτός του πεδινού τμήματος που διαρρέεται από τρεις εποχιακούς χείμαρρους που εκβάλλουν ο πρώτος στον κόλπο της πόλεως Ζακύνθου, ο δεύτερος στον κόλπο του Λαγανά και ο τρίτος στον όρμο των Αλυκών.

Γενικά, η μορφολογική εικόνα του νησιού είναι αποτέλεσμα των τεκτονικών κινήσεων που διατάραξαν την περιοχή αυτή κατά την Τριτογενή-Τεταρτογενή περίοδο, της πετρογραφικής σύστασης, της αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων κάθε περιοχής του.

Από κλιματολογική άποψη το κλίμα της περιοχής ανήκει στο μεσογειακό τύπο, που χαρακτηρίζεται από ψηλές βροχοπτώσεις το χειμώνα και ελάχιστες τη θερινή περίοδο με ψηλές θερμοκρασίες.

Λόγω της θέσης του νησιού, στο Δυτικότερο τμήμα της Ελλάδος, παρουσιάζει μεγάλο ύψος βροχόπτωσης. Κατά περιόδους στη Ζάκυνθο από το 1894 λειτούργησαν μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπίου, της Ε.Μ.Υ, του Υ.Δ.Ε κ.λ.π. και από επεξεργασία στοιχείων προέκυψε ότι για περίοδο 65 ετών το μέσο ετήσιο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ανέρχεται σε 1077 mm.

Πηγές: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999 και

Πληροφορίες από μελέτες της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ζακύνθου (Δ.Ε.Υ.Α.Ζ.).

4.4. Γεωλογία

4.4.1. Στρωματογραφία

Το νησί Ζάκυνθος ανήκει στην γεωτεκτονική ζώνη Παξών εκτός του όρου “Σκοπός” που καταλαμβάνει μικρή έκταση στο ανατολικό τμήμα του νησιού και δομείται από ιζήματα της Ιονίου ζώνης.

Οι ενότητες που συνέρχονται στη στρωματογραφική σύνθεση του νησιού είναι κατά ζώνες οι ακόλουθες, από τις παλαιότερες προς τις νεότερες:

4.4.1.1. Ζώνη Παξών (Προαπούλιος)

Τα πετρώματα αυτής της ζώνης είναι αποκλειστικά ιζηματογενή και εμφανίζεται στο νησί της Ζακύνθου η στρωματογραφική σειρά πλην Ιουρασικού από το Κρητιδικό μέχρι το Μειόκαινο.

α. Κρητιδικό

Η διάπλαση αυτή αντιπροσωπεύεται από λευκούς ασβεστόλιθους, λεπτοπλακώδεις έως παχυπλακώδεις υπολιθογραφικούς, εύθρυπτους, που είναι έντονα διαρρηγμένοι και αποκαρστωμένοι. Η παράταξη των στρωμάτων είναι κυρίως Β.ΒΔ - Ν.ΝΑ με μικρές κατά τόπους αποκλίσεις κι εμφανίζουν γενικές κλίσεις που κυμαίνονται από 10° μέχρι 40°.

Οι ασβεστόλιθοι αυτοί καταλαμβάνουν το 50% της επιφάνειας του νησιού ,παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη από όλους τους άλλους σχηματισμούς που υπάρχουν στο νησί και αποτελούν γεωλογικό υπόβαθρο ολόκληρης σχεδόν της Ζακύνθου.

Τα ιζήματα που αναφέραμε καταλαμβάνουν το Δυτικό τμήμα του νησιού, από το Ακρωτήρι Σχινάρι μέχρι την περιοχή που εκτείνεται Δ.ΒΔ του όρμου Κερίου.

β. Ηώκαινο

Η υποπερίοδος αυτή αντιπροσωπεύεται από λευκούς πορσελανώδεις λεπτοπλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, πάχους άνω των 300 m, επίκεινται στρωματογραφικά των Κρητιδικών ασβεστολίθων με φαινομενική συμφωνία. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι λιγότερο αποκαρστωμένοι σχετικά με τα ιζήματα του Κρητιδικού και δομούν τα Ανατολικά πρανή του δυτικού συγκροτήματος του νησιού, από Αγ.Μαρίνα μέχρι το Ακρωτήριο του Μαραθιά της περιοχής του Κερίου.

γ. Ολιγόκαινο

Αντιπροσωπεύεται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους πλακώδης, λευκούς με λεπτές ενστρώσεις μαργών. Τοπικά στην επαφή της μαργαϊκής ενότητας με τους υποκείμενους ασβεστόλιθους υπάρχει συχνά λεπτή παρεμβολή χονδροκροκαλοπαγούς με ασβεστολιθικές κροκάλες του Κρητιδικού και του Ηωκαίνου, αλλά χωρίς γωνιώδη ασυμφωνία.

Ο σχηματισμός του Ολιγόκαινου αναπτύσσεται παράλληλα με εκείνο του Ηώκαινου από τα Λαγκαδάκια μέχρι τον όρμο του Κερίου.

δ. Μειόκαινο

Η υποπερίοδος αυτή αντιπροσωπεύεται από μάργες γαλαζωπές, ιλυόλιθους και ψαμμίτες με συνολικό πάχος πάνω από 700 m.

Στα ανώτερα μέλη υπάρχουν ενστρώσεις γύψου, συνεκτικής αργίλου με γύψο και ψαμμίτη με γύψο. Ο γύψος είναι αδρομερής κρυσταλλική με καλά αναπτυγμένους κρυστάλλους και σε στρώματα πάχους 5-20 m.

Το ανώτερο Μειόκαινο αποτελείται από μια σειρά εναλλαγών μαργών και πηλινών με ελάχιστο ψαμμίτη και ιλυόλιθο.

Ο σχηματισμός αυτός ξεκινάει από τον όρμο των Αλυκών και φθάνει μέχρι τον Κόλπο του Κερίου, σαν επιμήκης ζώνη πλάτους τριών περίπου χιλιομέτρων.

4.4.1.2. Ιόνιος Ζώνη

Οι σχηματισμοί της ζώνης αυτής εμφανίζεται στο Ανατολικό τμήμα του νησιού και δομούν το όρος Σκοπός. Η ζώνη αυτή είναι επωθημένη στη ζώνη Παξών αλλά η γραμμή επωθήσεως έχει καλυφθεί με ιζήματα του ανώτερου Πλειοκαίνου. Στη Ζάκυνθο απαντούν μόνο τα κατώτερα μέλη της σειράς.

α. Τριαδικό

Αντιπροσωπεύεται από γύψους και ανυδρίτες, οι οποίοι λόγω διαπυρισμού είναι έντονα διαταραγμένοι και περιβάλλονται από λατυποπαγή που αποτελούνται από συστατικά τα οποία παρέμειναν μετά τη διάλυση και αποκόμιση της γύψου. Ακόμα, απαντώνται σε μικρή έκταση μαύροι ασβεστόλιθοι, μικροκοκκώδης, πλακώδεις που είναι βιτουμενιούχοι.

β. Νεότεροι σχηματισμοί (Νεοαλπικοί)

Πλειόκαινο

Οι σχηματισμοί αυτοί συναντώνται στην ανατολική παραλιακή περιοχή του νησιού, από Αλικανά μέχρι την πόλη της Ζακύνθου και από Αργάσι μέχρι Βασιλικό και αποτελούνται από δύο ορίζοντες. Τον ανώτερο με ανοιχτοκάστανους μέχρι λευκούς ψαμμίτες μετά αργιλομαργαϊκών παρεμβολών και τον κατώτερο με κυανές μάργες και μαργαϊκούς ψαμμίτες. Τα ιζήματα αυτής της υποπεριόδου κάθονται πάνω σε εκείνα του Μειοκαίνου και αποτελούν το υπόβαθρο των Τεταρτογενών αποθέσεων που αναπτύσσονται στην πεδινή ζώνη.

Πλειστόκαινο (Διλούβιο)

Οι Διλουβιακοί σχηματισμοί συναντώνται κυρίως στις ζώνες ρηγμάτων (Λιθακιά) καθώς επίσης στις περιοχές Μέσου Γερακαρίου, Αλικανά και Μπόχαλη. Αποτελούνται από χαλαρά ή συνεκτικά κροκαλοπαγή με αργιλομαργαϊκό συνδετικό υλικό, κυανές μάργες και ασβεστοψαμμίτες.

Ολόκαινο (Αλλούβιο)

Οι αποθέσεις αυτές διακρίνονται σε πλευρικά κορήματα, κώνους κορημάτων, κώνους χειμάρρων, αναβαθμίδες χειμάρρων, αποθέσεις κοιλάδων κ.λ.π. ανάλογα με την σύστασή τους και τον τρόπο που σχηματίζονται.

Οι τεταρτογενής αυτοί σχηματισμοί αναπτύσσονται στις πλαγιές των βουνών των λόφων και κυρίως μέσα στην πεδινή περιοχή στο κεντροανατολικό τμήμα του νησιού.

4.4.2. Τεκτονική

Γεωτεκτονικά η Ζάκυνθος ανήκει στην ζώνη Παξών, εκτός του όρου Σκοπός που δομείται από ιζήματα της Ιονίου ζώνης, τα οποία είναι επωθημένα πάνω στην αυτόχθονη ενότητα των Παξών.

Το έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο του δυτικού τμήματος του νησιού οφείλεται στην αντικλινική διάρθρωση της Κρητιδικής -Μειοκαινικής σειράς με βασικό άξονα διεύθυνσης Β.ΒΔ-Ν.ΝΑ.

Πολλά ρήγματα που ομαδοποιούνται κυρίως σε δυο οικογένειες ρηγμάτων με επικρατούσες διευθύνσεις Δ.ΒΔ-Α.ΝΑ και Α.ΒΑ-Δ.ΝΔ, διατέμνουν την ασβεστολιθική Μεσοζωική σειρά. Τα παραπάνω ρήγματα είναι αποτέλεσμα μεταπτώσεων που έδρασαν μετά από την πτύχωση της ασβεστολιθικής Μεσοζωϊκής σειράς, λόγω εφαπτομενικών κινήσεων. Αυτό διαπιστώνεται από την μετακίνηση του άξονα πτυχώσεως, τοπικά σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ.

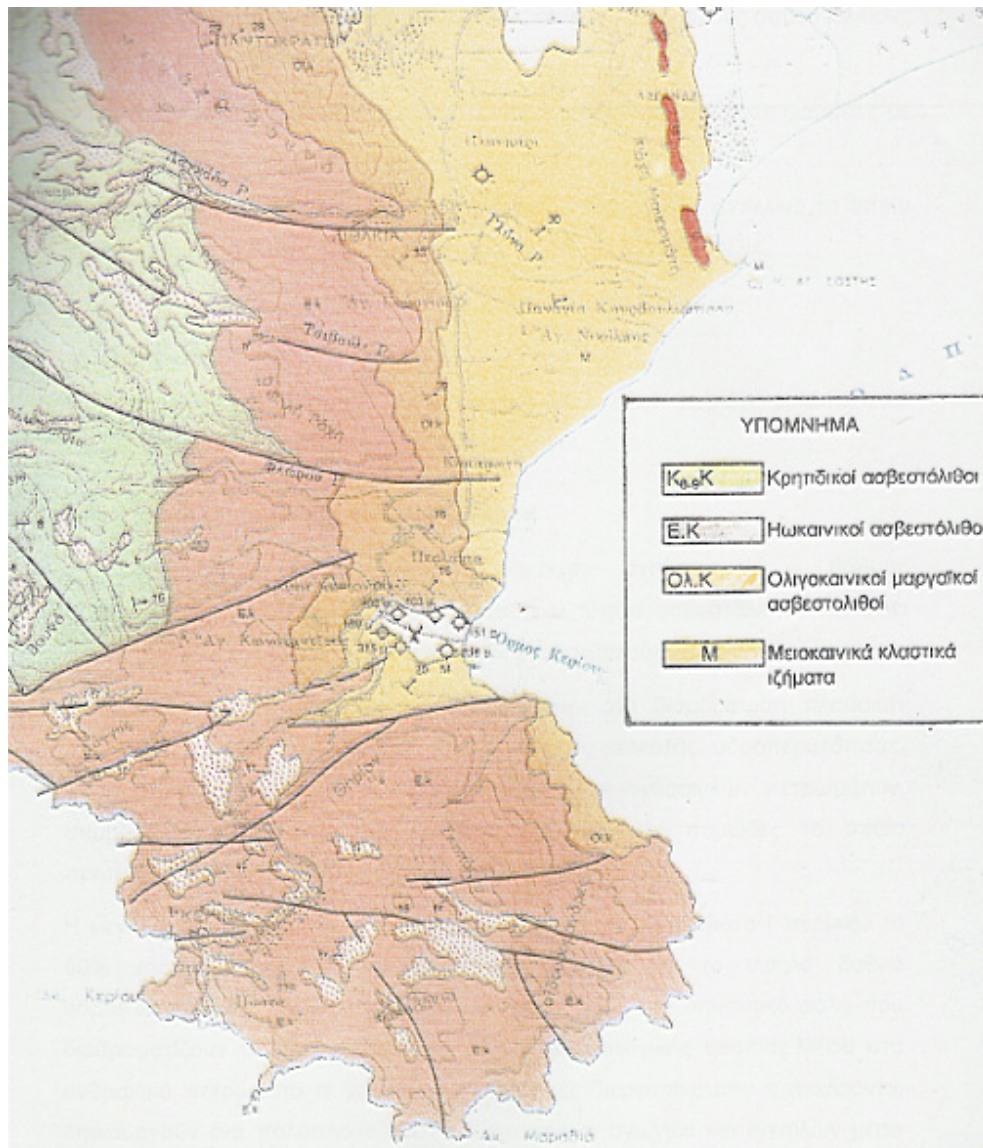
Οι τεκτονικές κινήσεις που προαναφέραμε έχουν πλήξει και τα ιζήματα του Νεογενούς, όπου στην εποχή εκείνη υπήρχε φάση συμπίεσης στην οποία ορισμένοι ερευνητές αποδίδουν την επώθηση της Ιονίου ενότητας πάνω στην Προαπούλιο και την επεναδραστηριότητα των κανονικών ρηγμάτων της Προαπουλίου σε ανάστροφα πτυχωσιγενή ρήγματα.

Αποτέλεσμα αυτών των συμπιεστικών κινήσεων ήταν η ανάδυση της Ζακύνθου.

Επίσης, λόγω της έντονης τεκτονικής των Ιονίων νησιών που αποτελούν ρηξιγενή τεμάχια, έχουν δημιουργηθεί συνθήκες αστάθειας σε αυτή την περιοχή με αποτέλεσμα να υπάρχουν στον χώρο αυτό μεγάλες σεισμικές εστίες.

Πηγή: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999 και

Πληροφορίες από μελέτες της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ζακύνθου (Δ.Ε.Υ.Α.Ζ.).



Χάρτης 4.1. Γεωλογικός Χάρτης τμήματος της περιοχής Ζακύνθου.

Πηγή: Κουρής Χ., Υδρογεωλογική Έκθεση Αποτελεσμάτων των Γεωτρητικών-Αντλητικών Εργασιών Ν. Ζακύνθου, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, Νοέμβριος 2001.

4.5. Υδρογεωλογία

4.5.1. Γενικά

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν στο νησί ανάλογα με τον βαθμό υδροπερατότητας ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Υδροπερατούς
- Ημιπερατούς
- Υδατοστεγείς

Στους υδροπερατούς κατατάσσουμε τους ασβεστόλιθους του Τριαδικού της Ιόνιας ζώνης, του Κρητιδικού και Ηωκαίνου της ζώνης Παξών και τις αδρομερείς αποθέσεις του Νεογενούς και Τεταρτογενούς.

Στους ημιπερατούς περιλαμβάνονται οι γύψοι και ανυδρίτες που εγκλείουν ασβεστολιθικά τεμάχια, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Ολιγοκαίνου, οι ψαμμίτες του Μειοκαίνου, οι πλειστοκαινικές αποθέσεις, οι αργιλοαμμώδεις αποθέσεις του Τεταρτογενούς καθώς και οι Ελουβιακοί σχηματισμοί.

Τέλος, πρακτικά υδατοστεγείς σχηματισμοί θεωρούνται οι λεπτομερείς αποθέσεις του Νεογενούς (Μειόκαινο - Πλειόκαινο) και του Τεταρτογενούς (Πλειστόκαινο-Ολιγόκαινο).

Οι κυριότεροι παράγοντες που ευνοούν τη διαμόρφωση πλούσιων υδροφόρων οριζόντων μέσα σε ορισμένους σχηματισμούς είναι οι εξής:

- Ο μεγάλος συντελεστής υδροπερατότητας
- Οι σημαντικές διαστάσεις του γεωλογικού σχηματισμού
- Η ευνοϊκή θέση του υδροφόρου σχηματισμού σχετικά με τα άλλα πετρώματα της περιοχής
- Η ευνοϊκή θέση σχετικά με τη θάλασσα
- Οι υψηλές βροχοπτώσεις
- Η ήπια μορφολογία της περιοχής κ.λ.π.

Η διαμόρφωση των υδροφόρων οριζόντων στους διάφορους σχηματισμούς σύμφωνα με τις υπάρχουσες μορφολογικές, γεωλογικές, τεκτονικές, υδρολογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν είναι οι παρακάτω:

4.5.2. Υδροφορία προσχώσεων

Οι προσχωματικές αποθέσεις που εντοπίζονται στο κεντροανατολικό πεδινό τμήμα του νησιού, αποτελούνται από άμμους και αργίλους που προήλθαν από την αποσάθρωση των σχηματισμών του Πλειοκαίνου και Μειοκαίνου αντίστοιχα και το πάχος αυτών των αποθέσεων δεν υπερβαίνει τα 10 μέτρα.

Μέσα στις αποθέσεις αυτές υπάρχει ένας πτωχός φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας που εκμεταλλεύονται οι κάτοικοι του νησιού για αρδευτικούς σκοπούς. Σύμφωνα με αναλύσεις που έγιναν από το χημείο του Ι.Γ.Μ.Ε., διαπιστώθηκε ότι οι υδροφόροι αυτοί στις παραλιακές ζώνες έχουν υποστεί την επίδραση της θάλασσας και των γυψούχων κοιτασμάτων με αποτέλεσμα τα νερά να είναι εκτός των ανεκτών ορίων ποσιμότητας βάση των Ελληνικών και Διεθνών προτύπων. Από τους πιεζομετρικούς χάρτες προκύπτει ότι η ροή των υπογείων νερών της πεδινής περιοχής έχει διεύθυνση ΒΑκή στην Βορειοανατολική και ΝΑκή στην Νοτιοανατολική περιοχή.

4.5.3. Υδροφορία Πλειστοκαινικών σχηματισμών

Οι σχηματισμοί αυτοί που αποτελούνται από χαλαρά ή συνεκτικά κροκαλοπαγή με αργιλομαργαϊκό συνδετικό υλικό, μάργες και ασβεστοψαμμίτες, εμφανίζουν αυξημένο ενεργό πορώδες κατά θέσεις αλλά δεν εμφανίζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

4.5.4. Υδροφορία Πλειοκαινικών σχηματισμών

Οι Πλειοκαινικοί σχηματισμοί που αναπτύσσονται στην ανατολική παραλιακή περιοχή του νησιού, αποτελούνται από λεπτομερή και αδρομερή ιζήματα και

εμφανίζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον στην περιοχή Κυψέλης, όπου εντοπίζονται ψαμμιτικοί ορίζοντες σε μεγάλη σχετικά έκταση και πάχος.

4.5.5. Μειοκαινικοί σχηματισμοί

Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν πάχος μεγαλύτερο από 800 μέτρα (στοιχεία από Δ.Ε.Π.) και αποτελούνται από λεπτομερή υδατοστεγή ιζήματα και γι' αυτό δεν διαμορφώνονται υδροφόροι ορίζοντες μέσα στην μάζα τους.

Αυτά τα ιζήματα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κίνηση των καρστικών νερών, τα οποία έχουν κυρίως διεύθυνση αποστράγγισης Βορειοδυτική- Νοτιοανατολική.

4.5.6. Υδροφορία καρστικών σχηματισμών

Ο σπουδαιότερος αποδέκτης νερού στο νησί είναι οι ασβεστολιθικοί σχηματισμοί του Κρητιδικού Ηωκαίνου και Ολιγοκαίνου.

Οι Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι αποτελούν το υπόβαθρο του νησιού και πάνω σε αυτούς αναπτύσσονται οι ασβεστόλιθοι του Παλαιογενούς.

Η αντικλινική τεκτονική δομή της ασβεστολιθικής σειράς του Κρητιδικού διαμορφώνει δυο κύριους τομείς υδρομάστευσης, τον δυτικό και τον ανατολικό. Ο δυτικός εκφορτίζεται στην θάλασσα στις δυτικές ακτές του νησιού με μορφή διάσπαρτων παράκτιων και υποθαλάσσιων υφάλμυρων καρστικών πηγών, ενώ στον ανατολικό τομέα τα καρστικά νερά οδηγούνται προς την ενδοχώρα όπου συναντούν τα λεπτομερή υδατοστεγή ιζήματα του Νεογενούς οπότε αλλάζουν διεύθυνση και εκφορτίζονται προς Νότο ή Βορρά, δηλαδή εκεί που απουσιάζουν οι Μάργες του Μειοκαίνου.

Η διακίνηση του ασβεστολιθικού νερού γίνεται μέσω των κατακλάσεων και των καρστικών αγωγών καθώς επίσης και διαμέσου των ρηγμάτων που τέμνουν όλη την ανθρακική σειρά.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα ιζήματα του Κρητιδικού και του Ηωκαίνου οι προνομιακοί αγωγοί κίνησης του νερού πολλές φορές έχουν κλειστεί από υλικά απασβεστώσεως ή από δευτερογενή ασβεστίτη, με αποτέλεσμα την έλλειψη υδροφορίας.

Οι σχηματισμοί του Ολιγοκαίνου δεν παρουσιάζουν μεγάλη περατότητα λόγω περιορισμένων κατακλάσεων.

4.5.7. Τριαδική σειρά Ιονίου ζώνης

Οι σχηματισμοί που απαντούν στο όρος Σκοπός δεν εμφανίζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον λόγω της ακαταλληλότητας του νερού από την υπερβολική συγκέντρωση θεϊκών ιόντων, η οποία προέρχεται από τους γύψους αυτής της περιοχής.

Πηγή: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999.

4.6. Απογραφή Υδροσημείων

Συνολικά απεγράφησαν 65 φρέατα, 19 γεωτρήσεις και 2 πηγές. Τα φρέατα έχουν ανορυχθεί στις αλλουβιακές λεκάνες του νησιού και οι γεωτρήσεις στα ανθρακικά ιζήματα της ζώνης Παξών.

Οι γεωτρήσεις αυτές εκμεταλλεύονται τους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες που διαμορφώνονται στους ασβεστολίθους του Κρητιδικού και Ηωκαίνου και έτσι αντιμετωπίζεται το υδρευτικό πρόβλημα του Συνδέσμου ύδρευσης των κατοίκων του νησιού.

4.6.1. Πηγές

Η κυριότερη καρστική πηγή της Ζακύνθου είναι η παράκτια και υποθαλάσσια πηγή του Κεριού μέσω της οποίας εκφορτίζονται τα υπόγεια νερά των Κρητιδικών και Ηωκαινικών ασβεστολίθων της ζώνης Παξών.

Ακόμα, σε όλα σχεδόν τα Δυτικά παράλια του νησιού υπάρχουν υποθαλάσσιες διάσπαρτες εκφορτίσεις του καρστικού συστήματος των Κρητιδικών ασβεστολίθων, οι οποίες όμως δεν μπορούν να αξιοποιηθούν.

Οι πηγές του Κεριοῦ με δυο αναβλύσεις δημιουργούν μια μικρή λίμνη που έχει τρεις εξόδους προς την θάλασσα.

Αθροιστικά η παροχή τους είναι η εξής:

Ημερομηνία	Παροχή (m ³ /h)
12/10/96	161
6/4/97	113
5/10/97	140
18/4/98	258
10/10/98	145
13/4/99	200
5/10/99	107

Επί του προκειμένου θα πρέπει να αναφερθεί ότι η παροχή των πηγών είναι πολύ μεγαλύτερη της μετρηθείσης και εκτιμάται ότι είναι της τάξεως των 400 m³/h και εκφορτίζεται υποθαλάσσια.

Οι πηγές αυτές είναι ανεκμετάλλευτες επειδή η ποιότητα του νερού είναι υποβαθμισμένη (Cl⁻ >1000 ppm) λόγω θαλάσσιας προσβολής.

Πηγή: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999.

4.7. Υδροχημεία

4.7.1. Γενικά

Τα προς εκμετάλλευση υπόγεια ή επιφανειακά νερά πρέπει να παρουσιάζουν ορισμένες ιδιότητες αναλόγως του σκοπού που πρόκειται να εξυπηρετήσουν. Έτσι, ανάλογα με τις ιδιότητες που έχουν χαρακτηρίζονται ως κατάλληλα ή ακατάλληλα για μια ορισμένη χρήση. Είναι δυνατόν όμως νερά ακατάλληλα για μια χρήση να

μετατραπούν σε κατάλληλα με σχετική επεξεργασία. Αυτή η επεξεργασία θα κριθεί αν είναι οικονομικά συμφέρουσα ή όχι ανάλογα με τις ανάγκες της περιοχής σε νερό και τις δυνατότητες κάλυψης των αναγκών αυτών.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του υπογείου νερού είναι επιφανειακής προέλευσης και λόγω της επαφής του επί μακρό χρονικό διάστημα με διάφορα ορυκτά και πετρώματα εμπλουτίζεται με διάφορα ιόντα.

Σε μεγάλο βαθμό η περιεκτικότητα του νερού σε ορισμένα ιόντα μπορεί να αποτελεί απαγορευτικό παράγοντα για την χρησιμοποίησή του προς ύδρευση – άρδευση και λοιπές χρήσεις.

Πηγή: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

5.1. Τι είναι Μοντέλο

Το μοντέλο είναι μια κατασκευή, η οποία αντιπροσωπεύει μια προσέγγιση της κατάστασης του πεδίου.

Τα φυσικά μοντέλα αντιπροσωπεύουν την ροή υπογείου νερού απ' ευθείας. Ένα μαθηματικό μοντέλο αντιπροσωπεύει τη ροή υπογείου νερού εμμέσως, από την επικρατούσα εξίσωση με σκοπό να εκπροσωπήσει τις φυσικές μεθόδους που κυριαρχούν στο σύστημα μαζί με τις εξισώσεις που περιγράφουν υδραυλικά ύψη ή ροές διαμέσου των απαγορεύσεων του μοντέλου. Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να λυθούν αναλυτικά ή με αριθμητικά. Όποιος τρόπος και να επιλεγθεί, μπορεί να χρειαστεί υπολογιστής. Γενικά, ισχύει ότι όσο ευκολότερες εξισώσεις χρησιμοποιηθούν για τη λύση του μοντέλου, τόσο πιο περίπλοκο είναι το μοντέλο.

Υπάρχουν δυο απόψεις για τα μαθηματικά μοντέλα:

A) Μοντέλα που δεν αξίζουν πολλά επειδή απαιτούν πολλές πληροφορίες και γι' αυτό είναι ακριβά για να συναρμολογηθούν και να τρέξουν. Επιπλέον, ποτέ δεν αποδεικνύεται ότι είναι σωστά και πάσχουν από έλλειψη επιστημονικής αβεβαιότητας.

B) Μοντέλα που είναι ουσιώδη στην παρουσίαση πολύπλοκων αναλύσεων και στη δημιουργία ανεπίσημων προβλέψεων.

Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ερμηνευτική διάθεση για να αποκτήσουν δραστητικότητα σε ελεγχόμενες παραμέτρους σε ειδική τοποθέτηση ή σαν δομή για συναρμολόγηση και οργάνωση δεδομένων πεδίου, καθώς και φορμαρισμένων ιδεών για τη δυναμική του συστήματος. Επίσης, μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη μεθόδων σε γενικές γεωλογικές τοποθετήσεις.

Ένα εννοιολογικό μοντέλο είναι η εικονική απεικόνιση του συστήματος ροής υπογείου νερού. Σκοπός είναι η απλοποίηση του προβλήματος του πεδίου. Η

οργάνωση του συστήματος είναι η ανάλυση να είναι πιο διεξοδική. Ακόμα, πολύ σημαντικά είναι τα υδρολογικά και γεωλογικά δεδομένα. Για την ανάλυση, θα πρέπει να έχουμε υδρολογικές πληροφορίες, όπως υγροποίηση και εξάτμιση καθώς και γεωχημικές πληροφορίες.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.2. Πρωτόκολλο του Μοντέλου

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου καλό θα ήταν να ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- 1) Διευκρίνιση του σκοπού, για τον οποίο γίνεται το μοντέλο.
- 2) Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος (να δίνονται πληροφορίες για την ισορροπία του νερού, υδρολογικοί-υδροστατικοί παράμετροι, απαγορεύσεις του συστήματος κ.α.).
- 3) Επιλογή των κύριων εξισώσεων και κώδικα του υπολογιστή (ένας αλγόριθμος που να λύνει μαθηματικά μοντέλα). Ακόμα, να γίνεται επαλήθευση του κώδικα για σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- 4) Σχεδιασμός του μοντέλου. Σε αυτό το βήμα συμπεριλαμβάνεται ο σχεδιασμός του πλέγματος. Επιλέγονται τα χρονικά βήματα, θέτονται απαγορεύσεις, αρχικές συνθήκες, παράμετροι του υδροφόρου ορίζονται και υδρολογικές πιέσεις.
- 5) Βαθμονόμηση. Γίνεται με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους κι έχει ως σκοπό να αποδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει μετρήσεις πεδίου και ροής.
- 6) Βαθμονόμηση ανάλυσης ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται με σκοπό τον καθορισμό των επιδράσεων των αβεβαιοτήτων που έχει η βαθμονόμηση του μοντέλου.
- 7) Επαλήθευση του μοντέλου, η οποία γίνεται με σκοπό την απόκτηση μεγαλύτερης σιγουριάς.
- 8) Πρόβλεψη. Υπολογισμός των παραμέτρων και των πιέσεων` που θα υπάρξουν στο μέλλον.

- 9) Πρόβλεψη ανάλυσης ευαισθησίας.
- 10) Παρουσίαση των σχεδίων του μοντέλου και των αποτελεσμάτων.
- 11) Μετ' έπειτα έλεγχος. Γίνεται μερικά χρόνια αργότερα, αφού έχει ολοκληρωθεί το μοντέλο μελέτης. Δημιουργείται νέο πεδίο δεδομένων για να διαπιστωθεί ότι οι μελλοντικές προβλέψεις ήταν σωστές.
- 12) Επανασχεδιασμός μοντέλου.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.3. Απόψεις και θεμελιώδης εξίσωσης συστημάτων υπογείων νερών

Σύμφωνα με τους Mary P.Anderson και William W.Woessner (1992), τα συστήματα υπόγειας ροής προσεγγίζονται από δυο σκοπιές, από άποψη του υδροφορέα και από άποψη συστήματος ροής.

Η άποψη του υδροφόρου ορίζοντα βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και ελεύθερου υδροφόρου.

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι η υπόγεια ροή διαμέσου των υδροφορέων είναι οριζόντια ενώ διαμέσου των αδιαπέρατων στρωμάτων είναι κάθετη.

Για περιορισμένους υδροφορείς ισχύει η βασική μαθηματική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_y \frac{\partial h}{\partial y}) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (5.1)$$

Όπου $L = -K_z' \frac{h_{\pi\eta\gamma\varsigma} - h}{b'}$ και οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέλος αφορούν την οριζόντια ροή διαμέσου αυτού.

Τα σύμβολα της εξίσωσης ερμηνεύονται ως εξής:

h: το υδραυλικό ύψος,

T_x, T_y : οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας

στους άξονες x και y αντίστοιχα,

S: ο συντελεστής αποθηκευτικότητας,

L: η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος,

R: γενικός όρος πηγής/δεξαμενής, ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού,

b' : το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος,

$h_{πηγής}$: το υψόμετρο της πηγής,

K'_z : η υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος.

Η εφαρμογή της εξίσωσης (5.1) σε ελεύθερο υδροφορέα ακολουθεί τις παραδοχές του Dupuit, σύμφωνα με τις οποίες οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες, οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες και η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίδια με την κλίση της επιφάνειας.

Η άποψη του συστήματος ροής υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη για περιορισμένους κι ελεύθερους υδροφορείς και στα αδιαπέρατα στρώματα, για τα οποία και χαράζονται οι ισοδυναμικές γραμμές ενώ η ροή μπορεί να θεωρηθεί δισδιάστατη ή τρισδιάστατη.

Η κύρια εξίσωση είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (5.2)$$

Όπου:

K_x, K_y, K_z : τα στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας

κατά τις διευθύνσεις x, y, z αντίστοιχα,

S_s : η ειδική αποθηκευτικότητα,

R^* : γενικός όρος πηγής/δεξαμενής, ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού.

Για εκροή, ισχύει ότι: $R^* = -W$

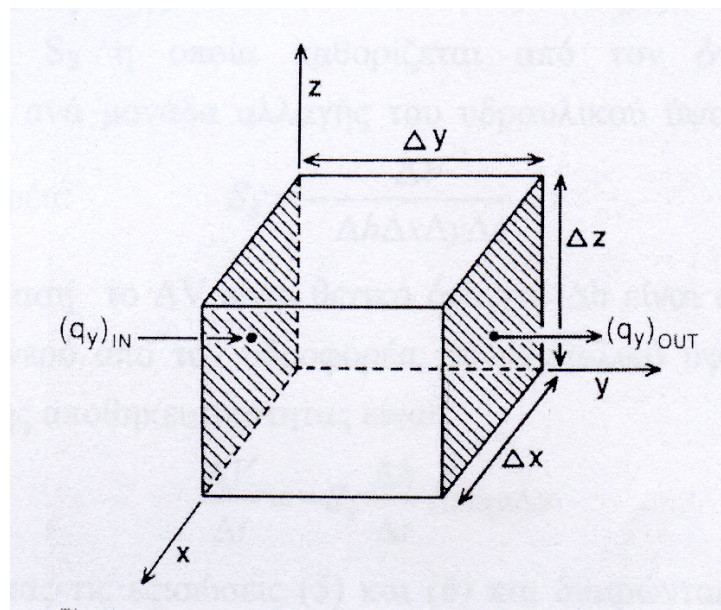
Η εξίσωση (5.2) προκύπτει από τον συνδυασμό ισοζυγίου μάζας του νερού και τον νόμο του Darcy.

Η εξίσωση ισορροπίας του νερού σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Μάζας είναι η εξής:

$$\text{Εκροές} - \text{Εισροές} = \text{Μεταβολή της Αποθηκευτικότητας} \quad (5.3)$$

Έστω ότι ο παρακάτω κύβος είναι ένας αντιπροσωπευτικός κύβος πορώδους υλικού, μέσα από τον οποίο μπορούμε να δούμε τις μεταβολές που συμβαίνουν.

Αυτός ο κύβος πορώδους υλικού είναι αρκετά μεγάλος ώστε να θεωρείται αντιπροσωπευτικός του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρός ώστε η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε αυτόν να είναι σχετικά μικρή.



Σχήμα 5.1 :Αντιπροσωπευτικός Στοιχειώδης Όγκος.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

Ο όγκος του κύβου ισούται με $V=\Delta_x\Delta_y\Delta_z$, ενώ ο ρυθμός ροής διαμέσου του όγκου εκφράζεται με το διάνυσμα q , για το οποίο ισχύει:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (5.4)$$

όπου i_x, i_y, i_z τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y και z αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι πραγματοποιείται ροή κατά μήκος του y -άξονα, η επιφάνεια διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή είναι η $(\Delta_x\Delta_z)$. Η εισροή ισούται με $(q_y)_{\text{εισ}}$ και η εκροή με $(q_y)_{\text{εξ}}$. Οπότε, η διαφορά του ογκομετρικού ρυθμού εκροής μείον του ογκομετρικού ρυθμού εισροής κατά μήκος του y - άξονα είναι:

$$[(q_y)_{\text{εξ}} - (q_y)_{\text{εισ}}] = \Delta_x\Delta_z \quad (5.5)$$

Δηλαδή, η μεταβολή του ρυθμού ροής διαμέσου του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδη όγκου κατά μήκος του y - άξονα ισούται με:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta_x\Delta_y\Delta_z)$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι μεταβολές ρυθμού ροής κατά μήκος του x - άξονα και z - άξονα.

Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής διαμέσου του όγκου ισούται με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας κι εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta_x\Delta_y\Delta_z = \text{Μεταβολή της Αποθηκευτικότητας}$$

Η ειδική αποθηκευτικότητα (S_s) εκφράζει τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και ορίζεται ως ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μοναδιαία μεταβολή υδραυλικού ύψους και ανά μοναδιαίο όγκο υδροφορέα.

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

Ο νόμος του Darcy για τις τρεις διευθύνσεις είναι:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Όπου:

q: η ροή,

K: η σταθερά υδραυλικής αγωγιμότητας και

ο λόγος $\frac{\partial h}{\partial x}$ είναι η μεταβολή της υδραυλικής κλίσης κατά την διεύθυνση x.

Στις εξισώσεις (5.1) και (5.2) θεωρήθηκε ότι οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας και κατά συνέπεια της μεταβιβασιμότητας είναι παράλληλες με τους άξονες x, y και z. Σε περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό λόγω της γεωλογίας της περιοχής, τότε το διάνυσμα των υδραυλικών αγωγιμοτήτων γράφεται ως εξής:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.4. Εννοιολογικό μοντέλο και Σχεδιασμός πλέγματος

5.4.1. Τύποι μοντέλων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να διαχωριστεί η ροή των υπογείων υδάτων. Μπορεί τα μοντέλα να είναι σε σταθερές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες, περιορισμένα ή μη, μονοδιάστατα, δισδιάστατα ή τρισδιάστατα.

Για τα δισδιάστατα μοντέλα υπάρχουν τέσσερις τύποι υδροφόρων:

Περιορισμένοι, λιμνάζων περιορισμένοι, μη περιορισμένοι και ανανεμιγμένοι υδροφόροι ορίζοντες, οι οποίοι περιέχουν και τους τρεις παραπάνω τύπους.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.4.2. Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί γραφική αναπαράσταση του συστήματος υπόγειας ροής που μελετάμε. Συνήθως εμφανίζεται με τη μορφή διατομής ή διαγράμματος με κουτιά και αυτό είναι που καθορίζει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και τον σχεδιασμό του πλέγματος.

Για τη κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων.

Οι υδροστρωματογραφικές μονάδες του μοντέλου προκύπτουν συνδυάζοντας στοιχεία που σχετίζονται με τη γεωλογία και υδρογεωλογία.

2. Κατάστρωση υδατικού ισοζυγίου.

Το υδατικό ισοζύγιο περιλαμβάνει τις πηγές νερού, τα σημεία εξόδου, τη διεύθυνση του νερού που αναμένεται να έχει, δείχνει το μέγεθος των εισροών και εκροών και τις αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του συστήματος. Κατά τη βαθμονόμηση, το ισοζύγιο που προκύπτει από τα δεδομένα πεδίου συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από το μοντέλο.

3. Καθορισμός συστήματος ροής.

Ο καθορισμός της κίνησης των υπογείων υδάτων εντός του συστήματος γίνεται με χρήση υδρολογικών και γεωχημικών στοιχείων, όπως συγκεντρώσεις κατιόντων, ανιόντων, θερμοκρασίας και pH.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.5. Τύποι πλεγμάτων

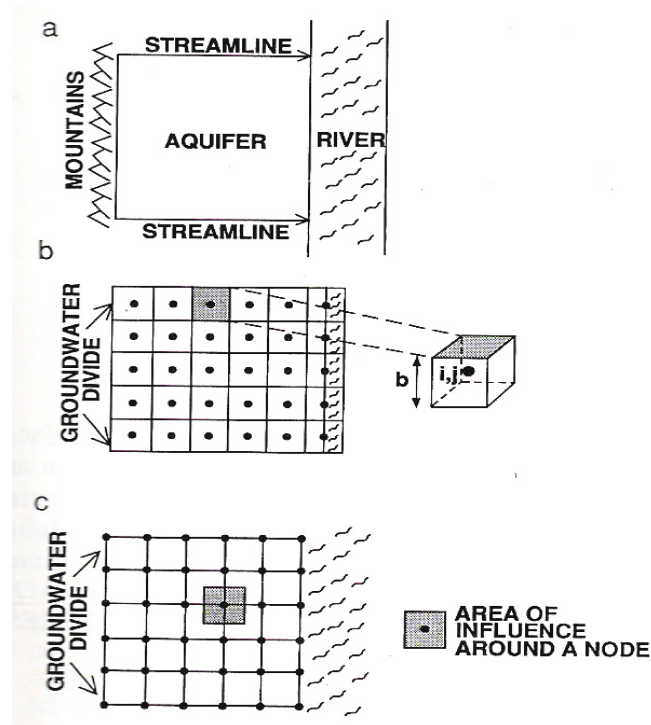
Υπάρχουν δύο είδη τύποι πλεγμάτων: Το παρεμποδισμένο κεντρικό πλέγμα και το δικτυωτό κεντρικό πλέγμα. Η διαφορά μεταξύ αυτών είναι στο τρόπο τον οποίο χειρίζονται τα όρια της ροής. Στο παρεμποδισμένο κεντρικό πλέγμα τα όρια της ροής είναι τοποθετημένα στην άκρη του πλέγματος, ενώ στο δικτυωτό κεντρικό πλέγμα τα όρια συμπίπτουν με το πλέγμα.

Τα πεπερασμένα στοιχεία επιτρέπουν μεγαλύτερη ελαστικότητα στον σχεδιασμό του πλέγματος. Τα δυσδιάστατα στοιχεία μπορεί να είναι τρίγωνα ή τετράπλευρα, ενώ τα τρισδιάστατα είναι τετραεδρικά, εξαεδρικά ή πρισματικά.

5.5.1. Σχεδιασμός πλέγματος

Το πλέγμα των κόμβων μαζί με τα πεπερασμένα στοιχεία ή τα κελιά των πεπερασμένων διαφορών, αποτελεί το πλαίσιο εργασίας του μαθηματικού μοντέλου. Αυτό που καθορίζει τον αριθμό των απαιτούμενων επιπέδων είναι το εννοιολογικό μοντέλο. Το πλέγμα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις κύριες συνιστώσες το διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x, y και z για να αποφευχθεί το φαινόμενο της ανισοτροπίας. Ακόμα, σε μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το πλέγμα θα πρέπει να προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι περισσότεροι κόμβοι να πέφτουν εντός των ορίων της περιοχής μελέτης.

Η απόσταση που επιλέγεται μεταξύ των κόμβων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η αναμενόμενη καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα, η μεταβολή των υδραυλικών υψών, η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών του υδροφορέα, η έκταση της περιοχής που θα μοντελοποιήσουμε και οι αλλαγές σε άντληση, εμπλουτισμό και επαναφόρτιση ή εκκένωση ποταμών.



Σχήμα 5.2.: Δισδιάστατα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.5.2. Πεπερασμένη διαφορά πλεγμάτων

Σε κάθε κόμβο αντιστοιχεί ένας δείκτης (i, j, k) που δηλώνει τη γραμμή, τη στήλη και το επίπεδο στο οποίο αυτός βρίσκεται. Για πεπερασμένη διαφορά μοντέλων υπάρχει κανόνας που δεν επιτρέπει την επέκταση του πλέγματος, αυξάνοντας το διάστημα των κόμβων παραπάνω από μιάμιση φορά του προηγούμενου διαστήματος.

Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων προσφέρουν μεγαλύτερη ευχέρεια στον σχεδιασμό του πλέγματος. Το είδος της παρεμβολικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο καθορίζει αν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό.



Σχήμα 5.3. : Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

Αριθμούνται οι κόμβοι και τα στοιχεία και τοποθετούνται οι συντεταγμένες κάθε κόμβου (x, y, z). Αρχικά, κάθε στοιχείο αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και στη συνέχεια οι εξισώσεις όλων των στοιχείων συνδυάζονται σε μια γενική εξίσωση. Για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών σφαλμάτων πρέπει ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση κάθε στοιχείου να είναι κοντά στην μονάδα και γενικά να μην ξεπερνάει το πέντε.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.5.3. Προσανατολισμός του πλέγματος

Το πλέγμα πρέπει να εμφανιστεί στην επιφάνεια του χάρτη της περιοχής που θα μοντελοποιηθεί. Είναι σημαντικό να προσανατολιστεί το πλέγμα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των κόμβων που πέφτουν έξω από τα όρια της μοντελοποιημένης περιοχής. Οι κόμβοι αυτοί εκτός της περιοχής λέγονται ανενεργοί κόμβοι, ενώ αυτοί εντός των ορίων λέγονται ενεργοί κόμβοι.

Η επιλογή του μεγέθους του χώρου των κόμβων είναι ένα σημαντικό βήμα για το σχεδιασμό του πλέγματος και διαφέρει ανάλογα με τις ιδιότητες του υδροφόρου ορίζοντα. Για παράδειγμα, για κόμβους ποταμών και άντλησης τα διαστήματα του πλέγματος είναι μικρότερα. Η διαδικασία της παρατήρησης συνεχίζεται μέχρι το

πλέγμα να είναι τόσο μικρό ώστε να φαίνεται και η παραμικρή επιθυμητή λεπτομέρεια.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling Academic Press, 1992.

5.6. Χρήσιμα δεδομένα

Τα δεδομένα μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες:

- α) Τα δεδομένα φυσικού σκελετού, όπου διευκρινίζουν τη γεωμετρία του συστήματος συμπεριλαμβάνοντας την αδυναμία και την έκταση κάθε υδροστατικής μονάδας.
- β) Τα υδρογεωλογικά δεδομένα που συμπεριλαμβάνουν πληροφορίες ροής, οι οποίες διαμορφώνουν το εννοιολογικό μοντέλο και χρησιμεύουν στη βαθμονόμησή του. Ακόμα θα πρέπει να γνωρίζονται και οι ταχύτητες των δεδομένων.

Στην προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων απαιτούνται πληροφορίες και για τις τρεις κύριες συνιστώσες του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας K_x , K_y , K_z . Η κάθετη ανισοτροπία μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από τα τεστ άντλησης. Η ανισότροπη αναλογία μπορεί ακόμη να υπολογισθεί κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Ο κάθετος ανισοτροπικός λόγος κυμαίνεται συνήθως από ένα έως χίλια, ενώ ο οριζόντιος είναι τυπικά μικρότερος. Η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα των υδροστατικών μονάδων ελέγχει τη ροή του νερού ανάμεσα στα στρώματα.

Ο Henre συνέστησε την παρακάτω εξίσωση που αποδίδεται στον Theis και διορθώνει την επίδραση της στρωματοποίησης κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων, οι οποίες στο μοντέλο προσομοιώνονται ως οριζόντια στρώματα:

$$\frac{k^x}{k^y} = \frac{R}{1 - (1 - R) \cos^2 A}$$

Όπου:

k^x : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στην x-διεύθυνση,

k^y : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη y-διεύθυνση,

R: ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας στη x-διεύθυνση
προς την υδραυλική αγωγιμότητα στην y-διεύθυνση,

A: η γωνία της κλίσης.

Συνήθως η κάθετη ανισόρροπος είναι άγνωστη και υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης.

Η μεταφορά των δεδομένων του πεδίου στο πλέγμα απαιτεί την συμβατότητά τους με την κλίμακα του μοντέλου και την εκχώρηση των χαρακτηριστικών του υδροφορέα σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του εννοιολογικού μοντέλου. Στο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται η τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο, η οποία αποτελεί και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού πεπερασμένων διαφορών.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

5.7. Οριακές συνθήκες

5.7.1. Τύποι οριακών συνθηκών

Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από τις εξισώσεις του συστήματος ,τις οριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εξισώσεις που καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή ή την παράγωγο αυτής στα όρια της υπό μελέτης περιοχής. Για την κατασκευή ενός μοντέλου πρέπει να γίνει προσεκτικά η επιλογή των σωστών οριακών συνθηκών διότι σε προσομοιώσεις σταθερής ροής τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την μορφή της ροής.

Τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από την φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος.

Άλλα όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρογεωλογικών συνθηκών κι εκφράζονται από τους παρακάτω τύπους μαθηματικών συνθηκών:

Οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους: Συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet), για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.

Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους: Συνθήκες σταθερής ροής (Συνθήκες Neumann), για τις οποίες η παράγωγος της ροής κατά μήκος του ορίου είναι δεδομένη. Μια οριακή συνθήκη μηδενικής ροής δίνεται τοποθετώντας τη σταθερή ροή ίση με το μηδέν.

Οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους: Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος ροής (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου), για τις οποίες η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους.

Η τοποθέτηση μιας οριακής συνθήκης στο πλέγμα εξαρτάται από το αν το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

5.8. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

5.8.1. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών οι ροές κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύουν έναν όγκο ύδατος που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Ο εμπλουτισμός μπορεί να προσομοιώνεται με πηγάδια ή να

καταγράφεται σε κάποιον πίνακα. Όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου, τότε στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις η διαχείριση του εμπλουτισμού γίνεται ευκολότερη. Αυτό συμβαίνει διότι το ανώτερο στρώμα ορίζεται ως μη περιορισμένο και ορίζεται ένας πίνακας με τους ρυθμούς εμπλουτισμού ή άντλησης. Σε περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας περνάει από περισσότερα στρώματα, τότε το πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπισθεί με διαφορετικό τρόπο διότι τα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών δεν επιβεβαιώνουν ότι το ύψος του ύδατος ισούται με το υδραυλικό ύψος λόγω πίεσης συν το υδραυλικό ύψος λόγω θέσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

5.8.2. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων συνήθως επιτρέπουν στον χρήστη να προσδιορίσει μια κατανεμημένη πηγή ως εμπλουτισμού σε ένα στοιχείο ενώ σημειακές πηγές ή καταβόθρες δίνονται σε κάποιο κόμβο. Οι κατανεμημένες πηγές και καταβόθρες αναδιανέμονται σε κόμβους για να επεξεργαστούν από τον κώδικα. Έτσι, ο κώδικας πολλαπλασιάζει τη ροή για κάθε στοιχείο που δίνει ο χρήστης επί την επιφάνεια του στοιχείου και στη συνέχεια γίνεται διανομή του ύδατος αναλογικά σε κάθε κόμβο του στοιχείου.

Πηγή: Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

6.1. Διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων της περιοχής στο μοντέλο

Για την προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, το μοντέλο PTC χρειάζεται κάποια αρχικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης. Εισάγονται πληροφορίες για τον τύπο του υδροφορέα, στοιχεία υδραυλικής αγωγιμότητας και υψομετρικά στοιχεία για την δημιουργία ενός ομοιώματος της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, προστίθενται στοιχεία βροχόπτωσης, οι οριακές και οι αρχικές συνθήκες και ο χρόνος προσομοίωσης (ο οποίος είναι 360 ημέρες) κι έτσι προσομοιώνεται το φυσικό σύστημα.

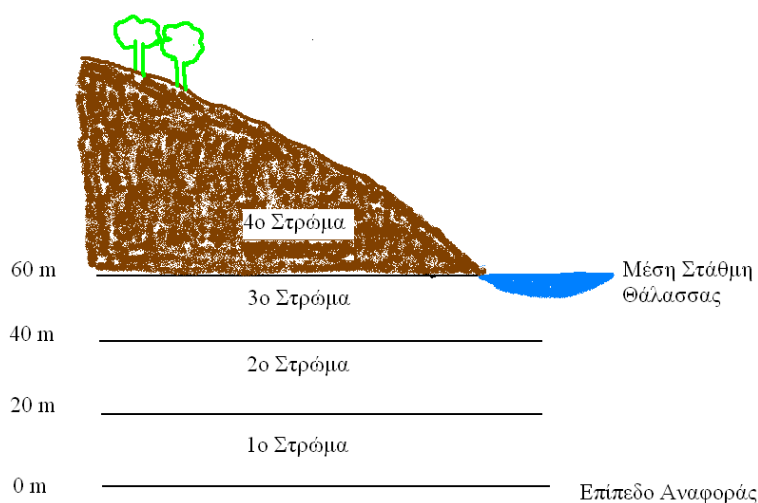
Εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα το μοντέλο υπολογίζει το υδραυλικό ύψος, την ταχύτητα του νερού στη x και y κατεύθυνση καθώς και την συγκέντρωση μιας ουσίας η οποία διακινείται στο υπόγειο νερό.

Στο μοντέλο εισήχθησαν τρεις χάρτες της περιοχής μελέτης, δηλαδή του Νότιου-ΝοτιοΑνατολικού τμήματος της νήσου Ζακύνθου, οι οποίοι προσαρμόστηκαν ώστε να αλληλεπικαλύπτονται και να έχουν την ίδια κλίμακα. Οι χάρτες αυτοί περιέχουν στοιχεία για το ανάγλυφο της περιοχής (Τοπογραφικός χάρτης Ζακύνθου), για την γεωλογία (Γεωλογικός χάρτης Ζακύνθου) και για τα πηγάδια της περιοχής (Χάρτης Απογραφής Υδροσημείων της Ζακύνθου). Μελετήσαμε το νησί από την μέση και κάτω διότι μόνο στην Νότιο - ΝοτιοΑνατολική πλευρά υπάρχουν γεωτρήσεις, πηγάδια και πηγές που μας ενδιαφέρουν σύμφωνα με τα δεδομένα και τις πληροφορίες που μας δόθηκαν.

Αφού εισαχθούν οι χάρτες στο μοντέλο και αποκτήσουν την ίδια κλίμακα, στη συνέχεια σχεδιάζεται το περίγραμμα της περιοχής μελέτης και καθορίζεται η πυκνότητα των τριγώνων του δικτύου. Για να δώσει το μοντέλο αποτελέσματα, ο αριθμός των τριγώνων δεν πρέπει να ξεπερνά το 2000, ο οποίος καθορίζεται από την συγκεκριμένη φοιτητική έκδοση του Argus One.

Ως μονάδα μήκους ορίζεται το μέτρο και ως μονάδα χρόνου η ημέρα.

Από τον χάρτη με τις ισοϋψείς δόθηκαν στο μοντέλο τα υψομετρικά στοιχεία της περιοχής και δημιουργήθηκε με παρεμβολή το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης. Στα υψόμετρα που δίνονται από τον Τοπογραφικό Χάρτη Ζακύνθου προστέθηκαν 60 μέτρα αφού το επίπεδο αναφοράς βρίσκεται 60 μέτρα κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας.



Σχήμα 6.1.: Διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε στρώματα.

Η περιοχή μελέτης διαχωρίζεται σε τρία στρώματα, ξεκινώντας την αρίθμηση από κάτω (από τον πυθμένα) προς τα επάνω, ώστε να υφίσταται κάποιος διαχωρισμός ανάμεσα στα βαθιά και τα ρηχά πηγάδια. Το πρώτο στρώμα βρίσκεται από το επίπεδο αναφοράς (δηλαδή από τα 0 m) μέχρι τα 20 m, το δεύτερο στρώμα από τα 20 m μέχρι τα 40 m και το τρίτο στρώμα από τα 40 m μέχρι τα 60 m. Από τα 60 m και πάνω, δηλαδή από τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας και πάνω, έχουμε το τέταρτο στρώμα.

Η κάθε γεώτρηση τραβάει από διαφορετικό στρώμα και αυτό βρίσκεται αν αφαιρέσουμε από το βάθος της γεώτρησης το υψόμετρο. Έτσι, βλέπουμε σε ποιο από τα παραπάνω στρώματα ανήκει.

Από τον Γεωλογικό Χάρτη Ζακύνθου μπορούμε να δούμε τα διάφορα πετρώματα και ρήγματα της περιοχής και να ορίσουμε τις υδραυλικές αγωγιμότητες του κάθε πετρώματος.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα πετρώματα της περιοχής μελέτης (δηλαδή της Νότια- Νοτιοανατολικής περιοχής της Ζακύνθου) και οι τυπικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας αυτών.

Η υδραυλική αγωγιμότητα των πετρωμάτων κατά την x και y διεύθυνση είναι αυτή που αναγράφεται στον πίνακα ,ενώ κατά την z διεύθυνση η υδραυλική αγωγιμότητα ισούται με το 10% των αντίστοιχων αγωγιμοτήτων της x και y διεύθυνσης. Ακόμα, θεωρούμε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα των πετρωμάτων είναι ίδια και στα τέσσερα στρώματα.

Είδος πετρώματος	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/day)
Ζώνη Παξών - Παλαιογενές - Ολιγόκαινο, Μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με ενστρώσεις μαργών	4,32
Ζώνη Παξών-Ανώτερο Κρητιδικό Ασβεστόλιθοι διαρρηγμένοι και αποκαρστωμένοι	691,2
Ζώνη Παξών - Παλαιογενές - Ηώκαινο Ασβεστόλιθοι διαρρηγμένοι και αποκαρστωμένοι	40,608
Ζώνη Παξών - Νεογενές - Μειόκαινο, Ιλυόλιθος, μάργες, ψαμμίτες με ενστρώσεις κρυσταλλικής γύψου	4,32
Τεταρτογενές - Ολόκαινο, Προσχώσεις, πλευρικά κορήματα, σύγχρονες παράκτιες αποθέσεις, ελουβιακοί σχηματισμοί και ερυθρογαίες μέσα σε δολίνες και πόλγες	864
Νεογενές - Πλειόκαινο, Σύστημα ψαμμιτών με αργιλομαργαϊκές παρεμβολές και μαργών με μαργαϊκούς ψαμμίτες	43,2
Τεταρτογενές - Πλειστόκαινο, Παλιές Παράκτιες αποθέσεις αποτελούμενες από μαργαϊκά κροκαλοπαγή, μάργες και ασβεστοψαμμίτες	43,2
Ιόνιος Ζώνη - Τριαδικό, Γύψος και ανυδρίτης που εγκλείουν τεμάχια ασβεστολίθων	43,2

Ιόνιος Ζώνη - Τριαδικό, Ασβεστόλιθοι βιτουμενιούχοι	432
--	-----

Πίνακας 6.1. Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για τα πετρώματα της περιοχής μελέτης. Πηγή: Από Γεωλόγο της περιοχής.

6.2. Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που επιλέξαμε ήταν 1^{ου} και 2^{ου} είδους.

Οριακή συνθήκη πρώτου είδους υπάρχει στην παραλιακή ζώνη, όπου το υδραυλικό ύψος είναι 60 m. Οριακή συνθήκη δεύτερου είδους υπάρχει στα σημεία που υπάρχουν διαπερατά πετρώματα στα όρια της περιοχής μελέτης. Γίνεται παραδοχή ότι από τα σημεία αυτά εισρέει στην περιοχή σταθερός όγκος νερού ανά μονάδα χρόνου.

Η προσομοίωση γίνεται για δυο χρονικές περιόδους, Χειμώνα- Καλοκαίρι. Το δεξί όριο της περιοχής χωρίστηκε σε δυο τμήματα. Στο πάνω τμήμα θεωρήσαμε ότι εισέρχεται σταθερός όγκος νερού 60 m³/day το καλοκαίρι και 65 m³/day τον χειμώνα. Στο κάτω τμήμα θεωρήσαμε ότι εισέρχεται σταθερός όγκος νερού 115 m³/day το καλοκαίρι και 120 m³/day τον χειμώνα.

Οριακή συνθήκη δεύτερου είδους αποτελούν και οι γεωτρήσεις που βρίσκονται μέσα στην περιοχή μελέτης. Οι γεωτρήσεις αυτές αντλούν κατά την καλοκαιρινή περίοδο ,δηλαδή επτά μήνες τον χρόνο, από Απρίλιο μέχρι και Οκτώβρη. Η χειμερινή περίοδος αρχίζει τον Νοέμβριο και τελειώνει τον Μάρτιο, όπου θεωρούμε ότι οι γεωτρήσεις δεν αντλούν αλλά εισέρχεται νερό της βροχής.

Αριθμός Γεώτρησης	Αντλούμενη ποσότητα (m ³ /day)
G1	800
G3	1100
G5	400
G6	800
G9	2000
G10	360
G11	320
G15	1100
G17	1200
G18	400
G19	300
G21	1800
G23	270
G25	1120
G26	450
G27	450
G28	600
G30	640
G32	800

Πίνακας 6.2. Αντλούμενη ποσότητα Γεωτρήσεων.

Πήγη: Σκαγιάς Σ., Μελέτη Διάταξ και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Παράστημα Ι, Απογραφή Σημείων Ύδατος, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999.

Για καλύτερη επεξεργασία του προγράμματος οι γεωτρήσεις G18 και G19 ενώθηκαν σε μια, με όνομα G18 και με αντλούμενη ποσότητα ίση με το άθροισμά τους. Το ίδιο ισχύει και για τις γεωτρήσεις G21, G28 και G9 οι οποίες ενώθηκαν σε μια, με όνομα G21 και με αντλούμενη ποσότητα ίση με το άθροισμά τους. Αυτό έγινε διότι οι

γεωτρήσεις έπεφταν πολύ κοντά η μια στην άλλη, με αποτέλεσμα να αλληλεπικαλύπτονται και να μην γίνονται δεκτές από το πρόγραμμα του Argus One.

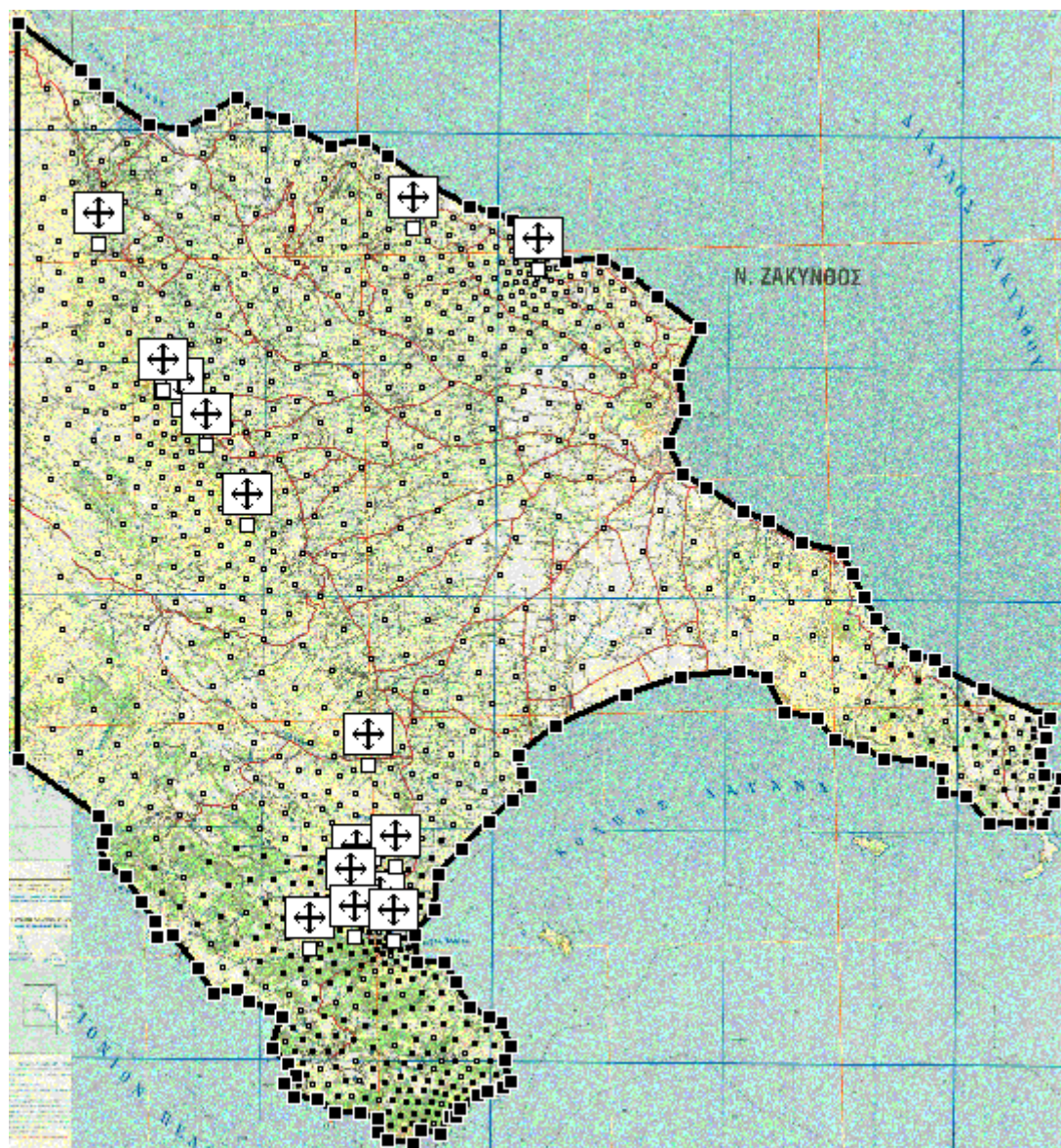
Οι γεωτρήσεις G3, G6, G10, G17 και G30 τραβάνε νερό από το 1^ο στρώμα. Οι γεωτρήσεις, G5, G11, G18, G21, G23, G26, G27 και G32 τραβάνε νερό από το 2^ο στρώμα. Και οι γεωτρήσεις G1, G15 και G25 τραβάνε νερό από το 3^ο στρώμα. Στο 4^ο στρώμα δεν έχουμε γεωτρήσεις.

Ακόμα, υπάρχουν και δυο πηγές με συνεχή ροή Π1 και Π2 με παροχή 2400 m³/day και 800 m³/day αντίστοιχα. Θεωρούμε ότι οι πηγές αυτές τραβάνε από το 1^ο στρώμα.

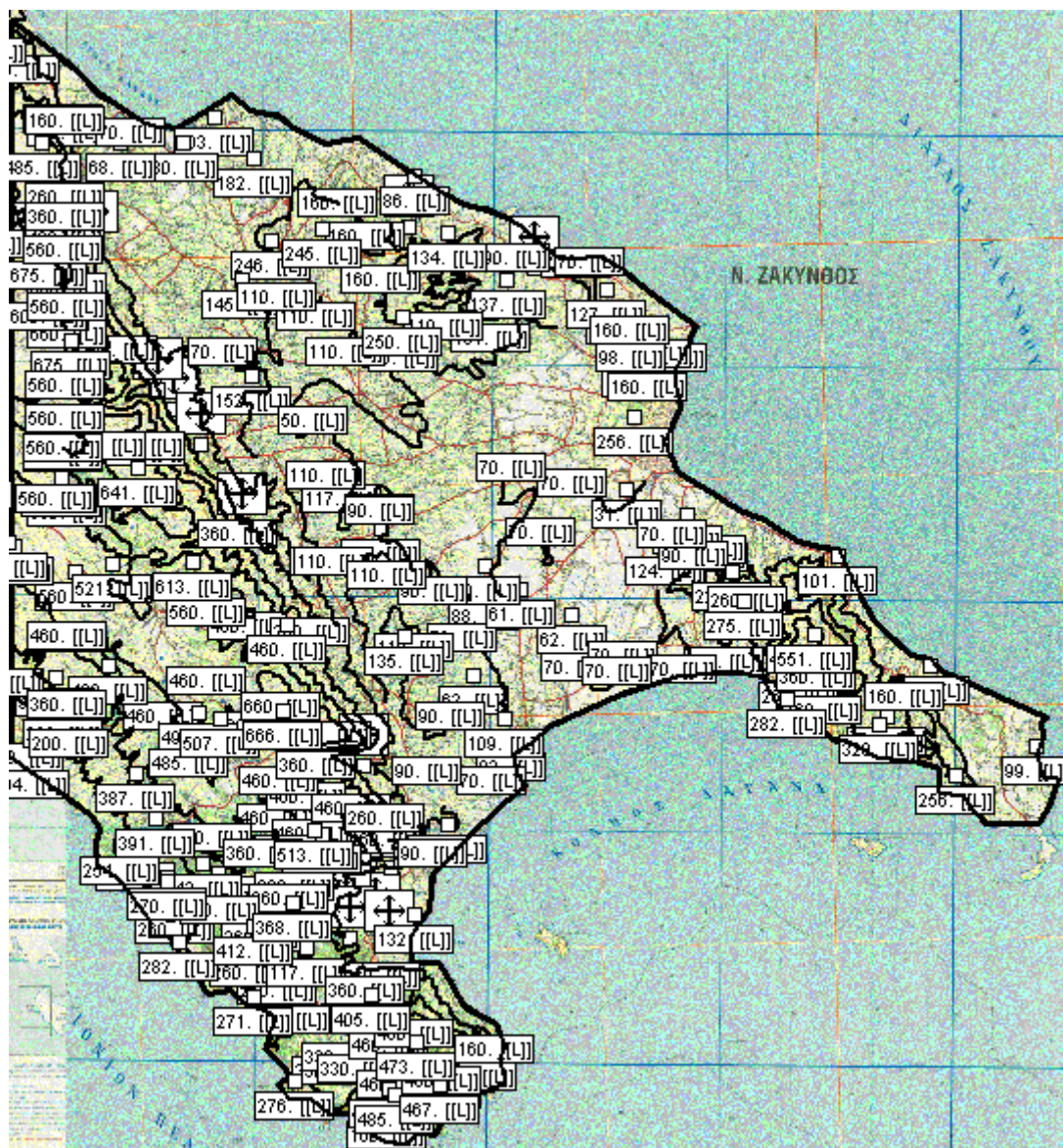
6.3. Βροχόπτωση

Μετεωρολογικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπίου, της Ε.Μ.Υ. και του Υ.Δ.Ε. που λειτούργησαν κατά περιόδους στη Ζάκυνθο και ύστερα από επεξεργασία στοιχείων προέκυψε ότι για περίοδο 65 ετών το μέσο ετήσιο ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ανέρχεται σε 1077 mm.

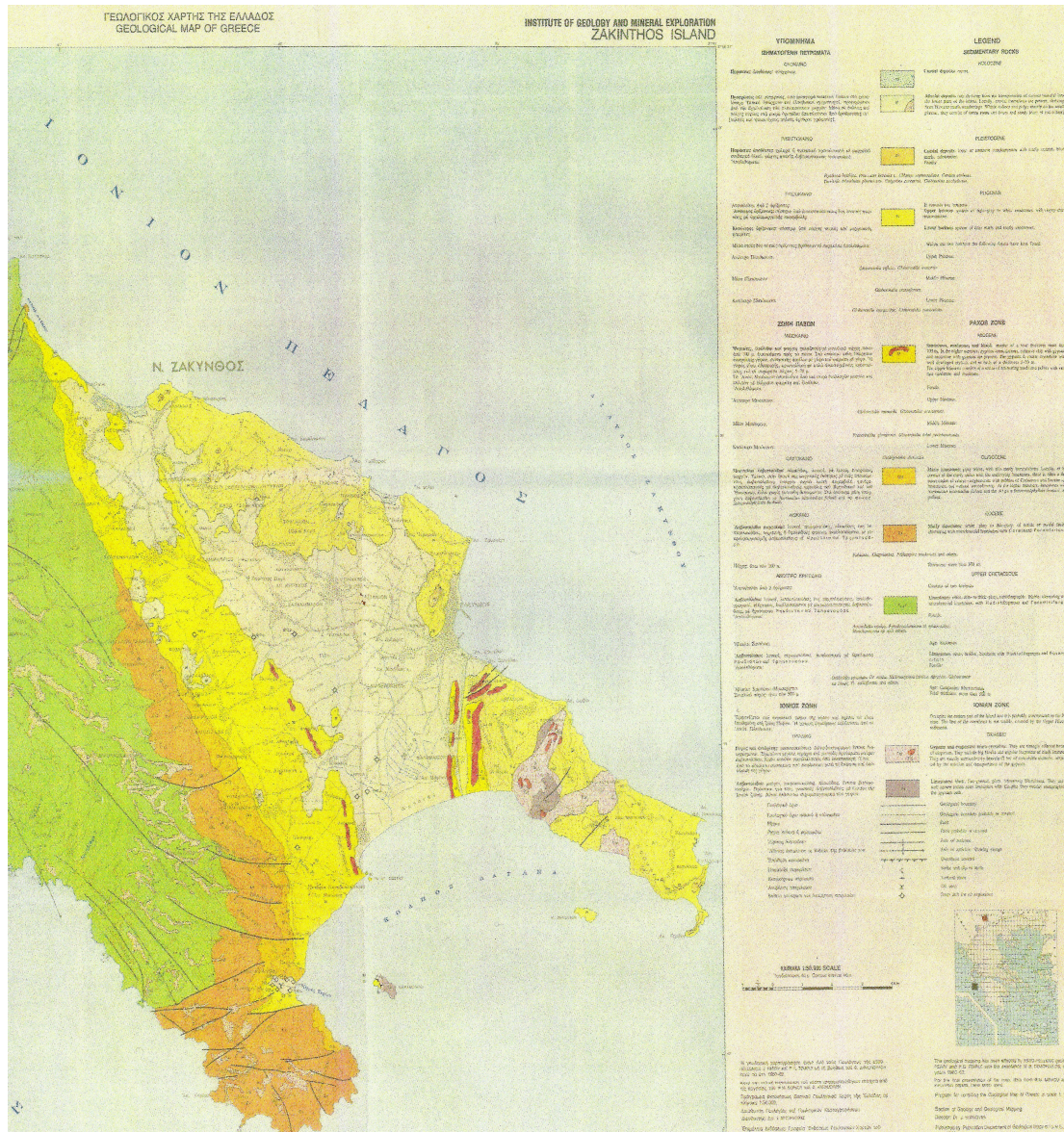
Περίγραμμα της περιοχής μελέτης μαζί με γεωτρήσεις



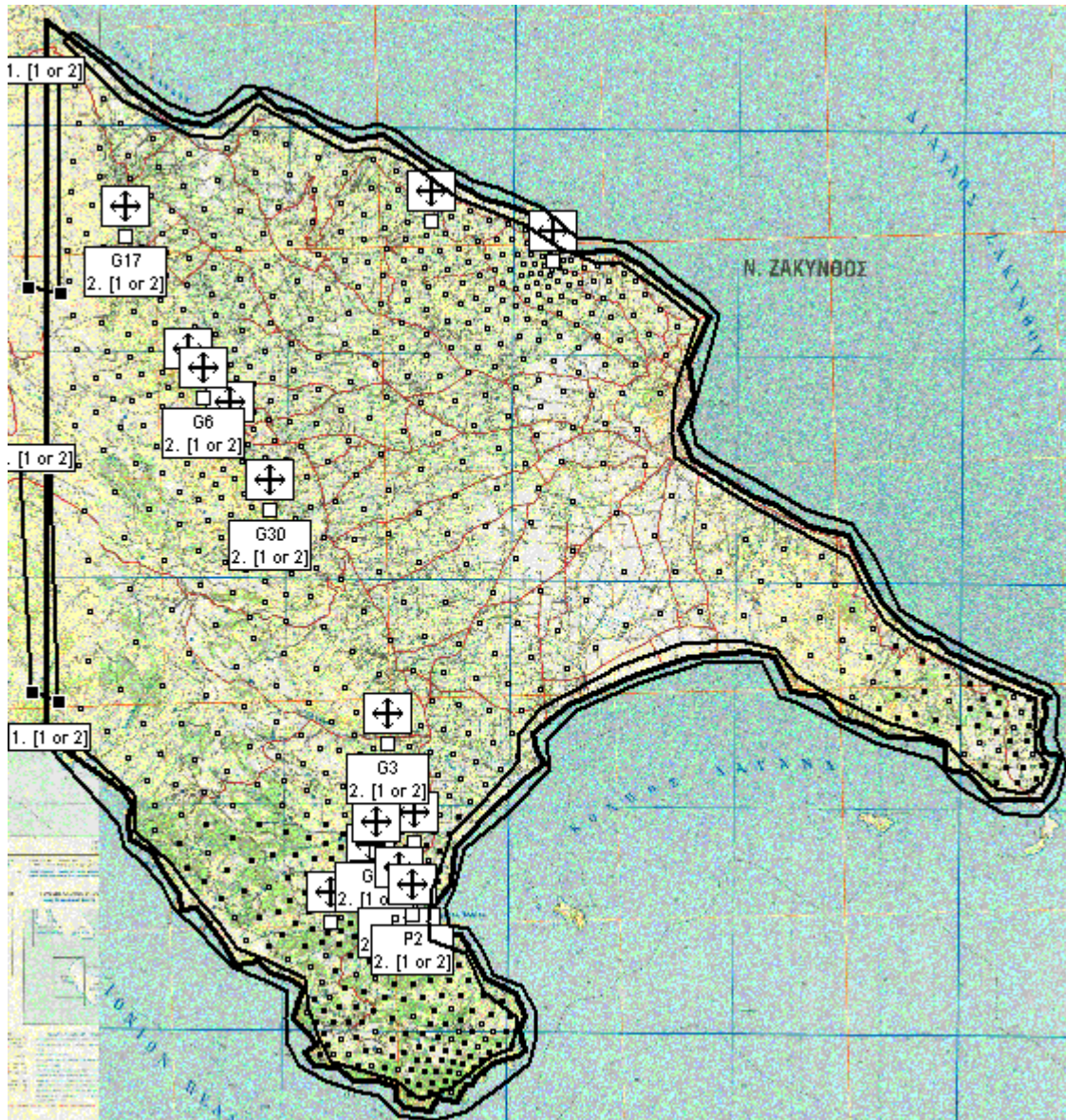
Ισουψείς της περιοχής μελέτης



Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής μελέτης της Ζακύνθου



Οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους στο νερό που εισέρχεται από την Δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης.



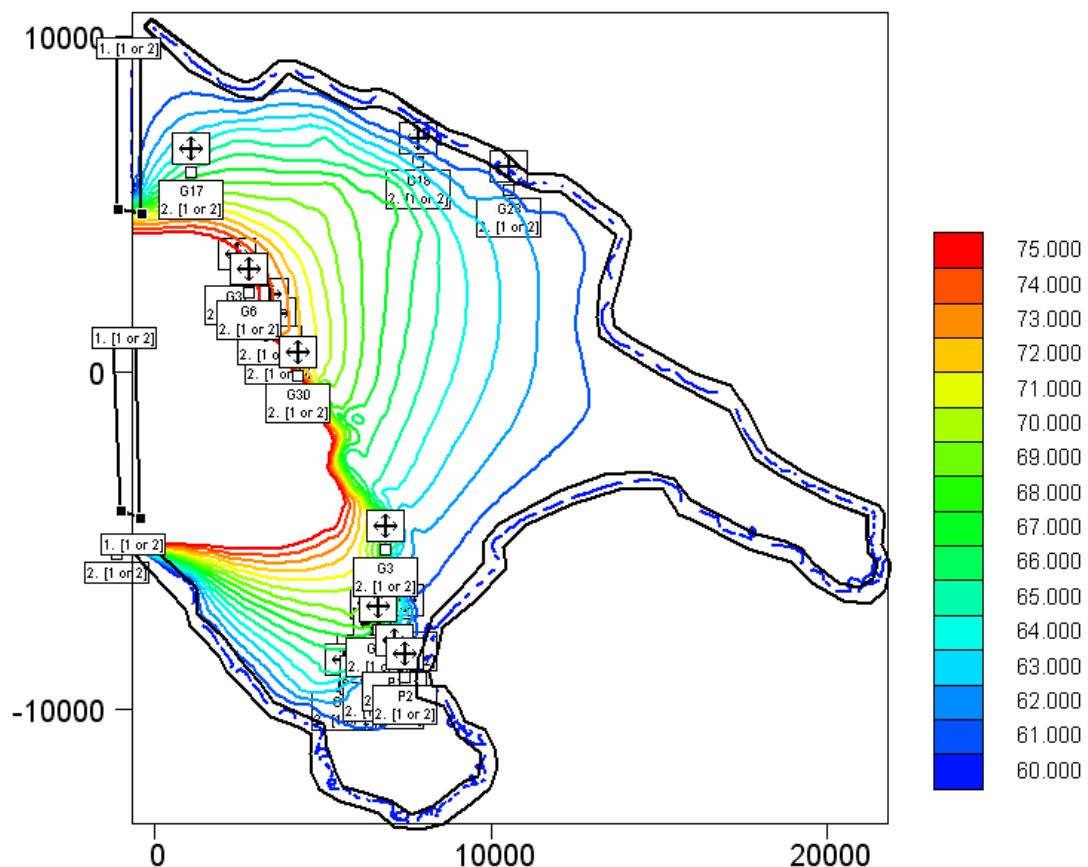
6.4. Βαθμονόμηση του μοντέλου

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις τιμές του υδραυλικού ύψους, οι οποίες δίνονται από αποτελέσματα μετρήσεων του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Δεκέμβριος 1999), με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης φαίνονται στα γραφήματα που ακολουθούν, από τα οποία συμπεραίνουμε ότι υπάρχει καλή προσέγγιση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης με τις πραγματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

7.1. Γραφήματα Υδραυλικών Ύψων και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο υπό κανονικές συνθήκες.

Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου

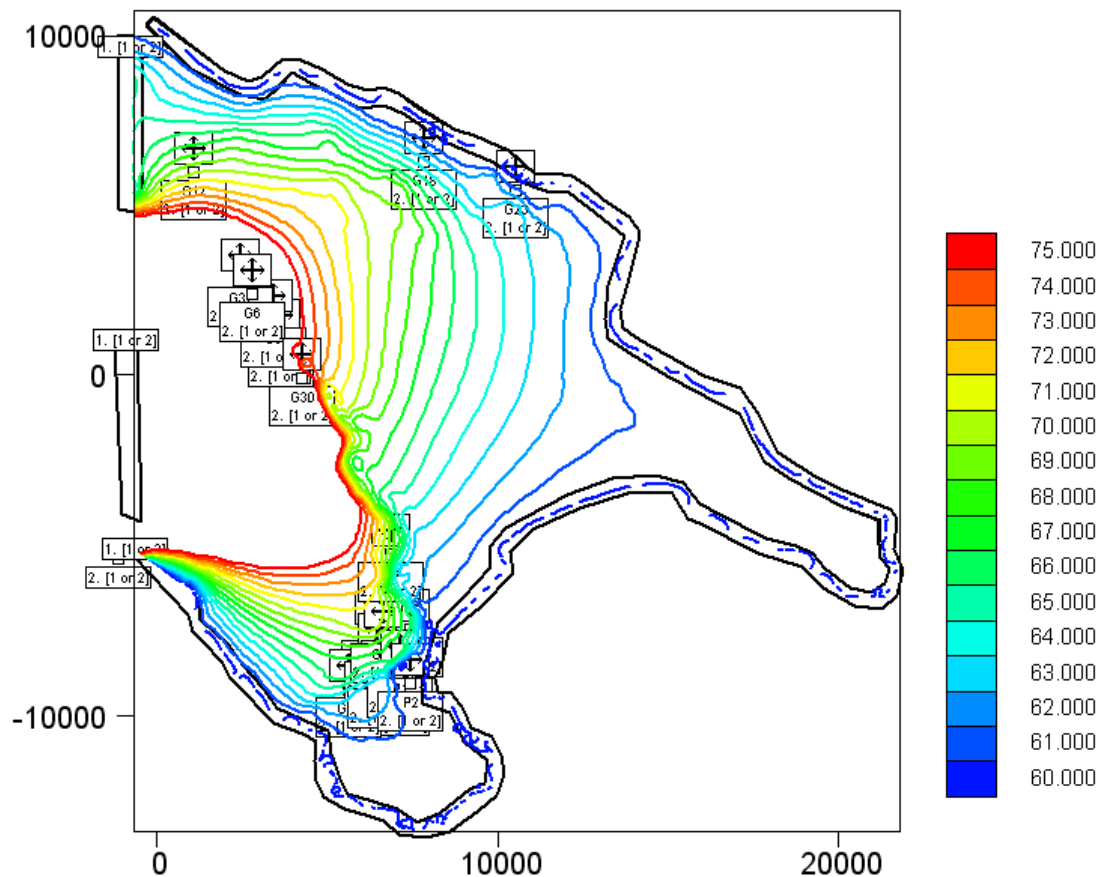


Γράφημα 7.1.: Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου

Από το παραπάνω γράφημα υδραυλικών υψών κατά την Θερινή περίοδο (από Απρίλιο μέχρι και Οκτώβριο), βλέπουμε ότι τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων κυμαίνονται από 60 έως 75 m περίπου. Αν θεωρήσουμε ότι επίπεδο αναφοράς είναι

τα 60 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, αυτό ανάγεται ότι τα υδραυλικά ύψη κυμαίνονται από 0 έως 15 m από το επίπεδο της θάλασσας. Οι γεωτρήσεις που είναι κοντά στα παράλια του νησιού έχουν υδραυλικό ύψος 60 με 65 m περίπου και απεικονίζονται με γραμμές που έχουν αποχρώσεις του μπλε. Όσο προχωράμε στο εσωτερικό της Ζακύνθου τα υδραυλικά ύψη αυξάνονται, εκτός μερικών εξαιρέσεων. Όσο αυξάνεται το υδραυλικό ύψος οι γραμμές που το συμβολίζουν παίρνουν διάφορες αποχρώσεις του πράσινου, του κίτρινου και του κόκκινου όταν φτάσουν τα 75 m.

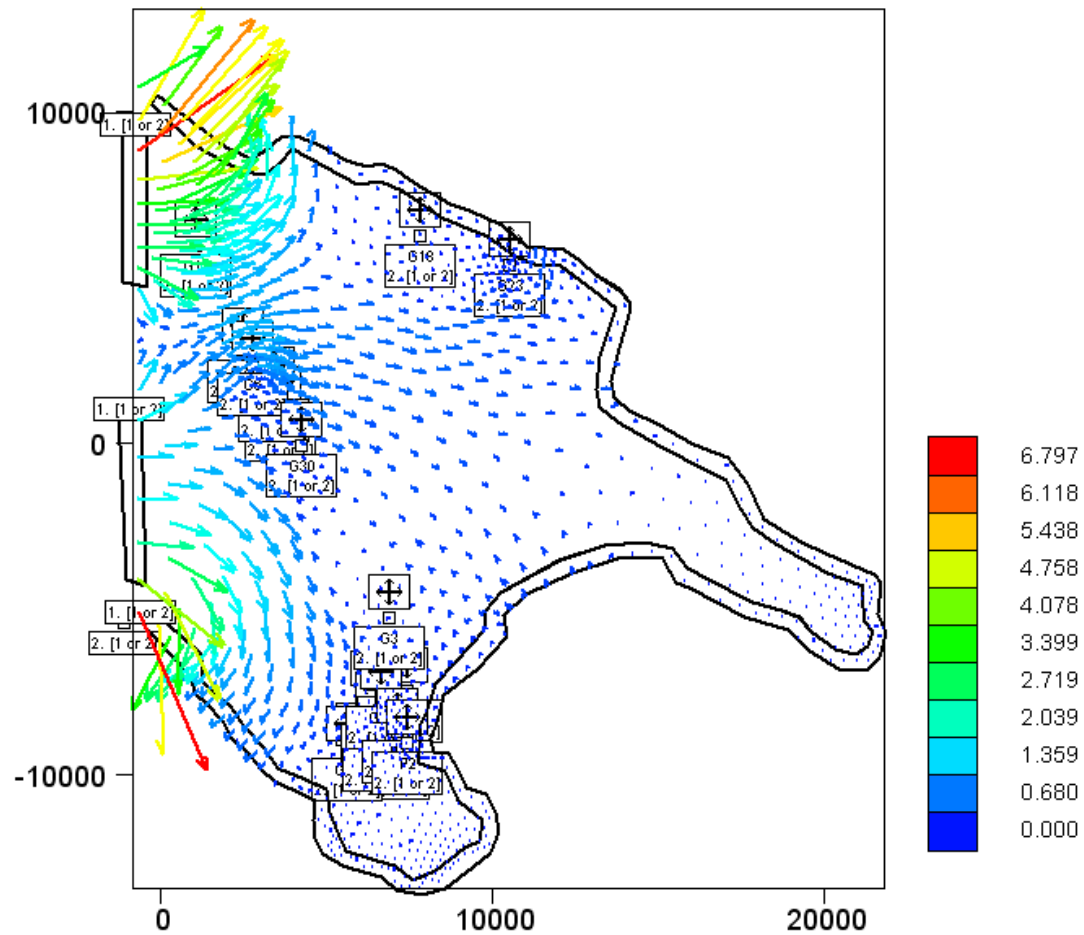
Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου



Γράφημα 7.2.: Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου

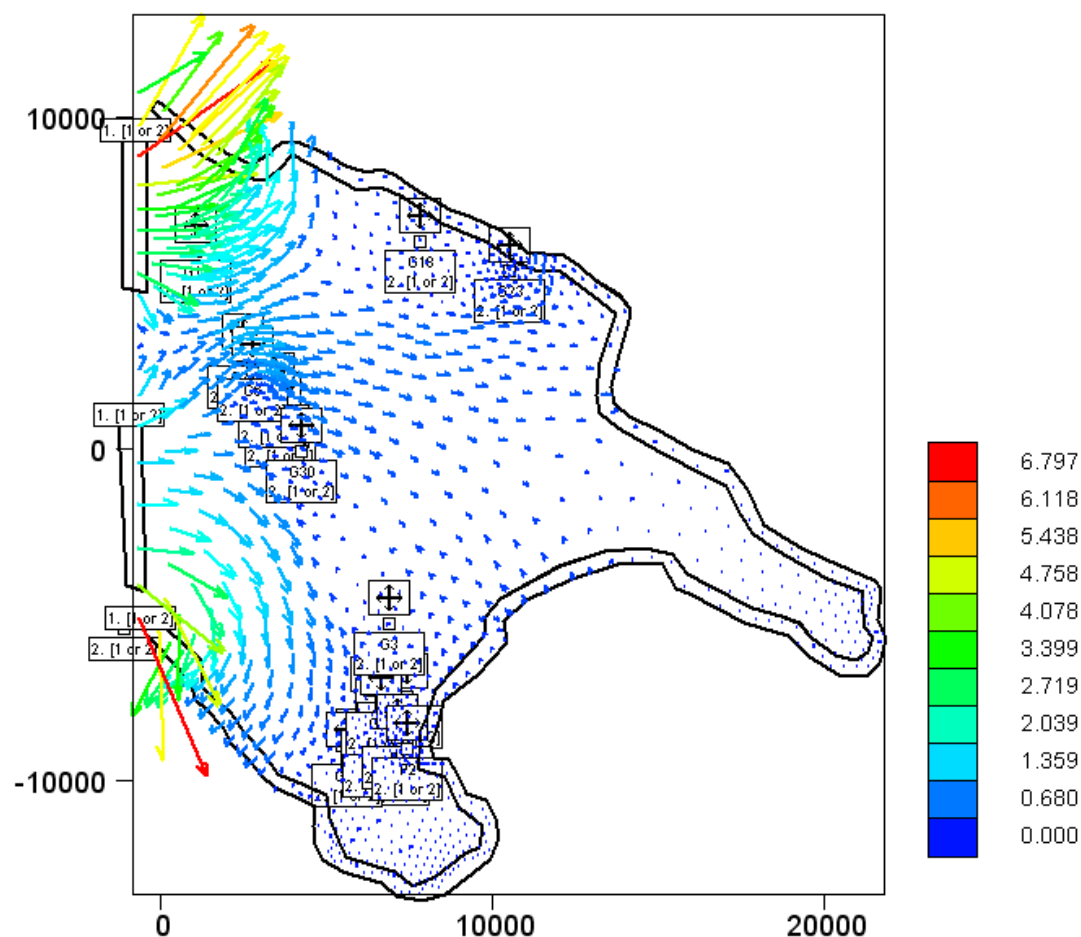
Στα υδραυλικά ύψη της Χειμερινής περιόδου (από Νοέμβριο μέχρι και Μάρτιο) παρατηρείται μια αύξηση περίπου της τάξεως δυο με τριών μέτρων. Αυτό συμβαίνει διότι οι γεωτρήσεις δεν αντλούν αυτή την εποχή και η στάθμη τους αυξάνεται λόγω εισροής νερού από την βροχή.

Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου



Γράφημα 7.3.: Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου

Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου



Γράφημα 7.4.: Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου

Από τα παραπάνω γραφήματα των ταχυτήτων ροής παρατηρούμε ότι έχουμε δυο διαφορετικούς υδροφόρους ορίζοντες. Από τις ταχύτητες, βλέπουμε ότι ο ένας υδροφόρος κατευθύνεται Βόρεια - Βορειοανατολικά και ο άλλος Νότια-Νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης.

Οι ταχύτητες ροής της Θερινής και Χειμερινής περιόδου είναι σχεδόν ίδιες και κυμαίνονται από 0 μέχρι 6,797 m/day. Στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης οι ταχύτητες είναι μικρές, δηλαδή στις αποχρώσεις του μπλε και μόνο στις πάνω και κάτω άκρες αριστερά αυξάνονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

8. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

8.1. Εισαγωγή

Η υφαλμύρινη είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για τις παράκτιες περιοχές σε όλο τον κόσμο. Ακόμα, και μικρές ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των υδροφόρων στρωμάτων.

Σε παράκτιες περιοχές της ηπειρωτικής Ελλάδας έχει βρεθεί ότι η στάθμη στους υπόγειους υδροφορείς μειώνεται κατά πέντε μέτρα ετησίως.

Η υφαλμύρινη παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και περιορισμένους υδροφορείς και μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικούς είτε σε ανθρωπογενείς παράγοντες.

Φυσικοί παράγοντες:

- Κλιματικές αλλαγές
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- Αλάτι
- Νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια

Ανθρωπογενείς παράγοντες:

- Υπεράντληση υδροφορέων
- Λύματα υψηλής περιεκτικότητας σε αλάτι ανθρώπινης προέλευσης

Η εκμετάλλευση και διαχείριση των υπογείων παράκτιων υδροφορέων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας σε αυτούς. Εισρέει θαλάσσιο νερό στο σύστημα των εν λόγω υδροφορέων και επειδή το γλυκό νερό είναι ελαφρύτερο από το αλμυρό επιπλέει πάνω σε αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υφαλμύρινη των υδροφορέων. Όταν σε έναν υδροφόρο εισχωρήσει αλμυρό νερό, μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσκολεύοντας την

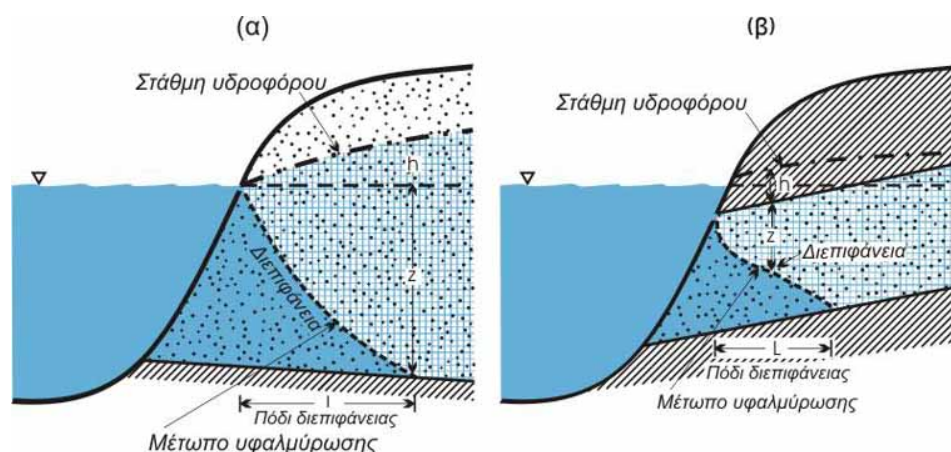
διαδικασία αναστροφής και αποκατάστασης του υδροφορέα. Με τον όρο υφαλμύριση υπογείου υδροφορέα εννοούμε την διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό με παράλληλη αύξηση της αλατότητας του σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων, καταστρέφει καλλιέργειες, αχρηστεύει χωράφια, διαβρώνει σωλήνες και λέβητες σε βιομηχανικές χρήσεις. Για τον λόγο αυτό η υφαλμύριση ενός υδροφορέα γλυκού νερού σημαίνει και την απώλεια αυτού του υδροφορέα ως πηγή νερού.

Όταν ο ρυθμός άντλησης σε πηγάδια κοντά στην θάλασσα υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλασσινό νερό εισρέει στους υδροφορείς καταστρέφοντας τους από πηγή πόσιμου νερού. Το φαινόμενο αυτό δεν θεωρείται γρήγορα αναστρέψιμο γι' αυτό είναι καλό να αντιμετωπίζεται με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση.

Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος, Ιούλιος 2001.

8.2. Μηχανισμός της υφαλμύρισης

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τον μηχανισμό της υφαλμύρισης, δηλαδή πως το θαλασσινό νερό που είναι βαρύτερο τείνει να κινείται κάτω από το γλυκό νερό.



Σχήμα 8.1.: Μηχανισμός της υφαλμύρισης.

Πηγή: Διαδίκτυο www.geo.auth.gr, Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα.

Η υδραυλική κλίση του γλυκού νερού, που οφείλεται στον συνεχή εμπλουτισμό λόγω βροχόπτωσης, μειώνεται προς την ακτή με αποτέλεσμα να κινείται τελικά προς τη θάλασσα. Αν δεν υπήρχε αυτή η δύναμη, το θαλασσινό νερό θα κινούνταν προς τα πάνω τείνοντας να καταλάβει ολόκληρο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από την στάθμη της θάλασσας. Σε αυτήν την κίνηση του θαλασσινού νερού, προβάλλει αντίσταση η ορμή του φρέσκου νερού λόγω πυκνότητας κι έτσι επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας που ονομάζεται διεπιφάνεια του μετώπου υφαλμύρινσης με τον υπόγειο υδροφορέα και φαίνεται στο σχήμα 8.1.

Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο ‘‘Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη’’, Πάρος, Ιούλιος 2001.

8.3. Τρόποι προσομοίωσης διεπιφάνειας αλμυρού- γλυκού νερού

Οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρινσης παράκτιων υδροφορέων είναι δυο:

- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς
- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, αν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα.

8.3.1. Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους

Η διεξόδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Υπάρχουν δυο αναμίξιμα υγρά. Επομένως, επιλύεται πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση c εξαρτώμενη από την πυκνότητα ρ (για κορεσμένη ροή). Οι άγνωστοι του προβλήματος στις διάφορες θέσεις \vec{r} του πεδίου ροής και για διάφορους χρόνους t , είναι: συγκέντρωση $c(\vec{r}, t)$, ταχύτητα $V(\vec{r}, t)$, πίεση $p(\vec{r}, t)$ και πυκνότητα $\rho(\vec{r}, t)$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

- Εξίσωση Διατήρησης Μάζας
- Εξίσωση Υδροδυναμικής Διασποράς
- Εξισώσεις Κίνησης (Νόμος του Darcy)
- $\rho = \rho(c)$ (γραμμική σχέση συνήθως)

8.3.2. Απότομη διεπιφάνεια

1^η Περίπτωση: Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρούνται:

- κατάσταση ισορροπίας, μόνιμη ροή
- ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν

2^η Περίπτωση: Λόγω άντλησης θεωρούνται:

- κινούμενη διεπιφάνεια, μη μόνιμη ροή

Υπό προϋποθέσεις, γίνεται παραδοχή της οριζόντιας ροής.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το γλυκό και το θαλάσσιο νερό είναι οι παρακάτω:

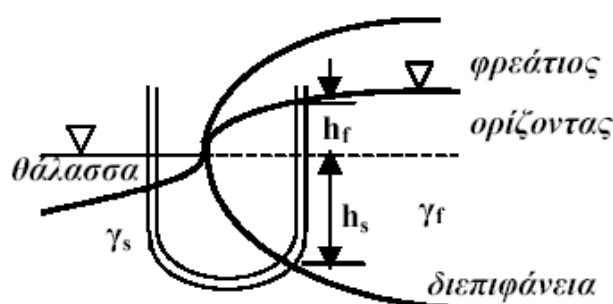
- Εξίσωση συνέχειας
- Εξισώσεις κίνησης ((Νόμος του Darcy)

Για την λύση του προβλήματος θεωρούμε άγνωστους την πίεση p , το βάθος ζ της διεπιφάνειας από την επιφάνεια της θάλασσας και οι ταχύτητες V για το γλυκό και το θαλασσινό νερό.

Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο ``Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη'', Πάρος, Ιούλιος 2001.

8.4. Προσέγγιση Ghyben- Herzberg

Οι Badon-Ghyden (1888) και Herzberg (1901) βρήκαν ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η παρακάτω σχέση προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δυο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή Dupuit.



Ορίζοντας h_f : το ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της

Θάλασσας,

h_s : τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού γλυκού νερού κάτω από αυτήν,

γ_f : το ειδικό βάρος του γλυκού νερού,

γ_s : το ειδικό βάρος του αλμυρού νερού και

δ : τον λόγο $\frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f}$.

Ισχύει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από την στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης :

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f$$

Η σχέση Ghyben- Herzberg μπορεί να γραφτεί και ως εξής :

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f$$

Όπου:

- ξ: η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας,
- h_f: το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας,
- ρ_f: η πυκνότητα του γλυκού νερού (1 g/cm³) και
- ρ_s: η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1,025 g/cm³).

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρινσης με τον υπόγειο υδροφορέα ωθείται 40 μέτρα προς τα κάτω.

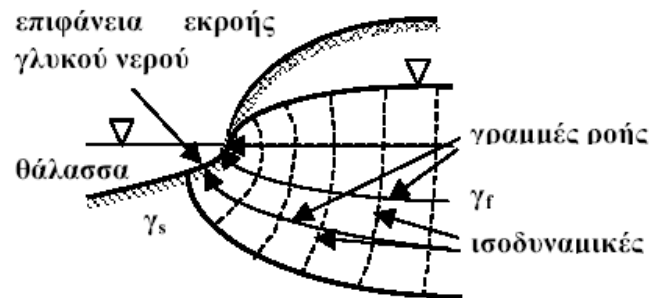
Σε περίπτωση όμως που σε κάποιες περιοχές υπάρχει έντονη αντλητική δραστηριότητα ο λόγος 40:1 δεν είναι αντιπροσωπευτικός.

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

- Με βάση παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής, κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας υπολογίζονται από την εξίσωση που μόλις αναφέραμε, άρα ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή
- Από τη γεωλογική μελέτη είναι γνωστή η θέση του πυθμένα του υδροφορέα
- Η τομή των δυο επιφανειών, της διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελεί τον πόδα της αλάτινης σφήνας
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για περιορισμένους και φρεάτινους υδροφορείς

Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος, Ιούλιος 2001.

8.5. Πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας



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

Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος, Ιούλιος 2001.

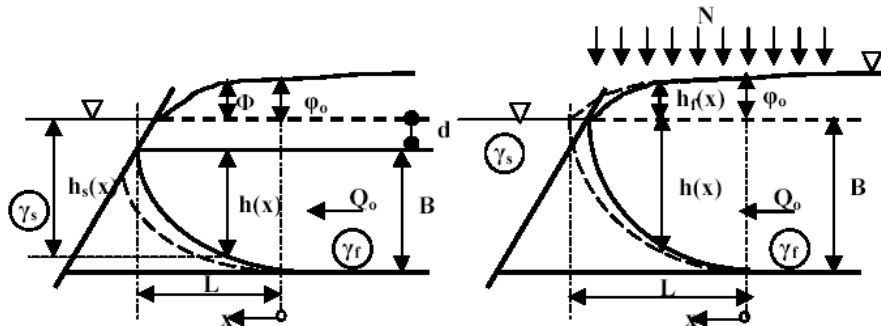
8.6. Ακίνητη διεπιφάνεια σε κατακόρυφο επίπεδο

Με την βοήθεια της μονοδιάστατης ανάλυσης μπορούμε να υπολογίσουμε την διεπιφάνεια αλμυρού- γλυκού νερού ,χωρίς την παρουσία φρεάτων.

Οι παραδοχές που ισχύουν είναι:

- Μόνιμη ροή γλυκού νερού
- Ακίνητη στρώση θαλάσσιου νερού

- Ομογενής υδροφορέας με υδραυλική αγωγιμότητα K
- Οριζόντια ροή και
- Προσέγγιση Ghyben- Herzberg



Πηγή: Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος, Ιούλιος 2001.

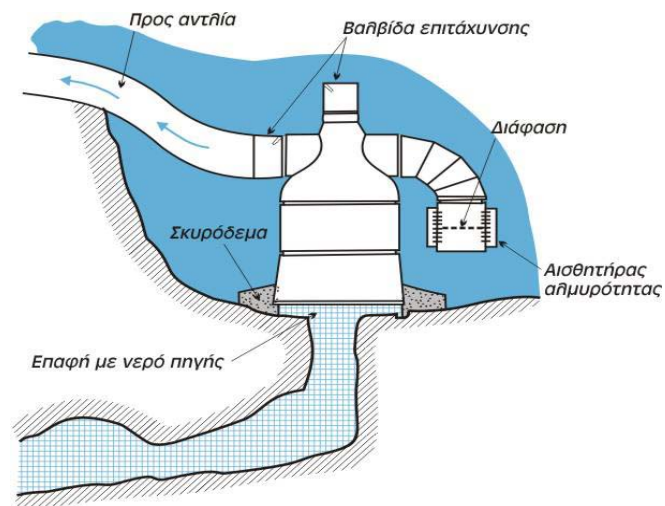
8.7. Μέθοδοι ελέγχου της υφαλμύρισης

Για τον έλεγχο της υφαλμύρισης έχουν χρησιμοποιηθεί αρκετές μέθοδοι, μερικές από τις οποίες είναι:

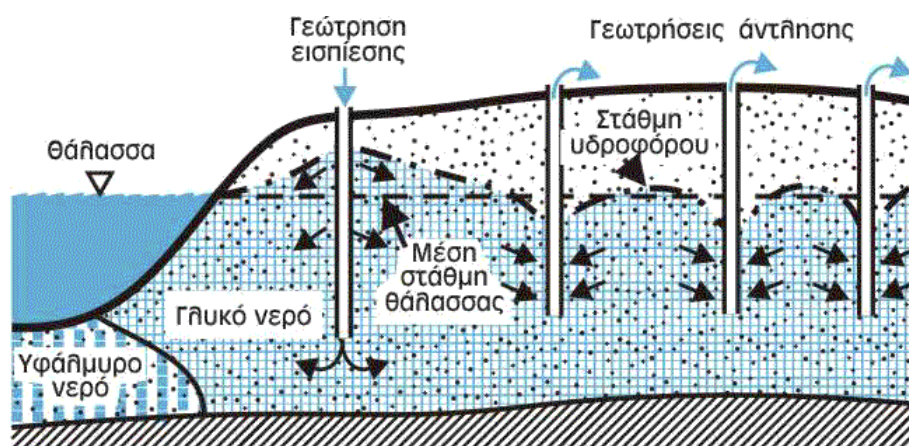
- Άντληση του θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρισης έτσι ώστε να μειωθεί η εξάπλωση του φαινομένου.
- Ανάπτυξη υποθαλάσσιων φραγμών. Η κατασκευή ενός αδιαπέρατου υποθαλάσσιου φράγματος κατά μήκος της ακτής θα μπορούσε να περιορίσει το φαινόμενο αυτό.
- Έλεγχος της άντλησης. Αν η άντληση από έναν παράκτιο υδροφόρα μειωθεί ή μετατοπιστεί η θέση του πηγαδιού, τότε η στάθμη του υδροφόρα μπορεί να αυξηθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα και το φαινόμενο της υφαλμύρισης να περιοριστεί κατά ένα μέρος.
- Τεχνητή αναπλήρωση. Με την τεχνητή αναπλήρωση από φυσικά επιφανειακά ύδατα ή επεξεργασμένα ύδατα ή πηγάδια εμπλουτισμού μπορεί να αυξηθούν τα επίπεδα του υπόγειου υδροφόρα και να λειτουργήσουν σαν ένα φράγμα εμποδίζοντας τη θαλάσσια εισχώρηση.
- Κατασκευή πηγαδιών με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ελέγχουν την

κίνηση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με τις επιφανειακές λεκάνες διήθησης.

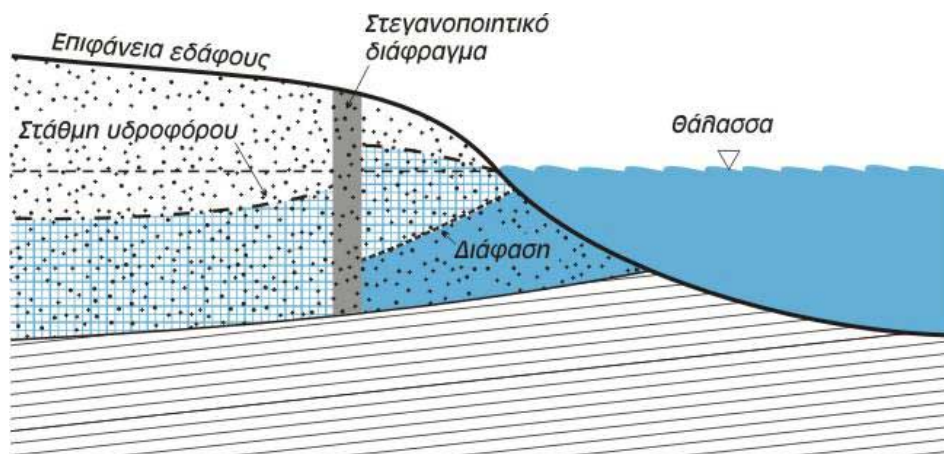
Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται μερικά μέτρα προστασίας κατά της υφαλμύρινσης



Σχήμα 8.2.: Σχηματική απεικόνιση μιας αντλίας για αξιοποίηση υποθαλάσσιας πηγής. (Από διάλεξη του Tulipano L., το 2003 στο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης)



Σχήμα 8.3.: Δημιουργία φραγμού από τεχνητό εμπλουτισμό κοντά στην ακτή. (Από Καλλέργη Γ., 2001)



Σχήμα 8.4.: Δημιουργία στεγανοποιητικού διαφράγματος κοντά στην ακτή.

Πηγή: Διαδίκτυο www.geo.auth.gr, Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα.

8.8. Οι εξισώσεις του μηχανισμού της υφαλμύρινης

Για την μαθηματική περιγραφή του μηχανισμού της υφαλμύρινης γίνονται οι εξής παραδοχές:

- Θεωρούμε ότι ο υδροφορέας έχει σταθερή ροή γλυκού νερού με κατεύθυνση από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά, ώστε το γλυκό νερό να απωθεί το αλμυρό εμποδίζοντας το να εισέλθει στον υδροφορέα.
- Θεωρούμε ότι η διεπιφάνεια που χωρίζει το αλμυρό από το γλυκό νερό είναι πολύ λεπτή και το πάχος του υδροφορέα από το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς ως τη στάθμη της θάλασσας είναι d . Το d είναι συνήθως μικρότερο από το μήκος ή το πάχος του υδροφορέα ή και τη ζώνη υφαλμύρινης διότι συνήθως η οριζόντια διάσταση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την κάθετη.

Ως αρχή του άξονα x λαμβάνεται το σημείο στην ακτογραμμή και ως αρχή του άξονα z το σημείο στη βάση του υδροφορέα.

Τα σημεία όπου η επιφάνεια του μεταβατικού στρώματος τέμνει τον πυθμένα του υδροφορέα συμβολίζονται με τ και με x_τ οι συντεταγμένες τους στον άξονα x . Ακόμα, όταν δεν υπάρχει ροή στην y κατεύθυνση, τα σημεία τ σχηματίζουν μια γραμμή παράλληλη προς την ακτογραμμή, ενώ όταν στον υδροφορέα υπάρχουν πηγάδια άντλησης οι άκρες σχηματίζουν μια περίπλοκη γραμμή.

Τα παρακάτω μεγέθη ορίζονται ως:

- $b(x, y)$ το βάθος του γλυκού νερού από την ελεύθερη επιφάνεια ως τη διεπιφάνεια,
- $\xi(x, y)$ το βάθος του γλυκού νερού από την επιφάνεια της θάλασσας ως την ελεύθερη επιφάνεια,
- $h_f(x, y)$ το πιεζομετρικό ύψος του γλυκού νερού, με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα.

Εξετάζονται δυο ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά νερού. Στην 1^η ζώνη ο υδροφορέας συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ένας ελεύθερος υδροφορέας, ενώ στη 2^η ζώνη υπάρχει μια διεπιφάνεια με έναν φακό γλυκού νερού που επιπλέει πάνω από το στρώμα του αλμυρού νερού, που είναι πυκνότερο. Έστω L το μήκος του υδροφορέα, B το πλάτος του και q ο ρυθμός απορροής προς το περιβάλλον ανά μονάδα πλάτους του υδροφορέα, ο οποίος δίνεται από την σχέση $q = V_c/B$. Όπου $V_c = N_c \cdot A$ ο όγκος νερού εμπλουτισμού ανά μονάδα χρόνου από την χερσαία περιοχή του υδροφορέα, N_c ο ρυθμός εμπλουτισμού ανά μονάδα χρόνου από τη χερσαία περιοχή του υδροφορέα και A η αντίστοιχη επιφάνεια της χερσαίας περιοχής εμπλουτισμού. Η χερσαία επιφάνεια θεωρείται υψηλής διαπερατότητας ενώ το A σχετικά μικρό σε σχέση με το μέγεθος του υδροφορέα.

Η παραδοχή πολύ λεπτής διεπιφάνειας υποθέτει ότι δεν υπάρχει καμία ανάμιξη του γλυκού με το αλμυρό νερό στη 2^η ζώνη. Ακόμα, μια παραδοχή είναι ότι η διεπιφάνεια έχει σταθεροποιηθεί και δεν κινείται (η κίνηση του αλμυρού νερού θεωρείται χωρίς τριβή). Αυτή η παραδοχή ενδείκνυται όταν η ροή πλησιάζει σε σταθερή κατάσταση ή όταν περάσει πολύς χρόνος από την τελευταία αλλαγή που έγινε στο σύστημα.

Τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Ghyben- Herzberg:

$$h_f - d = \delta \xi \quad (8.1)$$

$$\text{Όπου } \delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \approx 0.025, \text{ με } \rho_s \text{ την πυκνότητα του αλμυρού νερού και}$$

ρ_f την πυκνότητα του γλυκού νερού.

Η εξίσωση σταθερής ροής στον ελεύθερο υδροφορέα της 1^{ης} ζώνης γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial y}) + N - Q = 0 \quad (8.2)$$

Όπου :

K: η υδραυλική αγωγιμότητα, που συνήθως είναι

συνάρτηση των χωρικών συντεταγμένων (x, y),

N: ο εμπλουτισμός κατανεμημένος στην επιφάνεια του υδροφορέα και

Q: ο ρυθμός άντλησης από πηγάδια που βρίσκονται μέσα στον υδροφορέα.

Το βάθος του φρέσκου νερού στη 2^η ζώνη είναι b και η εξίσωση της ροής σε αυτή τη ζώνη είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \cdot h_f \frac{\partial h_f}{\partial y}) + N - Q = 0 \quad (8.3)$$

Ορίζουμε $b=h_f$ για την 1^η ζώνη και

$$b = h_f - d + \xi \text{ για την 2^η ζώνη.} \quad (8.4)$$

Το δυναμικό της ροής ϕ μπορεί να ορισθεί σύμφωνα με τον Strack ως εξής:

$$\phi = \frac{1}{2}[h_f^2 - (1+\delta)d^2] \quad \text{για την 1}^{\text{η}} \text{ ζώνη} \quad (8.5)$$

$$\phi = \frac{1+\delta}{2\delta}(h_f - d)^2 \quad \text{για την 2}^{\text{η}} \text{ ζώνη}$$

Στα άκρα ισχύει $\xi=d$ και από την (8.1) προκύπτει $h_f = (1+\delta) d$ ενώ το δυναμικό της ροής ϕ δίνεται από τη σχέση: $\phi_\tau = \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2$.

Από τις εξισώσεις (8.5) του δυναμικού ροής λαμβάνεται στο όριο της 1^{ης} και 2^{ης} ζώνης : $\phi_{1\text{ης ζώνης}} = \phi_{2\text{ης ζώνης}} = \phi_\tau$ και

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\text{ζώνη 1}} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{\text{ζώνη 2}} = \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_\tau$$

Αυτό δείχνει ότι το δυναμικό ροής είναι μια συνεχής και παραγωγίσιμη συνάρτηση κατά μήκος του ορίου ανάμεσα στις δυο ζώνες.

Από τις εξισώσεις (8.2), (8.3) και (8.5) συμπεραίνουμε ότι η συνάρτηση $\phi(x,y)$ ικανοποιεί την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (8.6)$$

Με οριακές συνθήκες:

-στο όριο της ακτής ($x=0$) το $\xi = 0$ και από την (8.5) προκύπτει ότι $\phi=0$.

-στα όρια μηδενικής ροής, η ροή προς την κατεύθυνση n κάθετα στο όριο είναι μηδέν.

Για παράδειγμα, $q_n = -Kb \frac{\partial h_f}{\partial n} = 0 \Rightarrow \frac{\partial h_f}{\partial n} = 0$, άρα από την (8.5) προκύπτει ότι στα όρια μηδενικής ροής ισχύει $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$.

Αν τα K, N, Q και οι οριακές συνθήκες είναι γνωστές, τότε η εξίσωση (8.6) λύνεται με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους για $\phi(x,y)$. Αφού υπολογίσουμε το $\phi(x,y)$, η επιφάνεια της διεπιφάνειας υπολογίζεται ως συνάρτηση του ϕ από τις εξισώσεις (8.4) και (8.5) και είναι η εξής:

Για την 1^η ζώνη:

$$\xi = d \quad z = 0 \quad \text{όταν} \quad \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2 \leq \phi \quad (8.7)$$

Για την 2^η ζώνη:

$$\xi = \sqrt{\frac{2\phi}{\delta(1+\delta)}} \quad z = d - \xi \quad \text{όταν} \quad 0 \leq \phi \leq \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2$$

Η πιεζομετρική επιφάνεια h_f λαμβάνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

Για την 1^η ζώνη:

$$h_f = \sqrt{2\phi + (1+\delta)d^2} \quad \text{όταν} \quad \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2 \leq \phi \quad (8.8)$$

Για την 2^η ζώνη:

$$h_f = \sqrt{\frac{2\delta\phi}{1+\delta}} + d \quad \text{όταν} \quad 0 \leq \phi \leq \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2$$

Η τοποθεσία των άκρων καθορίζεται με την επίλυση για x_t ως συνάρτηση του y_t της μη γραμμικής εξίσωσης:

$$\varphi(x_t, y_t) = \frac{(1+\delta)\delta}{2} d^2 \quad (8.9)$$

Πηγή: Καρτεράκης Στέφανος, Ματαπυχιακή Διατριβή “Διαχείριση των Υπογείων Υδάτων με χρήση συνδυασμού Μεθόδων Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης”, Χανιά, Αύγουστος 2005.

8.9. Εκτίμηση της Ζώνης Υφαλμύρινσης

Η θέση της διεπιφάνειας ξ κάτω από τη στάθμη της θάλασσας είναι 60 μέτρα.

Οπότε, από την σχέση $\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40h_f$, προκύπτει ότι:

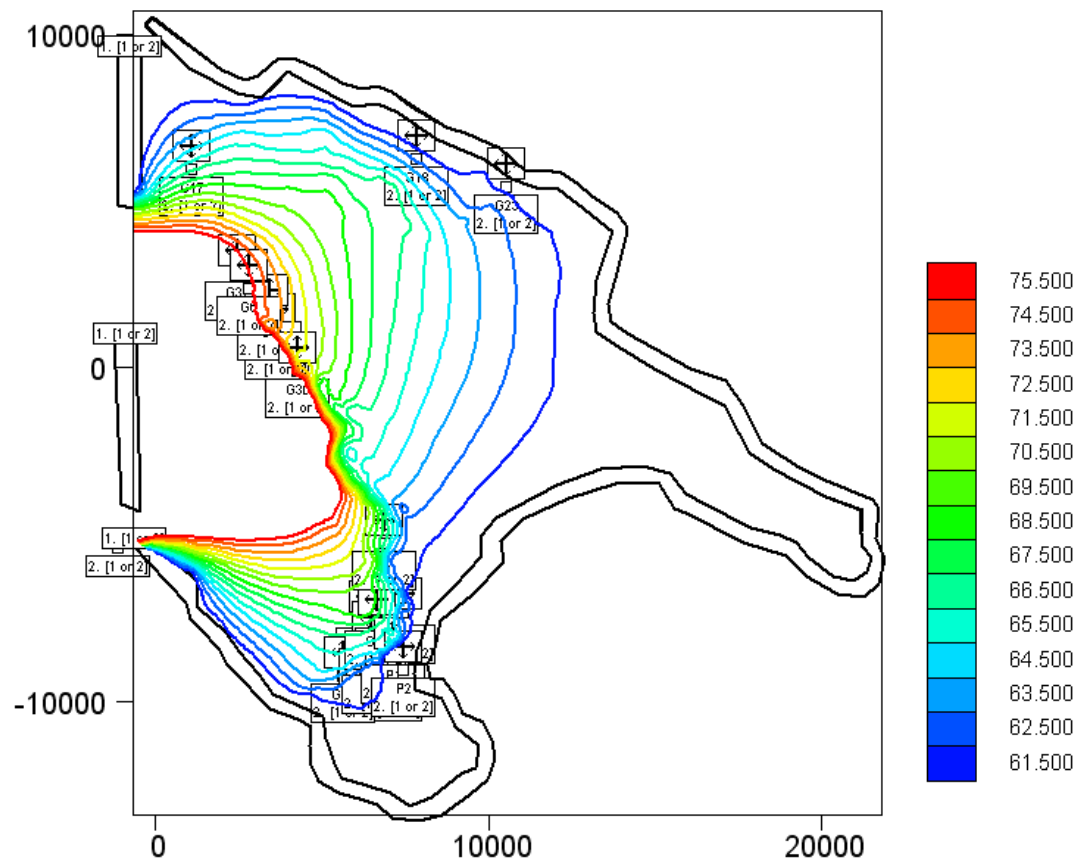
$$60 \approx 40h_f \Rightarrow h_f \approx 1.5 \text{ m}$$

Όπου h_f είναι το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Για να δούμε μέχρι που έχει φτάσει το υφάλμυρο νερό, ξανατρέχουμε το αρχικό πρόγραμμα αλλά το υδραυλικό ύψος θα αρχίζει από τα 61,5 m ($60 \text{ m} + 1,5 \text{ m} = 61,5 \text{ m}$) και όχι από τα 60 m που άρχιζε πριν.

8.10. Γραφήματα της ζώνης Υφαλμύρινης

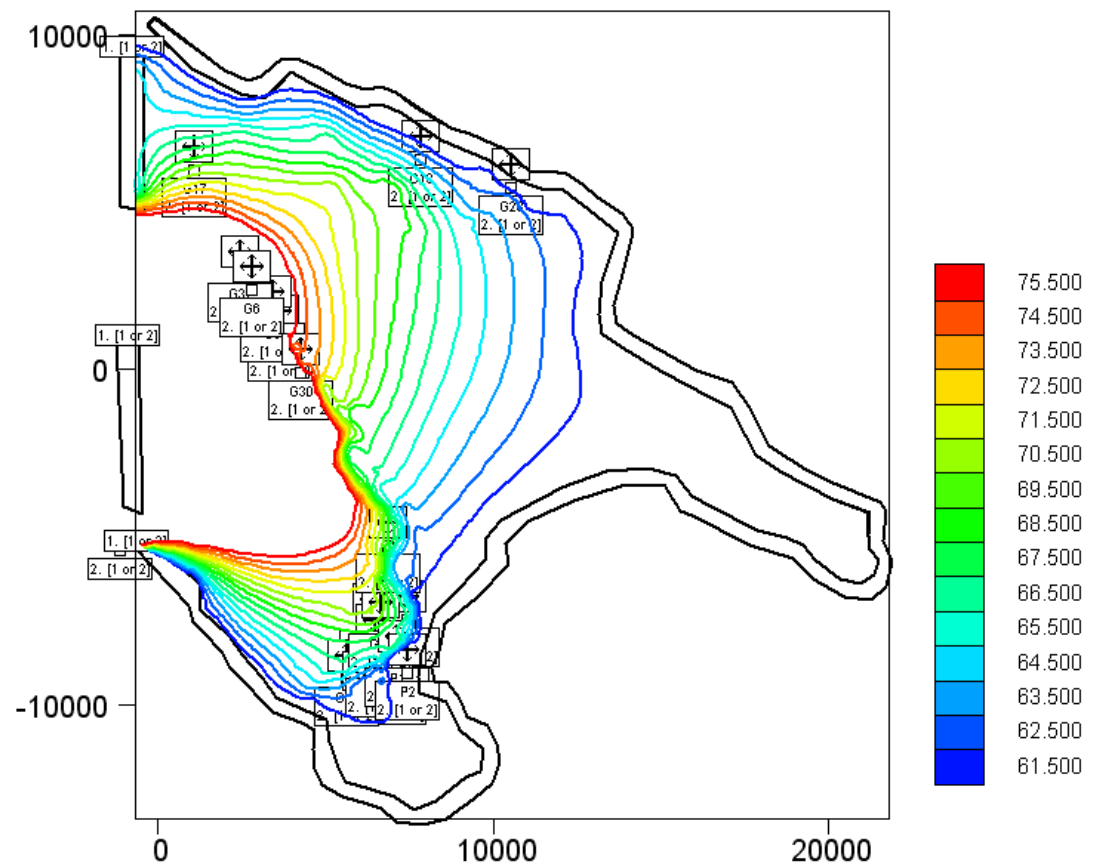
Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου της ζώνης Υφαλμύρινης



Γράφημα 8.5.: Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου

Από το γράφημα 8.5. παρατηρούμε ότι από της ακτές της Ζακύνθου μέχρι εκεί που συναντάμε την πρώτη μπλε γραμμή υπάρχει υφάλμυρο νερό. Οι περισσότερες από τις γεωτρήσεις στα Β.Α και Ν.Α της περιοχής μελέτης φαίνεται να επιρρεάζονται από την υφαλμύριση.

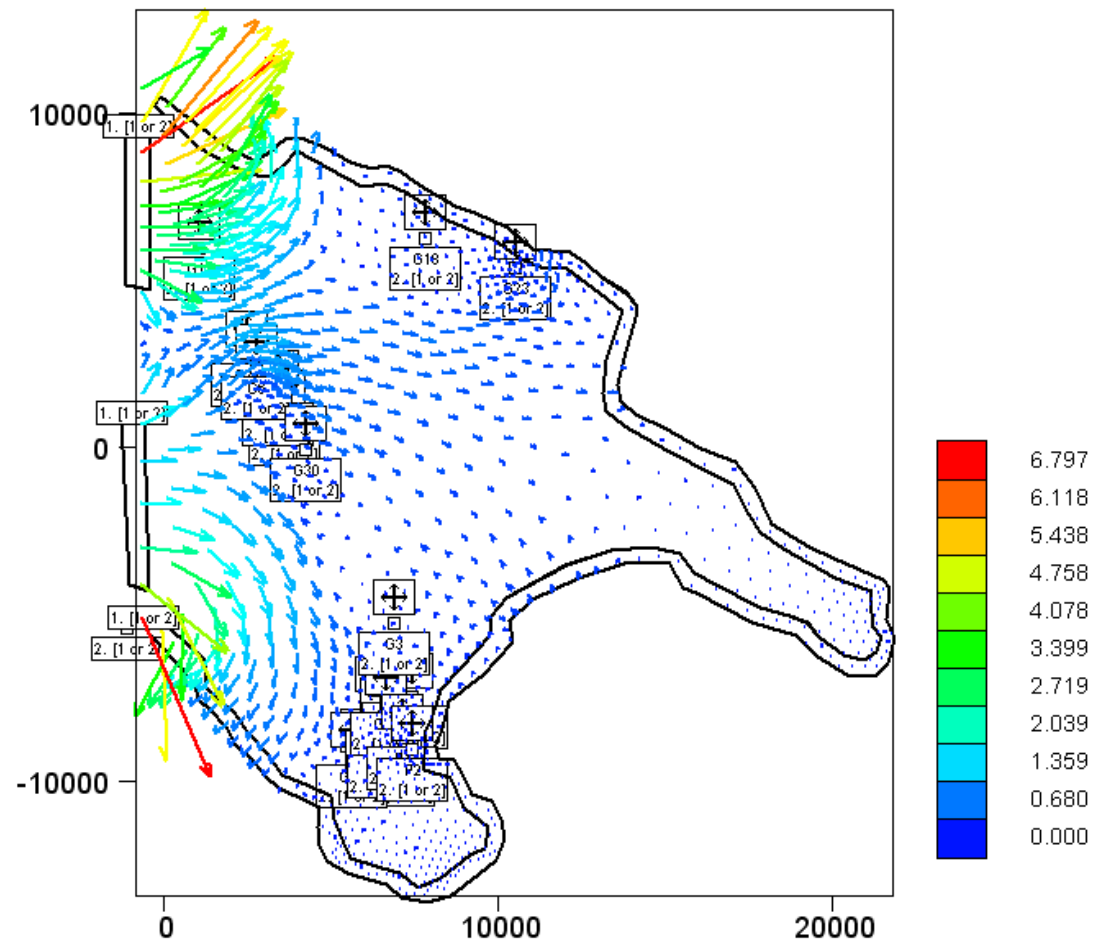
Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου της ζώνης Υφαλμύρινσης



Γράφημα 8.6.: Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου

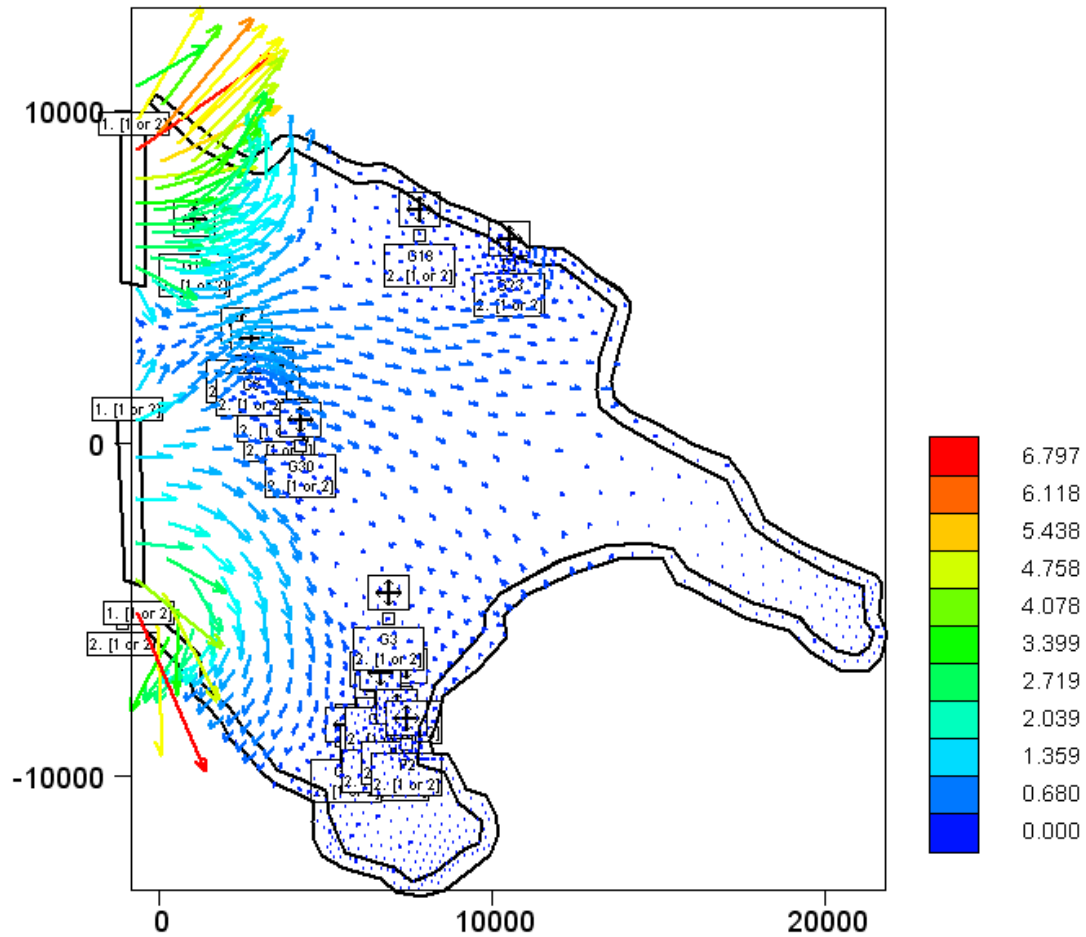
Τον χειμώνα η κατάσταση είναι λίγο καλύτερη. Τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων αυξάνονται κατά 2 με 3 m σε σχέση με το Καλοκαίρι, λόγω της αύξησης της στάθμης του νερού. Όμως, το πρόβλημα παραμένει.

Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου της ζώνης Υφαλμύρινσης



Γράφημα 8.7.: Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου

Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου της ζώνης Υφαλμύρινης



Γράφημα 8.8.: Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου

Οι ταχύτητες ροής κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο παραμένουν στα ίδια περίπου επίπεδα με πριν και κυμαίνονται από 0 μέχρι 6,797 m/day.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΥΞΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΛΟΥΜΕΝΗΣ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ

9.1. Σενάριο 1^ο –Αύξηση της αντλούμενης ποσότητας κατά 25% της αρχικής

Στο σενάριο αυτό υποθέτουμε ότι η αντλούμενη ποσότητα των γεωτρήσεων αυξάνεται κατά 25% από αυτήν που ήδη έχουμε.

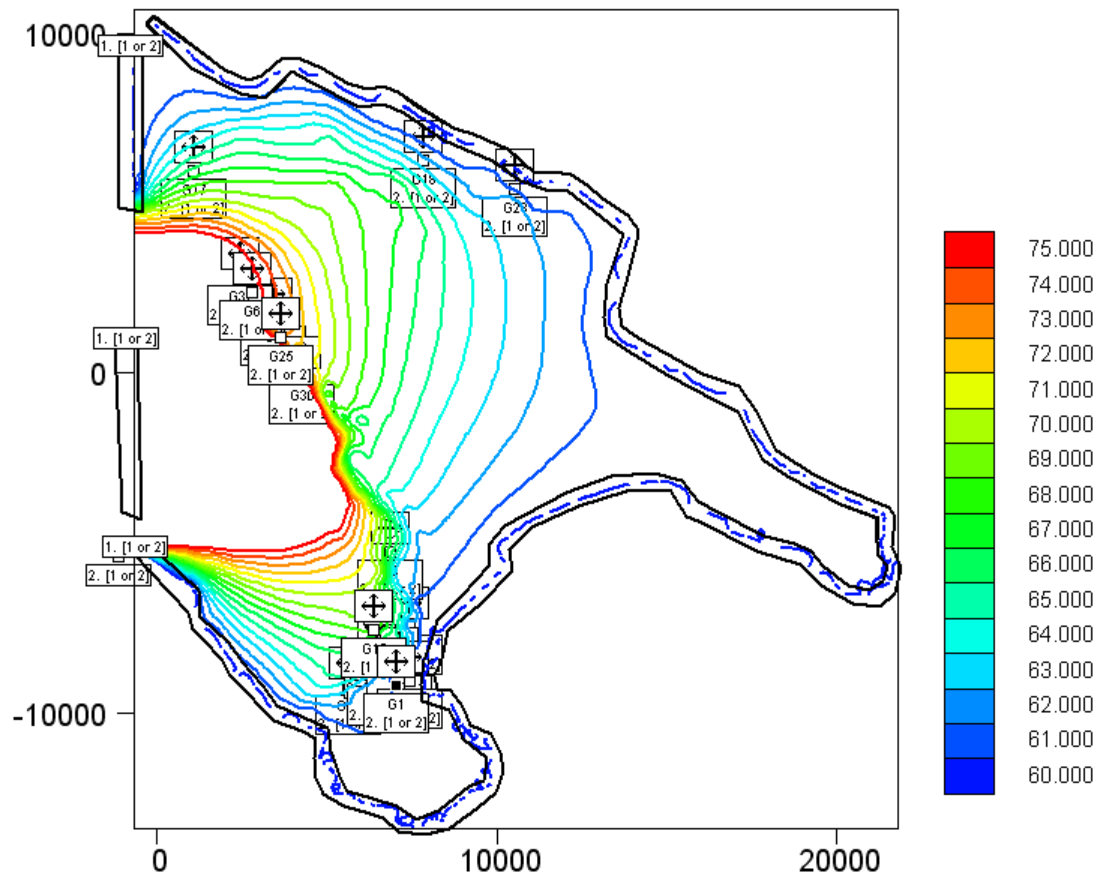
Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αντλούμενη ποσότητα που έχουμε υπό κανονικές συνθήκες σε κάθε γεώτρηση και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο σενάριο, δηλαδή μετά από 25% αύξηση.

Αριθμός Γεώτρησης	Αντλούμενη ποσότητα (m³/day)	Αντλούμενη ποσότητα (m³/day) 1^ο Σεναρίου
G1	800	1000
G3	1100	1375
G5	400	500
G6	800	1000
G9	2000	2500
G10	360	450
G11	320	400
G15	1100	1375
G17	1200	1500
G18	400	500
G19	300	375
G21	1800	2250
G23	270	337,5
G25	1120	1400
G26	450	562,5

G27	450	562,5
G28	600	750
G30	640	800
G32	800	1000

9.2. Γραφήματα Υδραυλικών Ύψων και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο ,1^ο Σενάριο

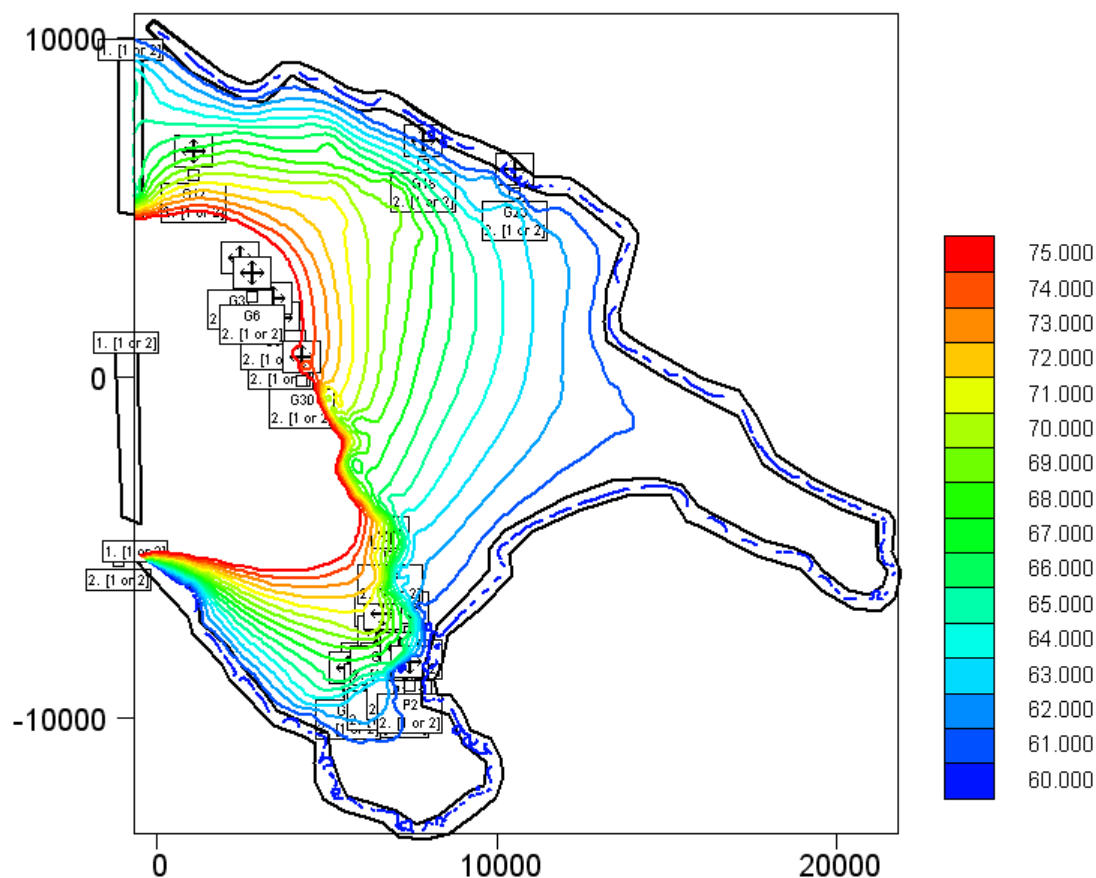
Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο



Γράφημα 9.1.: Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο

Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη της Θερινής περιόδου του γραφήματος 7.1. με το γράφημα 9.1. της Θερινής περιόδου του πρώτου σεναρίου (αύξηση κατά 25% της αντλούμενης ποσότητας), βλέπουμε ότι τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων μειώνονται κατά 1 με 2 m περίπου επί τω πλείστον. Αυτό είναι λογικό, διότι αντλώντας μεγαλύτερη ποσότητα νερού, μειώνεται και η στάθμη των γεωτρήσεων.

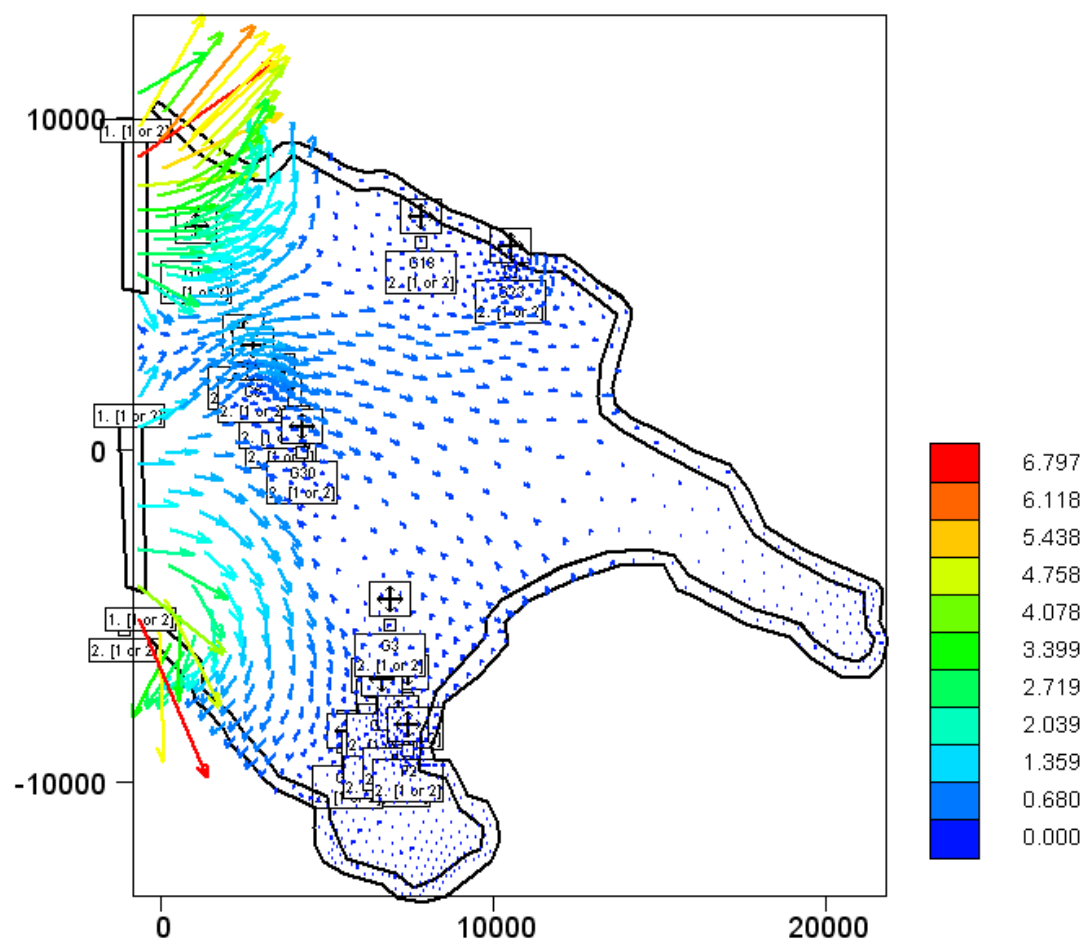
Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο



Γράφημα 9.2.: Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο

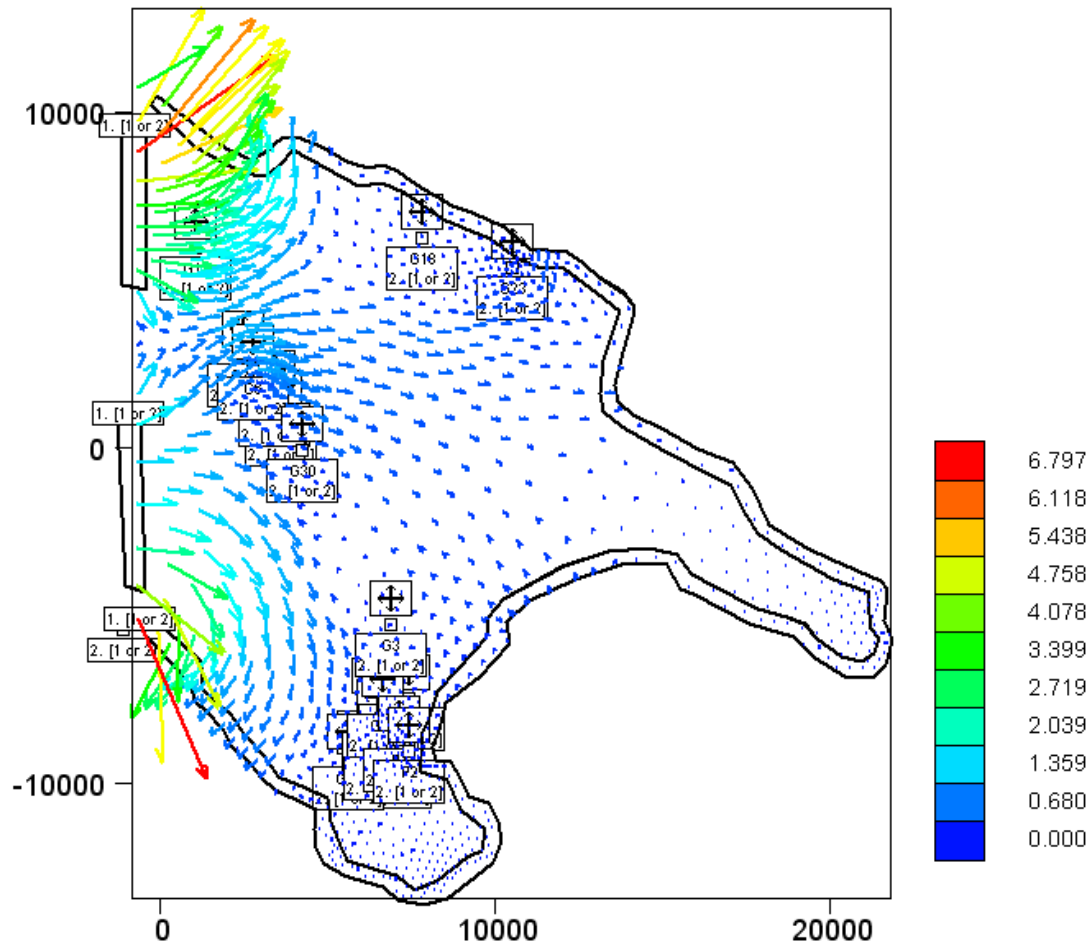
Τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων τον Χειμώνα μετά από αύξηση 25% της αντλούμενης παροχής αυξάνονται από 2 έως 4 m περίπου σε σχέση με του Καλοκαιριού του 1^{ου} Σεναρίου. Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη του Χειμώνα του 1^{ου} Σεναρίου με αυτά του Χειμώνα υπό κανονικές συνθήκες, παρατηρούμε μείωση κατά 1 με 2 m περίπου.

Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο



Γράφημα 9.3.: Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο

Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο



Γράφημα 9.4.: Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου, 1^ο Σενάριο

Οι ταχύτητες ροής του 1^{ου} σεναρίου παραμένουν σχεδόν ίδιες κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο και οι μεταβολές τους σε σχέση με τις ταχύτητες ροής υπό κανονικές συνθήκες είναι ανεπαίσθητες.

9.3. Σενάριο 2^ο – Μείωση της αντλούμενης ποσότητας κατά 25% της αρχικής

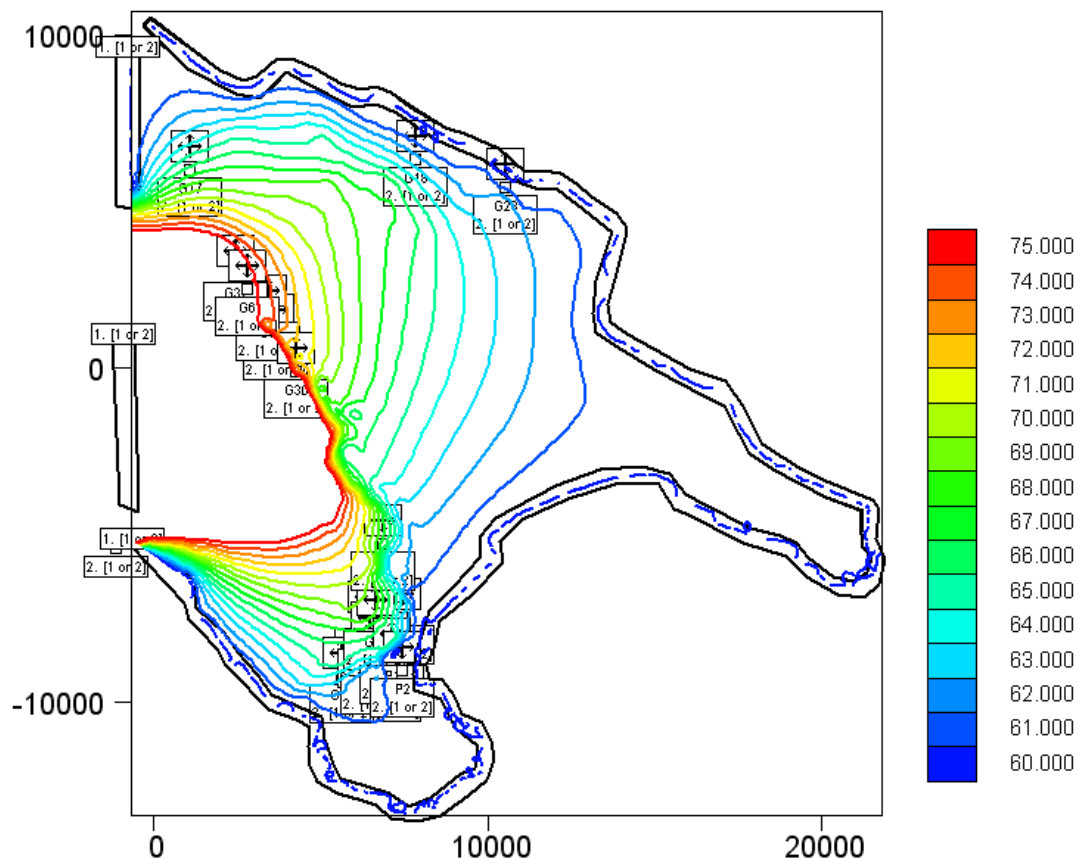
Στο σενάριο αυτό υποθέτουμε ότι η αντλούμενη ποσότητα των γεωτρήσεων μειώνεται κατά 25% από αυτήν υπό κανονικές συνθήκες.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η αντλούμενη ποσότητα που έχουμε κανονικά σε κάθε γεώτρηση και αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο δεύτερο σενάριο, δηλαδή μετά από 25% μείωση.

Αριθμός Γεώτρησης	Αντλούμενη ποσότητα (m³/day)	Αντλούμενη ποσότητα (m³/day) 2^ο Σεναρίου
G1	800	600
G3	1100	825
G5	400	300
G6	800	600
G9	2000	1500
G10	360	270
G11	320	240
G15	1100	825
G17	1200	900
G18	400	300
G19	300	225
G21	1800	1350
G23	270	202,5
G25	1120	840
G26	450	337,5
G27	450	337,5
G28	600	450
G30	640	480
G32	800	600

9.4. Γραφήματα Υδραυλικών Υψών και Ταχυτήτων κατά την Θερινή και Χειμερινή περίοδο ,2^ο Σενάριο

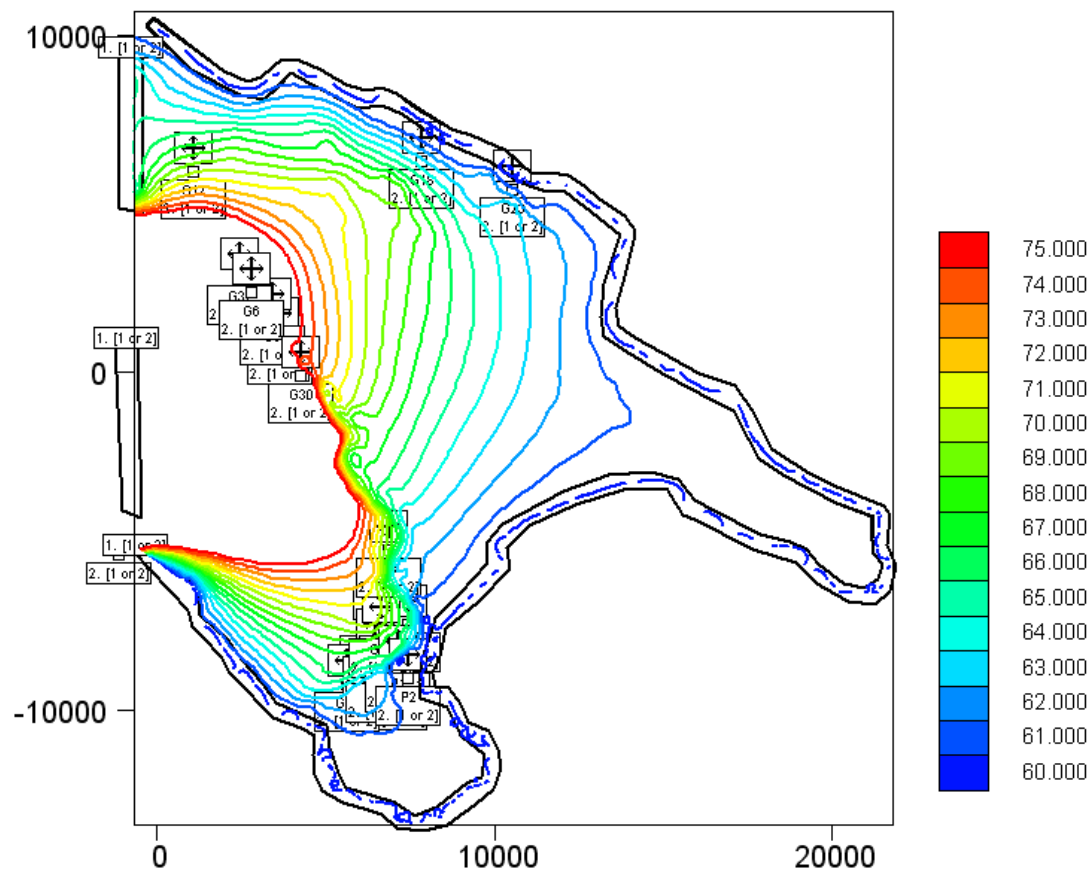
Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο



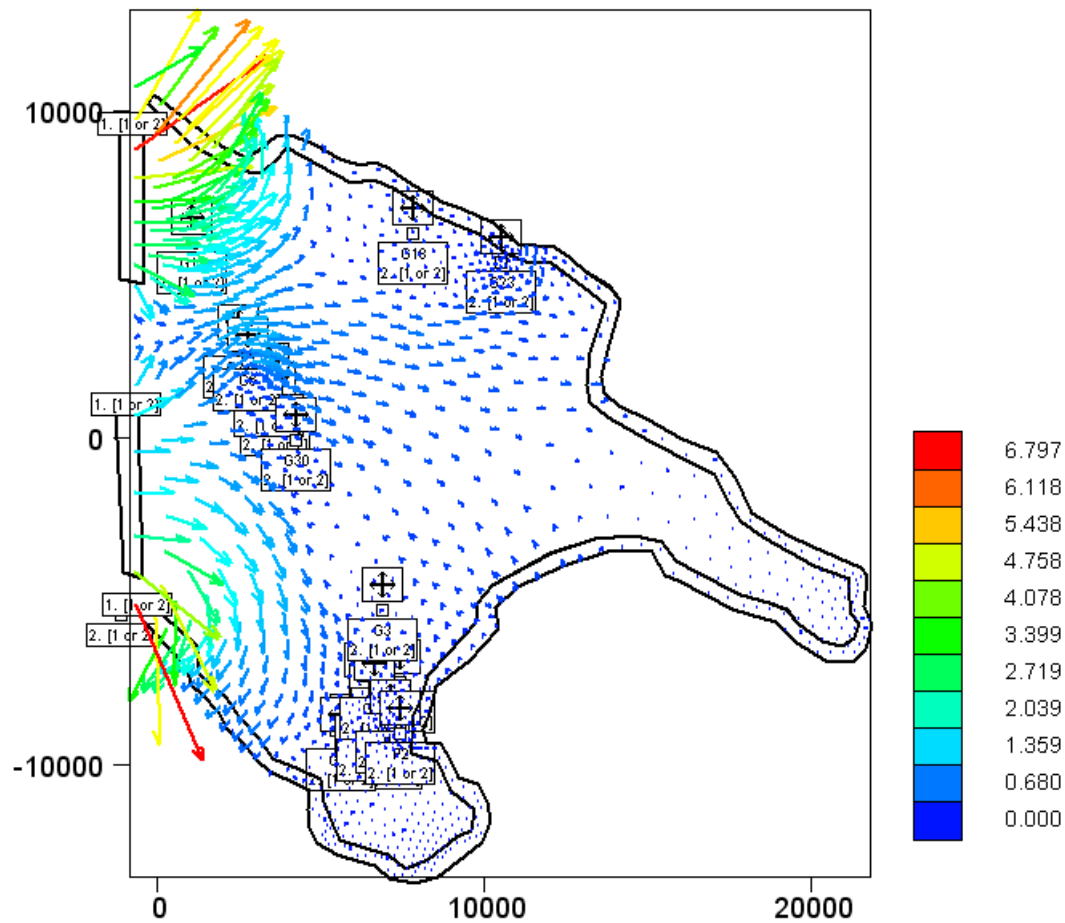
Γράφημα 9.5.: Υδραυλικά Ύψη της Θερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο

Συγκρίνοντας τα υδραυλικά ύψη της θερινής περιόδου του 2^{ου} σεναρίου με αυτά της Θερινής περιόδου υπό κανονικές συνθήκες, παρατηρούμε ότι αυξήθηκαν κατά 1 m περίπου. Αυτό συνέβη διότι μειώνοντας την παροχή, η στάθμη των γεωτρήσεων ανέβηκε.

Υδραυλικά Ύψη της Χειμερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο

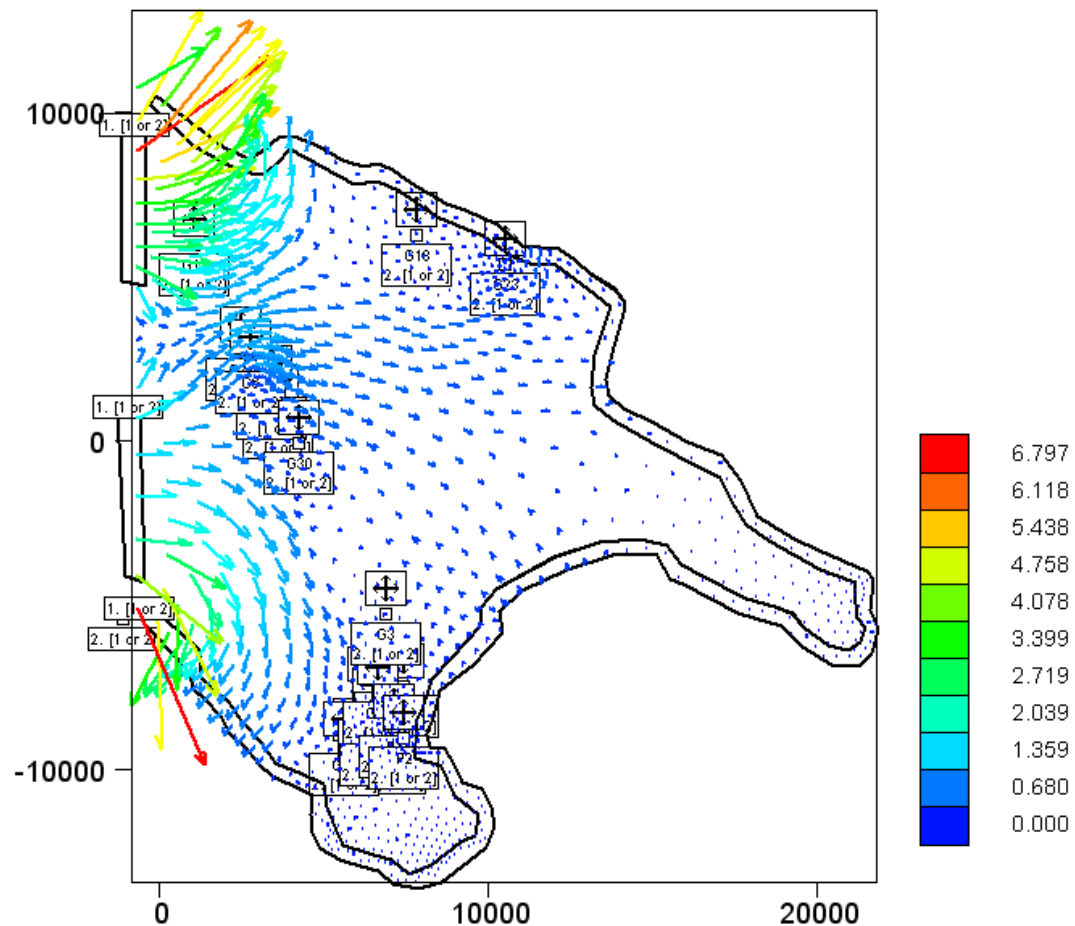


Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο



Γράφημα 9.7.: Ταχύτητες ροής της Θερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο

Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο



Γράφημα 9.8.: Ταχύτητες ροής της Χειμερινής περιόδου, 2^ο Σενάριο

Οι τιμές των ταχυτήτων ροής και στο 2^ο σενάριο κυμαίνονται από 0 έως 6,797 m/day περίπου με την ίδια διεύθυνση.

9.5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η Ζάκυνθος είναι ένα τουριστικό νησί με αποτέλεσμα το Καλοκαίρι να αυξάνεται κατά πολύ η ζήτηση σε νερό. Αυτό οδήγησε τους κατοίκους του νησιού στη διάνοιξη πάρα πολλών ιδιωτικών πηγαδιών, τα οποία αντλούν με πολύ μεγάλους ρυθμούς ιδίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Στην περιοχή μελέτης εμφανίζονται δυο συστήματα υπόγειας υδροφορίας (NA και BA). Η υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων και η κακή διαχείριση σε συνδυασμό με την υδρογεωλογία της περιοχής οδήγησε το φαινόμενο της υφαλμύρισης να γίνει ακόμα πιο έντονο. Εντονότερο εμφανίζεται το φαινόμενο στο NA τμήμα, όπου έχουμε μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων. Κατά τους χειμερινούς μήνες η κατάσταση γίνεται λίγο καλύτερη διότι η ζήτηση του νερού είναι μικρότερη λόγω μειωμένου πληθυσμού και αυξάνεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα λόγω εισροής νερού από τις βροχές.

Αυτό διαπιστώνεται και από την επεξεργασία και τα αποτελέσματα του Προγράμματος Argus One, όπου διαπιστώθηκε ότι στα παράλια της Ζακύνθου το μέτωπο έχει διεισδύσει στο εσωτερικό της περιοχής.

Μερικές προτάσεις για τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι:

- Να αποφεύγεται η υπεράντληση και να γίνεται εξοικονόμηση νερού σε κάθε σπίτι ακόμα και σε μικρές ποσότητες.
- Η μέθοδος του εμπλουτισμού των υδάτων με πηγάδια εισαγωγής.
- Η δημιουργία υποθαλάσσιων φραγμάτων ,παρ' όλο που το κόστος τους είναι αυξημένο και λόγω της σεισμικότητας στην Ελλάδα τα αποτελέσματά της ίσως να μην είναι επιθυμητά.
- Η μεταφορά νερού από γειτονικές περιοχές με περισσεύματα υδατικού δυναμικού.
- Εκπόνηση μελετών κι έργων για καλύτερη αξιοποίηση και εξοικονόμηση επιφανειακών υδάτων.
- Η αποφυγή των ανεξέλεγκτων γεωτρήσεων και ο σωστός έλεγχος πριν από την διάνοιξή τους.

Συγκρίνοντας όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι στο 2^ο σενάριο, όπου έχουμε μείωση της αντλούμενης παροχής κατά 25% ,τα υδραυλικά ύψη αυξάνονται κατά 1 με 2 m περίπου για κάθε περίοδο. Με βάση τα ανωτέρω, επιβάλλεται η εφαρμογή ορθολογικής διαχείρισης των υπογείων υδάτων για αποφυγή περεταίρω επιδείνωσης της σημερινής κατάστασης.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

1. Καρατζάς Γεώργιος Π., Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002
2. Τσακίρης Γ., Υδατικοί πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα 1995
3. Τσότσος Στέφανος, Εδαφομηχανική, Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη 1991
4. Μαριά Ε., Σημειώσεις μαθήματος Περιβαλλοντική και Τεχνική Νομοθεσία, Χανιά, Φεβρουάριος 2005
5. Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999
6. Σκαγιάς Σ., Μελέτη Δίαιτας και Ποιοτική Καταγραφή Υπογείων Νερών Νήσων Ιονίου, Ζακύνθου - Κεφαλληνίας, Παράστημα Ι, Απογραφή Σημείων Ύδατος Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Δεκέμβριος 1999
7. Κουρήs Χ., Υδρογεωλογική Έκθεση Αποτελεσμάτων των Γεωτρητικών - Αντλητικών Εργασιών Ν. Ζακύνθου, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, Νοέμβριος 2001
8. Νάνου-Γιάνναρου Α., Συμπόσιο "Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη", Πάρος, Ιούλιος 2001
9. Καρτεράκης Στέφανος, Ματαπτυχιακή Διατριβή, Διαχείριση των Υπογείων Υδάτων με χρήση συνδυασμού Μεθόδων Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης Χανιά, Αύγουστος 2005

ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

10. D.K. Badu ,G.F. Pinder, A. Niemi, D.P. Ahlfeld, S.A. Stothoff, Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows, 1997
11. Mary P.Anderson, William W.Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
12. Victor Streeter/ E.Benjamin Wylie, Μηχανική Ρευστών, Εκδόσεις Φούντας
13. Freeze and Cherry, Groundwater, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1979

ΠΗΓΕΣ:

14. Πληροφορίες από Μελέτες της Δημοτικής Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ζακύνθου (Δ.Ε.Υ.Α.Ζ.)

ΛΕΥΘΥΝΣΕΙΣ INTERNET:

15. www.google.com, "Travel guide of Zakynthos island in Greece "
16. www.geo.auth.gr, Παράκτια Υδροφόρα Στρώματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ