

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Μοντελοποίηση Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός
Υφάλμυρης Ζώνης Υπόγειου Υδροφορέα Περιοχής
Φαλασάρνων»**

ΔΑΟΥΛΑΡΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΚΑΤΣΑΟΥΝΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

Χανιά
Οκτώβριος 2007

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, όλους όσους με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Συγκριμένα, ευχαριστώ τον κ. Καρατζά Γεώργιο, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείου Κρήτης για την βοήθειά που μου προσέφερε, στην επιλογή του θέματος και την περεταίρω ανάπτυξή του.

Ευχαριστώ, τον κ. Βοζινάκη Κωνσταντίνο, γεωλόγο της Διεύθυνσης Εγγείων Βελτιώσεων και Υδατικών Πόρων Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης Χανίων, για την παροχή των απαραίτητων βιβλιογραφικών δεδομένων, για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης.

Ευχαριστώ, τον κ. Τριχάκη Ιωάννη, μεταπτυχιακό φοιτητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις επεξηγήσεις, που αφορούσαν το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κατά την μοντελοποίηση της υπό εξέταση περιοχής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κ. Νικολαΐδη Νικόλαο και κ. Κατσαούνη Αλέξανδρο.

Ξεχωριστά, θέλω να ευχαριστήσω, την οικογένειά μου και τους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν και με στήριξαν, για μία ακόμη φορά, και σε αυτήν την προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	4
2.1. Υδρολογικός κύκλος	4
2.2. Ταξινόμηση υπόγειων υδάτων	6
2.3. Υδροφορείς	7
2.4. Παράμετροι υδροφορέων	8
2.4.1. Πορώδες	8
2.4.2. Υδραυλική αγωγιμότητα.....	10
2.4.3. Ταχύτητα διήθησης.....	11
2.4.4. Ειδική διαπερατότητα	12
2.4.5. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας	12
2.4.6. Συντελεστής αποθηκευτικότητας.....	13
2.5. Ομοιογένεια και ισοτροπία	14
2.6. Ισοδυναμικές γραμμές.....	15
2.7. Εξίσωση υπόγειας ροής.....	17
2.8. Ροή και φρέαρ	18
2.8.1. Φρεάτια άντλησης.....	19
2.8.2. Φρεάτια παρατήρησης	20
2.8.3. Φρεάτια εμπλουτισμού	23
3. ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ	24
3.1. Κατανομή νερού και πιέσεις	24
3.2. Το φαινόμενο της υφαλμύρινης	25
3.3. Μέθοδοι προσομίωσης.....	27
3.3.1. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους.....	27
3.3.2. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας	32
3.3.3. Προσέγγιση πραγματικότητας	29
3.4. Σχηματισμός κώνου διείδυσης.....	35
3.5. Μέτρα αντιμετώπισης	37
3.5.1. Έλεγχος αντλήσεως	37
3.5.2. Τεχνητός εμπλουτισμός	37
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	41
4.1. Μοντέλο	41
4.2. Πρωτόκολο μοντελοποίησης.....	41
4.3. Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι	44
4.3.1. Προσέγγιση υδροφορέα	44
4.3.2. Προσέγγιση συστήματος ροής	45
4.4. Αριθμητικές μέθοδοι	46
4.4.1. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	46
4.4.2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	47
4.5. Θεμελιώδες μοντέλο.....	47
4.6. Κατασκευή πλέγματος	48
4.6.1. Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα	49
4.6.2. Ημιτριδιάστατα μοντέλα.....	51

4.6.3.	Τρισδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα	51
4.6.4.	Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών.....	52
4.6.5.	Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων	52
4.7.	Οριακές συνθήκες	53
4.7.1.	Προσομοίωση ορίων.....	55
4.8.	Παράμετροι εκτέλεσης μοντέλου.....	57
4.8.1.	Κριτήριο σφάλματος.....	57
4.8.2.	Βαθμονόμηση	58
4.8.3.	Πρόβλεψη	61
5.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	62
5.1.	Γεωγραφική θέση	62
5.2.	Γεωμορφολογία	63
5.3.	Γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά.....	63
5.3.1.	Γεωλογία	63
5.3.2.	Υδρογεωλογία.....	65
5.3.3.	Υδρολογία	67
5.4.	Κλιματολογικά χαρακτηριστικά.....	68
5.4.1.	Βροχόπτωση.....	70
5.4.2.	Θερμοκρασία	71
5.4.3.	Υγρασία	72
5.4.4.	Άνεμοι και ηλιοφάνεια.....	73
5.5.	Ανθρώπινες δραστηριότητες	73
5.5.1.	Πληθυσμός.....	73
5.5.2.	Οικονομικές δραστηριότητες.....	74
5.6.	Φυσικό περιβάλλον	75
5.6.1.	Ορνιθοπανίδα	76
5.6.2.	Πανίδα.....	77
5.6.3.	Χλωρίδα	77
6.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	78
6.1.	Argus ONE.....	78
6.2.	Princeton Transport Code.....	79
6.2.1.	Πεπερασμένα στοιχεία	81
6.2.2.	Πεπερασμένες διαφορές.....	82
6.2.3.	Κάθετη παράγωγος	82
6.2.4.	Παράγωγος του χρόνου.....	83
6.2.5.	Οριακές συνθήκες.....	84
6.3.	Προσομοίωση.....	86
6.3.1.	Διαδικασία προσομοίωσης.....	87
6.3.2.	Υποθετικά σενάρια	108
6.4.	Συμπεράσματα.....	110
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	115
	Παράρτημα I: Χάρτες	115
	Παράρτημα II: Στοιχεία γεωτρήσεων	120
	Παράρτημα III: Πίνακες	149
	Παράρτημα IV: Αποτελέσματα χειμερινής περιόδου.....	150

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων. Συγκεκριμένα, μελετάται το πρόβλημα στην ευρύτερη περιοχή Φαλασάρνων, όπου το φαινόμενο φαίνεται να έχει πάρει διαστάσεις. Στόχος της εργασίας, ήταν να εκτιμηθεί το μέτωπο της υφαλμύρισης, διαμέσου της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής και εν συνεχεία να γίνουν κάποιες προτάσεις για την αντιμετώπιση του. Η περιοχή είναι κατά κύριο λόγο αγροτική, γεγονός που υποδηλώνει, ότι κύρια αιτία του φαινομένου είναι η υπεράντληση του υπόγειου ύδατος, με σκοπό την άρδευση των καλλιεργειών.

Σε πρώτο, επίπεδο έγινε μία σύντομη περιγραφή για τα χαρακτηριστικά των υδροφορέων, όπως επίσης και των βασικών εξισώσεων που διέπουν την κίνηση του υπόγειου νερού. Στη συνέχεια, ακολούθησε μία εκτεταμένη αναφορά στο φαινόμενο της υφαλμύρισης, συμπεριλαμβανομένων των μαθηματικών προσεγγίσεων, που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς για τη μελέτη της συμπεριφοράς του. Επιπρόσθετα περιγράφηκαν συνοπτικά οι περισσότεροι διαδεδομένοι και αποτελεσματικοί τρόποι αντιμετώπισης του. Έπειτα, έγινε περιγραφή των γενικών αρχών, της προσομοίωσης της κίνησης των υπόγειων υδάτων καθώς και των σταδίων που περιλαμβάνει. Οι παραπάνω ενότητες αποτελούν και τον πρώτο άξονα της εργασίας, ο οποίος επικεντρώνεται στο θεωρητικό υπόβαθρο του θέματος.

Ο δεύτερος άξονας, περιλαμβάνει στοιχεία που αφορούν την περιοχή μελέτης. Αρχικά γίνεται μια περιγραφή της περιοχής, όπως επίσης και όλων παραγόντων, που θεωρείται ότι ασκούν επίδραση την ροή του υπόγειου υδροφορέα. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση, καθώς και του κώδικα με τον οποίο εκτελέστηκε σε συνδυασμό. Το μοντέλο αυτό ήταν το ARGUS ONE και εκτελέστηκε σε συνεργασία με τον κώδικα PTC. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης φαίνονται αναλυτικά, μέχρις ότου να προκύψουν τα αποτελέσματα, που αφορούν την υφιστάμενη κατάσταση. Αυτή, κρίθηκε δυσμενής και για το λόγο αυτό, εξετάστηκαν κάποια υποθετικά σενάρια, με στόχο την υποχώρηση του μετώπου της υφαλμύρισης.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν δύο σενάρια. Ο ρυθμός άντλησης από τα φρεάτια που υπάρχουν στην περιοχή να μειωθεί κατά 25% και 50% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δεν ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο δραστική αντιμετώπιση και διαχείριση του προβλήματος, όπως μέσω της εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν βασική παράμετρο του υδρολογικού κύκλου και ταυτόχρονα παράγοντα ζωτικής σημασίας για τον άνθρωπο. Πρόκειται για υδάτινες ποσότητες εντός του υπεδάφους και των διαφόρων υπόγειων γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίες λόγω της διαθεσιμότητάς τους, αλλά και της, συχνά, υψηλής τους ποιότητας, χρησιμοποιούνται για την κάλυψη διαφόρων ανθρωπίνων αναγκών. Τα τελευταία χρόνια όλο και σε συχνότερη βάση, παρατηρούνται φαινόμενα υποβάθμισης της ποιότητας του νερού των υπόγειων υδροφορέων. Το συγκεκριμένο γεγονός σε συνδυασμό με τα μελλοντικά σενάρια που προειδοποιούν για παγκόσμια έλλειψη του πόσιμου νερού, καθιστούν απαραίτητη την καλύτερη δυνατή διαχείριση των υπόγειων υδάτων, τα οποία και αποτελούν σημαντικό ποσοστό των συνολικών διαθέσιμων αποθεμάτων γλυκού νερού. Η υποβάθμιση των υπόγειων υδροφορέων μπορεί να είναι αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών, αλλά πιο συχνά έχει σαν πηγή της, την ανθρωπογενή δραστηριότητα.

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων, συνιστά δείκτη της άναρχης και κακής διαχείρισης του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Αποτελεί άμεσο επακόλουθο, της υποχώρησης του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Οι υπόγειοι υδροφορείς στον ελλαδικό χώρο δέχονται μεγαλύτερες πιέσεις από τον τομέα της γεωργίας. Υπολογίζεται ότι περίπου το 85% του υπόγειου νερού καταναλώνεται στις αγροτικές δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, ο αριθμός των γεωτρήσεων, που χρησιμοποιούνται στην άρδευση των καλλιεργειών, είναι υπερβολικά μεγάλος, όπως και οι ρυθμοί αντλήσεως του υπόγειου νερού, εξ αυτών. Παράλληλα στις περισσότερες των περιπτώσεων, πρόκειται για παράνομες γεωτρήσεις, γεγονός που καθιστά ακόμα πιο δύσκολο των έλεγχό τους. [11]

Στην υποβάθμιση των υπόγειων υδάτων έχει συμβάλει και η αυξανόμενη αστικοποίηση. Η τσιμεντοποίηση και ασφαλτοποίηση, μεγάλων πολεοδομικών συγκροτημάτων, η στεγανοποίηση των ρευμάτων και των κοιτών των χειμάρρων, αποτελούν μερικά μόνο παραδείγματα, τα οποία συνιστούν ανασταλτικό παράγοντα στο φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτες, στα μεγάλα πολεοδομικά συγκροτήματα, η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα, από επιφανειακά νερά μειώνεται έως και 80%. Το παράδοξο είναι, ότι σε αυτές τις περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί εμπλουτισμός, του υπόγειου υδροφορέα, διαμέσου διαρροών των δικτύων ύδρευσης, οι οποίες και αποτελούν σύνηθες φαινόμενο. Στη νησιωτική Ελλάδα οι πιέσεις είναι ανάλογες και είναι απόρροια της τουριστικής ανάπτυξης. [11]

Φαινόμενα υφαλμύρισης και γενικότερα υποβάθμισης των υπόγειων υδάτων, έχουν εμφανιστεί σε όλο το μήκος της ελληνικής επικράτειας. Συγκριμένα στη βόρεια Ελλάδα, υφαλμύριση έχει εντοπιστεί στους νομούς Ξάνθης και Ροδόπης, στους οποίους η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών (υπεράντληση και άναρχες γεωτρήσεις) είναι τέτοιου βαθμού, ώστε αναπόφευκτα να επακολουθήσει η διείσδυση της θάλασσας στον υδροφόρο ορίζοντα. Στον Νομό Θεσσαλονίκης, πιο έντονο πρόβλημα εντοπίζεται στη βιομηχανική ζώνη Καλοχωρίου, όπου εκτός της υφαλμύρισης, έχουν παρατηρηθεί και φαινόμενα καθιζήσεων. [12]

Στην Κεντρική Ελλάδα φαίνεται, να εντοπίζονται μεγάλα προβλήματα στον Θεσσαλικό Κάμπο. Στη νοτιοανατολική ζώνη έχουν σημειωθεί ακόμη και καθιζήσεις, ενώ η θάλασσα, εισέρχεται στον υδροφόρο ορίζοντα, σε μεγάλη απόσταση από τις ακτές, με αποτέλεσμα την έντονη υφαλμύριση του νερού. Λόγω της υπεράντλησης, η πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών είναι τόσο μεγάλη, ώστε ολόκληρες περιοχές να έχουν υποβιβαστεί ως και 25 μέτρα. Στις περιοχές Καλαμπάκας, Τρικάλων και Τυρνάβου η κατάσταση δεν θεωρείται κρίσιμη προς το παρόν. Στον Νομό Ημαθίας, λόγω της υπεράντλησης των υπόγειων νερών, ανεβαίνει το επίπεδο του αβαθούς υδροφόρου ορίζοντα με κίνδυνο μεγάλες περιοχές να πλημμυρίσουν ή να μετατραπούν σε ελώδεις αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. [12]

Στη δυτική Ελλάδα, υποβάθμιση των υπόγειων νερών σημειώνεται σε μεγάλες παράκτιες περιοχές της Ηπείρου. Στα Ιόνια νησιά εντονότερα προβλήματα υφαλμύρισης εντοπίζονται στην Κεφαλλονιά, στην Ιθάκη, στη Ζάκυνθο και στην Κέρκυρα. Αν δεν εμπλουτισθούν οι υδροφορείς και δεν αξιοποιηθούν ορθολογιστικά τα επιφανειακά νερά, η κατάσταση θα επιδεινωθεί επικίνδυνα. [12]

Στην Αττική, τα προβλήματα είναι έντονα, σε όλη την παραλιακή ζώνη από τη Βάρκιζα, τη Βουλιαγμένη ως και το Κορωπί, όπου η υφαλμύριση των νερών είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα. Η θάλασσα έχει εισχωρήσει σε βάθος ακόμη και τριών χιλιομέτρων προς την ενδοχώρα. Το σύνολο της έκτασης του Θριασίου είναι πλέον υφαλμυρωμένο, όπως και ο κάμπος του Μαραθώνα. Καθιζήσεις της τάξεως των 5 ως 15 μέτρων, λόγω υποχώρησης του υδροφόρου ορίζοντα έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή μεταξύ Μοσχάτου και Καλλιθέας. [12]

Στην Πελοπόννησο, οι πλέον υποβαθμισμένες περιοχές σε σχέση με τα υπόγεια νερά, είναι το Αργολικό Πεδίο, η περιοχή της Ερμιονίδας, η Βόρεια και η Βορειοανατολική Κορινθία, η Βόρεια και η Βορειοδυτική Αχαΐα. Στην Πελοπόννησο άρχισαν ήδη να λαμβάνονται κάποια μέτρα με την ανάθεση μελετών και την κατασκευή έργων που ίσως αναστρέψουν την κατάσταση. [12]

Στη νησιωτική Ελλάδα, η υπεράντληση των υπόγειων νερών έχει δημιουργήσει προβλήματα υφαλμύρισης σχεδόν σε όλους τους κάμπους των νησιών. Στην Κρήτη η περιοχή της Μεσσαράς κρίνεται η πλέον προβληματική από πλευράς τόσο της ποσότητας όσο και της ποιότητας υπόγειων νερών, ενώ έχουν σημειωθεί και αρκετές καθιζήσεις από την υποχώρηση του υδροφόρου ορίζοντα. Ήδη στην περιοχή προωθείται η κατασκευή φραγμάτων. Σοβαρά είναι τα προβλήματα στη Χίο και στη Νάξο. [12]

Ένα πρώτο βήμα στην αντιμετώπιση του προβλήματος, αποτελούν τα πιλοτικά προγράμματα, που έχουν αναλάβει τα πανεπιστημιακά ιδρύματα της χώρας, με στόχο την κατασκευή έργων, που θα συμβάλουν στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών και παράλληλα στην αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων. Παρόλα αυτά το έλλειμμα πολιτικής, γύρω από αυτά τα ζητήματα είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να συρρικνώνονται σημαντικά οι οιοσδήποτε προσπάθειες αντιμετώπισης και διαχείρισης. [12]

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1. Υδρολογικός κύκλος (Hydrological cycle)

Ο υδρολογικός κύκλος, γνωστός και ως κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της γης, την ατμόσφαιρα και το υπέδαφος. Το νερό της γης βρίσκεται διαρκώς σε κίνηση και σε ανταλλαγή από την υγρή μορφή σε αέρια ή σε πάγο και αντίστροφα. Το σύνολο των διεργασιών που συνιστούν τον υδρολογικό κύκλο, συντελούνται εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια και σε αυτές οφείλεται η ύπαρξη ζωής στον πλανήτη, τουλάχιστον, έτσι όπως αυτή έχει διαμορφωθεί σήμερα.

Ο κύκλος του νερού, δεν έχει αρχή ή τέλος, αλλά αποτελεί αδιαμφισβήτητο γεγονός, ότι η κινητήριος δύναμη για την εφαρμογή του φαινομένου είναι ο ήλιος. Εξαιτίας της ενέργειας του ηλίου, το νερό που περιέχεται εντός των υδάτινων αποδεκτών και του εδάφους, θερμαίνεται, εξατμίζεται μερικώς και ανυψώνεται με τη μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμα λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα και επειδή πολύ συχνά δεν είναι δυνατή η διάκριση της από την εξάτμιση, χαρακτηρίζεται συνολικά ως εξατμισοδιαπνοή. Μικρό ποσοστό υδρατμών στη ατμόσφαιρα είναι αποτέλεσμα εξάχνωσης, κατά την οποία μόρια πάγου ή χιονιού μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς, χωρίς να διέλθουν από την υγρή μορφή. [13]

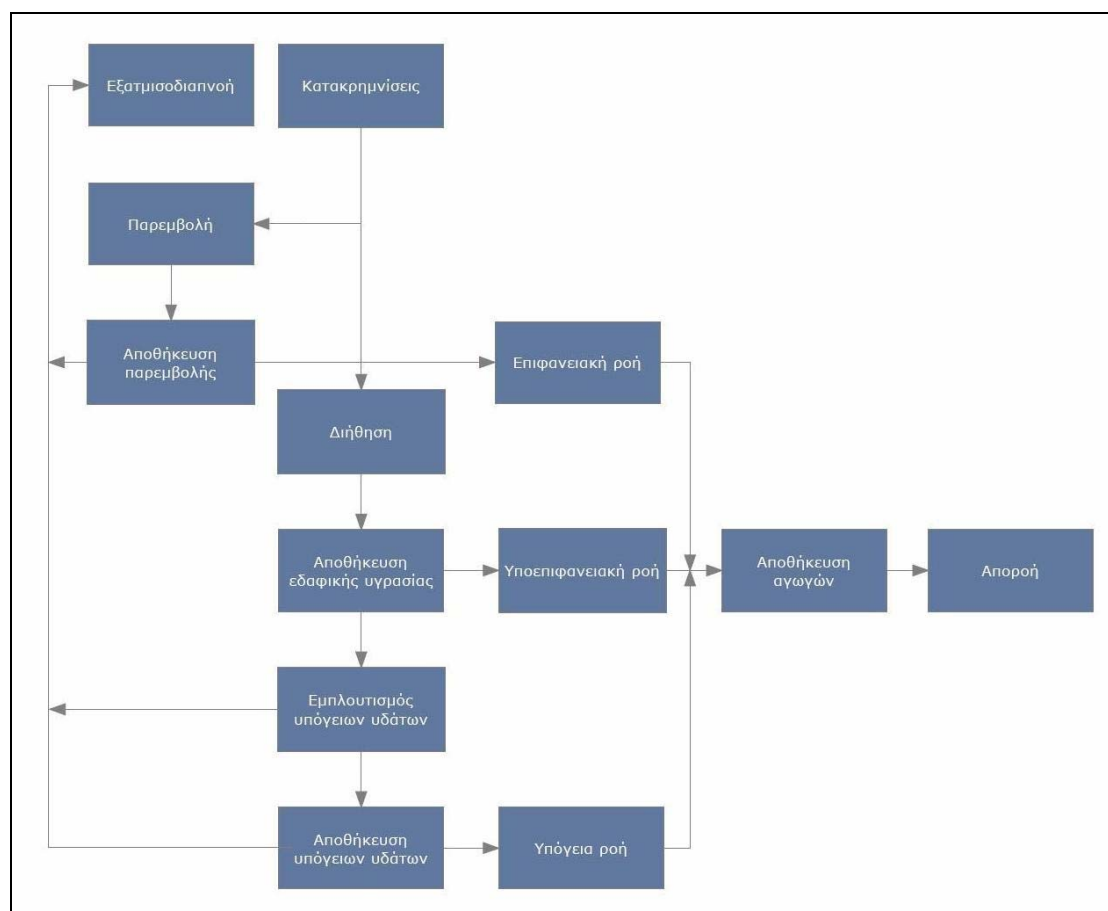
Ανοδικά ρεύματα αέρα οδηγούν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου λόγω μικρότερων πιέσεων επέρχεται μείωση της θερμοκρασίας. Εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας, μέρος των υδρατμών συμπυκνώνεται σχηματίζοντας σύννεφα. Ρεύματα αέρα κινούν τα σύννεφα περιμετρικά της υδρογείου, με αποτέλεσμα συχνά να συγκρούονται, να μεγαλώνουν και τελικά εξαιτίας του βάρους τους, να επανέρχονται στη γη με τη μορφή κατακρημνισμάτων. [13]

Η μεγαλύτερη ποσότητα των κατακρημνισμάτων καταλήγει απευθείας στις επιφανειακές υδάτινες μάζες. Διαφορετικά καταλήγει και πάλι σε αυτές, ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος, μέσω της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού, βρίσκει και πάλι δίοδο προς την επιφάνεια με τη μορφή των πηγών. Το υπόλοιπο μέρος του υπόγειου νερού εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι δύναται να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και σε αυτήν, την περίπτωση, όμως, το νερό συνεχίζει να κινείται και με την παρέλευση του χρόνου, μέρος του, θα οδηγηθεί στους επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. [13]

Συνεπακόλουθα, το νερό των υδάτινων αποδεκτών θα ακολουθήσει και πάλι την ίδια πορεία προς την ατμόσφαιρα, με πριν, ώστε να συντελεστεί εκ νέου ο κύκλος του νερού. Κάπως έτσι, θα μπορούσε να περιγραφεί εν τάχει, η αλληλουχία φαινομένων που συνιστούν τον υδρολογικό κύκλο. Στα σχήματα που ακολουθούν (Εικόνα 2.1 και Εικόνα 2.2) φαίνονται και γραφικά πλέον, όλα όσα περιγράφονται παραπάνω.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση υδρολογικού κύκλου, [13]



Εικόνα 2.2: Διαγραμματική αναπαράσταση υδρολογικού κύκλου, [1]

2.2. Ταξινόμηση υπόγειων υδάτων (Underground water Classification)

Τα υπόγεια νερά αποτελούν υδάτινες ποσότητες, αποθηκευμένες ή εν κινήσει, στο υπέδαφος και στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Καθώς το νερό διηθείται προς το υπέδαφος, συνήθως, σχηματίζει μια ακόρεστη και μια κορεσμένη ζώνη.

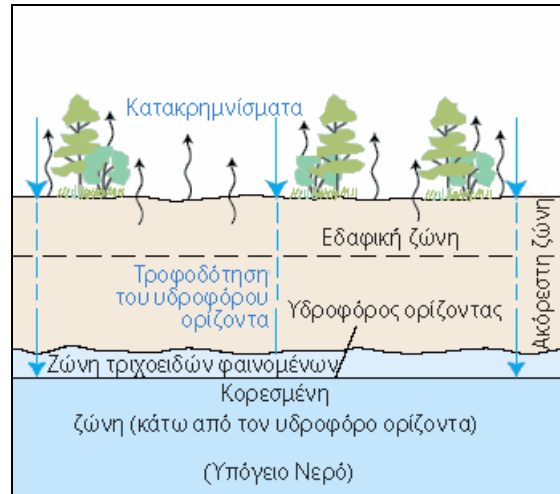
▶ Ακόρεστη ζώνη (Unsaturated zone)

Στην ακόρεστη ζώνη, οι εδαφικοί πόροι δεν καταλαμβάνονται μόνο από νερό, αλλά ταυτόχρονα και αέρα. Δηλαδή, δεν είναι ολοκληρωτικά πληρωμένοι με νερό, με εξαίρεση κάποιες μεμονωμένες περιπτώσεις πλημμύρας, όπου παρατηρείται πλήρωση τους, φαινόμενο, όμως, παροδικό και μικρής διάρκειας. Το ανώτερο μέρος της ακόρεστης ζώνης, συμπίπτει με την εδαφική ζώνη. Η εδαφική ζώνη, εκτίνεται από την επιφάνεια του εδάφους, μέχρι το τέλος του ριζικού συστήματος των φυτών. Έχει βάθος λίγα μόνο μέτρα και το νερό που περιέχεται σε αυτήν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα φυτά. Εντός των ορίων της ακόρεστης ζώνης, εντοπίζεται και η ζώνη των τριχοειδών φαινομένων. Συγκεκριμένα η έκτασή της, οριοθετείται μεταξύ του υδροφόρου ορίζοντα και του ύψους, όπου παρατηρούνται τριχοειδή φαινόμενα. Το ύψος αυτό διακυμαίνεται, ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους εδαφών, από μερικά χιλιοστά έως και ένα μέτρο. [1]

▶ Κορεσμένη ζώνη (Saturated zone)

Στην κορεσμένη ζώνη το σύνολο του όγκου των πόρων και των ρωγμών των πετρωμάτων, πληρώνεται με νερό και χαρακτηρίζεται από πίεση μικρότερη της υδροστατικής. Ο όρος υπόγειο νερό, χρησιμοποιείται εξίσου συχνά για να περιγράψει αυτή τη ζώνη. Το ανώτερο όριο της κορεσμένης ζώνης, καλείται υδροφόρος ορίζοντας και η αναπτυσσόμενη πίεση σε αυτό το σημείο, είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί το σύνορο μεταξύ κορεσμένης και ακόρεστης ζώνης. Ο χώρος αποθήκευσης του υπόγειου νερού, αποδίδεται με τον όρο υδροφορέας ή διαφορετικά υδροφόρο στρώμα. Πρόκειται για υπεδάφιο σχηματισμό, στον οποίο περιέχονται σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών, κορεσμένων σε νερό, το οποίο τροφοδοτεί φρέατα και πηγές. Λόγω της μεγάλης έκτασης, που καταλαμβάνει ένας υδροφορέας, θα μπορούσε να περιγραφεί και ως μια, μεγάλων διαστάσεων, υπόγεια δεξαμενή. [1]

Στο σκαρίφημα που ακολουθεί (Εικόνα 2.3) γίνεται μια απόπειρα σχηματικής αναπαράστασης του υπεδάφους, σχετικά με το χώρο που καταλαμβάνουν, η κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη, καθώς και οι επιμέρους ζώνες, που περιέχονται εντός των ορίων, αυτών. Όπως, φαίνεται στο σχήμα και σε συμφωνία, με όλα όσα έχουν ήδη αναφερθεί, το υπόγειο νερό, επί της ουσίας, ταυτίζεται με την κορεσμένη ζώνη, ενώ το ποσοστό του νερού που περιέχεται στην ακόρεστη ζώνη, είναι σημαντικά μικρότερο. Ανάμεσα στις δύο ζώνες παρεμβάλλεται ο υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος, άλλωστε, αποτελεί και το φυσικό τους σύνορο. [1]



Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, [13]

2.3. Υδροφορείς (Aquifers)

Υπενθυμίζεται ότι, ως υδροφορέας χαρακτηρίζεται ο χώρος αποθήκευσης του υπόγειου νερού και συνιστά σχηματισμό σημαντικών ποσοτήτων διαπερατών υλικών, κορεσμένων σε νερό, τα οποία προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διαπερατών υλικών αποτελούν οι χάλικες και η άμμος. Οι υδροφορείς διακρίνονται σε ελεύθερους και περιορισμένους (ή αρτεσιανούς), διάκριση η οποία βασίζεται στη θέση του υδροφόρου ορίζοντα. [1]

► Ελεύθερος υδροφορέας (Unconfined aquifer)

Στον ελεύθερο υδροφορέα (Εικόνα 2.4), η ανώτερη επιφάνεια συμπίπτει με τον υδροφόρο ορίζοντα.



Εικόνα 2.4: Ελεύθερος υδροφορέας, [26]

► Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας (Confined aquifer)

Στον περιορισμένο υδροφορέα, το νερό περιορίζεται από την άνω και κάτω επιφάνειά του, εξαιτίας της εκεί παρουσίας αδιαπέραστων ή έστω μικρής διαπερατότητας στρωμάτων. Άμεσο επακόλουθο είναι το νερό να βρίσκεται υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής.



Εικόνα 2.5: Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας, [26]

2.4. Παράμετροι υδροφορέων (Aquifer parameters)

Υπάρχει μια σειρά παραμέτρων, οι οποίες αποτελούν χαρακτηριστικά ενός υδροφορέα και μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητά του, να συγκρατεί και να μετακινεί νερό. Ακολουθώντας, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των πιο σημαντικών από αυτές.

2.4.1. Πορώδες (Porosity)

Ως πορώδες ορίζεται ο λόγος του όγκου των κενών (πόρων, μικρορωγμών κλπ.) προς το συνολικό όγκο του δείγματος. Όπως και η πυκνότητα, εξαρτάται από τον τρόπο και τις συνθήκες σχηματισμού των πετρωμάτων, καθώς και τις διεργασίες που επιτελούνται κατά τη γένεσή τους (διαγένεση, αποσάθρωση – εξαλλοίωση). Σαν παράμετρος, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι, επηρεάζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του δείγματος. [32]

► Ολικό πορώδες (Total Porosity)

Για τον προσδιορισμό του ολικού πορώδους, λαμβάνεται υπόψη το σύνολο του όγκου των κενών, ανεξάρτητα αν αυτά θεωρούνται μικρά ή μεγάλα, αν επικοινωνούν μεταξύ τους ή είναι τυφλά και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{V_v}{V_0} \quad (2.1)$$

Όπου, n : ολικό πορώδες, []

V_v : όγκος των κενών του δείγματος, [L^3]

V_0 : συνολικός όγκος του δείγματος, [L^3]

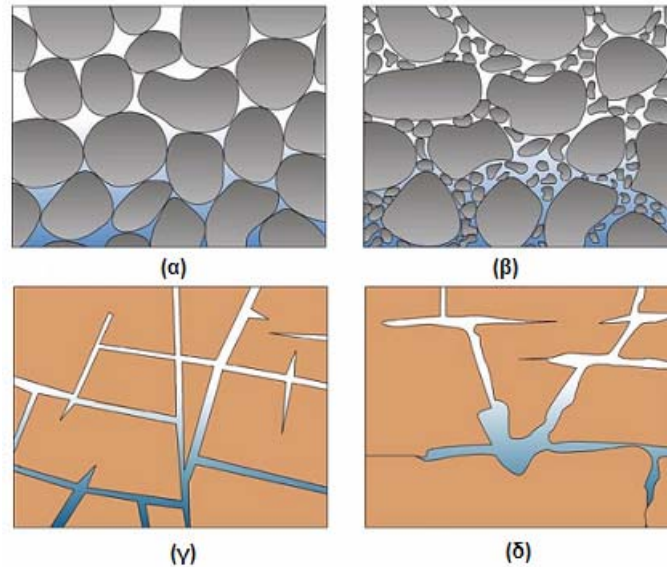
► Ενεργό ή ανοικτό πορώδες (Effective porosity)

Για τον προσδιορισμό του ενεργού πορώδους, λαμβάνεται υπόψη ο όγκος του συνόλου των κενών, που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του ρευστού, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_e = \frac{V_v}{V_0} \quad (2.2)$$

Όπου, n_e : ενεργό πορώδες, []
 V_v : όγκος νερού εντός ενεργών πόρων δείγματος, [L³]
 V_0 : συνολικός όγκος δείγματος, [L³]

Το πορώδες, των μη συνεκτικών υλικών, ή διαφορετικά πρωτογενές πορώδες, εξαρτάται από παράγοντες, όπως είναι η κοκκομετρική σύνθεση του δείγματος, η διάταξη και το σχήμα των κόκκων του. Το πορώδες των πετρωμάτων, γνωστό και ως δευτερογενές πορώδες, δημιουργείται στο εσωτερικό τους, εξαιτίας ρωγματώσεων.



Εικόνα 2.6: Διαφορετικά συστήματα πορώδους, [27]

(α): Ομοιόμορφοι κόκκοι, διατεταγμένοι έτσι, ώστε να δημιουργούνται ξεχωριστά συστήματα πορώδους.
 (β): Κόκκοι διαφόρων μεγεθών και σχημάτων, αραιά διατεταγμένοι ώστε να υπάρχει κυκλοφορία ρευστού.
 (γ): Πορώδες στο εσωτερικό πετρώματος, λόγω αποσάθρωσης
 (δ): Πορώδες στο εσωτερικό πετρώματος, λόγω διάβρωσης.

Ενδεικτικά, δίνονται παρακάτω (Πίνακας 2.1) κάποιες τυπικές τιμές πορώδους για διάφορα υλικά.

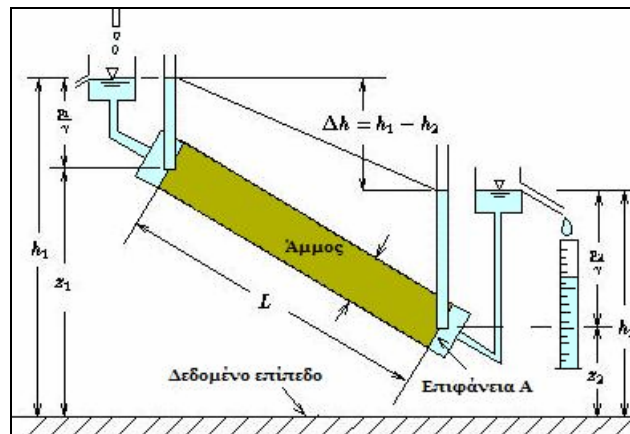
Υλικό	Ολικό πορώδες
Μη συνεκτικά ιζήματα	
Χαλίκι	0,25 – 0,40
Άμμος	0,25 – 0,50
Ιλύς	0,35 – 0,50
Άργιλος	0,40 – 0,70
Πετρώματα	
Αποσαθρωμένος βαλσάτης	0,05 – 0,50
Καρστικός ασβεστόλιθος	0,05 – 0,50
Αμμόλιθος	0,05 – 0,30
Δολομιτικός ασβεστόλιθος	0,00 – 0,20
Σχιστόλιθος	0,00 – 0,10
Αποσαθρωμένος κρυσταλλικός βράχος	0,00 – 0,10
Πυκνός κρυσταλλικός βράχος	0,00 – 0,05

Πίνακας 2.1: Εύρος τιμών πορώδους για τα διάφορα υλικά, Freeze and Cherry 1997, [28]

2.4.2. Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity)

► Νόμος του Darcy (Darcy's Law)

Ο Henry Darcy (1803-1858) μελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζόντιων στρωμάτων άμμου, που χρησιμοποιούνταν παλιότερα, ως υδατικά φίλτρα. Συγκεκριμένα για τα πειράματά του, χρησιμοποίησε μια διάταξη ανάλογη με αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα (Εικόνα 2.7). Βασικά συστατικά μέρη, μιας τέτοιας διάταξης είναι ένας σωλήνας διατομής A και ένας ογκομετρικός κύλινδρος. Ο σωλήνας περιέχει πορώδες υλικό (άμμο) κορεσμένο με νερό. Ο ογκομετρικός κύλινδρος χρησιμεύει για τον υπολογισμό του όγκου του νερού που διαπερνά το πορώδες υλικό στη μονάδα του χρόνου. [14]



Εικόνα 2.8: Το πείραμα του Darcy, [14]

Ο Darcy μετά από την εκτέλεση αλληπάλληλων πειραμάτων διαπίστωσε, ότι ο ρυθμός ροής (Q/A) διαμέσου πορώδους υλικού είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή K , ο οποίος χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μήκους της πορείας της ροής. Το συμπέρασμα αυτό, αποτελεί τον νόμο του Darcy και εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \quad \text{ή} \quad q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (2.3)-(2.4)$$

Όπου, Q : ο ρυθμός παροχής, [$L^3 T^{-1}$]
 A : η επιφάνεια, [L^2]
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα, [LT^{-1}]
 Δh : η απώλεια φορτίου, [L]
 L : το μήκος της στήλης, [L]
 q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή, [LT^{-1}]

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το νερό κινείται από περιοχές υψηλού δυναμικού σε περιοχές χαμηλού δυναμικού, ενώ το υδραυλικό φορτίο ενός τυχαίου σημείου του πορώδους υλικού ορίζεται ως εξής:

$$h = \frac{p}{\gamma} + z \quad (2.5)$$

Όπου, p : η υδροστατική πίεση, [$ML^{-1}T^{-2}$]
 γ : το ειδικό βάρος του νερού, [$ML^{-2}T^{-2}$]
 z : το υψόμετρο του σημείου από τον οριζόντιο άξονα αναφοράς, [L]

2.4.3. Ταχύτητα διήθησης (Seepage velocity)

Στο νόμο του Darcy ο λόγος Q/A , αντιστοιχίζεται στην παροχή που περνά από τη μονάδα επιφάνειας της διατομής και ισούται με την ταχύτητα q , γνωστή σαν ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή. Κατά τον υπολογισμό αυτής της ταχύτητας γίνεται η παραδοχή ότι η ροή πραγματοποιείται διαμέσου της συνολικής επιφάνειας του μέσου και δε λαμβάνονται υπόψη το στερεό υλικό και οι πόροι. Σε ένα πορώδες, όμως υλικό, η ροή περιορίζεται, επί της ουσίας, εντός του χώρου των πόρων. [1] Σ' αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα διήθησης, η οποία είναι και η πραγματική ταχύτητα, ορίζεται ως ακολούθως:

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -K \frac{dh}{dl} \quad (2.6)$$

Όπου, q_p : η ταχύτητα διήθησης, $[LT^{-1}]$
 Q : ο ρυθμός παροχής, $[L^3T^{-1}]$
 A : η επιφάνεια, $[L^2]$
 n : το πορώδες, $[]$
 q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή, $[LT^{-1}]$
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα, $[LT^{-1}]$
 dh : η απώλεια φορτίου, $[L]$
 dl : το μήκος της στήλης, $[L]$
 dh/dl : υδραυλική κλίση, $[]$

► Κριτήριο εφαρμογής του νόμου του Darcy

Ο νόμος του Darcy, αποτελεί εμπειρικό νόμο και συνεπακόλουθα δεν έχει απεριόριστο πεδίο εφαρμογής. Ισχύει, μόνο στις περιπτώσεις, όπου ο αριθμός Reynolds έχει τιμή μικρότερης της κρίσιμης. Ο αριθμός Reynolds για ροή σε πορώδες υλικό ορίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{|q|d_{10}}{v} \quad (2.7)$$

Όπου, Re : ο αριθμός Reynolds, $[]$
 q : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή, $[LT^{-1}]$
 v : το κινηματικό ιξώδες, $[L^2T^{-1}]$
 d_{10} : η χαρακτηριστική διάμετρος των κόκκων¹, $[L]$

Για να ισχύει ο νόμος του Darcy, θα πρέπει η τιμή του αριθμού Reynolds, να είναι μικρότερη του ενός. Στην πράξη, έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, με μικρό ποσοστό σφάλματος και για τιμές μέχρι δέκα. Για την περίπτωση, της ροής υπόγειων υδάτων ο αριθμός Reynolds είναι πάντα μικρότερος του ενός και κατά συνέπεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Darcy, ελεύθερα και χωρίς καμία προϋπόθεση. Ιδιαίτερη προσοχή, χρειάζεται στις περιπτώσεις, όπου η υδραυλική κλίση είναι μεγάλη (πχ. κοντά σε φρέαρ άντλησης) ή, η ροή είναι τυρβώδης (πχ. βαλσάτης ή ασβεστόλιθος με μεγάλα ανοίγματα). [1]

¹ Τέτοια, ώστε το 10% του πορώδους υλικού κατά βάρος, να απαρτίζεται από κόκκους με διάμετρο μικρότερη από τη d_{10} , ενώ το υπόλοιπο 90%, από κόκκους με διάμετρο μεγαλύτερη, αυτής. Υπολογίζεται από την κοκκομετρική καμπύλη του υλικού.

2.4.4. Ειδική διαπερατότητα (Permeability)

Πειραματικά αποδεικνύεται, για ένα ιδεώδες, ομοιόμορφο πορώδες μέσο, το οποίο αποτελείται από γυάλινες σφαίρες διαμέτρου d , ομοιόμορφα κατανεμημένες και δια μέσου του οποίου μελετάται η ροή διαφόρων ρευστών, ότι η ειδική παροχή είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου d , ανάλογη του ειδικού βάρους του εκάστοτε ρευστού και αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους του. Ο συνδυασμός των παραπάνω, με το συμπέρασμα που προέκυψε από το πείραμα του Darcy, ότι δηλαδή η ειδική παροχή είναι ανάλογη με την υδραυλική κλίση, οδηγεί σε μία νέα έκφραση του νόμου του Darcy. [1]

$$q = - \frac{Cd^2\rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (2.8)$$

Όπου, d : η διάμετρος κόκκων, [L]
 ρ : η πυκνότητα ρευστού, [ML⁻³]
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας, [LT⁻²]
 μ : το ιξώδες του ρευστού, [MT⁻¹]
 dh/dl : η υδραυλική κλίση, []
 C : συντελεστής σχετιζόμενος με την ταξινόμηση μεγέθους, τη σφαιρικότητα και τη διάταξη των κόκκων, []

Συσχετίζοντας την εξίσωση (2.8) με την εξίσωση του Darcy (2.4 & 2.6) προκύπτει μια νέα σχέση για την υδραυλική αγωγιμότητα:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2.9)$$

Όπου, k : η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου (= Cd^2), [L²]

Η ειδική διαπερατότητα είναι συνάρτηση, μόνο του πορώδους μέσου (γεωμετρία και διάταξη των κόκκων) και σε αντίθεση με την υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας.

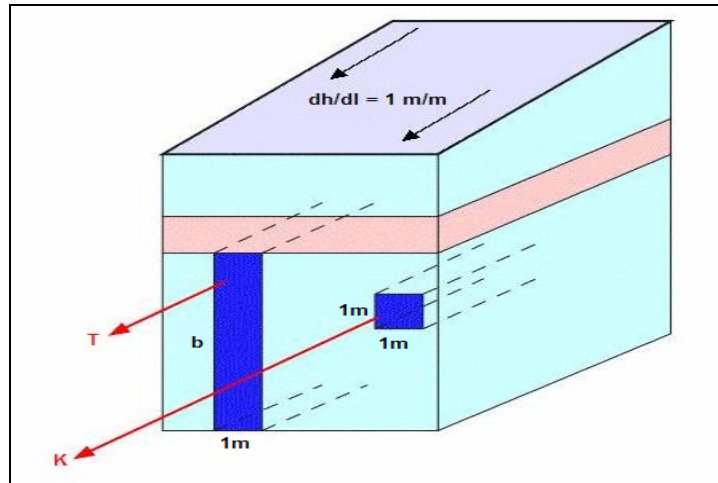
2.4.5. Συντελεστής μεταβιβασιμότητας (Transmissivity)

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας, ορίζεται σαν τον ρυθμό με τον οποίο, νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα, με μοναδιαία κλίση. [1] Η παραπάνω διατύπωση αποτυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$T = Kb \quad (2.10)$$

Όπου, T : ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας, [L²T⁻¹]
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα, [LT⁻¹]
 b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα, [L]

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση (2.10), ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας είναι άμεσα ανάλογος προς το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων. Συνεπώς, για έναν περιορισμένο υδροφορέα δεδομένου πάχους, ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας παραμένει σταθερός. Δεν ισχύει το ίδιο και για την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα, εφόσον το πάχος του είναι μεταβλητό και εξαρτάται από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 2.9: Μεταβιβασιμότητα περιορισμένου υδροφορέα, [29]

2.4.6. Αποθηκευτικότητα (Storativity)

Σαν αποθηκευτικότητα ορίζεται, η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος των υδροφόρων στρωμάτων και εξαρτάται, από το είδος τους (περιορισμένος ή ελεύθερος υδροφορέας) και από τους υφιστάμενους, κατά περίπτωση, μηχανισμούς αποθήκευσης (συμπίεστικότητα ύδατος, συμπίεστικότητα υλικού, πλήρωση ή εκκένωση των πόρων). [1]

Στην περίπτωση του περιορισμένου υδροφορέα, η ικανότητα αποθήκευσης επηρεάζεται από τη συμπίεστικότητα του εδάφους και του υλικού, εφόσον δεν υπάρχουν πόροι. Έτσι, ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας σε ένα κορεσμένο πορώδη σχηματισμό, εκφράζει το ποσό του αποθηκευόμενου ύδατος που αποδίδεται από μια μονάδα όγκου του υδροφόρου στρώματος για μία μονάδα πτώσης του φορτίου. Δηλαδή:

$$S_0 = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (2.11)$$

Όπου, S_0 : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, $[L^{-1}]$
 ρ : ο πυκνότητα του νερού, $[ML^{-3}]$
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας, $[LT^{-2}]$
 α : συμπίεστικότητα εδάφους, $[LT^2M^{-1}]$
 β : συμπίεστικότητα ύδατος, $[LT^2M^{-1}]$
 n : πορώδες, $[]$

Στον πίνακα που ακολουθεί, (Πίνακας 2.2) δίνονται κάποιες τυπικές τιμές για τη συμπίεστικότητα επιλεγμένων εδαφών, καθώς και του νερού.

Τύπος εδάφους	Συμπίεστικότητα εδάφους (m^2/N)
Αργίλος	$10^{-6} - 10^{-8}$
Άμμος	$10^{-7} - 10^{-9}$
Χαλίκια	$10^{-8} - 10^{-10}$
	Συμπίεστικότητα νερού (m^2/N)
Νερό	$4,4 \cdot 10^{-10}$

Πίνακας 2.2: Τυπικές τιμές συμπίεστικότητας, [1]

Τελικά ο συντελεστής συνολικής αποθηκευτικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$S = \int_0^b S_0(z) dz \quad (2.12)$$

Όπου, S : συντελεστής συνολικής αποθηκευτικότητας, []
 S_0 : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, [L^{-1}]
 b : το πάχος του υδροφορέα, [L]
 z : το υψόμετρο του σημείου από τον οριζόντιο άξονα αναφοράς, [L]

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία οι τιμές για τη συνολική αποθηκευτική ικανότητα των περιορισμένων υδροφορέων κυμαίνονται μεταξύ 10^{-2} και 10^{-4} . [1] Συνεπώς, μπορεί να επιλεγεί μια τιμή εντός του προτεινόμενου εύρους, ανάλογα και με τα υπόλοιπα δεδομένα που αφορούν τον υδροφορέα, αντί να επιλυθεί μια δύσκολη ολοκληρωτική σχέση σαν την (2.12).

Για την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα, η ικανότητα αποθηκευτικότητας επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από το μηχανισμό πλήρωσης ή εκκένωσης των πόρων και κατά πολύ λιγότερο από τους άλλους δύο μηχανισμούς αποθήκευσης (συμπιεστότητα υλικού και ύδατος). Μαθηματικά περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$S = \int_0^b S_0(z) dz + n_{ef} \cong n_{ef} \quad (2.13)$$

Όπου, S : συντελεστής συνολικής αποθηκευτικότητας, []
 S_0 : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, [L^{-1}]
 b : το πάχος του υδροφορέα, [L]
 z : το υψόμετρο του σημείου από τον οριζόντιο άξονα αναφοράς, [L]
 n_{ef} : το ενεργό πορώδες, []

Το εύρος τιμών που δίνεται από τη βιβλιογραφία για την ολική αποθηκευτικότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα περιλαμβάνει τις τιμές μεταξύ 0,15 και 0,60. [1] Επιλέγεται και πάλι μία εκ των προτεινόμενων τιμών, που θεωρείται ότι είναι περισσότερο κατάλληλη για την εκάστοτε περίπτωση.

2.5. Ομοιογένεια και ισοτροπία (Homogeneity and isotropy)

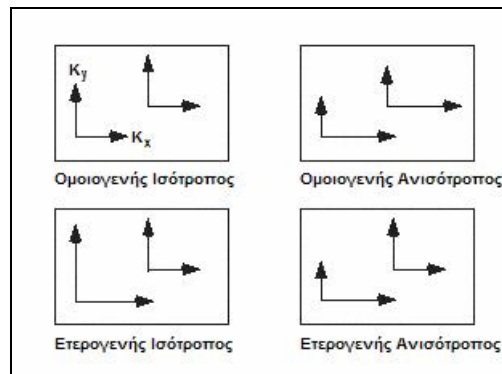
Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα, συνήθως μεταβάλλεται χωρικά. Ακόμα και σε δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται το ενδεχόμενο ομοιογένειας ή ετερογένειας του υδροφορέα, ενώ στη δεύτερη το ενδεχόμενο ισοτροπίας ή ανισοτροπίας του. [1]

► Ομοιογενής - Ετερογενής υδροφορέας (Homogeneous – Heterogeneous aquifer)

Ένας υδροφορέας, προκειμένου να χαρακτηριστεί ως ομοιογενής θα πρέπει να εμφανίζει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε όλη την έκτασή του. Φαινόμενο, ιδιαίτερα σπάνιο. Οι υδραυλικές ιδιότητες των περισσότερων υδροφορέων, μεταβάλλονται χωρικά, γεγονός που υποδηλώνει, ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των υδροφορέων στη φύση, είναι ετερογενείς. [1]

► Ισότροπος – Ανισότροπος υδροφορέας (Isotropic – Anisotropic aquifer)

Ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως ισότροπος όταν δεν εμφανίζει προτιμώμενες διευθύνσεις ροής. Όταν δηλαδή, η υδραυλική αγωγιμότητα δεν εξαρτάται από τη διεύθυνση της ροής. Αντίστοιχα, όταν ένας υδροφορέας παρουσιάζει διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση θεωρείται ανισότροπος. [1]



Εικόνα 2.10: Περιπτώσεις ομοιογένειας-ετερογένειας, ισοτροπίας-ανισοτροπίας, [29]

2.6. Ισοδυναμικές γραμμές (Equipotential lines)

Οι ισοδυναμικές γραμμές ενός υδροφορέα, ελεύθερου ή περιορισμένου, προκύπτουν από την ένωση των σημείων που αντιστοιχίζονται σε ίσα ολικά φορτία. Το ολικό φορτίο ενός υδροφορέα, γνωστό και ως υδραυλικό ύψος, ισοδυναμεί με το αποτέλεσμα του αθροίσματος, του δυναμικού φορτίου και του φορτίου πίεσης. Ένας χάρτης ισοδυναμικών γραμμών προσομοιάζει με ένα τοπογραφικό χάρτη, εφόσον οι ισοδυναμικές γραμμές είναι αντίστοιχες των ισοϋψών καμπυλών. Σε περίπτωση τρισδιάστατης αναπαράστασης εμφανίζονται ως ισοδυναμικές επιφάνειες. [1]

Η κλίση του υδραυλικού φορτίου ($\text{grad } h$) είναι διανυσματικό μέγεθος και έχει διεύθυνση κάθετη προς τις ισοδυναμικές γραμμές.

$$\text{grad } h = \frac{dh}{ds} \quad (2.14)$$

Σε περίπτωση που η τιμή του όρου, $\text{grad } h$ είναι ίση με μηδέν, αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει υδραυλική κλίση προς την κατεύθυνση που υποδεικνύει και επομένως δεν υφίσταται υπόγεια ροή.

Η έκφραση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου στη πλήρη διανυσματική μορφή της παρατίθεται ακολούθως:

$$\text{grad } h = i \frac{\partial h}{\partial x} + j \frac{\partial h}{\partial y} + k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.15)$$

Όπου, i, j, k τα μοναδιαία διανύσματα στην x, y και z διεύθυνση αντίστοιχα.

Σε συμφωνία με τα προηγούμενα, η διανυσματική έκφραση της υδραυλικής είναι ένας τανυστής, εννέα όρων. Δηλαδή:

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Αν, το σύστημα αξόνων συμπίπτει με τους κύριους άξονες τότε ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας γίνεται:

$$K = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Για ισότροπους υδροφορείς:

$$K = \begin{pmatrix} K & 0 & 0 \\ 0 & K & 0 \\ 0 & 0 & K \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η γενική μορφή του νόμου του Darcy έχει την ακόλουθη μορφή:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.19)$$

$$q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.21)$$

Αν οι άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας συμπίπτουν με τους άξονες του συστήματος, η ταχύτητα ροής για τις τρεις διευθύνσεις, υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.22)$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.23)$$

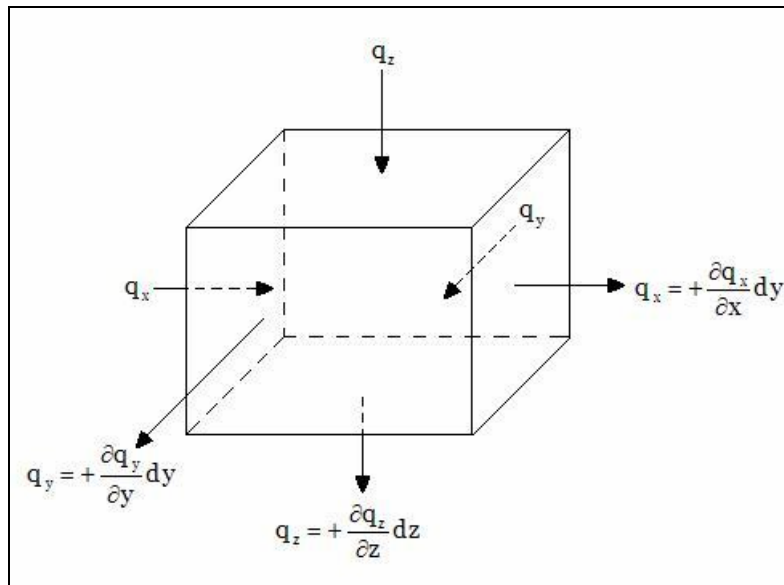
$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.24)$$

Τέλος, για ισότροπους υδροφορείς ισχύει:

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \frac{\partial h}{\partial y} - K \frac{\partial h}{\partial z} = -K \text{grad } h \quad (2.25)$$

2.7. Εξίσωση της υπόγειας ροής (Underground flow equation)

Ο νόμος του Darcy αποτελεί το θεμελιώδη νόμο της υπόγειας υδραυλικής, αλλά η εφαρμογή του δεν επαρκεί για την επίλυση όλων των προβλημάτων, καθώς παρέχει τρεις εξισώσεις για τον προσδιορισμό τεσσάρων διαφορετικών μεγεθών. Των τριών συνιστωσών της ταχύτητας διηθήσεως και του υδραυλικού φορτίου. Η τέταρτη απαιτούμενη εξίσωση, για την επίλυση αυτού του είδους των προβλημάτων προκύπτει από την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας. Σύμφωνα με αυτήν, σε ένα μικρό, μοναδιαίο όγκο κορεσμένου πορώδους υλικού, δεν υπάρχει αλλαγή στη μάζα του ρευστού.



Εικόνα 2.13: Στοιχειώδης όγκος για την εφαρμογή της αρχής διατήρησης μάζας, [1]

Εφόσον, γίνεται η παραδοχή, ότι ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας, η ροή που εισέρχεται θα ισούνται με την εξερχόμενη ροή. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} q_x dz dy + q_y dx dz + q_z dy dx &= (q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx) dz dx + (q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy) dx dz + (q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz) dy dx \\ \Rightarrow -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy dx dz - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz dx dy &= 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Από την εξίσωση (2.25) και την εξίσωση (2.26), η οποία υπολογίζει την ταχύτητα διήθησης για ισότροπους υδροφορείς συνεπάγονται τα εξής:

$$-\frac{\partial(-K\frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(-K\frac{\partial h}{\partial y})}{\partial y} - \frac{\partial(-K\frac{\partial h}{\partial z})}{\partial z} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.27)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη γενική εξίσωση μόνιμης ροής σε ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς. Στην περίπτωση που η ροή δεν είναι μόνιμη, υπεισέρχεται και ο παράγοντας της ειδικής αποθηκευτικότητας. [1] Συγκεκριμένα για μη σταθερές συνθήκες ισχύει:

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

$$\Rightarrow \frac{Sh}{\Delta t} = -\frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y \Delta t}$$

$$\Rightarrow \frac{Sh}{\Delta t} = -\frac{q_w}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow -\frac{q_w}{\Delta t} = S \frac{dh}{dt}, \Delta t \rightarrow 0 \quad (2.28)$$

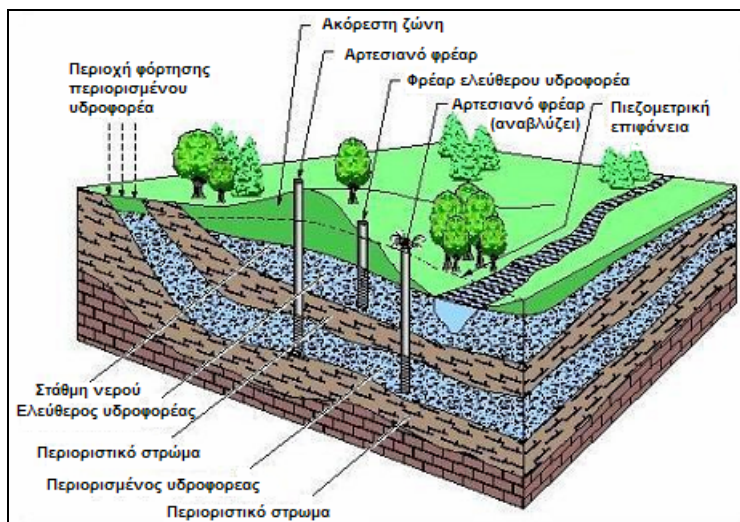
Η επεξεργασία των εξισώσεων (2.47) και (2.28), οδηγεί σε μία νέα εξίσωση, για την υπόγεια ροή, η οποία λαμβάνει υπόψη της το ενδεχόμενο οι συνθήκες ροής να μην είναι μόνιμες.

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.29)$$

2.8. Ροή και φρέαρ (Flow and well)

Τα φρεάτια είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης παρέμβασης στους υπόγειους υδροφορείς και ανάλογα με το είδος τους, επηρεάζουν διαφορετικά την υπόγεια ροή. Υπάρχουν φρεάτια που εκτίνονται μέχρι το ύψος τη στάθμης του νερού, όπου ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και άλλα, που διεισδύουν στο εσωτερικό περιορισμένων υδροφορέων. Όταν τοποθετούνται σε θέσεις, όπου ο υδροφορέας είναι περιορισμένος, ακολουθεί εκτόνωση, της εκεί αναπτυσσόμενης πίεσης, με αποτέλεσμα την ανύψωση της στάθμης του νερού κατά μήκος του φρεατίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις η πίεση είναι αρκετή ώστε το νερό να αναβλύζει στην επιφάνεια.

Περαιτέρω κατηγοριοποίηση των φρεατίων αφορά στη χρήση τους. Υπάρχουν φρεάτια, που έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την άντληση νερού, άλλα που στοχεύουν στον εμπλουτισμό ενός υδροφορέα και τέλος αυτά που αξιοποιούνται στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υδροφορέα, γνωστά και ως φρεάτια παρατήρησης. [1]

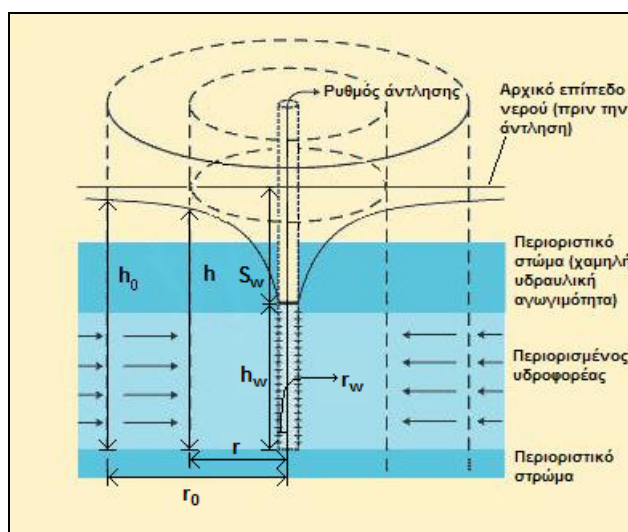


Εικόνα 2.11: Τύποι φρεατίων και υδροφορείς, [30]

2.8.1. Φρεάτια άντλησης (Pumping wells)

Ο ρυθμός με τον οποίο αντλείται το νερό, διαμέσου των φρεατίων άντλησης, είναι ο πλέον καθοριστικός παράγοντας, όσο αφορά το μέγεθος της επίδρασης που έχουν αυτά, στην υπόγεια ροή. Το μέγεθος αυτής της επίδρασης, εκφράζεται από την ακτίνα επιρροής του φρέατος και ορίζεται ως η απόσταση από το φρεάτιο, στην οποία η πτώση στάθμης του υπόγειου ύδατος, φτάνει σε σημείο, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. [1]

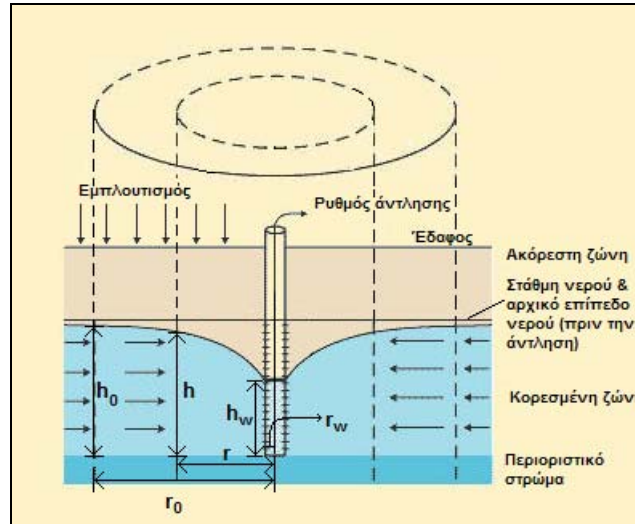
Η ροή γειτονικά του φρέατος γίνεται ακτινική, καθώς εξαιτίας της άντλησης, η επιφάνεια στην οποία κινείται το νερό μειώνεται σημαντικά. Έτσι, η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα προσομοιάζει σχηματικά με ένα κώνο, γνωστό και ως κώνο πτώσης στάθμης, ενώ ο συνολικός όγκος της περιοχής, που υπόκειται σε μεταβολή περικλείεται εντός ενός κυλίνδρου, που προκύπτει από την κυκλική επιφάνεια της ροής και το υδραυλικό ύψος. Στην περίπτωση δε, του ελεύθερου υδροφορέα, παράλληλα με τον υδροφόρο ορίζοντα σημειώνεται πτώση και του ύψους της κορεσμένης ζώνης. [1]



Εικόνα 2.12: Άντληση από περιορισμένο υδροφορέα, [31]

Θεωρώντας σταθερές συνθήκες, το υδραυλικό ύψος, σε τυχαία απόσταση από φρεάτιο, ενός περιορισμένου υδροφορέα υπολογίζεται ως εξής:

$$h = h_0 + \frac{Q}{2\pi Kb} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.30)$$



Εικόνα 2.13: Άντληση από ελεύθερο υδροφορέα, [31]

Αντίστοιχα, όταν ο υδροφορέας είναι ελεύθερος ισχύει:

$$h = \sqrt{h_0^2 + \frac{N}{2K}(r_0^2 - r^2)} + \frac{Q}{\pi K} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (2.31)$$

Όπου, h : το υδραυλικό ύψος σε απόσταση r από το φρέαρ άντλησης, [L]
 h_0 : η στάθμη ύδατος πριν την άντληση, [L]
 b : το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα, [L]
 Q : ο ρυθμός άντλησης, [L³T⁻¹]
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα, [LT⁻¹]
 r_0 : η ακτίνα επιρροής, [L]
 N : εμπλουτισμός λόγω βροχόπτωσης, [LT⁻¹]

2.8.2. Φρεάτια παρατήρησης (Observation wells)

Η μελέτη ενός υδροφορέα, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό ορισμένων βασικών παραμέτρων, οι οποίες και τον χαρακτηρίζουν. Τέτοιες είναι, η υδραυλική αγωγιμότητα, ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας και η αποθηκευτικότητα. Μια μέθοδος καθορισμού των παραπάνω παραμέτρων περιλαμβάνει, δοκιμαστική άντληση του υδροφορέα, όπου εγκαθίσταται μια σειρά φρεατίων άντλησης και φρεατίων παρατήρησης. [1] Εξετάζοντας την περίπτωση ενός περιορισμένου υδροφορέα και για συνθήκες μόνιμης ροής ισχύει η εξίσωση:

$$T = Kb = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.32)$$

Όπου, T : ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας, $[L^2T^{-1}]$

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, $[LT^{-1}]$

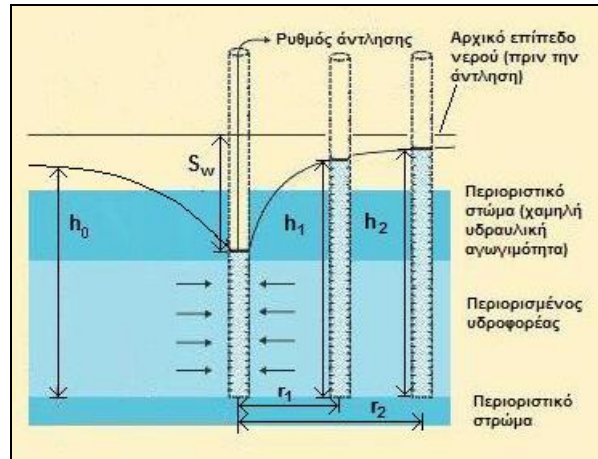
b : το πάχος του υδροφορέα, $[L]$

Q : ο ρυθμός άντλησης, $[L^3T^{-1}]$

h_1 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_1 από το φρέαρ άντλησης, $[L]$

h_2 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_2 από το φρέαρ άντλησης, $[L]$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση του Thiem και για την εφαρμογή της κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση δύο φρεατίων παρατήρησης πλησίον του φρεατίου άντλησης.



Εικόνα 2.14: Φρεάτια παρατήρησης σε περιορισμένο υδροφόρο, [31]

Η εξίσωση του Thiem για έναν ελεύθερο υδροφόρο, με συνθήκες μόνιμης ροής, παίρνει την ακόλουθη μορφή:

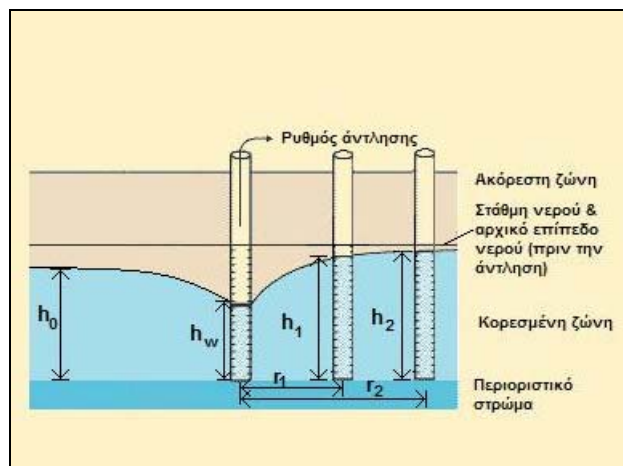
$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.33)$$

Όπου, K : η υδραυλική αγωγιμότητα, $[LT^{-1}]$

Q : ο ρυθμός άντλησης, $[L^3T^{-1}]$

h_1 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_1 από το φρέαρ άντλησης, $[L]$

h_2 : υδραυλικό ύψος σε απόσταση r_2 από το φρέαρ άντλησης, $[L]$



Εικόνα 2.15: Φρεάτια παρατήρησης σε περιορισμένο υδροφόρο, [31]

Αν οι συνθήκες ροής του εξεταζόμενου υδροφορέα, δεν είναι σταθερές, ο προσδιορισμός των απαιτούμενων μεγεθών, μπορεί να γίνει μέσω γραφικών μεθόδων. Ενδεικτικά αναφέρεται η μέθοδος Theis, η οποία και θεωρείται από τις πιο ακριβείς.

► Μέθοδος Theis (Theis method)

Σύμφωνα με τη μέθοδο Theis, η πτώση στάθμης υπολογίζεται ως εξής:

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{4\pi Kb} W(u) \quad (2.34)$$

Όπου, $W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} \dots$ (συνάρτηση φρέατος), []

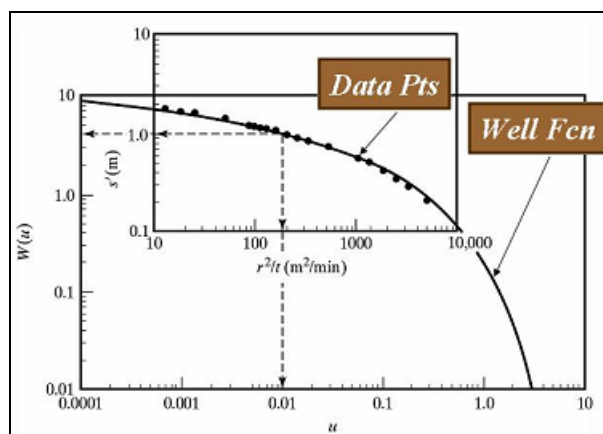
$$u = \frac{r^2 S}{4Kbt}, []$$

S: ο συντελεστής αποθήκευσης, []

t: ο χρόνος [T]

Για την εφαρμογή της γίνονται κάποιες παραδοχές. Καταρχάς, ο υδροφορέας θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) έκταση. Επίσης θα πρέπει να είναι ομοιογενής, ισότροπος και σταθερού πάχους. Πριν την έναρξη της άντλησης η επιφάνεια του υπόγειου νερού θα πρέπει, να είναι σχεδόν οριζόντια, ενώ ο ρυθμός άντλησης να είναι σταθερός. Τέλος το φρέαρ θα πρέπει να διαπερνά το σύνολο του πάχους του υδροφορέα.

Αφού εξασφαλιστούν οι παραπάνω υποθέσεις, μπορεί να ακολουθήσει η εφαρμογή της μεθόδου. Υπάρχουν πίνακες με τυπικές τιμές του u και W(u) (Πίνακας 1, βλ. Παράρτημα ΙΙΙ), από τις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί ένα γράφημα (W(u) προς f(1/u)). Άλλο ένα γράφημα μπορεί να προκύψει από τα μεγέθη που αφορούν των υδροφορέα (πτώση στάθμης προς f(t/r²)). Το δεύτερο διάγραμμα τοποθετείται πάνω από το πρώτο και μετακινείται, διατηρώντας τους άξονες σταθερούς, μέχρι να συμπίσουν τα σημεία των συναρτήσεών τους. Αφού επιτευχθεί η σύμπτωση, επιλέγεται ένα τυχαίο σημείο πάνω στο γράφημα για το οποίο, αντιστοιχίζονται τιμές εξ αμφοτέρων των συναρτήσεων και οι οποίες επαρκούν για την επίλυση των εξισώσεων.



Εικόνα 2.16: Εφαρμογή γραφικής μεθόδου Theis, [15]

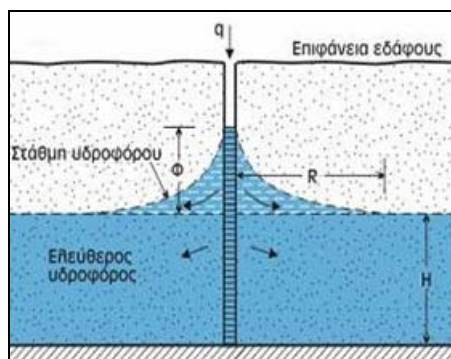
2.8.3. Φρεάτια εμπλουτισμού (Recharging wells)

Τα φρεάτια εμπλουτισμού αποτελούν μια από τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται σήμερα, στον τομέα του τεχνητού εμπλουτισμού. Ως τεχνητός εμπλουτισμός ορίζεται η ανθρώπινη παρέμβαση, προκειμένου να αυξηθεί η ποσότητα του νερού που καταλήγει με φυσικές διαδικασίες στους υπόγειους υδροφόρους. Το νερό που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό μπορεί να προέρχεται από επιφανειακά νερά, ή από παρακείμενα υδροφόρα στρώματα. [32]

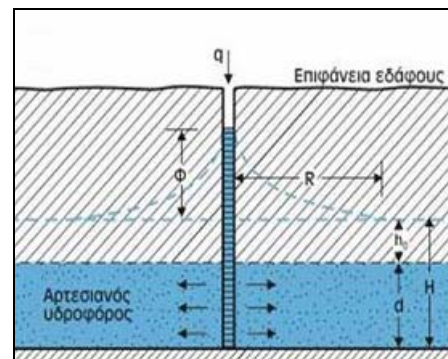
Θα πρέπει, όμως σε κάθε περίπτωση να ισχύουν κάποιες προϋποθέσεις. Αν για παράδειγμα, το νερό που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό είναι επιφανειακό, θα πρέπει να έχει εξασφαλισθεί εκ των προτέρων ότι, αυτό, υπάρχει σε επαρκή ποσότητα. Επιπλέον, η ποιότητα του νερού θα πρέπει να είναι κατάλληλη και χημικά συμβατή με αυτή του υπόγειου υδροφόρου. Τέλος, θα πρέπει να έχουν μελετηθεί οι γεωλογικές συνθήκες και η γεωμορφολογία του εδάφους, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι οι κατάλληλες για την εφαρμογή της μεθόδου. [32]

Οι λόγοι για τους οποίους, εφαρμόζεται τεχνητός εμπλουτισμός στους υπόγειους υδροφόρους είναι αρκετοί και με διαφορετικά επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Μεγαλύτερη βαρύτητα όμως, παρουσιάζουν αυτοί που εστιάζουν στην αναβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων. Συγκεκριμένα, διαμέσου του εμπλουτισμού μπορεί να επιτευχθεί η αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας υδροφόρων στρωμάτων ή συστημάτων, που διαταράχθηκε λόγω υπεράντλησης. Επίσης, είναι δυνατή η αύξηση της στάθμης του νερού σε παράκτια υδροφόρα στρώματα για την αποφυγή ή αναχαίτιση της διείσδυσης της θάλασσας και υφαλμύρινσης των υδροφορέων. Τέλος, αν κριθεί αναγκαίο, μπορεί να τροποποιηθεί η ποιότητα του υπόγειου νερού με την προσθήκη νερού διαφορετικής ποιότητας. [32]

Η εφαρμογή φρεατίων εμπλουτισμού εγγυάται όλες τις παραπάνω θετικές συνέπειες, ενώ ταυτόχρονα η τοποθέτησή τους, δεν περιλαμβάνει κινδύνους φυσικής καταστροφής του εδάφους. Απ' την άλλη πλευρά, προϋποθέτουν συνεχή και επιμελή παρακολούθηση, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος της μόλυνσης/ρύπανσης του υπόγειου ύδατος, έστω και αν περιστασιακά χρησιμοποιηθεί μολυσμένο/ρυπασμένο νερό για τον εμπλουτισμό. Επίσης σαν τεχνολογία, εξαιτίας των ιδιόμορφων συνθηκών που επικρατούν πολύ συχνά στη φύση, μπορεί να εμφανιστεί ως οικονομικά ασύμφορη. [32]



Εικόνα 2.17: Φρεάτιο εμπλουτισμού σε ελεύθερο υδροφορέα

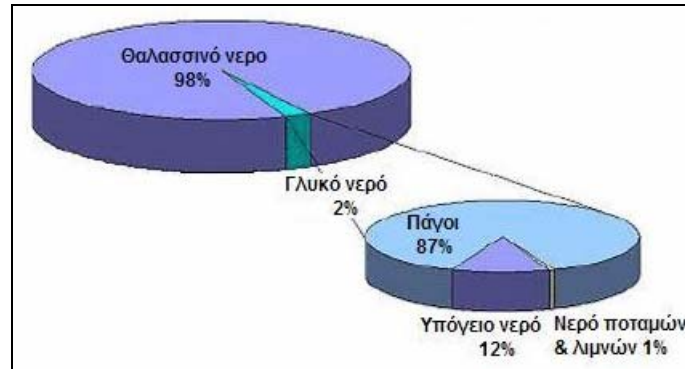


Εικόνα 2.18: Φρεάτιο εμπλουτισμού σε περιορισμένο υδροφορέα

3. ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

3.1. Κατανομή νερού και πιέσεις (Water distribution and stresses)

Ο συνολικός όγκος νερού που υπάρχει στη γη εκτιμάται γύρω στα $1460 \times 10^6 \text{ km}^3$. Απ' αυτά ο όγκος του υπόγειου νερού ανέρχεται στα $60 \times 10^6 \text{ km}^3$. Μικρό ποσοστό, αν αναλογιστεί κανείς ότι αντιστοιχεί περίπου, στο 2% του συνολικού νερού του πλανήτη. Επιπρόσθετα τα υπόγειο νερό αποτελεί το 98% του εκμεταλλεύσιμου πόρου σε υγρή κατάσταση. [33]

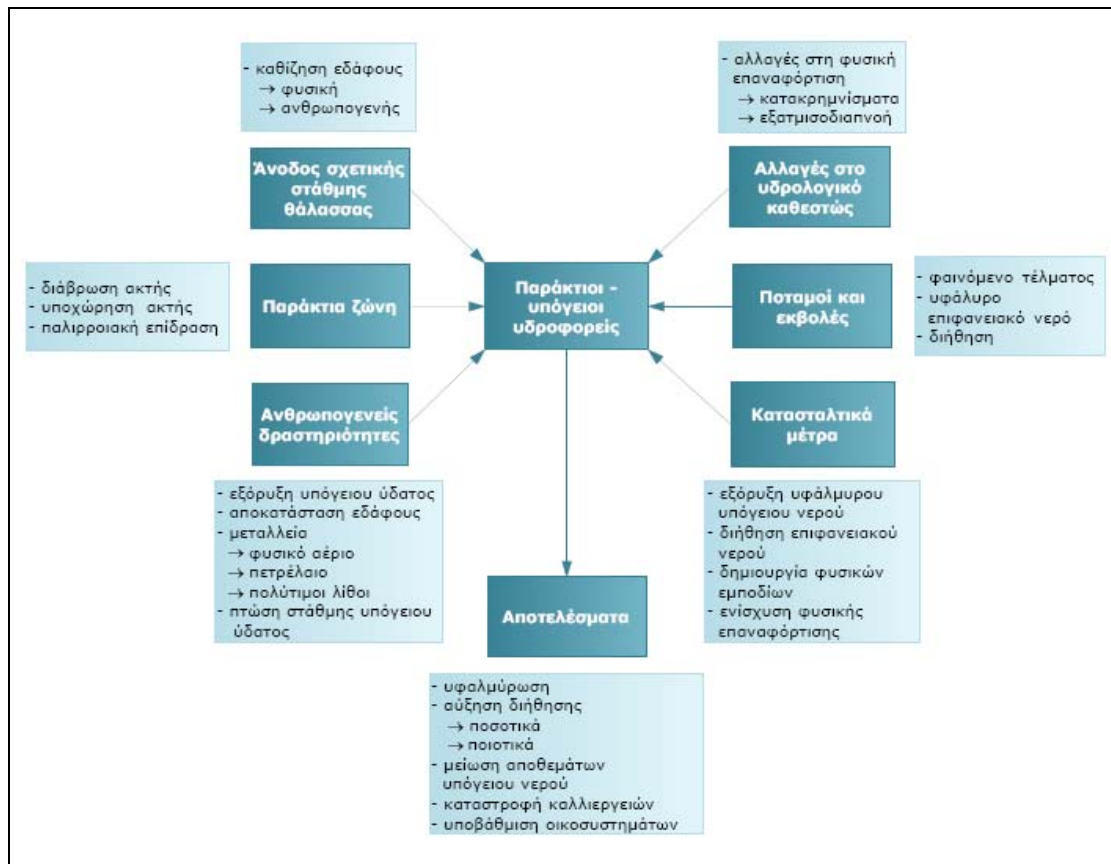


Εικόνα 3.1: Κατανομή νερού στη γη, [33]

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η οικονομική ανάπτυξη είναι μερικοί από τους λόγους που έχουν συμβάλει στην υπερβολική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων. Όσο αφορά, την εκμετάλλευση του παράκτιου, υπόγειου ύδατος, αυτή είναι απόρροια της ιδιαίτερα αυξημένης πυκνότητας σε ανθρώπινο δυναμικό, της παράκτιας ζώνης. Σχεδόν το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε απόσταση 60 km ή και λιγότερο από την ακτή. Η παραθαλάσσια ζώνη ανέκαθεν, αποτελούσε πόλο έλξης για τον άνθρωπο, εξαιτίας των πολλαπλών δυνατοτήτων που προσφέρει (ανάπτυξη γεωργίας, αλιείας, τουριστικών δραστηριοτήτων κ.α.). [4]

Από το σύνολο του νερού που χρησιμοποιείται στην ύδρευση και άρδευση, το $\frac{1}{3}$ προέρχεται από υπόγειους υδροφορείς. Το ποσοστό αυτό αυξάνει συνεχώς, ανάλογα με την απαίτηση σε νερό, καθώς, διαθέτει υψηλή ποιότητα σε σχέση με το νερό των επιφανειακών υδροφορέων και ταυτόχρονα τα αποθέματα του είναι μεγαλύτερα. Απ' την άλλη πλευρά, τα υπόγεια ύδατα, παρουσιάζουν πολύ συχνά υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ η εξόρυξη τους, πέρα από το υψηλό κόστος που έχει, εμπεριέχει και τον κίνδυνο της καθίζησης του εδάφους. Στην περίπτωση δε, των παράκτιων, υπόγειων υδροφορέων, η άντληση νερού συνδέεται με την ανάπτυξη φαινομένων υφαλμύρινης. [4]

Σύμφωνα με όλα όσα έχουν αναφερθεί ως τώρα, από τους υπόγειους υδροφορείς, αυτοί που βρίσκονται πλησίον της παράκτιας ζώνης, φαίνεται να δέχονται, τις περισσότερες και ταυτόχρονα μεγαλύτερες πιέσεις. Αποτελούν, δηλαδή, το τμήμα της υπόγειας ροής ύδατος, που εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 3.2), γίνεται μια συνοπτική αναπαράσταση, των εξωτερικών πιέσεων που ασκούνται στους παράκτιους, υπόγειους υδροφορείς.



Εικόνα 3.2: Ασκοούμενες επιδράσεις στους παράκτιους-υπόγειους υδροφορείς, [34]

3.2. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης (Salt water intrusion effect)

Με τον όρο υφαλμύριση υπόγειων υδροφορέων, εννοείται η εισροή σε αυτούς, αλμυρού νερού, με παράλληλη αύξηση της αλατότητάς τους σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Αποτελεί ξεχωριστή κατηγορία της υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς. Η εμφάνιση του φαινομένου μπορεί να οφείλεται σε γεωλογικούς παράγοντες (καρστικοί υδροφορείς), συνηθέστερα όμως, παρατηρείται κατά τη διείδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. [16]

Η διείδυση αυτή, μπορεί να έχει φυσικά αίτια:

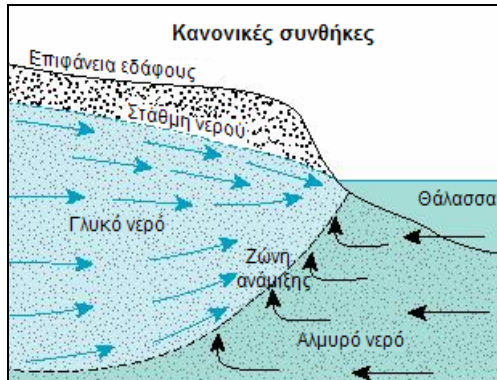
- ✧ Κλιματικές αλλαγές
- ✧ Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- ✧ Θαλασσινό νερό που διείδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν
- ✧ Υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες και κοιλάδες
- ✧ Νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια

Μπορεί να είναι αποτέλεσμα ανθρωπογενούς παρέμβασης:

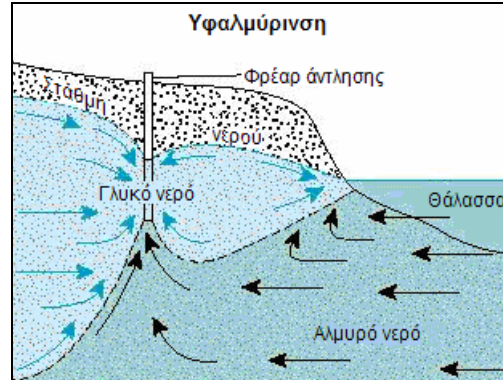
- ✧ Υπεραντλήση νερού υπόγειων υδροφορέων
- ✧ Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προελεύσεως

Ενώ, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να είναι αποτέλεσμα συνδυασμού των παραπάνω πιθανών αιτιών. Σίγουρα όμως, ο ανθρωπογενής παράγοντας είναι αυτός, που έχει οδηγήσει στην έξαρση του φαινομένου, μέσω της ανεξέλεγκτης άντλησης του νερού των υπόγειων υδροφορέων.

Συγκεκριμένα, όταν ο ρυθμός άντλησης, σε φρεάτια πλησίον της θάλασσας, υπερβεί το ρυθμό φυσικής ή τεχνητής επαναφόρτισης του υδροφορέα, τότε το θαλάσσιο νερό εισρέει σε αυτόν αποκλείοντάς τον, από πηγή πόσιμου νερού. Στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού δημιουργείται μία μεταβατική ζώνη, μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ορισμένου πάχους, γνωστή ως διεπιφάνεια. Πάνω απ' αυτήν κινείται το ελαφρύτερο γλυκό νερό που εξέρχεται προς τη θάλασσα και κάτω από αυτήν συναντάται το αλμυρό νερό. Οι υδραυλικές παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της υπόγειας ροής στη ζώνη αυτή μεταβάλλονται, καθώς αλλάζει η πυκνότητα, εξαιτίας της μεταβολής της συγκέντρωσης του αλατιού. [16]



Εικόνα 3.3: Στάθμη υδροφόρου οριζοντα σε κανονικές συνθήκες, [31]



Εικόνα 3.4: Στάθμη υδροφόρου οριζοντα μετά την έναρξη της άντλησης, [31]

Όταν, πλέον σε ένα υδροφορέα έχει εισχωρήσει θαλασσινό νερό, μέρος του αλατιού προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, δυσχεραίνοντας, με αυτόν τον τρόπο, τη διαδικασία αναστροφής και αποκατάστασης του υδροφορέα. Σε συνδυασμό, με την αργή κίνηση του υπόγειου νερού, η κατάσταση επιδεινώνεται, σε βαθμό που το φαινόμενο να μην μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων, αλλά και γενικότερα όλων των ζώντων οργανισμών (της πανίδας και της χλωρίδας), ενώ ταυτόχρονα πολλαπλασιάζει τη διαβρωτική ικανότητα του νερού με αποτέλεσμα την σταδιακή καταστροφή κάθε είδους σωληνώσεων και εγκαταστάσεων που έρχονται σε επαφή με αυτό. Κατά συνέπεια, η αντιμετώπισή του, αποτελεί επιτακτική ανάγκη και συνδέεται πρακτικά με πρόβλεψη και ορθή διαχείριση. [16]

Υφαλμύριση μπορεί να παρατηρηθεί, τόσο σε μικρή-τοπική όσο και σε μεγάλη-περιφερειακή κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση, η επίδραση από το φαινόμενο εντοπίζεται στη διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού, στην περιοχή γύρω και κάτω, από ένα φρεάτιο άντλησης. Στη δεύτερη περίπτωση, επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις, από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα, από εγγειοβελτιωτικά έργα. Παρά το γεγονός ότι, στις περισσότερες των περιπτώσεων, το πρόβλημα της υφαλμύρισης, αναγνωρίζεται από υπεύθυνους υδρογεωλόγους και μηχανικούς, συνήθως η ακριβής έκτασή του είναι άγνωστη, λόγω ελλείπων στοιχείων. Η ποσοτικοποίηση δηλαδή, του προβλήματος είναι αρκετά δύσκολη, καθώς κατά την εισροή της θάλασσας σε ένα υδροφορέα, δεν αποκαθίστανται εύκολα, συνθήκες μόνιμης ροής και επιπρόσθετα, τις περισσότερες φορές, το πρόβλημα, έχει ήδη ξεπεράσει, τα επιτρεπτά όρια,

εφόσον δεν λαμβάνονται εγκαίρως, τα αναγκαία μέτρα. Η καθυστέρηση της εφαρμογής των μέτρων αυτών, οφείλεται σε μία σειρά ανασταλτικών παραγόντων οικονομικής, κοινωνικής, νομικής και πολιτικής φύσεως. [16]

Ακόμα, όμως και στην περίπτωση που προσπεραστούν τα παραπάνω εμπόδια, η προσέγγιση ενός τέτοιου σύνθετου προβλήματος, είναι ιδιαίτερα δύσκολη και προϋποθέτει αφενός μεν, εξειδικευμένη γνώση και αφετέρου δυνατότητα χρήσης μεθόδων εφαρμοσμένων μαθηματικών προσομοιώσεων, οι οποίες και θα πρέπει να προσαρμόζονται κάθε φορά, στις απαιτήσεις της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Η αξιοπιστία των μαθηματικών προσομοιώσεων αποτελεί αναγκαία συνθήκη και ως προς αυτήν την κατεύθυνση μπορούν να βοηθήσουν οι μετρήσεις πεδίου, όταν είναι κατά το δυνατόν ακριβείς. Οι μετρήσεις πεδίου συμβάλουν στη βαθμονόμηση του μοντέλου, καθώς επίσης και στην επαλήθευσή του. [16]

3.3. Μέθοδοι προσομοίωσης (Modeling approaches)

Για την ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου της υφαλμύρινης, θα πρέπει να υπάρχει γνώση:

- ✧ της θέσης, των ορίων και των γεωλογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών του συστήματος υπόγειων νερών,
- ✧ της σχέσης του συστήματος με τα επιφανειακά νερά και τα γειτονικά οικοσυστήματα,
- ✧ της χημικής του σύνθεσης
- ✧ των πιέσεων και επιπτώσεων λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Εφόσον τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι γνωστά, η αντιμετώπιση των προβλημάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο διαφορετικών τρόπων. Της θεώρησης διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς και της θεώρησης απότομης διεπιφάνειας, εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα.

3.3.1. Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (Density dependent approximation)

Η εισροή αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό της θάλασσας και το καθαρό νερό του υδροφορέα και το πρόβλημα προσεγγίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή). Συγκεκριμένα, για έναν ετερογενή και ισότροπο υδροφορέα ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις: [17]

► Ταχύτητα Darcy (Darcy velocity)

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \nabla(p + \rho g z) \quad (3.1)$$

Ενώ, παράλληλα ισχύουν οι σχέσεις: $K = \frac{k \rho g}{\mu}$ και $h = \frac{p}{\rho g} + z$

Όπου, k : η ειδική διαπερατότητα του υφάλμυρου νερού, $[L^2]$
 μ : το δυναμικό ιξώδες του υφάλμυρου νερού, $[ML^{-1}T^{-1}]$
 ρ : είναι η πυκνότητα του υφάλμυρου νερού, $[ML^{-3}]$
 p : η πίεση του νερού των πόρων, $[ML^{-1}T^{-2}]$
 g : η επιτάχυνση της βαρύτητας, $[LT^{-2}]$
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα υφάλμυρου νερού, $[LT^{-1}]$
 h : το υδραυλικό ύψος του υφάλμυρου νερού, $[L]$

► **Γραμμική σχέση πυκνότητας νερού και συγκέντρωσης αλατιού
(Linear relation between water density and salt concentration)**

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_f} = 1 + EC \quad (3.2)$$

Συνεπώς, θα ισχύει: $K_f = \frac{k\rho_f g}{\mu_f}$ και $h_f = \frac{p}{\rho_f g} + z$

Όπου, ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού ($=998 \text{ kg/m}^3$), $[ML^{-3}]$
 C : η συγκέντρωση του αλατιού ($0 \sim 300 \text{ ppt}$), $[ML^{-3}]$
 E : συντελεστής εξαρτώμενος της πυκνότητας ($= 6,614 \text{ L/g}$), $[L^3M^{-1}]$
 K_f : η υδραυλική αγωγιμότητα του γλυκού νερού, $[LT^{-1}]$
 μ_f : το δυναμικό ιξώδες του γλυκού νερού, $[ML^{-1}T^{-1}]$
 h_f : το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού, $[L]$

► **Αρχή διατήρησης της μάζας (Mass conservation)**

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = -\nabla(\rho \bar{q}) + \rho_{ss} Q_{ss} \quad (3.3)$$

Όπου, n : το πορώδες, $[]$
 ρ_{ss} : η πυκνότητα του νερού εκροής/κατείσδυσης, $[ML^{-3}]$
 Q_{ss} : ο ρυθμός παροχής, εκροής/κατείσδυσης, $[T^{-1}]$

Η συνολική μάζα, στην εξίσωση του ισοζυγίου της μάζας (Εξίσωση (3.3)) περιλαμβάνει τη μάζα του γλυκού νερού και τη μάζα του διαλυμένου αλατιού, δηλαδή $\rho = \rho_f + C$. Η διασπορά της συγκέντρωσης του αλατιού, εδώ θεωρείται αμελητέα (θα είναι, όμως, απαραίτητη στην εξίσωση μεταφοράς του αλατιού). Ειδικά, όταν η συγκέντρωση αυτή, είναι μικρότερη απ' αυτή του θαλασσινού νερού, ο συνολικός όγκος υγρού θεωρείται σταθερός, παρότι προστίθεται διαλυμένο άλας στο γλυκό νερό.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση της ταχύτητας του Darcy και τον συντελεστή ειδικής αποθηκευτικότητας του γλυκού νερού, ($S_{of} = \rho_f g (\alpha + n\beta)$), καταλήγουμε στην εξίσωση, της εξαρτώμενης απ' την πυκνότητα, ροής υπόγειου ύδατος:

$$\alpha S_{of} \frac{\partial h_f}{\partial t} + nE \frac{\partial C}{\partial x} = \nabla(\alpha K_f \nabla h_f) + \frac{\rho_{ss}}{\rho_f} Q_{ss} \quad (3.4)$$

Αν, η πυκνότητα θεωρείται ανεξάρτητη της συγκέντρωσης του αλατιού, τίθεται $\alpha = 1$ (ή $E = 0$) στην εξίσωση 3.4.

► Υδροδυναμική διασπορά (Advection – dispersion)

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} + \nabla(n\vec{V}C) = \nabla(nD\nabla C) + C_{ss} Q_{ss} \quad (3.5)$$

Όπου, V : η ταχύτητα διήθησης, $[LT^{-1}]$
 D : ο συντελεστής διασποράς, $[L^2T^{-1}]$
 C_{ss} : η συγκέντρωση αλατιού, εκροής/κατείδουσης, $[ML^{-3}]$

Χρησιμοποιώντας, σταθερό συντελεστή διασποράς, στη μελέτη του προβλήματος της υφαλμύρισης, δεν επηρεάζονται τα ουσιώδη χαρακτηριστικά του προβλήματος [Henry (1964), Pinder and Cooper (1970), Lee and Cheng (1974)].

Για σταθερή τιμή πορώδους η προηγούμενη εξίσωση (Εξίσωση (3.5)) γίνεται:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\vec{V}C) = \nabla(D\nabla C) + \frac{C_{ss} Q_{ss}}{n} \quad (3.6)$$

Η παραπάνω μέθοδος είναι αρκετά ακριβής, αλλά οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται κατά την εφαρμογή της, είναι πολύπλοκες και επιπλέον ορισμένες εκ των παραμέτρων, λόγω της ετερογένειας των χαρακτηριστικών των υδροφορέων, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν.

3.3.2. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (Sharp interface approximation)

Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά (δύο διαφορετικές φάσεις). Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Σε συνθήκες άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, που συνεπάγεται μη μόνιμη ροή. Οι θεμελιώδεις, για αυτή τη θεώρηση, εξισώσεις είναι η εξίσωση της συνέχειας και της ταχύτητας του Darcy, οι οποίες και εφαρμόζονται τόσο για το γλυκό νερό όσο και για το αλμυρό. [14]

► Εξίσωση της συνέχειας (Continuity equation)

$$\nabla q_f + S_{of} \frac{\partial h_f}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla q_s + S_{os} \frac{\partial h_s}{\partial t} = 0 \quad (3.8)$$

Όπου, q : η ταχύτητα του Darcy, $[LT^{-1}]$
 S_o : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, $[L^{-1}]$
 f, s : οι δείκτες για το γλυκό και αλμυρό νερό, αντίστοιχα
 h_f : το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού από ελεύθερη την επιφάνεια, ως το επίπεδο της θάλασσας, $[L]$
 h_s : το ύψος, από το επίπεδο της θάλασσας ως τη διεπιφάνεια, $[L]$

► Ταχύτητα Darcy (Darcy velocity)

$$q_f = -K_f \nabla h_f \quad (3.9)$$

$$q_s = -K_s \nabla h_s \quad (3.10)$$

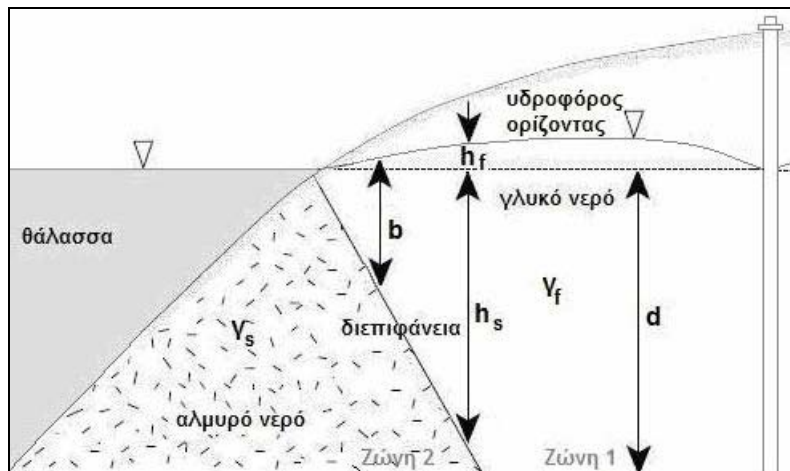
Όπου, K : η υδραυλική αγωγιμότητα, $[LT^{-1}]$

Από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων (Εξισώσεις 3.7 ως 3.10) προκύπτουν οι εξισώσεις, οι οποίες αποτελούν τον πυρήνα της συγκεκριμένης προσέγγισης.

$$S_{of} \frac{\partial h_f}{\partial t} = \nabla(K_f \nabla h_f) \quad (3.11)$$

$$S_{os} \frac{\partial h_s}{\partial t} = \nabla(K_s \nabla h_s) \quad (3.12)$$

Έχοντας θεωρήσει, υδροστατική ισορροπία μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού, η διεπιφάνεια εντοπίζεται, κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, περίπου σαράντα φορές τη διαφορά, μεταξύ της στάθμης γλυκού νερού και θάλασσας [Ghyben (1888), Herzberg (1901)].



Εικόνα 3.5: Διεπιφάνεια και συνθήκες στάθμης νερού κατά Ghyben – Herzberg, [18]

Συγκριμένα, εφόσον η υδροστατική πίεση είναι παντού η ίδια, ισχύει:

$$\begin{aligned} h_s \gamma_s &= (h_f + h_s) \gamma_f \Rightarrow h_s = \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \Rightarrow h_s = \frac{g \rho_f}{g(\rho_f - \rho_s)} h_f \\ &\Rightarrow h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = \delta h_f \end{aligned} \quad (3.13)$$

Όπου, ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού ($=10^3 \text{ kg/m}^3$), $[ML^{-3}]$

ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού ($= 1025 \text{ kg/m}^3$), $[ML^{-3}]$

Αντικαθιστώντας τις τιμές, που αντιστοιχούν στις πυκνότητες γλυκού και αλμυρού νερού η εξίσωση (3.13) γίνεται:

$$h_s = \frac{1000}{1025 - 1000} h_f \Rightarrow h_s \approx 40h_f \quad (3.14)$$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα (Εικόνα 3.5) υπάρχουν δύο ζώνες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, η κάθε μία. Στη ζώνη 1 ισχύουν οι εξισώσεις, που θα ίσχυαν σε έναν ελεύθερο υδροφόρα, ενώ στη ζώνη 2 υπάρχει εισροή θαλασσινού νερού, με αποτέλεσμα το γλυκό νερό σαν ελαφρύτερο, να επιπλέει πάνω από το θαλασσινό. Σε συνθήκες μόνιμης ροής και για ετερογενή υδροφόρα, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση του νερού, και για τις δύο ζώνες έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q = 0 \quad (3.15)$$

Όπου, b : για τη ζώνη 1, το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού από την ελεύθερη επιφάνεια ως τη διεπιφάνεια, ($= h_f + d$), [L]

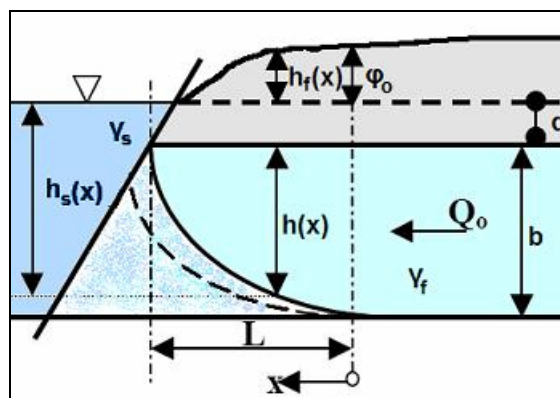
για τη ζώνη 2, το πάχος του γλυκού νερού ως τη διεπιφάνεια, ($= h_f + h_s$), [L]

N : ο φυσικός εμπλουτισμός στην επιφάνεια του υδροφορέα, [LT^{-1}]

Q : ο ρυθμός άντλησης από το φρεάτιο εντός του υδροφορέα, [$L^{-3}T$]

Ένας απλός τρόπος, υπολογισμού της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, χωρίς την παρουσία φρεατίων παρατήρησης είναι με τη βοήθεια της μονοδιάστατης ανάλυσης. Τα αποτελέσματα συνεισφέρουν στην ποιοτική μελέτη του φαινομένου. Οι παραδοχές που γίνονται περιλαμβάνουν μόνιμη και οριζόντια ροή γλυκού νερού, ακίνητη στρώση θαλασσίου νερού και ομογενή υδροφόρα.

⇒ Περιορισμένος υδροφορέας – Μονοδιάστατη ροή



Εικόνα 3.6: Υφαλμύριση σε περιορισμένο υδροφόρα, [16]

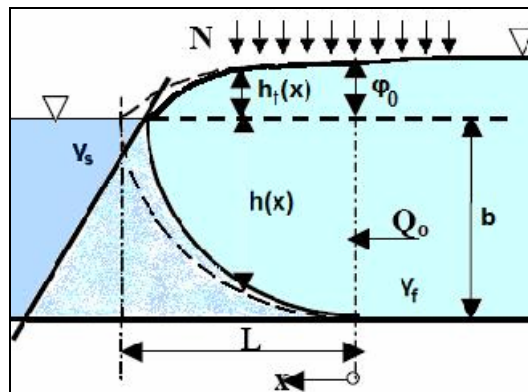
Εξαιτίας του αδιαπέρατου στρώματος, που συναντά το νερό, σχηματίζεται όπως φαίνεται και στο σχήμα (Εικόνα 3.6) μια σφήνα. Στον πόδα αυτής της σφήνας, η οποία είναι γνωστή και ως υφάλμυρη σφήνα, δηλαδή για $x=L$, $h=0$, $\phi_0=(d+b)/\delta$, υπολογίζονται:

$$Q_0 = \frac{1}{L} \left(\frac{K\phi_0}{2} (\delta\phi_0 - 2d) + \frac{Kd^2}{2\delta} \right) = \frac{Kb^2}{2\delta L} \quad (3.16)$$

Όπου, Q_0 : η παροχή του γλυκού νερού προς τη θάλασσα, [L^3T]
 L : το μήκος της υφάλμυρης σφήνας, [L]
 K : η υδραυλική αγωγιμότητα, [LT^{-1}]
 ϕ_0 : το πιεζομετρικό φορτίο ως προς τη στάθμη της θάλασσας στον πόδα της σφήνας, [L]
 δ : σχετική πυκνότητα (≈ 40), [$]$
 d : το βάθος περιοριστικού στρώματος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, [L]
 b : το πάχος του υδροφορέα, [L]

Η παραπάνω σχέση (Εξίσωση (3.16)) συσχετίζει την παροχή του γλυκού νερού από τον υδροφορέα, με το πάχος του και το μήκος της υφάλμυρης σφήνας. Επομένως για γνωστή παροχή μπορεί να υπολογιστεί το μήκος της σφήνας και αντίστροφα. Ιδιαίτερη σημασία έχει το μέγεθος ϕ_0 , δηλαδή το πιεζομετρικό φορτίο στο τέλος της σφήνας. Η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού θα εισχωρήσει στο εσωτερικό του υδροφορέα μέχρι το σημείο που το πιεζομετρικό φορτίο είναι ίσο με ϕ_0 . Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι όσο πιο κοντά στην εισροή προς τη θάλασσα είναι η τιμή του, τόσο μικρότερο είναι το μήκος της σφήνας. Η συγκεκριμένη παρατήρηση αποτελεί τη βάση για αρκετές μεθόδους αντιμετώπισης του προβλήματος της υφαλμύρισης. [16]

⇒ Ελεύθερος υδροφορέας – Μονοδιάστατη ροή



Εικόνα 3.7: Υφαλμύριση σε ελεύθερο υδροφορέα, [16]

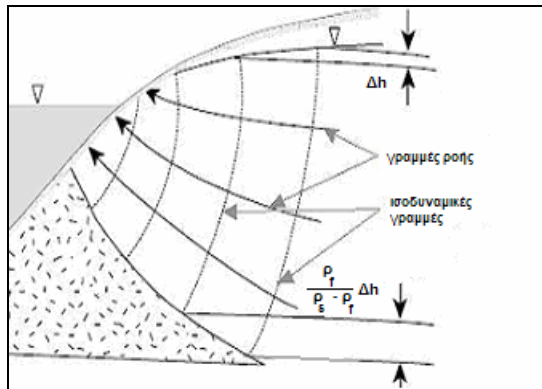
Στους ελεύθερους υδροφορείς, πρέπει να ληφθεί υπόψη, επιπλέον ο φυσικός εμπλουτισμός μέσω κατακρήμνισης. Για αυτήν την περίπτωση, στο κάτω άκρο και πάλι της διεπιφάνειας, δηλαδή για $x=L$, $h=0$, $\phi_0=b/40$, υπολογίζονται:

$$Q_0 = \frac{Kb^2}{2L} \frac{(1+\delta)}{\delta^2} - \frac{NL}{2} \quad (3.17)$$

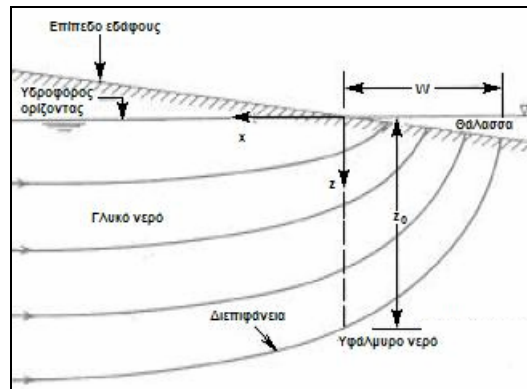
Όπου b : το ύψος από τη βάση του υδροφορέα ως το επίπεδο της θάλασσας, [L]
 N : ο ρυθμός φυσικού εμπλουτισμού, [LT^{-1}]
 ϕ_0 : το πιεζομετρικό φορτίο από την ελεύθερη επιφάνεια ως τη βάση του υδροφορέα, [L]

3.3.3. Προσέγγιση πραγματικότητας (Reality approximation)

Στην πραγματικότητα οι συνθήκες ροής, δεν είναι τόσο απλές όσο αυτές που υποθέτονται, σύμφωνα με την προσομοίωση της απότομης διεπιφάνειας. Για παράδειγμα, το γλυκό νερό εισρέει στη θάλασσα, διαμέσου κάποιας επιφάνειας και όχι ενός σημείου. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από το σχήμα (Εικόνες 3.8 και 3.9) η παραδοχή, ότι η ροή του υπόγειου ύδατος του υδροφορέα είναι οριζόντια, δεν ισχύει, καθώς υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων, οι οποίες και δε θα έπρεπε να αγνοηθούν. Αυτή είναι και μία από τις βασικότερες αιτίες, για τις οποίες, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι δυνατόν να δώσει παραπλανητικά αποτελέσματα. [18]



Εικόνα 3.8: Διεπιφάνεια και συνθήκες ροής υπόγειου ύδατος, [18]



Εικόνα 3.9: Γεωμετρία και σύμβολα της λύσης του Glover, για τη διεπιφάνεια, [19]

Λαμβάνοντας, τα παραπάνω υπόψη του, ο Glover (1964) ανέπτυξε την ακόλουθη σχέση (Εξίσωση (3.18)) για την προσέγγιση του σχήματος της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού: [2]

$$z^2 - \frac{2qx}{(\rho_s - \rho_f)K} - \frac{q^2}{(\rho_s - \rho_f)^2 K^2} = 0 \quad (3.18)$$

Όπου, q : η ειδική παροχή, $[LT^{-1}]$

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, $[LT^{-1}]$

$\rho_s - \rho_f$: η διαφορά πυκνοτήτων αλμυρού-γλυκού νερού ($=0,025$), $[ML^{-3}]$

x, z : αποστάσεις συντεταγμένων από την ακτογραμμή, $[L]$

Για $z=0$ η εξίσωση (3.18), γίνεται:

$$W = \frac{q}{2(\rho_s - \rho_f)K} \quad (3.19)$$

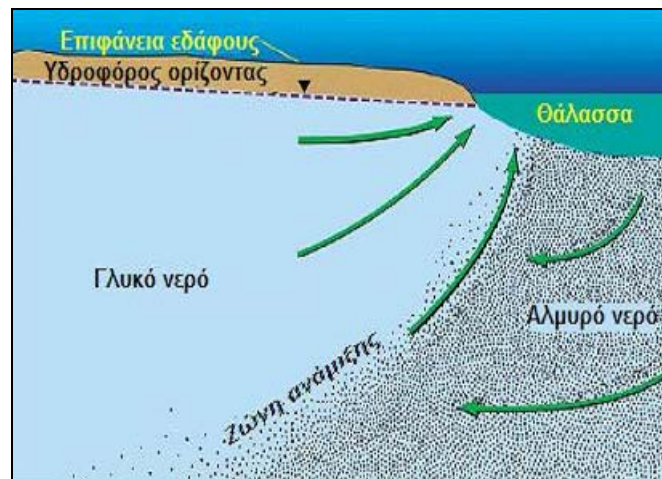
Όπου, W : το πλάτος της κατώτερης ζώνης, από την οποία καταλήγει γλυκό νερό στη θάλασσα, $[L]$

Το βάθος z_0 , της διεπιφάνειας, κάτω από την ακτή υπολογίζεται, και πάλι από τροποποίηση της εξίσωσης (3.18), θέτοντας $z = z_0$ και $x=0$. Έτσι:

$$z_0 = \frac{q}{(\rho_s - \rho_f)K} \quad (3.20)$$

Όσο αφορά, τη διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού, αυτή δεν είναι συνήθως ακίνητη, αλλά κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Από μετρήσεις πεδίου δε, προκύπτει ότι η διεπιφάνεια αυτή, στην πραγματικότητα, δεν ανταποκρίνεται στην έννοια της «επιφάνειας», όπως αυτή, είναι γνωστή από τη γεωμετρία, αλλά πρόκειται για μια ζώνη από υφάλμυρο νερό, μεταβλητού πάχους, που είναι προϊόν εξωτερικών επιδράσεων, όπως για παράδειγμα, της φύσης της φόρτισης και επαναφόρτισης του γλυκού νερού, της παλιρροιακής δράσης και της μεθόδου άντλησης. Οι εν λόγω επιδράσεις, είναι και αυτές, που προκαλούν τη συνεχή μετατόπιση της διαχωριστικής επιφάνειας προς νέα θέση ισορροπίας, με κατεύθυνση το εσωτερικό του υδροφορέα. [31]

Η μετάβαση του αλμυρού νερού σε γλυκό, συνεπάγεται το σχηματισμό μιας ζώνης διάχυσης, εφόσον υπάρχει ανάμιξη μεταξύ των δύο υγρών. Συγκεκριμένα, η διάχυση, η οποία και προκαλείται από την οποιαδήποτε κίνηση του νερού, οδηγεί στο σχηματισμό μεταβατικής ζώνης βαθμιαίας ανάπτυξης και αλατότητας (Εικόνα 3.9) και εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και από την απόσταση που διασχίζει το υπόγειο νερό. [31]



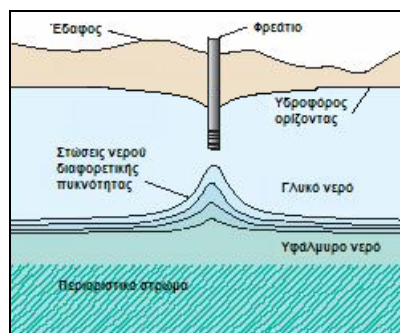
Εικόνα 3.10: Μεταβατική ζώνη αλατότητας λόγω διάχυσης. [31]

Το πάχος της μεταβατικής ζώνης ανάμιξης σε κάθε θέση εξαρτάται από το συντελεστή διάχυσης, την κατάσταση ή μη της ισορροπίας του γλυκού νερού, την υδραυλική αγωγιμότητα και την παλιρροία. Ενόσω, το αλμυρό νερό προωθείται στα ανώτερα στρώματα της μεταβατικής ζώνης, εξαιτίας διακυμάνσεων, ένα μέρος κατευθύνεται προς τη θάλασσα, διαμέσου της ροής του γλυκού νερού με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών διαβαθμίσεων στην πυκνότητα του νερού. Το γεγονός αυτό, επιβραδύνει σε σημαντικό βαθμό τη ροή του αλμυρού νερού προς την ξηρά.

Οι παραπάνω παράμετροι, λαμβάνονται υπόψη από τη θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους [Henry (1964), Pinder and Cooper (1970), Lee and Cheng (1974)], η οποία και αναπτύσσεται αναλυτικά στα προηγούμενα αυτού του κεφαλαίου (κεφάλαιο 3, υποενότητα 3.3.1).

3.4. Σχηματισμός κώνου διείδυσης (Upconing)

Σε περιοχές, όπου το υπόγειο νερό, υπέρκειται υφάλμυρου, η άντληση μέσω ενός φρεατίου στη ζώνη του γλυκού νερού, οδηγεί στην αύξηση της διεπιφάνειας αναμίξεως, κάτωθεν του φρεατίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, σχηματίζεται ένας «κώνος» υφάλμυρου νερού (Εικόνα 3.11 και 3.12), ο οποίος είναι αποτέλεσμα της ελάττωσης της πίεσης στη διεπιφάνεια, εξαιτίας της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα περιμετρικά του φρεατίου άντλησης. Εάν, ο πυθμένας του φρεατίου είναι πλησίον του υφάλμυρου νερού ή αν, ο ρυθμός άντλησης είναι σχετικά υψηλός, ο κώνος αυτός, είναι δυνατό να εισέλθει στο εσωτερικό του φρεατίου, με άμεσο επακόλουθο, το νερό που λαμβάνεται ως προϊόν της συγκεκριμένης αντλήσεως, να είναι ένα μίγμα γλυκού και υφάλμυρου νερού. [2]

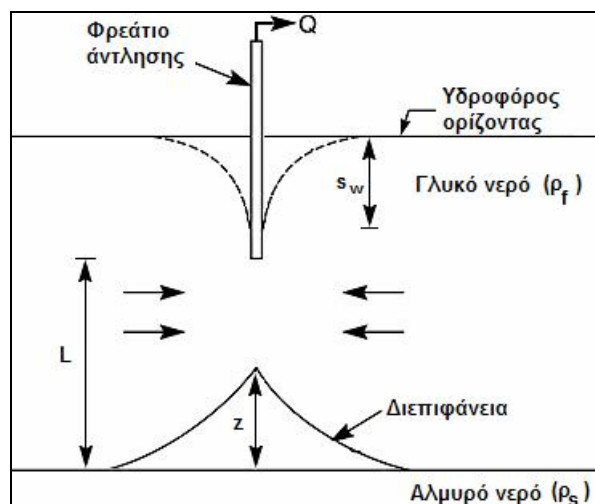


Εικόνα 3.11: Σχηματισμός κώνου διείδυσης, λόγω άντλησης, [31]

Θεωρώντας σταθερή και οριζόντια ροή για το γλυκό νερό, καμία πλευρική κίνηση για το αλμυρό και απότομη διεπιφάνεια, το ύψος του κώνου που σχηματίζεται κάτω από το φρεάτιο μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση [Ghyben-Herzberg]:

$$z = \frac{\rho_f s_w}{\rho_s - \rho_f} \quad (3.22)$$

Όπου, s_w : η πτώση στάθμης του νερού, λόγω άντλησης, [L]



Εικόνα 3.12: Γεωμετρία και σύμβολα για την περίπτωση σχηματισμού κώνου διείδυσης, [2]

Μια πιο ακριβής μέθοδος επίλυσης, που αφορά το σχηματισμό κώνου διείσδυσης υφάλμυρου νερού, αναπτύχθηκε από τους Bear και Dagan (1968), οι οποίοι και παρουσίασαν την ακόλουθη εξίσωση για την ανύψωση του κώνου κάτω από τον πυθμένα του φρεατίου άντλησης.

$$z_t = \frac{\rho_f Q}{2\pi(\rho_s - \rho_f)K_x L} \left(1 - \frac{2\rho_f nL}{2\rho_f nL + (\rho_s - \rho_f)K_z t} \right) \quad (3.23)$$

Όπου, z_t : η ανύψωση της κορυφής του κώνου τη χρονική στιγμή t , [L]
 Q : ο ρυθμός άντλησης του φρεατίου, [L^3T]
 L : η απόσταση της διεπιφάνειας από τον πυθμένα του φρεατίου, πριν την έναρξη της άντλησης, [L]
 K_x : η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση, [LT^{-1}]
 K_z : η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση, [LT^{-1}]
 ρ_f : η πυκνότητα του γλυκού νερού, [ML^{-3}]
 ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού, [ML^{-3}]
 n : το πορώδες του υδροφορέα, []
 t : η χρονική στιγμή που αρχίζει η άντληση, [T]

Για $t \rightarrow \infty$ η εξίσωση (3.23) γίνεται:

$$z_\infty = \frac{\rho_f Q}{2\pi(\rho_s - \rho_f)K_x L} \quad (3.24)$$

Όπου, z_∞ : το τελικό ή αλλιώς ύψος ισορροπίας του κώνου κάτω από τον πυθμένα του φρεατίου, [L]

Τιμές, που υπολογίστηκαν με βάση την παραπάνω σχέση (Εξίσωση (3.24)), ήταν ανάλογες των μετρήσεων πεδίου, όσο αφορά το κρίσιμο ύψος του κώνου υφαλμύρισης, το οποίο και κυμαινόταν, σε γενικές γραμμές, μεταξύ 0,4L και 0,6L [Schomogak και Mercado (1969)]. Παρόμοια αποτελέσματα δόθηκαν και από τον Haubold (1975), ο οποίος χρησιμοποίησε για τη δική του προσομοίωσή ένα Hele-Shaw μοντέλο. [2]

Στις περιπτώσεις που το ύψος του κώνου ξεπέρασε την κρίσιμη τιμή, έπαυε να υπάρχει πλέον γραμμική σχέση μεταξύ ύψους και παροχής άντλησης και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις ο κώνος έφτασε τον πυθμένα του φρεατίου με ένα απότομο άλμα, υποδεικνύοντας συνθήκες αστάθειας. Εν συνεχεία, το υφάλμυρο νερό εισερχόταν στο φρεάτιο, γεγονός που αύξανε την αλατότητα του αντλούμενου νερού από 5 μέχρι 8% της συγκέντρωσης του αλατιού του υφάλμυρου νερού. [2]

Η παραπάνω διαπίστωση, είναι και αυτή που καταδεικνύει, πλέον ξεκάθαρα, την αναγκαιότητα διεξαγωγής μιας σωστής πρόβλεψης, πριν ακόμα από την τοποθέτηση ενός φρεατίου στο εσωτερικό υπόγειου υδροφορέα, κάτω από τον οποίο έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη θαλάσσιου νερού. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουν να προσδιοριστούν ασφαλή βάθη και ρυθμοί άντλησης για τα φρεάτια, έτσι ούτως ώστε να ανασταλεί, ενδεχόμενη εισροή του υφάλμυρου νερού εντός του υδροφορέα. [2]

3.5. Μέτρα αντιμετώπισης (Countermeasures)

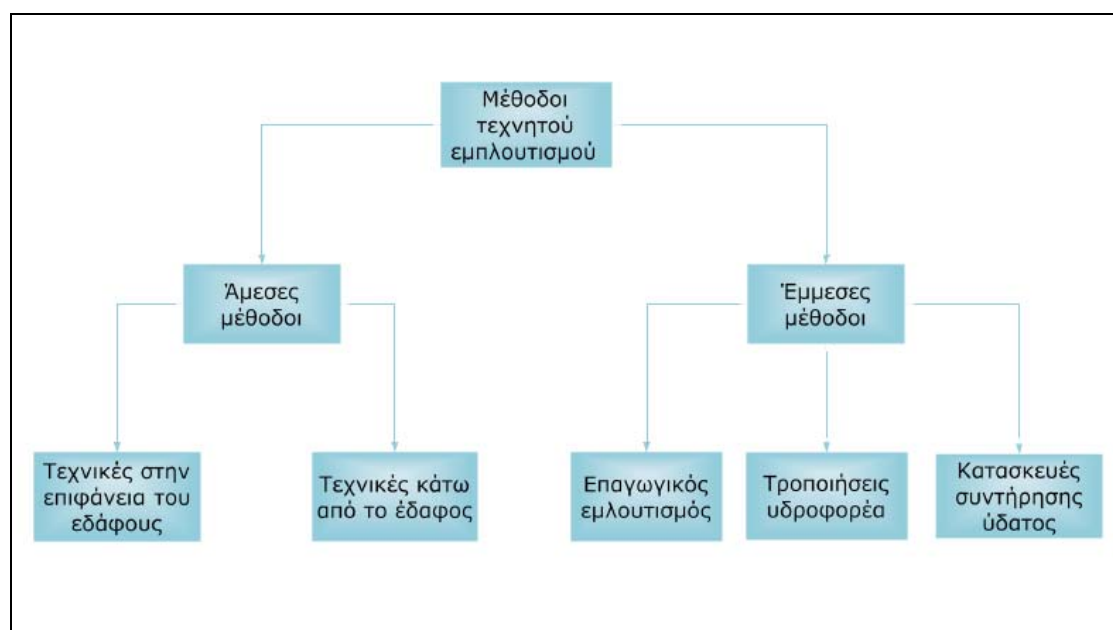
Η επίδραση των διαφόρων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στην υφαλμύριση των παράκτιων υδροφορέων, δεν εντοπίζεται συχνά εγκαίρως, καθώς η πτώση της πιεζομετρικής στάθμης του υπόγειου νερού, συντελείται σε βάθος χρόνου, με αποτέλεσμα να μη γίνεται άμεσα αντιληπτή. Τις περισσότερες φορές, δηλαδή, έχει ήδη εισχωρήσει μεγάλος όγκος αλμυρού νερού στον υδροφορέα, μέχρι να τεθεί ζήτημα περί αντιμετώπισης του προβλήματος. Ακόμα και για αυτές τις περιπτώσεις όμως, έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι, προκειμένου να αναχαιτιστεί ή τουλάχιστον να καθυστερηθεί η εξάπλωση του φαινομένου. [4]

3.5.1. Έλεγχος άντλησεως (Pumping control)

Σε φρεάτια, που αντλούν νερό, από έναν παράκτιο υδροφορέα, μπορεί να ελαττωθεί ο ρυθμός άντλησής τους ή να μετατοπιστεί η θέση τους. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατόν να αυξηθεί η στάθμη του υδροφορέα και κατ' επέκταση να μειωθεί η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα, αποτρέποντας έτσι, την επιδείνωση του φαινομένου της υφαλμύρισης. [4]

3.5.2. Τεχνητός εμπλουτισμός (Artificial recharge)

Ο τεχνητός εμπλουτισμός αποτελεί μέθοδο ενίσχυσης της εισροής πλεοναζόντων ποσοτήτων νερού στα υδροφόρα στρώματα εντός του εδάφους. Το πρόσθετο αυτό νερό, μπορεί να είναι επιφανειακό ή να προέρχεται από παρακείμενο υδροφόρο στρώμα. Πρόκειται, δηλαδή, για μια μέθοδο αποθήκευσης νερού σε περιόδους περίσσειας, ώστε αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους λειψυδρίας. Η εφαρμογή του, περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος τεχνικών διαδικασιών, που στοχεύουν προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση και οι οποίες επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά (γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες) της εκάστοτε περιοχής. [4]

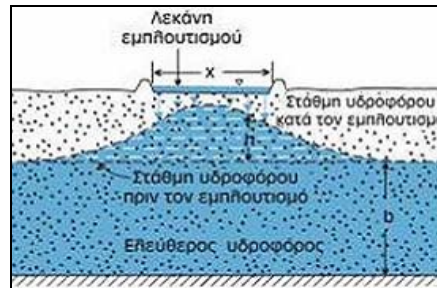


Εικόνα 3.13: Αντιμετώπιση υφαλμύρισης με τεχνητό εμπλουτισμό, [35]

► Τεχνικές στην επιφάνεια του εδάφους (Surface spreading techniques)

⇒ Επιφανειακή κατάκλιση (Run off conservation)

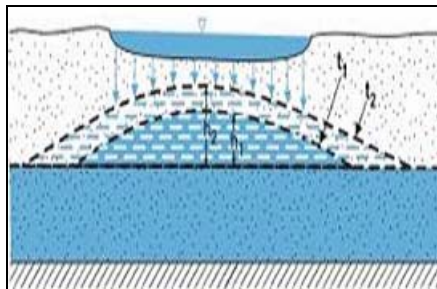
Το νερό συγκεντρώνεται σε λεκάνες που έχουν εκσκαφθεί σε συγκεκριμένη περιοχή και από εκεί διηθείται στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα. [4]



Εικόνα 3.14: Εφαρμογή επιφανειακής κατάκλισης, [32]

⇒ Πλημμύρα επιφανειών (Flooding)

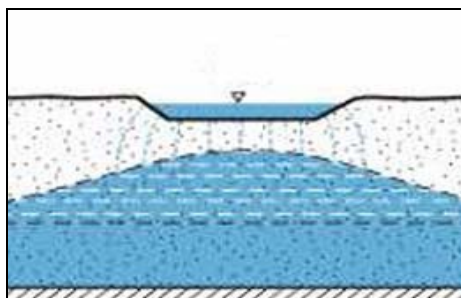
Καθορίζεται μια περιοχή, η οποία πλημμυρίζει και στην συνέχεια, αναμένεται το νερό να διεισδύσει μέσω του υπεδάφους στον υπόγειο υδροφόρο. [4]



Εικόνα 3.14: Εφαρμογή πλημμύρας επιφανειών, [32]

⇒ Ταύροι και αυλάκια (Ditch and furrow)

Σε περιοχές με κατάλληλα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται μια σειρά από αυλάκια τα οποία συνήθως καταλήγουν σε μία μεγαλύτερη ταύρο, όπου και διηθείται το νερό. Το νερό που δεν μπορεί να διηθηθεί μεταφέρεται και πάλι μέσω αυλακιών και έτσι αποφεύγεται η συσσώρευση αδρανούς υλικού. [4]

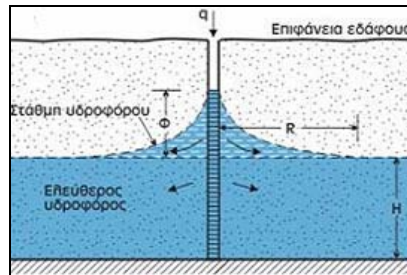


Εικόνα 3.15: Εμπλουτισμός διαμέσου ταύρου, [32]

► Τεχνικές κάτω από το έδαφος (Subsurface techniques)

⇒ Φρεάτια εμπλουτισμού (Injection wells)

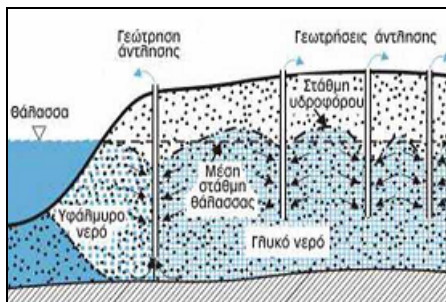
Επιτυγχάνουν τον άμεσο εμπλουτισμό των υδροφορέων και αποτελούν κατάλληλη λύση, όταν υπάρχει αδιαπέρατο στρώμα μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του υδροφορέα. [4]



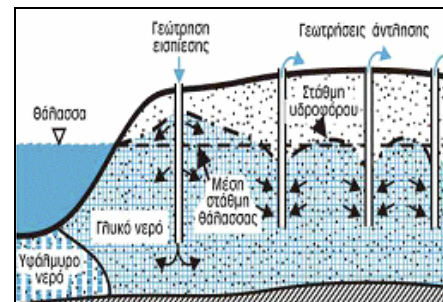
Εικόνα 3.16: Φρεάτιο εμπλουτισμού, [32]

⇒ Φρεάτια άντλησης – εμπλουτισμού (Discharge – Recharge wells)

Είναι δυνατή η δημιουργία φραγμού μέσω υπεράντλησης. Έτσι, ανάλογα με την εποχή χρησιμοποιούνται φρεάτια άντλησης ή εμπλουτισμού για την επίτευξη αντίστασης απέναντι στο μέτωπο της υφαλμύρισης. [4]



Εικόνα 3.17: Δημιουργία φραγμού με άντληση, [32]

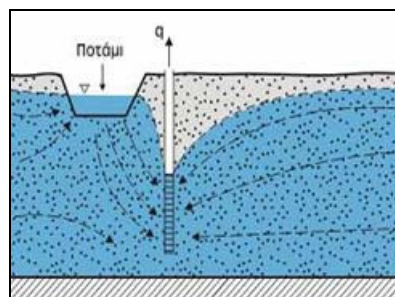


Εικόνα 3.18: Δημιουργία φραγμού με εμπλουτισμό, [32]

► Επαγωγικός εμπλουτισμός (Induced recharge)

⇒ Άντλησης πλησίον ταύρου (Pumping cell)

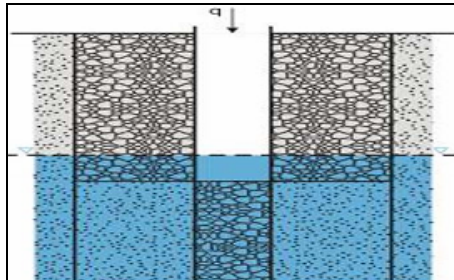
Φρεάτια άντλησης τοποθετούνται πλησίον ταύρου με αποτέλεσμα ποσοστό νερού να διεισδύει στον υδροφορέα. [4]



Εικόνα 3.19: Άντληση πλησίον ταύρου, [32]

⇒ Φρεάτια συλλογής (Collector wells)

Κατασκευάζονται φρεάτια, τα οποία συλλέγουν το νερό της βροχής, ώστε αυτό να είναι διαθέσιμο για μετέπειτα χρήση. [4]



Εικόνα 3.20: Φρεάτια (πηγάδια) συλλογής, [32]

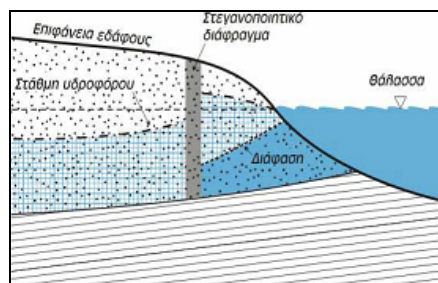
► Τροποποιήσεις υδροφορέα (Aquifer modifications)

⇒ Διάτρηση μέσω έκρηξης (Bore blasting)

Αδιαπέρατα στρώματα που εμποδίζουν υδροφορείς να έρθουν σε επαφή με το νερό των επιφανειακών απορροών, μπορούν να διανοιχθούν σε κατάλληλα σημεία μέσω εκρήξεων. [35]

⇒ Υδροφράγματα (Hydro fracturing)

Τοποθετούνται στεγανοποιητικά διαφράγματα εντός των υδροφορέων σε σημεία πλησίον της ακτής. [32]

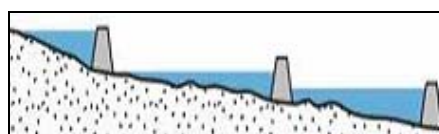


Εικόνα 3.21: Στεγανοποιητικό διάφραγμα κοντά στην ακτή, [32]

► Κατασκευές δέσμευσης ύδατος (Water conservation structures)

⇒ Διευθετήσεις στις κοίτες των χειμάρρων (Stream modifications)

Κατασκευάζονται μικρά φράγματα κατά μήκος των χειμάρρων όπου συσσωρεύονται ποσότητες νερού. Αυτά μεταφέρουν το νερό σε άλλες περιοχές στις οποίες και διηθείται. [32]



Εικόνα 3.22: Μικρά φράγματα κατά μήκος χειμάρρων, [32]

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

4.1. Μοντέλο (Model)

Ως μοντέλο ορίζεται οποιοδήποτε επινόημα, το οποίο επιτυγχάνει μία προσέγγιση της κατάστασης που επικρατεί στο πεδίο. Ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου ύδατος με έμμεσο τρόπο, χρησιμοποιώντας μία βασική εξίσωση, η οποία αντιπροσωπεύει τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα, μαζί με άλλες εξισώσεις, που υπολογίζουν υδραυλικά ύψη, ή ροές εντός των ορίων του μοντέλου (οριακές συνθήκες). Για τα μοντέλα, που λαμβάνουν υπόψη τους το χρόνο, απαιτείται μία επιπλέον εξίσωση, η οποία θα περιγράφει την αρχική κατανομή των υδραυλικών υψών στο σύστημα (αρχικές συνθήκες). [5]

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να επιλυθούν είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά. Και οι δύο αυτοί τρόποι επίλυσης περιλαμβάνουν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Όταν οι υποθέσεις που χρησιμοποιούνται προκειμένου να εξαχθεί μία αναλυτική λύση, κριθούν ότι είναι υπερβολικά απλουστευμένες και ακατάλληλες για το πρόβλημα το οποίο μελετάται, μπορεί να επιλεγεί ένα αριθμητικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, ένα αριθμητικό μοντέλο, μπορεί να αποδειχθεί πιο απλό στη χρήση απ' ό,τι ένα αναλυτικό. Σε γενικές γραμμές, πάντως, όσο λιγότερες είναι οι απλουστευτικές υποθέσεις που χρησιμοποιούνται για να συνθέσουν ένα μοντέλο, τόσο πιο πολύπλοκο είναι αυτό. [5]

4.2. Πρωτόκολλο μοντελοποίησης (Modeling Protocol)

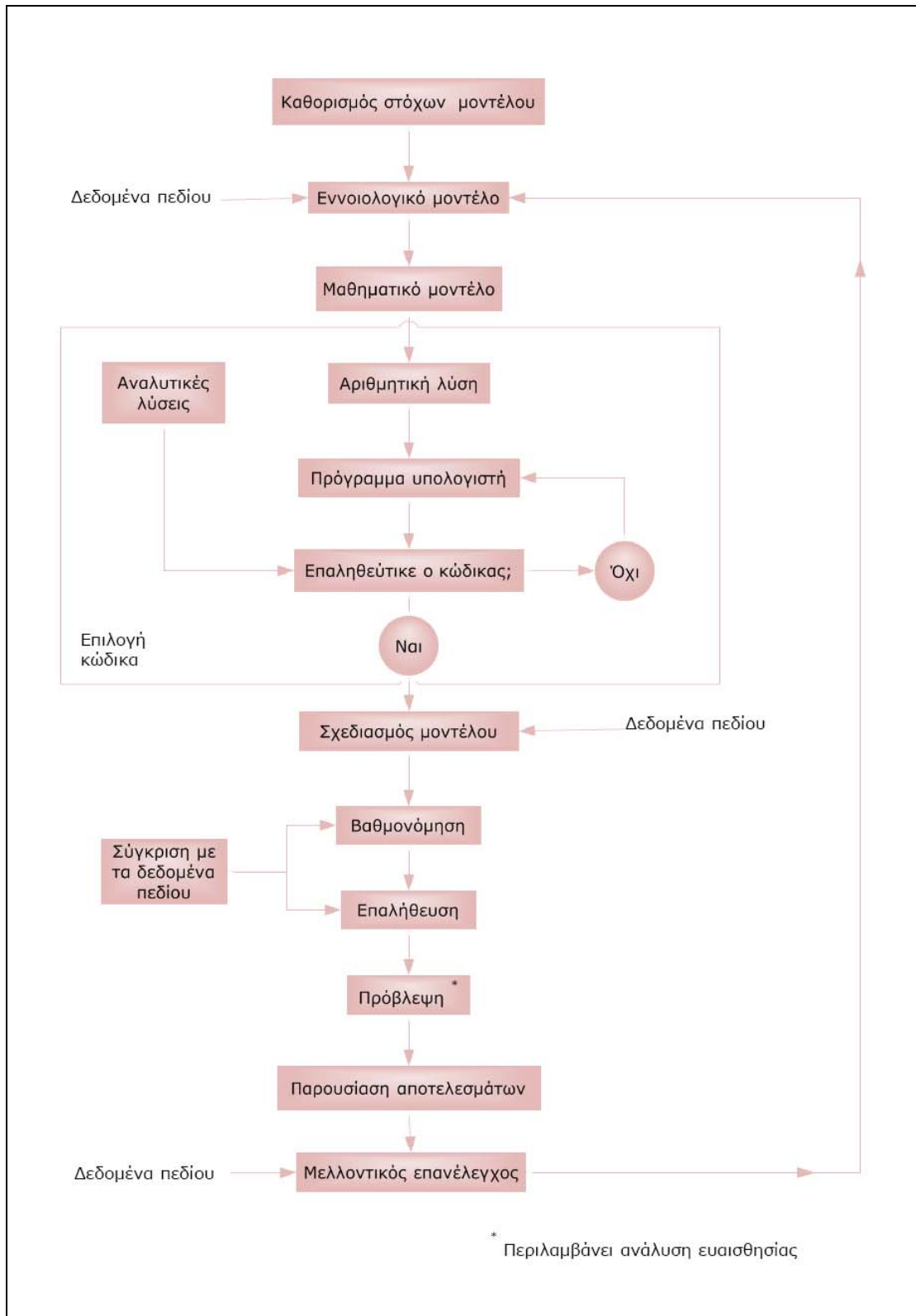
Όταν πλέον έχει αποφασιστεί, ότι είναι απαραίτητο ένα αριθμητικό μοντέλο και επίσης, έχει καθοριστεί με σαφήνεια ο σκοπός της μοντελοποίησης, τότε ξεκινά η διαδικασία του σχεδιασμού του. Το πρωτόκολλο της μοντελοποίησης περιλαμβάνει μεταξύ άλλων, επιλογή του κώδικα και επαλήθευση, σχεδιασμό του μοντέλου, βαθμονόμηση, ανάλυση ευαισθησίας και τελικά πρόβλεψη. Τα βήματα για ένα προτεινόμενο πρωτόκολλο μοντελοποίησης μαζί με τις σχετικές επεξηγήσεις παρουσιάζονται παρακάτω και στη συνέχεια απεικονίζονται και σχηματικά (Εικόνα 3.1). Κάθε ένα από αυτά τα βήματα επιβεβαιώνει ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι σε θέση να εξάγει ουσιώδη αποτελέσματα. Με άλλα λόγια, ενισχύει την εγκυρότητα του. [5]

Βήματα ενός προτεινόμενου πρωτοκόλλου μοντελοποίησης (Recommended modeling protocol steps)

- ✓ Καθορισμός των αντικειμενικών στόχων (purpose) του μοντέλου. Οι στόχοι αυτοί, καθορίζουν και τις αντίστοιχες εξισώσεις που επιλέγονται, καθώς και τον κώδικα που θα χρησιμοποιηθεί.
- ✓ Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model) του συστήματος. Ορίζονται οι υδροστρωματογραφικές ενότητες, αναγνωρίζονται τα όρια του συστήματος, συγκεντρώνονται τα δεδομένα υπαίθρου, δεδομένα που αφορούν υδραυλικές παραμέτρους και εκτιμώνται ποσοτικά οι διάφορες συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου.

- ✓ Επιλογή της βασικής εξίσωσης (governing equation) και του κατάλληλου κώδικα (computer code). Ο κώδικας είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, το οποίο περιέχει αλγόριθμους που επιλύουν το μαθηματικό μοντέλο αριθμητικά. Η εξίσωση, καθώς και ο κώδικας πρέπει πρώτα να επαληθευτούν. Η επαλήθευση της εξίσωσης αποδεικνύει ότι αυτή περιγράφει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα στο πορώδες μέσο. Η επαλήθευση του κώδικα, επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την αριθμητική λύση με την αντίστοιχη αναλυτική αν υπάρχει, προκειμένου να αποδειχθεί ότι αυτό επιλύει σωστά τις σχετικές εξισώσεις που συνθέτουν το μαθηματικό μοντέλο.
- ✓ Σχεδιασμός του μοντέλου (model design). Περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του χώρου και χρόνου, τον καθορισμό αρχικών και οριακών συνθηκών, καθώς και την αρχική επιλογή των υδραυλικών παραμέτρων και τάσεων.
- ✓ Βαθμονόμηση (calibration). Στόχος της βαθμονόμησης είναι να καταδείξει ότι το μοντέλο μπορεί να αναπαράγει τις πραγματικές ροές και μεταβλητές καταστάσεις. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, αναζητείται ένα σύνολο παραμέτρων και τάσεων που προσεγγίζουν καλύτερα τα πραγματικά υδραυλικά φορτία και τις διάφορες ροές. Η βαθμονόμηση γίνεται είτε με την κλασική μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος, είτε με τη χρήση πολυπλοκότερων μαθηματικών μεθόδων αυτόματης ρύθμισης.
- ✓ Ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis). Το μοντέλο υπόκειται σε αβεβαιότητα που αποδίδεται στον μη ακριβή καθορισμό της χωρικής κατανομής των παραμέτρων του στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αβεβαιότητα εισάγεται επίσης και στον καθορισμό των τάσεων και των οριακών συνθηκών. Η ανάλυση ευαισθησίας αποσκοπεί στον έλεγχο της σημασίας της αβεβαιότητας στη ρύθμιση του μοντέλου.
- ✓ Επαλήθευση του μοντέλου (model verification). Στόχος της επαλήθευσης είναι η απόδοση μεγαλύτερης εμπιστοσύνης στο μοντέλο, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους βαθμονόμησης του, ώστε να παραχθεί και ένα δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων.
- ✓ Πρόβλεψη (prediction). Αποδίδει ποσοτικά, τη συμπεριφορά του συστήματος σε μελλοντικά σενάρια. Το μοντέλο εκτελείται διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους βαθμονόμησης και μεταβάλλοντας τις πιέσεις που εκτιμάται ότι πρόκειται να αλλάξουν στο μέλλον.
- ✓ Προβλεπόμενη ανάλυση ευαισθησίας (predictive sensitivity analysis). Πραγματοποιείται για να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της αβεβαιότητας στις τιμές των παραμέτρων της πρόβλεψης. Πεδία εκτιμώμενων μελλοντικών πιέσεων προσομοιώνονται για να ελέγξουν τον αντίκτυπο στην πρόβλεψη του μοντέλου.
- ✓ Παρουσίαση του σχεδιασμού του μοντέλου και αποτελέσματα (presentation of modeling design and results). Είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική μετάδοση/πληροφόρηση της προσπάθειας της μοντελοποίησης.

- ✓ Επανελέγχος του μοντέλου (postaudit). Διεξάγεται μετά από αρκετό χρονικό διάστημα μετά το τέλος της μελέτης της μοντελοποίησης. Νέα δεδομένα πεδίου συλλέγονται, προκειμένου να ελεγχθεί αν οι προβλέψεις ήταν σωστές. Τυχόν αλλαγές στη συμπεριφορά του συστήματος οδηγούν στον ανασχεδιασμό του μοντέλου (model redesign). [5]



Εικόνα 4.1: Τα βήματα ενός πρωτοκόλλου για την εφαρμογή ενός μοντέλου, [5]

4.3. Εξισώσεις και μαθηματικές μέθοδοι (Equations and mathematical approaches)

Οι προσεγγίσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για την περιγραφή ενός συστήματος υπόγειας ροής είναι δύο. Η προσέγγιση υδροφορέα και η προσέγγιση συστήματος ροής.

4.3.1. Προσέγγιση υδροφορέα (Aquifer viewpoint)

Η προσέγγιση αυτή, βασίζεται στις έννοιες, του περιορισμένου και ελεύθερου υδροφορέα. Ο υδροφορέας είναι μια μονάδα ενός πορώδους υλικού ικανή να αποθηκεύει και να μεταφέρει σημαντικές ποσότητες νερού στα φρεάτια. Ένας περιορισμένος υδροφορέας έχει ως ανώτερο όριο ένα αδιαπέρατο στρώμα, δηλαδή μια μονάδα με πορώδες υλικό, τέτοιο, που να επιβραδύνει την κίνηση του νερού. Ο ελεύθερος υδροφορέας, αντίθετα, έχει ως ανώτερο όριο τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση της ροής σε φρεάτια άντλησης και αποτελεί τη βάση για αρκετές αναλυτικές λύσεις, όπως των Thiem, Theis και Jacob. Η υπόγεια ροή θεωρείται ότι είναι οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη μέσα στα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας. [5]

Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική αγωγιμότητα ή τη μεταβιβασιμότητα. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και το πάχος του είναι παντού ίδιο, ενώ σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, μεταβάλλεται χωρικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού. [5]

Η προσέγγιση υδροφορέα, χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει δυσδιάστατη και οριζόντια ροή, τόσο για περιορισμένο όσο και ελεύθερο υδροφορέα. Εάν υφίσταται διαρροή, μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας προσέγγιση τρισδιάστατης ροής. Η κάθετη ροή μέσα στον υδροφορέα θα αντιπροσωπεύει τον όρο της διαρροής, η οποία προσθέτει ή αφαιρεί νερό στον υδροφορέα. Το μέγεθος της διαρροής εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης εκατέρωθεν του αδιαπέρατου στρώματος, την κάθετη υδραυλική του αγωγιμότητα, καθώς και το πάχος του. [5]

Μια γενική μορφή της βασικής εξίσωσης αυτής της προσέγγισης είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (4.1)$$

Όπου, h : το υδραυλικό ύψος, [L]

$T_{x,y}$: η μεταβιβασιμότητα, στους άξονες x, y αντίστοιχα [$L^2 T^{-1}$]

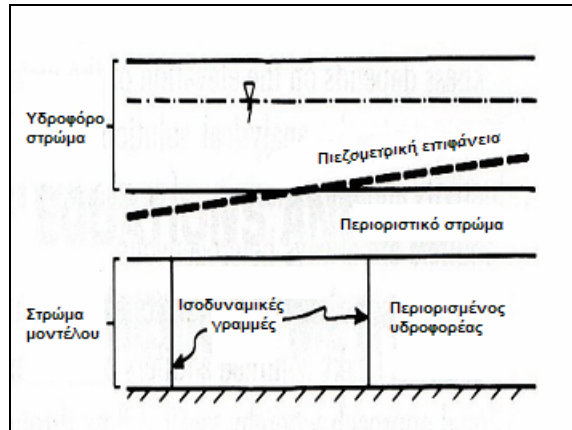
S : ο συντελεστής αποθηκευτικότητας, []

R : θετικός όρος, που αφορά την επαναφόρτιση του υδροφορέα, [LT^{-1}]

L : η διαρροή $\left(= -K'_z \frac{h_{source} - h}{b} \right)$, [LT^{-1}]

K_z : η υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη διεύθυνση, [LT^{-1}]

b : το πάχος του υδροφορέα



Εικόνα 4.2: Προσέγγιση υδροφορέα, [5]

4.3.2. Προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system view point)

Σε αυτήν την προσέγγιση, ο καθορισμός του είδους των υδροφορέων και των αδιαπέρατων δεν αποτελεί αντικείμενο άμεσου ενδιαφέροντος. Στόχος είναι να κατασκευαστεί μια τρισδιάστατη κατανομή των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των ιδιοτήτων αποθήκευσης σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα οριζόντιας, αλλά και κάθετης ροής μέσα στο σύστημα και ταυτόχρονα επιτρέπει τη διαχείριση του σε δυσδιάστατο ή τρισδιάστατο προφίλ. [5]

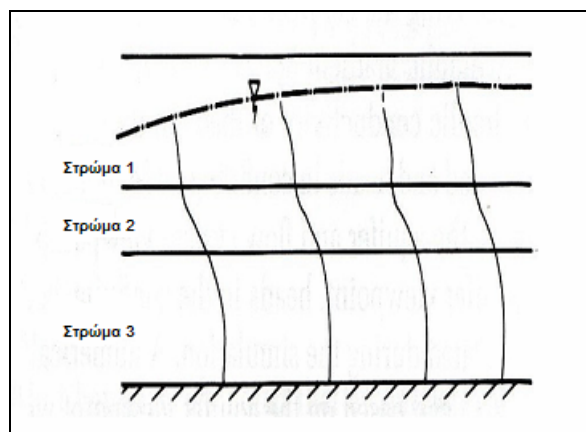
Η θεμελιώδης εξίσωση που χρησιμοποιείται, προκύπτει από το συνδυασμό της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας και της ταχύτητας του Darcy. Η γενική μορφή της έχει ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (4.2)$$

Όπου, $K_{x,y,z}$: ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας, $[LT^{-1}]$

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

R^* : θετικός όρος που υποδηλώνει τον όγκο νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα στη μονάδα του χρόνου, $[T^{-1}]$



Εικόνα 4.3: Προσέγγιση συστήματος ροής, [5]

4.4. Αριθμητικές μέθοδοι (Numerical methods)

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων για την προσομοίωση φυσικών φαινομένων, όπως αυτά που σχετίζονται με την υπόγεια ροή των υδάτων, είναι αναγκαία, εξαιτίας της αδυναμίας των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία πρακτικά προβλήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο να υπολογιστούν οι αναλυτικές λύσεις των γενικών μορφών των εξισώσεων, σε διδιάστατα και κυρίως τρισδιάστατα προβλήματα, τα οποία είναι και αυτά που εμφανίζονται στη φύση. Επιπλέον, στα φυσικά συστήματα υπόγειων υδροφορέων, οι παράμετροι, που τα χαρακτηρίζουν, παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια. [5]

Από τις αριθμητικές μεθόδους, που χρησιμοποιούνται σήμερα, οι περισσότερες γνωστές είναι οι μέθοδοι:

- ✧ Πεπερασμένων διαφορών
- ✧ Πεπερασμένων στοιχείων
- ✧ Ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
- ✧ Οριακής ολοκληρωτικής εξίσωσης
- ✧ Αναλυτικών στοιχείων

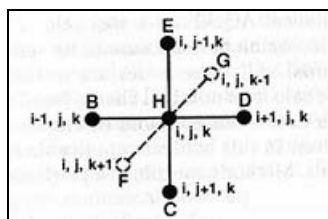
Από αυτές οι περισσότερες διαδεδομένες είναι οι δύο πρώτες. Οι υπόλοιπες αναφέρονται σε νέες τεχνολογίες και δεν εφαρμόζονται τόσο συχνά.

Ένας κώδικας (ή διαφορετικά πρόγραμμα) μπορεί να επιλύσει ένα σετ αλγεβρικών εξισώσεων, που δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις χωρικές, ολοκληρωτικές εξισώσεις (βασική εξίσωση, αρχικές και οριακές συνθήκες), που συνθέτουν το μαθηματικό μοντέλο. Η διαδικασία επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα:

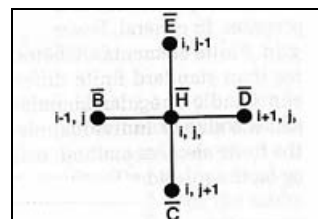
- ✧ Την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μοντέλο.
- ✧ Την επίλυση του πίνακα των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτει.

4.4.1. Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite differences method)

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών είναι μια σχετικά εύκολη και κατανοητή μέθοδος. Απαιτεί λιγότερα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος και υπολογίζει μία τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο, με την παραδοχή ότι η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε όλο το τμήμα που περιβάλλει τον κόμβο. Δεν υπολογίζει, όμως τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς κόμβους. [5]



Εικόνα 4.4: Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών, [5]



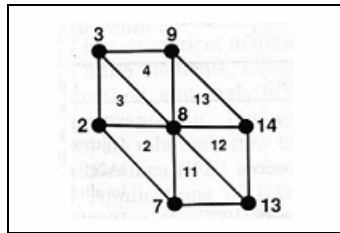
Εικόνα 4.5: Δισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών, [5]

Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (4.2) διατυπώνεται για το υπολογιστικό μόριο του προηγούμενου σχήματος (Εικόνα 4.4) ως εξής:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (4.3)$$

4.4.2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite elements method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σε αντίθεση με αυτή, των πεπερασμένων διαφορών, προσεγγίζει καλύτερα περιοχές με ακανόνιστο σχήμα και όρια, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η προσαρμογή του μεγέθους των στοιχείων, όπως και της τοποθέτησης των ορίων. Τα εσωτερικά όρια αντιμετωπίζονται καλύτερα, ενώ τα σημεία άντλησης/εμπλουτισμού του νερού και οι μεταβαλλόμενες συνθήκες προσομοιώνονται πιο σωστά. Επιπλέον, υπολογίζεται η ακριβής τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο και ταυτόχρονα είναι δυνατός ο προσδιορισμός της διακύμανσής του ανάμεσα σε δύο κόμβους διαφορετικών τιμών. [5]



Εικόνα 4.6: Τμήμα με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8, [5]

Η δισδιάστατη διαφορική εξίσωση της ροής του ανωτέρω σχήματος (Εικόνα 4.6) έχει την παρακάτω μορφή:

$$\bar{B}h_{i-1,j} + \bar{C}h_{i,j+1} + \bar{D}h_{i+1,j} + \bar{E}h_{i,j-1} + \bar{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \quad (4.4)$$

4.5. Θεμελιώδες μοντέλο (Conceptual model)

Ο σκοπός της κατασκευής ενός θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του, έτσι ώστε το σύστημα, στο σύνολό του, να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Η απλοποίηση του συστήματος είναι αναγκαία, καθώς η εξ ολοκλήρου ανακατασκευή του πεδίου είναι ανέφικτη. [5]

Για την κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου, κρίνεται απαραίτητος ο καθορισμός των υδρογραφικών μονάδων, του υδατικού ισοζυγίου καθώς και του συστήματος της ροής. [5]

► Υδρογραφικές μονάδες (Hydrostratigraphic units)

Γεωλογικές πληροφορίες συμπεριλαμβανομένων των γεωλογικών χαρτών, συνδυάζονται με δεδομένα της υδρογεωλογίας προκειμένου να καθοριστούν

οι υδρογραφικές μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν από το μοντέλο. Κατά τη διάρκεια κατασκευής του μοντέλου τα τοπικά συστήματα ροής, οι υδροφορείς και τα αδιαπέρατα στρώματα προσδιορίζονται, ούτως ώστε να χρησιμοποιηθούν σαν βάση για τις υδρογραφικές μονάδες. [5]

► **Υδατικό ισοζύγιο (Water budget)**

Οι πηγές του συστήματος, οι αναμενόμενες κατευθύνσεις της ροής και τα σημεία εξόδου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου. Οι εισροές μπορεί να περιλαμβάνουν υπόγεια επαναφόρτιση εξαιτίας κατακρημνίσεων, ή εμπλουτισμό από επιφανειακούς υδάτινους αποδέκτες. Οι εκροές αντίστοιχα, μπορεί να περιλαμβάνουν, απορροή σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Το υδατικό ισοζύγιο θα πρέπει να έχει προετοιμαστεί από τα δεδομένα του πεδίου, ώστε να μπορεί να συγκεντρώσει τα μεγέθη των ροών που περιγράφονται, παραπάνω, καθώς και τυχών αλλαγές στην αποθηκευτικότητα. [5]

► **Σύστημα ροής (Flow system)**

Τα υδρογραφικά στοιχεία αποτελούν τη βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Οι υδρολογικές πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να θεμελιώσουν την κίνηση του υπόγειου ύδατος του συστήματος, ενώ οι πληροφορίες για τη βροχόπτωση, την εξάτμιση και την επιφανειακή απορροή, όπως επίσης και τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος και τη γεωχημεία, χρησιμοποιούνται περισσότερο στην ανάλυση. Η διάσταση των επιπέδων του νερού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής και ο συσχετισμός που υπάρχει μεταξύ των υπόγειων υδροφορέων και των επιφανειακών υδατικών συστημάτων. [5]

Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά, σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα, αλλά προκειμένου να ισχυροποιηθεί το μοντέλο, θα ήταν χρήσιμο να περιέχει και πληροφορίες γεωχημείας, όπως είναι η χημεία του νερού, ώστε να εδραιωθεί η κίνηση του, να εκτιμηθεί ο ρυθμός της υπόγειας ροής και να αναγνωριστούν οι πηγές, καθώς και το μέγεθος της επαναφόρτισης. Οι χημικές αναλύσεις περιέχουν συγκεντρώσεις των κυριοτέρων κατιόντων (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+}) και ανιόντων (SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , CO_3^{-}), μετρήσεις της θερμοκρασίας και του pH, ενώ ανάλογα με τις επιδιώξεις του μοντέλου, μπορεί να περιλαμβάνουν και μετρήσεις για βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά ισότοπα και οργανικούς ρυπαντές. [5]

4.6. Κατασκευή πλέγματος (Grid design)

Για την κατασκευή του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου πρέπει, να γίνει κατάταξη του, ως προς τις χωρικές του διαστάσεις. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες μοντέλων:

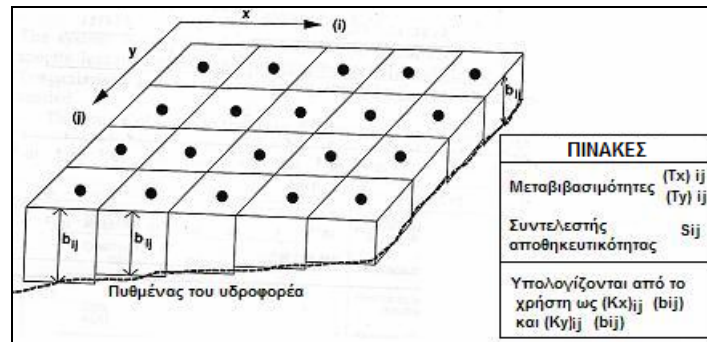
- ✧ Δισδιάστατα επιφανειακά (προσέγγιση υδροφορέα)
- ✧ Δισδιάστατα (προσέγγιση συστήματος ροής)
- ✧ Ημι-τριδιάστατα (προσέγγιση υδροφορέα)
- ✧ Τριδιάστατα (προσέγγιση συστήματος ροής)

4.6.1. Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα (Two-dimensional areal models)

Τα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα είναι κατάλληλα για να μελετήσουν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων. Τους περιορισμένους, τους περιορισμένους με διαρροή, τους ελεύθερους και τους μεικτούς.

► Περιορισμένοι υδροφορείς (Confined aquifers)

Προσδιορίζονται τα μεγέθη της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο ή στοιχείο. Η διακύμανση της μεταβιβασιμότητας μπορεί να μεταφραστεί, είτε ως διακύμανση του βάθους του υδροφορέα, είτε ως διακύμανση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η ενδεχόμενη ανισοτροπία του υδροφορέα, αντικατοπτρίζεται στη διαφορετική τιμή της μεταβιβασιμότητας στο x και y άξονα. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις τιμές που παρέχονται από τη βιβλιογραφία, ενώ η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας από αποτελέσματα δοκιμαστικών αντλήσεων. [5]



Εικόνα 4.7: Προσέγγιση περιορισμένου υδροφορέα με δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο, [5]

► Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή (Leaky confined aquifers)

Το αδιαπέρατο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί με νερό τον περιορισμένο υδροφορέα, δεν ορίζονται σαφώς από το μοντέλο, αλλά εκπροσωπούνται από έναν όρο διαρροής, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\text{Leakage} = \frac{K'_z}{b'} \quad (4.5)$$

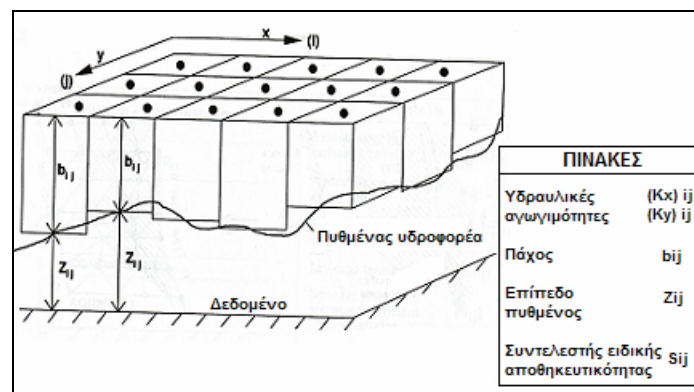
Η πηγή του νερού για έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή, μπορεί να είναι, είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας, είτε ένας ελεύθερος, ή ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο γενικά, σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος διατηρείται σταθερό σε σχέση με το χρόνο και ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση νερού εντός του αδιαπέρατου στρώματος. Η διαρροή του νερού από το αδιαπέρατο στρώμα πραγματοποιείται σε χρόνο t_s , ο οποίος εξαρτάται από την ειδική αποθηκευτικότητα, την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος. [5]



Εικόνα 4.8: Προσέγγιση διαρρέοντος περιορισμένου υδροφορέα με 2D επιφανειακό μοντέλο, [5]

► Ελεύθεροι υδροφορείς (Unconfined aquifers)

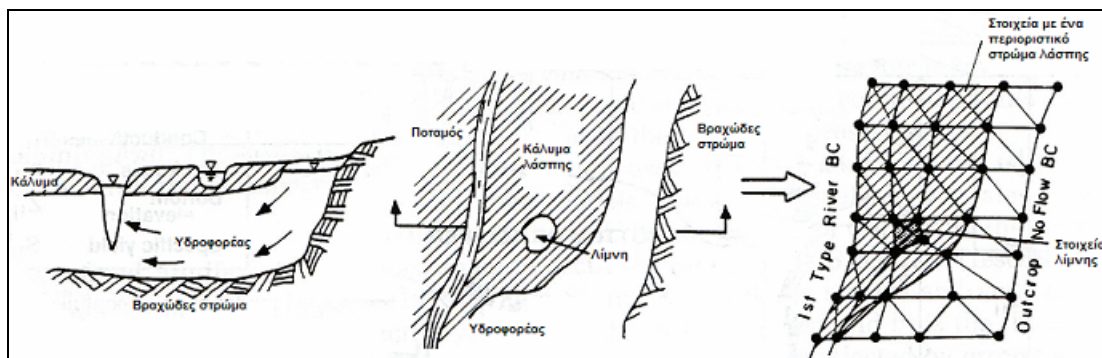
Στους ελεύθερους υδροφορείς υιοθετούνται οι παραδοχές του Dupuit και υπολογίζεται η στάθμη του υπόγειου νερού σε κάθε κόμβο. Η προσομοίωση προϋποθέτει πίνακες με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, του ενεργού πορώδους και του ύψους από ένα καθορισμένο επίπεδο αναφοράς. [5]



Εικόνα 4.9: Προσέγγιση ελεύθερου υδροφορέα με δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο, [5]

► Μικτά συστήματα υδροφορέων (Mixed aquifer systems)

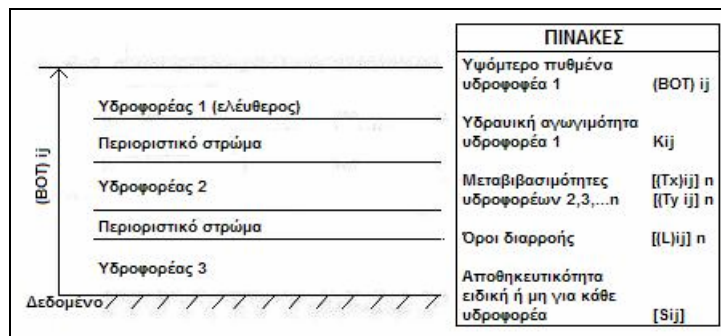
Σε αυτήν την κατηγορία, ανήκουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των περιπτώσεων που αναφέρονται παραπάνω. Συνεπώς, το σύνολο των δεδομένων και των πινάκων που αντιστοιχίζονται σε κάθε περίπτωση κρίνονται απαραίτητα. [5]



Εικόνα 4.10: Παράδειγμα μεικτού υδροφορέα (τομή-κάτοψη-πλέγμα), [5]

4.6.2. Ημι-τριδιάστατα μοντέλα (Quasi three-dimensional problems)

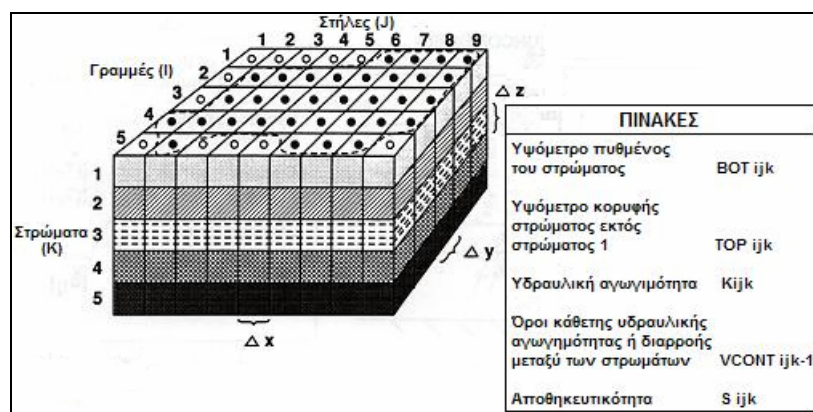
Τα μοντέλα αυτά, προσομοιώνουν μια σειρά υδροφορέων, οι οποίοι διαχωρίζονται από αδιαπέρατα στρώματα. Η επίδραση των αδιαπέρατων στρωμάτων, προσομοιώνεται διαμέσου ενός όρου διαρροής, ο οποίος υποδηλώνει την κάθετη ροή ανάμεσα στους υδροφορείς και αποτελεί συνάρτηση της διαφοράς πίεσης εκατέρωθεν του αδιαπέρατου στρώματος, της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους του. Σε περίπτωση, που η διαφορά ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος και σ' αυτήν του υδροφορέα, είναι τάξης μεγέθους μικρότερης του δύο, ενδείκνυται χρήση τρισδιάστατου μοντέλου. [5]



Εικόνα 4.11: Προσέγγιση ημι-τριδιάστατου μοντέλου (τομή), [5]

4.6.3. Τρισδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα

Τα δεδομένα που χρειάζονται σε ένα τρισδιάστατο ή δισδιάστατο μοντέλο είναι ανάλογα με αυτά, ενός δισδιάστατου και επιφανειακού, με τη διαφορά ότι θα πρέπει να αναφέρονται σε κάθε στρώμα ξεχωριστά. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, προσομοιώνουν ελεύθερους υδροφορείς, όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι μεγάλη. Οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου αποτελεσματικά, στην περίπτωση, όμως, που έχουμε μεταβολή στη στάθμη του νερού, ενδείκνυται η εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν παροδική απελευθέρωση νερού στα περιορισμένα στρώματα, για τα οποία θεωρείται μια συγκεκριμένη τιμή της ειδικής αποθηκευτικότητας. [5]



Εικόνα 4.12: Προσέγγιση τρισδιάστατου μοντέλου, [5]

Παράγοντα καθοριστικής σημασίας, για την κατασκευή ενός πλέγματος, αποτελεί η απόσταση μεταξύ των κόμβων στην οριζόντια διεύθυνση, καθώς, είναι συνάρτηση της αναμενόμενης κλίσης της στάθμης του νερού ή της πιεζομετρικής επιφάνειας. Αντίστοιχα, οι αλλαγές του υδραυλικού ύψους στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι αυτές, που θα διαμορφώσουν την επιλογή της κάθετης απόστασης των κόμβων. [5]

Εξίσου, σημαντικό παράγοντα αποτελεί η ενδεχόμενη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχουν τέτοιες διαφορές ανάμεσα σε δύο στρώματα, ώστε να μην μπορούν να θεωρηθούν ως ενιαία υδρογραφική μονάδα και να απαιτείται ξεχωριστή αντιμετώπισή τους. Γενικά, οι αλλαγές στην οριζόντια διεύθυνση πραγματοποιούνται σε μεγαλύτερη απόσταση, σε σχέση με αυτές στην κατακόρυφη. Τυχόν, αλλαγές στις εκροές, εισροές και αντλήσεις του υδροφορέα, προϋποθέτουν πυκνότερο δίκτυο, ώστε να μπορέσουν να αναπαρασταθούν. [5]

Η επιλογή της απόστασης μεταξύ των κόμβων, καθώς και οι πυκνότητες με την οποία θα εμφανίζονται, διαμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό με βάση την έκταση της περιοχής μελέτης. Ένα πλέγμα με μικρό αριθμό κόμβων είναι προτιμότερο, από άποψη πρακτικότητας, καθώς περιορίζεται ο αριθμός των δεδομένων και των υπολογισμών που χρειάζονται. Από την άλλη θα πρέπει, να λαμβάνεται υπόψη η επίπτωση που θα έχει αυτό, στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Θα πρέπει δηλαδή, να εξισορροπηθεί η ανάγκη για ακρίβεια με την μεγαλύτερη δυνατή ευχέρεια στη χρήση. [5]

4.6.4. Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών (Finite difference grid)

Ένα πλέγμα πεπερασμένων διαφορών στοιχειοθετείται από ένα σύνολο κελιών, τα οποία σχηματίζουν σειρές και στήλες. Οι κόμβοι κατονομάζονται με τη χρήση δεικτών i , j και k , που αντιπροσωπεύουν μία γραμμή, μία στήλη και ένα στρώμα, αντιστοίχως. Κατ' αυτόν, τον τρόπο κατασκευάζονται πίνακες, που περιλαμβάνουν τις τιμές των ιδιοτήτων του υδροφορέα σε κάθε κόμβο. Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων, δεν είναι απαραίτητα ίσες μεταξύ τους, εφόσον εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της περιοχής. Γενικά, ο κανόνας που ακολουθείται, επιτρέπει η απόσταση δύο κόμβων σε μία διεύθυνση να είναι μικρότερη ή ίση κατά 1,5 φορές την απόσταση των δύο προηγούμενων κόμβων. Σε περίπτωση, που δεν υπήρχε αυτός ο περιορισμός, θα διογκωνόταν το σφάλμα, που προκύπτει λόγω της δεύτερης παραγώγου, η οποία, υπολογίζεται σε ακανόνιστα διαστήματα των κόμβων. [5]

4.6.5. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (Finite elements grid)

Ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, αποτελείται από πολυγωνικά στοιχεία, τα οποία καλύπτουν το σύνολο της περιοχής μελέτης. Βασικό μειονέκτημα των μοντέλων που χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία, είναι ο αρκετά μεγάλος βαθμός δυσκολίας, της εισαγωγής των απαιτούμενων στοιχείων για τους κόμβους του πλέγματος. Συγκεκριμένα, κάθε κόμβος και κάθε στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένα και να έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα, οι συντεταγμένες τους. Η αρίθμηση των κόμβων πραγματοποιείται με

κατεύθυνση από πάνω προς τα κάτω (ή αντίστροφα, ανάλογα με τη θέση της μικρότερης διάστασης της περιοχής) και εν συνεχεία από αριστερά στα δεξιά. Σ' αυτή τη μέθοδο, κάθε στοιχείο αντιμετωπίζεται ξεχωριστά και ακολούθως συνθέτονται οι εξισώσεις που το διέπουν, σε έναν πίνακα. Η αρίθμηση των κόμβων πρέπει να γίνεται με τρόπο, τέτοιο, ώστε να ελαχιστοποιούνται τα απαιτούμενα δεδομένα. Η αναλογία μεταξύ της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης ενός στοιχείου, θα πρέπει να προσεγγίζει τη μονάδα και σε καμία περίπτωση να μην ξεπερνά την τιμή πέντε. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζονται σημαντικά τα σφάλματα. [5]

Προς αυτήν την κατεύθυνση αποσκοπεί και η χρήση γραμμικών τριγωνικών στοιχείων. Στα τριγωνικά στοιχεία, πολύ συχνά, για μεγαλύτερη ευκολία, προσδιορίζονται οι ιδιότητες στους κόμβους, οι οποίοι είναι και λιγότεροι σε σχέση με τα στοιχεία. Όταν, δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για κάθε κόμβο, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής διαφόρων μεθόδων γραμμικής παρεμβολής. Βέβαια, αν οι τιμές αυτές χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, καθίσταται αναγκαία η εκτίμηση του σφάλματος. [5]

4.7. Οριακές συνθήκες (Boundary conditions)

Οριακές συνθήκες είναι εξισώσεις, που προσδιορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος νερού) ή την παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (παράγωγος υδραυλικού ύψους – flux), στα όρια των περιοχών, που αποτελούν το αντικείμενο μελέτης. Σε σταθερές συνθήκες, επηρεάζουν τη μορφή της ροής, ενώ όταν οι συνθήκες δεν είναι σταθερές, επηρεάζουν τις λύσεις. Συνεπώς, η επιλογή των οριακών συνθηκών, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για το σωστό σχεδιασμό του μοντέλου. Τα όρια μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο κατηγορίες. Στα φυσικά και τα υδραυλικά όρια. [5]

► Φυσικά όρια (Physical boundaries)

Τα φυσικά όρια, σχηματίζονται εξαιτίας της ύπαρξης αδιαπέρατων υπόγειων στρωμάτων ή επιφανειακών υδάτινων σωμάτων.

► Υδραυλικά όρια (Hydraulic boundaries)

Τα υδραυλικά όρια, προκύπτουν από τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν και περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και στρωτές ροές.

Τα υδρογεωλογικά όρια, στο σύνολό τους, διατυπώνονται, εν μέσω τριών διαφορετικών τύπων μαθηματικών συνθηκών. Τις μαθηματικές συνθήκες πρώτου, δεύτερου και τρίτου είδους.

⇒ 1^ο Είδος (Specified head boundaries – Dirichlet conditions)

Πρόκειται για όρια, συγκεκριμένου – δεδομένου υδραυλικού ύψους.

⇒ 2^ο Είδος (Specified flow boundaries – Neumann conditions)

Πρόκειται για όρια συγκεκριμένης ροής, για τα οποία η παράγωγος του υδραυλικού ύψους είναι δεδομένη και για οριακές συνθήκες μηδενικής ροής ισούται με μηδέν.

⇒ 3^ο Είδος (Head-dependent flow boundaries – Cauchy or mixed boundary conditions)

Πρόκειται για οριακές συνθήκες ροής, οι οποίες εξαρτώνται από το υδραυλικό ύψος. Συγκεκριμένα, για μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους, υπολογίζεται η παράγωγος (flux), κατά μήκος των ορίων. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών ονομάζεται και mixed, καθώς αποτελεί συσχετισμό των οριακών υδραυλικών υψών και των οριακών συνθηκών ροής.

Όταν, έχουν πλέον καθοριστεί τα όρια ενός συστήματος, το επόμενο βήμα περιλαμβάνει, τον έλεγχο της συμφωνίας μεταξύ της μορφής της ροής που προκύπτει από το μοντέλο και αυτής που έχει παρατηρηθεί με βάση τις μετρήσεις του πεδίου. Γενικά προτιμώνται φυσικά όρια, μιας και αποτελούν υφιστάμενα μέρη του συστήματος. Τέτοιου είδους όρια θεωρούνται, μεταξύ άλλων, τα ακόλουθα:

- ✧ Αδιαπέραστοι βράχοι ως το κατώτερο όριο του συστήματος
- ✧ Σημεία στα οποία, παρατηρείται διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από δύο τάξεις μεγέθους.
- ✧ Επιφανειακοί υδάτινοι αποδέκτες, οι οποίοι διεισδύουν ολικά σε υπόγειους υδροφορείς αποτελώντας έτσι, όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους
- ✧ Αδιαπέρατα στρώματα, καθώς επίσης, ρηξιγενείς ζώνες και εισροές αλμυρού νερού σε παραθαλάσσιους υδροφορείς, αποτελούν ιδανικά όρια μηδενικής ροής.

Η αποκλειστική χρήση, οριακών συνθηκών ροής, δεν ενδείκνυται, γιατί έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή πολλαπλών λύσεων, εφόσον οι εξισώσεις που επιλύονται είναι διαφορικές. Στα προβλήματα, σταθερών συνθηκών θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον, ένας οριακός κόμβος, με γνωστό υδραυλικό ύψος, ώστε να μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών και στους άλλους κόμβους. Στα προβλήματα, μη μόνιμων συνθηκών, προϋποτίθεται επιπρόσθετα, ο καθορισμός των αρχικών συνθηκών.

Εάν δεν είναι εφικτό, να χρησιμοποιηθούν φυσικά όρια ή υδραυλικά χωρίσματα, τότε θα πρέπει να επιλεγούν διαφορετικού είδους όρια, τα οποία όμως δεν θα επεμβαίνουν με κανένα τρόπο στην επίλυση του μοντέλου, ούτε θα διαμορφώνουν τη ροή του συστήματος διαφορετικά από αυτή του πεδίου. Σ' αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα παρακάτω είδη:

► Απομακρυσμένα όρια (Distant boundaries)

Σε μεταβατικές προσομοιώσεις, τα όρια τοποθετούνται μακριά από το κέντρο του πλέγματος, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται και μεταβάλλονται, εξαιτίας των συνθηκών, που επικρατούν. Πλησίον του κέντρου του πλέγματος δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός μικρών κελιών, ενώ κοντά στα όρια της περιοχής τα κελιά γίνονται μεγαλύτερα και λιγότερα. Έτσι, σε περίπτωση άντλησης νερού από ένα φρεάτιο, για παράδειγμα, είναι δυνατόν τα όρια να παραμείνουν ανεπηρέαστα, είτε εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου στον οποίο γίνεται η προσομοίωση, είτε ταυτόχρονης εισροής ύδατος από παρακείμενες πηγές. [5]

► Τεχνητά ή υδραυλικά όρια (Artificial boundaries)

Τα τεχνητά όρια, που δεν συμπίπτουν με τα τοπικά όρια, χρησιμοποιούνται συχνά, προκειμένου να μειωθεί η έκταση της περιοχής μελέτης. Μπορεί να είναι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μηδενικής ή σταθερής ροής. Σε κάθε περίπτωση μιμούνται, κατά κάποιο τρόπο, το είδος της παροχής που σημειώνεται στην ευρύτερη περιοχή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για να δημιουργηθούν σταθερές συνθήκες κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου. Υπάρχει όμως, ο κίνδυνος σε ορισμένες περιπτώσεις, να δημιουργήσουν, σφάλματα και αυτό, διότι το μοντέλο υποθέτει, ότι οι συνθήκες στα όρια δεν μεταβάλλονται από τις αρχικές τους τιμές, παρά μόνο μετά από επέμβαση του χρήστη. Είναι δυνατό, όμως κάτω από μεταβατικές συνθήκες, τα υδραυλικά ύψη κατά μήκος των ορίων να αλλάξουν, εξαιτίας πιέσεων που δέχονται από το σύστημα. Εφόσον το μοντέλο θα αγνοήσει αυτήν την αλλαγή, άμεσο επακόλουθο είναι η δημιουργία σφάλματος στο εσωτερικό του πλέγματος. Για την περίπτωση αυτή, δύο λύσεις υπάρχουν. Είτε διευρύνονται τα όρια την περιοχής μελέτης είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές οριακών συνθηκών. [5]

4.7.1. Προσομοίωση ορίων (Boundaries simulation)

► Σταθερό υδραυλικό ύψος (Specified head)

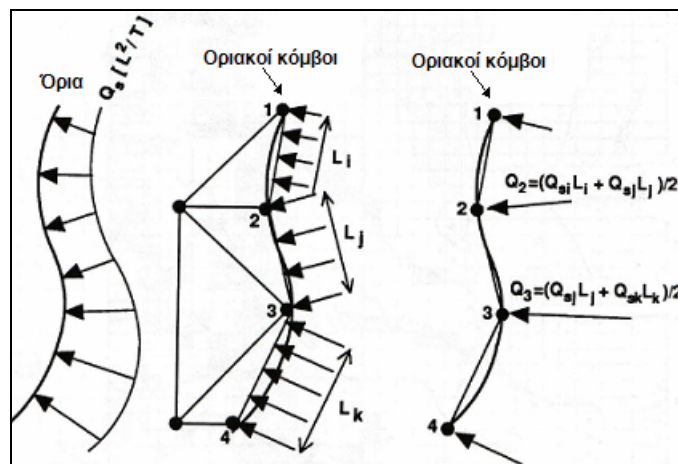
Η προσομοίωση ορίων συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, πραγματοποιείται ορίζοντας το υδραυλικό ύψος στους οριακούς κόμβους, ίσο με γνωστές τιμές που έχουν μετρηθεί. Όταν το όριο είναι ένας ποταμός, το υδραυλικό ύψος κατά μήκος του ποταμού, θα μεταβάλλεται χωρικά, ενώ όταν το όριο είναι μια λίμνη ή ένα άλλο σώμα αποθεμάτων, επικρατούν σταθερές συνθήκες υδραυλικού ύψους, σε όλο το μήκος τους. Σε δισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, αντιπροσωπεύουν το κάθετο, μέσο υδραυλικό ύψος του υδροφορέα ή επιφανειακά υδάτινα σώματα, που διεισδύουν πλήρως στο εσωτερικό του υδροφορέα. Σε τρισδιάστατα μοντέλα οι κόμβοι αυτοί, αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδάτινα σώματα ή τη στάθμη του ύδατος. Είναι δυνατόν να γίνονται εισροές και εκροές στο σύστημα, ενώ το υδραυλικό ύψος παραμένει αμετάβλητο, γεγονός μη ρεαλιστικό. Βέβαια, μπορεί να επιτευχθεί αλλαγή στην τιμή του υδραυλικού ύψους των ορίων, καθώς προχωράει η προσομοίωση, αρκεί η νέα τιμή που εισάγεται να μπορεί να δικαιολογηθεί κατάλληλα. [5]



Εικόνα 4.13: Εφαρμογή οριακών συνθηκών 1^{ου} είδους, [5]

► Σταθερή ροή (Specified flow)

Οι συνθήκες καθορισμένης ροής, χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις μεταβολές στη ροή (flux), επιφανειακών υδάτινων σωμάτων, υπόγειων ροών και πηγών. Χρησιμοποιούνται επίσης για την προσομοίωση υδραυλικών ορίων, που ορίζονται από τα τοπικά συστήματα ροής. Συνηθέστερα, χρησιμοποιούνται τα όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μιας και το υδραυλικό ύψος μετράται πιο εύκολα και εξυπηρετεί στη βαθμονόμηση του μοντέλου. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις, που η ροή είναι σταθερή και το υδραυλικό ύψος μεταβάλλεται. Σ' αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όρια συγκεκριμένης ροής, τα οποία, σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, προσομοιώνονται διαμέσου φρεατίων άντλησης ή εμπλουτισμού, ενώ σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων την τιμή της παροχής ανάμεσα σε δύο κόμβους και το πρόγραμμα την επανατοποθετεί στους κόμβους, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 4.14). [5]



Εικόνα 4.14: Εφαρμογή συνθηκών 2^{ης} Είδους, [5]

⇒ Όρια μηδενικής ροής (No-flow boundaries)

Σε σημεία, που εντοπίζονται αδιαπέρατα πετρώματα, ζώνες ρηγμάτων, υπόγειοι διαχωρισμοί, γραμμές ροής ή ακόμα και γραμμές εισροής ή επαφής θαλάσσιου νερού του υδροφορέα, μπορεί να γίνει η παραδοχή μηδενικής ροής. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών η προσομοίωση της μηδενικής ροής επιτυγχάνεται με το μηδενισμό της μεταβατικότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά, εκτός των ορίων. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων γίνεται και πάλι με τον ίδιο τρόπο, όπως φαίνεται και στο προηγούμενο σχήμα (Εικόνα 4.14). Τα περισσότερα μοντέλα, πάντως θεωρούν αυτόματα μηδενική ροή στα όρια της περιοχής μελέτης και πρέπει ο ίδιος ο χρήστης να παρέμβει, προκειμένου να αλλάξει αυτές τις συνθήκες. [5]

► Ροή εξαρτώμενη του υδραυλικού ύψους (Head-dependent flow)

Η τιμή της μεταβολής της ροής (flux) κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά, στην τιμή του υδραυλικού ύψους που καταχωρεί ο χρήστης στη μία πλευρά του ορίου και στην τιμή που υπολογίζει το μοντέλο για την άλλη πλευρά του ορίου. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, υπολογίζεται για κάθε κελί, ενώ στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για κάθε κόμβο. [5]

Η διαρροή από, ή προς μία λίμνη, ένα ποτάμι ή γενικότερα οποιοδήποτε σώμα υδατικών αποθεμάτων, προσομοιώνεται με τη χρήση συνθηκών ροής εξαρτώμενης του υδραυλικού ύψους. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$L = \frac{Q_L}{A} = \frac{K'_z}{b'} (h_{\text{source}} - h) \quad (4.6)$$

Όπου, Q_L : η ογκομετρική παροχή, [L^3T^{-1}]

A : η επιφάνεια του κελιού που σημειώνεται διαρροή, [L^2]

h_{source} : το υδραυλικό ύψος στην πηγή, [L]

h : το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα κοντά στην πηγή, [L]

K'_z : η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας, [L^2T^{-1}]

b' : το πάχος της διεπιφάνειας, [L]

Η εξατμισοδιαπνοή κατά μήκος της επιφάνειας του νερού μπορεί να υπολογιστεί με παρόμοιο τρόπο, χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος, όπου η μεταβολή στη ροή (flux) θα εξαρτάται από το βάθος του νερού και την επιφάνεια. [5]

Όλες οι επιλογές που υπάρχουν για τον ορισμό των οριακών συνθηκών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τον προσδιορισμό εσωτερικών ορίων ή την προσομοίωση πηγών ή σημείων συγκέντρωσης του υπόγειου νερού. Πολλές φορές, ο καθορισμός εσωτερικών ορίων, όπως για παράδειγμα ενός ποταμού, μπορεί να διαχωρίσει την περιοχή μελέτης σε δύο ανεξάρτητα τμήματα, τα οποία και μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά. [5]

4.8. Παράμετροι εκτέλεσης του μοντέλου (Execution parameters)

4.8.1. Κριτήριο σφάλματος (Error criterion)

Οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών των ροών, συνήθως περιέχουν σφάλματα, αποκοπής, διακριτικότητας και επανάληψης των υπολογισμών. Τα σφάλματα διακριτικότητας μπορεί να αφορούν το χρόνο ή το χώρο και πρέπει να εντοπίζονται στα αρχικά στάδια της βαθμονόμησης, του μοντέλου. Η επίδραση του μεγέθους των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων, στα αποτελέσματα του μοντέλου, θα πρέπει να ελέγχεται μέσω αλλαγών στο μέγεθος των κελιών ή των στοιχείων και εν συνεχεία επανεκτέλεση του μοντέλου. Εξαιτίας, του βαθμού δυσκολίας, στην αλλαγή ενός πλέγματος πεπερασμένων διαφορών, η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται σπάνια σ' αυτόν τον τομέα μοντελοποίησης. Αντίθετα, ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο εύκολο να υποστεί αλλαγές, χωρίς να χρειαστεί ανασχεδιασμός ολόκληρου του πλέγματος. Επιπρόσθετα, πρέπει να εξεταστεί η επίδραση του χρόνου σε μεταβατικές προσομοιώσεις, διαμέσου της χρήσης διαφορετικών χρονικών βημάτων και ελέγχου των τελικών λύσεων. [5]

Το σύνολο, των αλγεβρικών εξισώσεων, που συνθέτουν την εξίσωση της ροής, μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας μεθόδους με πίνακες, επαναληπτικές μεθόδους, ή συνδυασμό των παραπάνω. Όταν χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι, παρουσιάζεται ένα επιπλέον σφάλμα, το οποίο είναι

γνωστό ως επαναληπτικό, υπολειμματικό σφάλμα. Σ' αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να οριστεί ένα όριο από την πλευρά του χρήστη, το οποίο θα καθορίζει τότε η λύση προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα. [5]

► Όριο για το υδραυλικό ύψος (Error criterion for heads)

Η τιμή που θα επιλεγεί ως όριο, εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαφοράς των λύσεων μεταξύ δύο επαναλήψεων. Η διαφορά υπολογίζεται για κάθε κόμβο, ενώ το όριο θα πρέπει να είναι δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο, από την επιδιωκόμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η διαφορά είναι δυνατόν, να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα, ως η απόλυτη διαφορά των τιμών δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Διαφορετικά, μπορούν να αθροιστούν οι απόλυτες τιμές των διαφορών, του υδραυλικού ύψους όλων των κόμβων και το άθροισμα να συγκριθεί με δεδομένο όριο. Στην ιδανική περίπτωση, το όριο για το υδραυλικό ύψος, θα πρέπει να είναι τόσο μικρό, ώστε να εξασφαλίζεται μία ακριβής λύση, αλλά ταυτόχρονα να είναι εφικτή η σύγκλιση με την πραγματική τιμή. [5]

► Όριο για το ισοζύγιο νερού (Error criterion for water balance)

Ένας άλλος τρόπος για να ελεγχθεί, το ποσοστό του υπολειμματικού σφάλματος, περιλαμβάνει τη σύγκριση των ολικών εισροών και εκροών του νερού, με βάση το ισοζύγιο μάζας. Το σφάλμα, υπολογίζεται ως η διαφορά των εκροών και των εισροών, ως προς εκροές (ή τις εισροές). Στην ιδανική περίπτωση, το σφάλμα αυτό, θα είναι μικρότερο από 0,1%. Όμως, μέχρι και περίπου 1% θεωρείται αποδεκτό. Το ισοζύγιο μάζας του νερού, μπορεί να αποτελέσει βασικό δείκτη ασφαλείας, όπως για παράδειγμα όταν προκύψουν υπερβολικά μεγάλες ροές, εξαιτίας λανθασμένων τιμών των δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί να υποδείξει κατά πόσο, ένα συγκεκριμένο μοντέλο είναι σε θέση να δώσει αποδεκτή λύση για το εξεταζόμενο πρόβλημα. [5]

4.8.2. Βαθμονόμηση (Calibration)

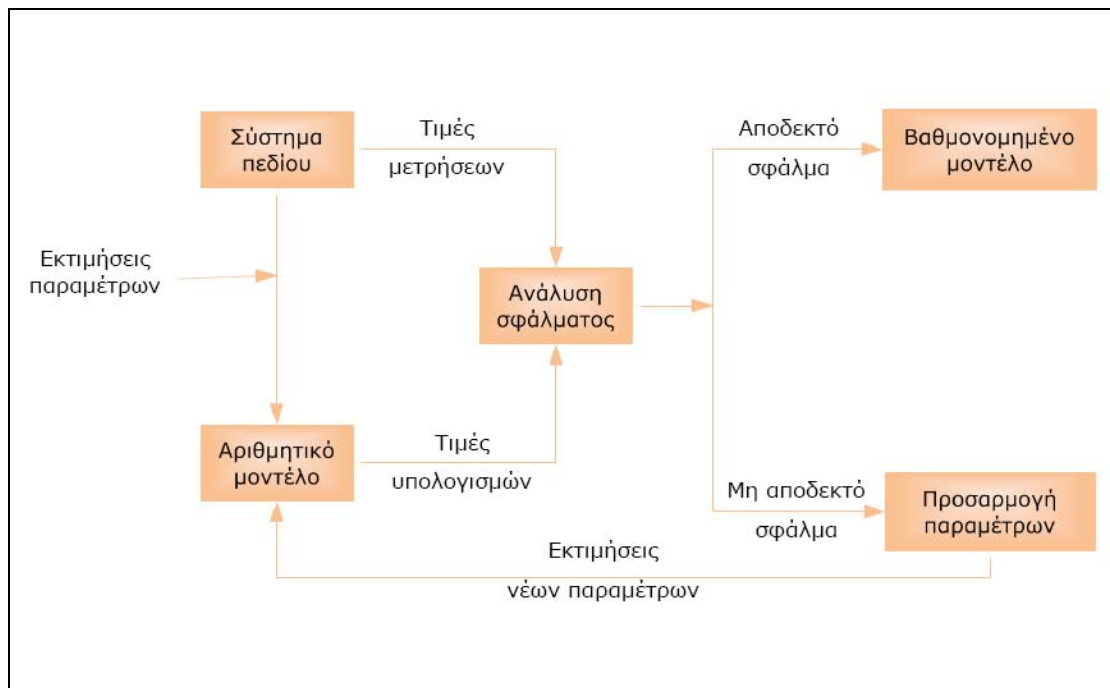
Η βαθμονόμηση είναι μια διαδικασία, μέσω της οποίας γίνεται μια προσπάθεια να αποδειχθεί, ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται, είναι σε θέση να δώσει αποτελέσματα, ανάλογα με αυτά που παρατηρούνται στο πεδίο. Επιλύεται, δηλαδή, το αντίστροφο πρόβλημα, με αναφορά, κάποια γνωστά βασικά μεγέθη. Πραγματοποιείται συνήθως, σε μόνιμες συνθήκες, αλλά μπορεί εξίσου να εφαρμοστεί για μεταβατικές συνθήκες, ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Στην περίπτωση, που οι συνθήκες είναι μόνιμες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενδεικτικές, οι μέσες τιμές μετρήσεων του πεδίου, οι οποίες έχουν ληφθεί σε βάθος χρόνου. Εάν οι διακυμάνσεις, που υπάρχουν, είναι μεγάλες ή ο αριθμός των μετρήσεων περιορισμένος, δεν μπορεί να υποτεθεί ότι οι συνθήκες είναι μόνιμες και κατά συνέπεια η βαθμονόμηση θα πρέπει να γίνει κάτω από μεταβατικές συνθήκες. [5]

Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι βαθμονόμησης είναι:

- ✧ Καθορισμός των παραμέτρων με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος.
- ✧ Αυτόματη εκτίμηση των παραμέτρων.

► Δοκιμή και σφάλμα (Trial and error)

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, οι τιμές των παραμέτρων εφαρμόζονται σε κάθε κόμβο και αλλάζουν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης μέχρις ότου, επιτευχθούν οι επιδιωκόμενες τιμές. Πριν από τη βαθμονόμηση, προσδιορίζεται το εύρος της αβεβαιότητας κάθε παραμέτρου και βάσει αυτού, κάποιες, αλλάζουν περισσότερο συχνά, από άλλες. Μετά από τη βαθμονόμηση ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας. Σε γενικές γραμμές, πάντως η μέθοδος αυτή, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις γνώσεις και την εμπειρία του χρήστη, εφόσον από ένα τεράστιο εύρος συνδυασμών, αυτός επιλέγει τις τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές και θα οδηγήσουν στον καθορισμό των τελικών τιμών των παραμέτρων. [5]



Εικόνα 4.15: Σχηματική αναπαράσταση μεθόδου «Δοκιμή και σφάλμα», [5]

► Αυτόματη βαθμονόμηση (Automated calibration)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε ειδικά ανεπτυγμένους κώδικες, οι οποίοι χρησιμοποιούν είτε την άμεση είτε την έμμεση προσέγγιση για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Στην άμεση προσέγγιση, οι άγνωστες παράμετροι θεωρούνται εξαρτημένες μεταβλητές στη βασική εξίσωση, ενώ τα υδραυλικά ύψη, ανεξάρτητες. Αυτή, όμως η προσέγγιση είναι επιρρεπής στην αστάθεια των λύσεων που προκύπτουν και επιπρόσθετα, δεν αναγνωρίζει τα σφάλματα μετρήσεων, για αυτό και στην πράξη, έχει εγκαταλειφθεί. Η έμμεση προσέγγιση είναι ανάλογη με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, καθώς και εδώ το πρόβλημα επιλύεται, μέσω επαναλήψεων. Η διαφορά είναι, ότι εδώ ελέγχεται αυτόματα η λύση και ρυθμίζονται οι παράμετροι έτσι ώστε, να ελαχιστοποιείται το σφάλμα. Παρότι, η έμμεση προσέγγιση, παρέχει πιο σταθερές λύσεις από την άμεση, παρουσιάζει και αυτή κάποια αστάθεια, με αποτέλεσμα ορισμένες φορές να καταλήγει σε παράλογες λύσεις (πχ. αρνητικές τιμές). [5]

Μια πρώτη εκτίμηση της αξιοπιστίας της βαθμονόμησης, μπορεί να γίνει μέσω της σύγκρισης των ισοϋψών του υδραυλικού ύψους, που προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου, με αυτές που δίνονται ως αποτελέσματα, της προσομοίωσης του μοντέλου. Μόνο αυτό, όμως, δεν επαρκεί. Στη συνέχεια, θα πρέπει να δημιουργηθεί μια πιο ολοκληρωμένη λίστα με τις τιμές του πεδίου και της προσομοίωσης, όπου θα σημειώνονται και οι διαφορές τους. Ο μέσος όρος των διαφορών αυτών, αποτελεί ένα μέτρο του σφάλματος που υπάρχει στη βαθμονόμηση και το οποίο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. [5]

⇒ **Επίπεδο βαθμονόμησης και κατανομή σφάλματος (Calibration level and distribution error)**

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά επίπεδα βαθμονόμησης, στα οποία χρησιμοποιείται διαφορετικό κριτήριο για το επιτρεπτό σφάλμα και επιδιώκεται διαφορετικός στόχος. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζονται τμήματα του πλέγματος, στα οποία δεν είναι εφικτή η βαθμονόμηση υψίστου επιπέδου. Η κατανομή των επιπέδων αυτών πρέπει να παρουσιαστεί σε ένα χάρτη. Υπό σταθερές συνθήκες απαιτείται ένας χάρτης για κάθε μέγεθος βαθμονόμησης, ενώ υπό μεταβατικές συνθήκες απαιτείται επιπλέον και για κάθε χρονικό βήμα, που χρησιμοποιείται. Σε γενικές γραμμές, η εκτίμηση της κατανομής του σφάλματος, αποτελεί ένα είδος περισσότερο διεξοδικής βαθμονόμησης. [5]

⇒ **Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)**

Στόχος της αναλύσεως ευαισθησίας είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας του βαθμονομημένου μοντέλου, η οποία είναι αποτέλεσμα της αβεβαιότητας στις εκτιμήσεις των παραμέτρων του υδροφορέα, στις ασκούμενες πιέσεις και στις οριακές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής της, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, των συντελεστών αποθηκευτικότητας, του εμπλουτισμού του υδροφορέα και των οριακών συνθηκών, μεταβάλλονται συστηματικά, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμούς, εντός ενός λογικού εύρους τιμών. Το μέγεθος της αλλαγής που προκύπτει στις λύσεις του μοντέλου είναι και αυτό που υποδεικνύει την ευαισθησία του. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει μέσω συντελεστών ευαισθησίας, επιμέρους περιοχές του πλέγματος, που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε σχέση με τις υπόλοιπες. [5]

⇒ **Επαλήθευση του μοντέλου (Model verification)**

Κατόπιν της εκτελέσεως του μοντέλου και της λήψης των αποτελεσμάτων, πρέπει να γίνει επαλήθευση. Έλεγχος, δηλαδή, κατά πόσο οι τιμές που ανακύπτουν βρίσκονται σε συμφωνία με τις τιμές των μετρήσεων πεδίου, στα πλαίσια πάντα, ενός δεδομένου ορίου απόκλισης. Εάν, κατά την επαλήθευση αποδειχθεί ότι είναι απαραίτητος ο επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων, πραγματοποιείται μια νέα βαθμονόμηση, για την οποία και απαιτούνται καινούρια ανεξάρτητα δεδομένα πεδίου. Πολλές φορές, όμως δεν υπάρχει μεγάλο εύρος στα υπάρχοντα σετ μετρήσεων πεδίου, ώστε να είναι εφικτή η επαλήθευση της προσομοίωσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα μοντέλο με απλή βαθμονόμηση και κατά το δυνατόν καλή ανάλυση ευαισθησίας, στη βαθμονόμηση και στις προβλέψεις, αποτελεί τη μοναδική επιλογή. [5]

4.8.3. Πρόβλεψη (Prediction)

Ο απώτερος στόχος ενός μοντέλου, περιλαμβάνει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των συνθηκών, που θα επικρατούν σε ένα σύστημα μελλοντικά. Σημαντική παράμετρο, αποτελεί ο χρόνος στον οποίο, το μοντέλο θα εξακολουθεί να πραγματοποιεί ακριβείς προβλέψεις. Ο χρόνος αυτός, εξαρτάται από τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, της επαλήθευσης και της ανάλυσης ευαισθησίας. Η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη, προκύπτει κατά κύριο λόγο, από την αβεβαιότητα της αξιοπιστίας του βαθμονομημένου μοντέλου, καθώς και των μελλοντικών συνθηκών. Πάντα, υπάρχει το ενδεχόμενο, αυτές να αλλάξουν εξαιτίας υδρολογικών πιέσεων και ανθρώπινων παρεμβάσεων, καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο, τις παραδοχές και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λανθασμένα. Για το λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η διεξαγωγή ανάλυσης ευαισθησίας και για τα αποτελέσματα των μελλοντικών προβλέψεων. [5]

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1. Γεωγραφική θέση (Geographical position)

Η υπό εξέταση περιοχή εντοπίζεται βορειοδυτικά της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα βρίσκεται δυτικά του νομού Χανίων, στον οποίο και υπάγεται διοικητικά, εφόσον αποτελεί τμήμα της επαρχίας Κισσάμου. Καλύπτει σημαντικό μέρος του δήμου Κισσάμου και απέχει από την πόλη των Χανίων απόσταση περίπου ίση με 35 km. Η επιλογή της περιοχής, βασίστηκε στο μεγάλο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η παραλία των Φαλασάρνων και διαθέσιμες πληροφορίες όσο αφορά τις υφιστάμενες υπόγειες υδροφορίες.



Εικόνα 5.1: Χάρτης με τους δήμους του νομού Χανίων, [39]

Ο δήμος Κισσάμου, μέρος του οποίου θα αποτελέσει το αντικείμενο αυτής της μελέτης, απαρτίζεται από ένα υπολογίσιμο αριθμό επιμέρους οικισμών. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι η κωμόπολη του Κισσάμου, ο πληθυσμός της οποίας ανέρχεται στους 3000 κατοίκους. Αποτελεί διοικητικό, πνευματικό αλλά και οικονομικό κέντρο για την ευρύτερη περιοχή.

Λίγο πιο δυτικά της περιοχής μελέτης, εντοπίζεται ο κόλπος του Κισσάμου. Με μέτωπο προς το βορρά έχει έκταση περίπου 18,6 km² και αποτελείται από περίπου 45 km ακανόνιστων ακτών που περιλαμβάνουν χερσονήσους, κόλπους και όρμους.

Στην περιοχή αυτή, της παραλίας του Κισσάμου έχει κατασκευαστεί ένα από τα πλέον σημαντικά έργα, που έχει συμβάλει δραστικά στην ανάπτυξη της περιοχής. Πρόκειται για το λιμάνι του Καβρονησίου, το οποίο και αποτελεί το σύνδεσμο της Κρήτης με την Πελοπόννησο και κατ' επέκταση με την υπόλοιπη ηπειρωτική Ελλάδα.

5.2. Γεωμορφολογία (Geomorphology)

Κατά τη διάρκεια των περιόδων του Μειοκαίνου και του Πλειοκαίνου τεκτονικές κινήσεις έπληξαν την περιοχή με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρηγμάτων. Τα ρήγματα αυτά, έχουν σε μεγάλο βαθμό διαμορφώσει και το γεωμορφολογικό χαρακτήρα της, ενώ η μορφολογική υφή της είναι αποτέλεσμα των διεργασιών διάβρωσης και αποσάθρωσης των πετρωμάτων. Το ανάγλυφο που έχει διαμορφωθεί στην περιοχή είναι αποτέλεσμα συνθηκών και διεργασιών, οι οποίες θα περιγραφούν στην πορεία. Επίσης, όμως παρουσιάζει άμεση σχέση με τη γεωλογική σύσταση του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, σε περιοχές όπου επικρατούν ασβεστολιθικοί σχηματισμοί το ανάγλυφο είναι τραχύ. Στις περιοχές, όπου τα ιζήματα είναι νεότερα, είναι περισσότερο ομαλό.

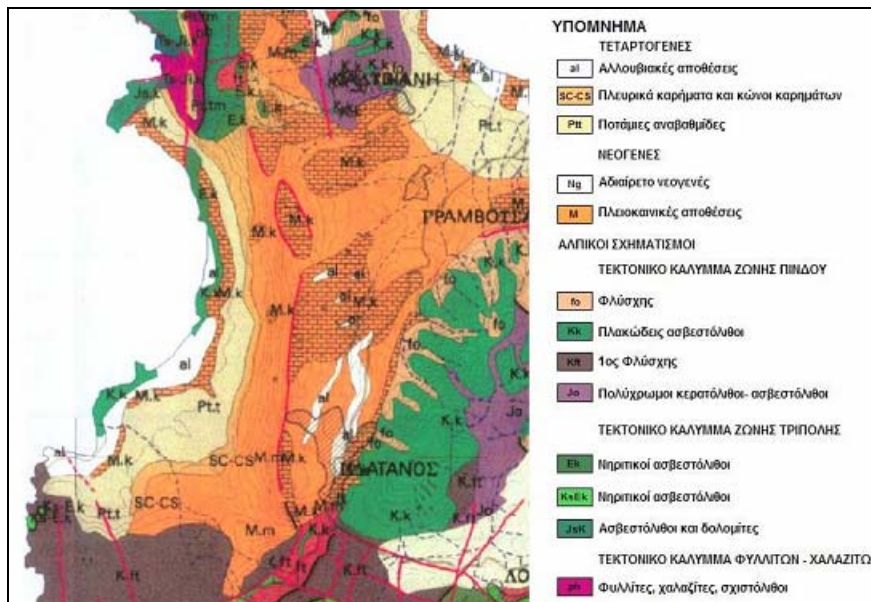
Σε συνάρτηση με την τιμή του υψομέτρου η περιοχή μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις επιμέρους μορφολογικές ζώνες. Την ορεινή, ημιορεινή και χαμηλή ζώνη. Ως ορεινή ζώνη χαρακτηρίζεται μια περιοχή μεγάλου υψομέτρου, στην οποία συναντάται πλήθος βουνοκορφών και χαραδρών. Σε αυτήν ανήκει το ορεινό τμήμα του ακρωτηρίου της Γραμβούσας. Ως ημιορεινή χαρακτηρίζεται μία ζώνη με πιο ήπιο ανάγλυφο και στην περιοχή μελέτης εντοπίζεται κατά κύριο λόγο, νότια και νοτιοανατολικά. Τα απόλυτα υψόμετρα εδώ, διακυμαίνονται μεταξύ 200 m και 400 m. Τέλος, στη χαμηλή ζώνη κατατάσσονται περιοχές που το υψόμετρό τους δεν ξεπερνά τα 200 m. Τέτοιες είναι, οι παράκτιες περιοχές της δυτικής πλευράς.

5.3. Γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά (Geological and hydrological characteristics)

5.3.1. Γεωλογία (Geology)

Η γεωλογική δομή τη Κρήτης συνδέεται άμεσα με τη γεωλογική δομή της υπόλοιπης Ελλάδας, η οποία χωρίζεται σε διάφορες γεωτεκτονικές ζώνες με γενική διεύθυνση στον ηπειρωτικό χώρο της, βορειοδυτικά-νοτιοανατολικά. Κάθε περιοχή, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη χαρτογραφίσιμη, στρωματογραφική / λιθολογική διαδοχή των πετρωμάτων της, όπως αυτά προέκυψαν από την επαλληλία των τεκτονικών γεγονότων που οδήγησαν στη δημιουργία του ορογενούς. Η Κρήτη βρίσκεται στο νότιο κλάδο του αλπικού ορογενούς καθώς επίσης και πάνω στην καμπή του Ελληνικού τόξου που εκτείνεται από τη δυτική ηπειρωτική Ελλάδα, τη Δυτική Πελοπόννησο, τα Κύθηρα την Κρήτη, την Κάρπαθο μέχρι και τη Ρόδο. Στην εσωτερική πλευρά του εν λόγω τόξου, δηλαδή στο Ιόνιο, Λιβυκό πέλαγος και νότια της Ρόδου λαμβάνει χώρα και η ελληνική τάφρος. Η τάφρος είναι αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Αφρικανικής πλάκας με την Ευρασιατική.

Γενικά η Κρήτη θεωρείται ότι έχει πολύπλοκη γεωτεκτονική δομή, κάτι που σύμφωνα με διάφορες απόψεις, οφείλεται κυρίως στη σύγκλιση των παραπάνω λιθοσφαιρικών πλακών. Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα και η περιοχή μελέτης παρουσιάζει πολύ ενδιαφέρουσα δομή από γεωλογική άποψη, τα χαρακτηριστικά της οποίας, φαίνονται στον ακόλουθο γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 1.3.1).



Εικόνα 5.2: Γεωλογικός χάρτης περιοχής, [20]

Εξετάζοντας, πρώτα το δυτικό τμήμα της περιοχής διαπιστώνεται η έντονη παρουσία ιζημάτων τεταρτογενούς. Αυτά αποτελούνται κυρίως από ποτάμιες αναβαθμίσεις, δηλαδή χειμαρρώδεις αποθέσεις λατυπών, κροκαλών, άμμων και αργίλων σε διάφορα υψόμετρα και διαφορετικού βαθμού διαγένεσης. Επίσης εμφανίζονται πλευρικά καρήματα και κώνοι καρημάτων. Τέλος υφίστανται σε μικρότερο βαθμό και κάποιες αλουμενικές αποθέσεις. Πρόκειται για σύγχρονες αποθέσεις εσωτερικών λεκανών και παράκτιες αποθέσεις στις κοίτες και τις εκβολές των χειμάρρων και αργιλοαμμώδη χαλαρά, εν γένει, υλικά αποτελούμενα από αργίλους, άμμους και κροκαλολατύπες.

Βορειοδυτικά εμφανίζονται κάποιες ενότητες φυλλιτών και χαλαζιτών. Αυτές περιλαμβάνουν φυλλίτες, μεταψαμίτες, χαλαζίτες και σχιστόλιθους χαμηλού βαθμού μεταμόρφωσης. Επιπλέον εμφανίζονται και κάποια τεκτονικά κλάσματα, που ανήκουν στη ζώνη της Τρίπολης. Κυρίως περιλαμβάνουν νηριτικούς, μεσοπαχυστρωματώδεις και κατά θέσεις δολομημένους ασβεστόλιθους. Σε μικρότερη έκταση κάνει την εμφάνισή του, ο φλύσχος, ο οποίος δημιουργείται από τις εναλλαγές αργιλικών σχιστόλιθων και ψαμιτών με μικρές ενστρώσεις τεφρών, ασβεστόλιθων, τουρβιδιτών και ανθρακικών, κυρίως, ολισθόλιθων.

Τέλος, νοτιοδυτικά, εντοπίζονται ενότητες της ζώνης Πίνδου και συγκεκριμένα πρώτος φλύσχος. Πρόκειται για εναλλαγές λεπτών στρωμάτων από ερυθρές μάργες, κερατόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και αργιλομαργαϊκούς σχιστόλιθους.

Εξετάζοντας το κεντρικό τμήμα της περιοχής διαπιστώνεται ότι κυριαρχούν τα ιζήματα του νεογενούς και συγκεκριμένα οι μειοκαινικές αποθέσεις. Οι μειοκαινικές αποθέσεις, σε γενικότερη βάση, αποτελούνται από μαργαϊκούς ψαμιτίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, κροκαλοταγή και παρεμβολές γύψων. Εδώ, απ' ό,τι φαίνεται, έχουν επικρατήσει οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι.

Στο βόρειο μέρος του κεντρικού τμήματος εκτός από μαργαϊκές αποθέσεις εμφανίζονται και κάποιοι σχηματισμοί της ζώνης Πίνδου. Αυτοί αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ασβεστόλιθους, οι οποίοι είναι πλακώσεις, κυρίως μικριτικοί με κονδύλους και ενστρώσεις πυριτόλιθων και λεπτές ενστρώσεις, αργιλικών σχιστόλιθων. Κατά θέσεις περιέχουν λατυποπαγή, ενώ στα ανώτερα τμήματα συναντώνται στρώματα μετάβασης προς το φλύσχη. Ο φλύσχος αποτελείται από ψαμμίτες, ασβεστολιθικούς ψαμμίτες ιλμόλιθους.

Νότια συναντώνται και πάλι, τεκτονικά κλάσματα ζώνης της Πίνδου, εφόσον το στρώμα του πρώτου φλύσχη επεκτείνεται μέχρι και το κέντρο της περιοχής που μελετάται. Σε μικρότερο βαθμό εντοπίζεται φλύσχος του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Τρίπολης.

Στο ανατολικό κομμάτι της περιοχής μελέτης υφίστανται ως επί το πλείστο σχηματισμοί της ζώνης Πίνδου. Το μεγαλύτερο μέρος καταλαμβάνεται από τους πλακώδεις μικριτικούς ασβεστόλιθους. Εκτός, αυτών σημαντική έκταση καταλαμβάνει το στρώμα του φλύσχη που περιλαμβάνει, κατά κύριο, λόγο ψαμμίτες. Οι πολύχρωμοι κερατόλιθοι – ασβεστόλιθοι καλύπτουν, με τη σειρά τους, ένα μικρό μέρος από το σύνολο των ενώσεων της συγκεκριμένης περιοχής, που ανήκουν στη ζώνη Πίνδου. Ταυτίζονται με τις εναλλαγές κυανών, πράσινων καστανών, ερυθρών αλλά και μαύρων κερατόλιθων με συχνές ενστρώσεις ασβεστόλιθων, οι οποίοι κατά θέσεις περιέχουν κονδύλους κερατόλιθων.

Βορειοανατολικά της περιοχής, κυριαρχούν οι ποτάμιες αναβαθμίδες, οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελούν ιζήματα του τεταρτογενούς. Σε μικρότερη έκταση κάνουν την εμφάνισή τα οι μάργες και οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι νεογενούς.

Νοτιοανατολικά η μεγαλύτερη επιφάνεια της περιοχής καλύπτεται από αδιαίρετο νεογενές, αποτελούμενο από μάργες, ψαμμίτες και μαργαϊκούς παχυστρωματώδεις ως άστρωτους ασβεστόλιθους. Επίσης υφίστανται και οι αλπικές ενώσεις ως επέκταση αυτών που εμφανίζονται στο κεντρικό κομμάτι της ανατολικής πλευράς που εξετάζεται.

Ανακεφαλαιωτικά, αναφέρεται ότι τα ιζήματα τεταρτογενούς καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της δυτικής πλευράς της περιοχής, τα ιζήματα νεογενούς εμφανίζονται επί το πλείστο στο κέντρο, ενώ οι αλπικοί σχηματισμοί κυριαρχούν στα ανατολικά. Τα τεκτονικά κλάσματα της ζώνης Τρίπολης εντοπίζονται, κατά κύριο λόγο, δυτικά χωρίς όμως να καταλαμβάνουν ιδιαίτερα μεγάλες εκτάσεις, όπως και οι φυλλίτες – χαλαζίτες.

5.3.2. Υδρογεωλογία (Hydrogeology)

Η υδρογεωλογία μιας περιοχής σχετίζεται με την κίνηση του νερού μέσα από υδροπερατούς, γεωλογικούς σχηματισμούς. Αυτή καθορίζει σε μεγάλο βαθμό, τους υπόγειους υδροκρίτες, οι οποίοι με τη σειρά τους κατευθύνουν την κίνηση του υπόγειου νερού και σχηματίζουν τους υπόγειους ταμιευτήρες. Γενικά η ανάπτυξη ενός υπόγειου υδροφορέα εξαρτάται μεταξύ άλλων, από τη διαπερατότητα και το πάχος των σχηματισμών, την υπεδάφια έκτασή τους, καθώς επίσης και από τα υφιστάμενα ρήγματα.

Σύμφωνα με την περιγραφή της γεωλογικής δομής που προηγήθηκε, στην περιοχή, κυρίαρχη παρουσία έχουν τα ιζήματα νεογενούς και τεταρτογενούς. Οι μάργες και οι άργιλοι χαρακτηρίζονται για τη στεγανότητά τους, ενώ αντίθετα οι ψαμίτες, τα κροκαλοπαγή και οι άμμοι μπορεί να είναι ημιπερατοί έως υδροπερατοί σχηματισμοί ανάλογα τις επιπλέον ιδιότητές τους. Σημαντική παρουσία έχουν και οι γεωλογικοί σχηματισμοί της ζώνης Πίνδου. Ο φλύσχης έχει την ιδιότητα να είναι στεγανός, ενώ οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι μπορεί να συμπεριφέρονται από ημιπερατοί έως και πλήρως διαπερατοί στο νερό, ανάλογα με το είδος τους. Τα τεκτονικά κλάσματα της ζώνης Τρίπολης καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση σε σχέση με τους υπόλοιπους σχηματισμούς και πρόκειται κυρίως για ασβεστόλιθους και δολομίτες. Οι εν λόγω, σχηματισμοί εμφανίζουν ιδιαίτερα μεγάλη διαπερατότητα στο νερό και κατ' αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται σημαντικά η κίνηση του νερού διαμέσου αυτών. Η παρουσία ενώσεων φυλλιτών – χαλαζιτών είναι περιορισμένη και δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την κίνηση του νερού. Γενικά, πάντως, οι σχηματισμοί αυτοί έχουν την ιδιότητα να είναι στεγανοί και ανθεκτικοί στη διάβρωση που θα μπορούσε να επιφέρει το νερό.

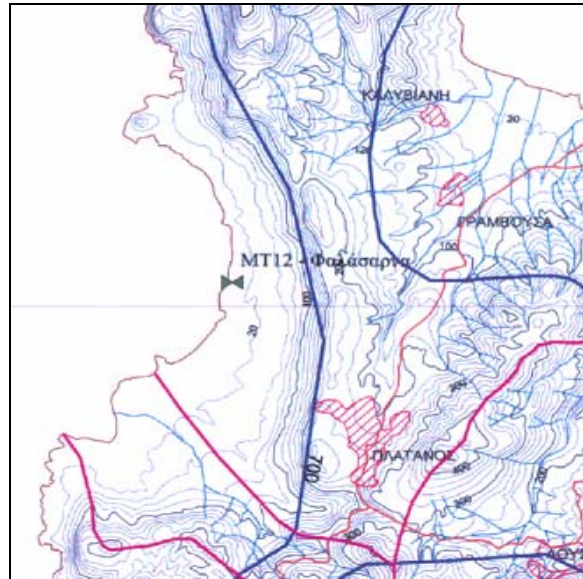
Μια από τις πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες που επηρεάζει το βαθμό διαπερατότητας, που παρουσιάζουν κάποιοι γεωλογικοί σχηματισμοί, στο νερό, είναι η ηλικία τους. Έτσι για παράδειγμα τα ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή της Μ. Μειοκαινικής ηλικίας εκτός από μεγάλη καρστικότητα, εμφανίζουν εξίσου σημαντική διαπερατότητα στο νερό, αυξάνοντας έτσι, την πιθανότητα εμφάνισης υπόγειας υδροφορίας.

Στο γεωλογικό χάρτη της περιοχής (Εικόνα 1.3.1) φαίνονται μεταξύ άλλων και οι θέσεις των σημαντικότερων επιβεβαιωμένων ή ενδεχόμενων ρηγμάτων. Παρατηρείται ότι στην περιοχή επικρατεί έντονη ρηξιγενή τεκτονική. Αυτό συνεπάγεται τη διευκόλυνση της κίνησης του νερού μέσω των ρωγματώσεων, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της πιθανότητας εμφάνισης υπόγειας υδροφορίας.

Οι υδρογεωλογικές ενότητες, οι πιο σημαντικές τουλάχιστον απεικονίζονται από τον υδρογεωλογικό χάρτη (Εικόνα 1.3.2), όπου τα διάφορα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής αντιστοιχίζονται σε γραμμές, διαφορετικού χρώματος και πάχους. Επιπρόσθετα μπορεί να διακρίνει κανείς μετεωρολογικούς και βροχομετρικούς σταθμούς, καθώς και θέσεις υδρομέτρησης αν υπάρχουν. Στην περιοχή υφίσταται ένας μετεωρολογικός σταθμός πλησίον των Φαλάσαρων.

Οι χρώματος φούξια γραμμές του χάρτη απεικονίζουν τα όρια των κύριων υδρολογικών γραμμών, καθορίζουν δηλαδή, τις θέσεις στις οποίες υπάρχει αξιόλογη υδροφορία. Οι μπλε γραμμές, μεγάλου πάχους, αντιστοιχίζονται στους υδροκρίτες των λεκανών απορροής της περιοχής. Οι λεπτές γραμμές, σκούρου μπλε χρώματος, είναι οι ισοϋψείς και υποδηλώνουν το υψόμετρο της εκάστοτε περιοχής. Η κατά τόπους γκρι απόχρωση διαφόρων περιοχών πάνω στο χάρτη υποδηλώνει την ύπαρξη καρστικών πετρωμάτων. Συνεπακόλουθα, σε αυτά τα σημεία οι υφιστάμενοι υδροφορείς παρουσιάζουν ανάλογα χαρακτηριστικά (καρστικοί υδροφορείς, υποκείμενοι των ανωτέρων γεωλογικών σχηματισμών). Η τροφοδοσία των συγκεκριμένων ενοτήτων, σε νερό, επιτυγχάνεται μέσω των βροχοπτώσεων με τη συμβολή των

υδροπερατών σχηματισμών και από τις διηθήσεις μέρους των απορροών που προέρχονται από διαφορετικές λεκάνες απορροής κατά τη διάρκεια της ροής τους, διαμέσου των καρστικών σχηματισμών. Στις ενότητες των καρστικών υδροφορέων δεν υφίσταται υφαλμύριση.



Εικόνα 5.3: Υδρογεωλογικός χάρτης περιοχής, [20]

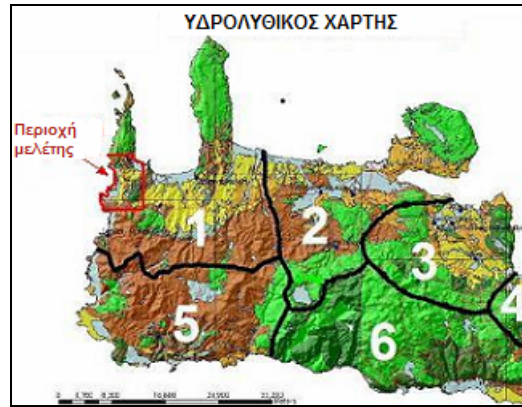
Διαπιστώνεται λοιπόν, νότια της περιοχής μελέτης, η ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα (φούξια γραμμές). Το νερό διέρχεται μέσω τεταρτογενών, νεογενών και αλπικών (τεκτονικά κλάσματα Πίνδου) ενώσεων, οι οποίες ως προς τη διαπερατότητά τους κυμαίνονται από στεγανές ως πλήρως υδροπερατές. Παρότι, λοιπόν, κάποιοι από τους παραπάνω σχηματισμούς είναι στεγανοί, το νερό κινείται μέσω των ρωγματώσεων, λόγω της ρηξιγενούς δομής που χαρακτηρίζει την περιοχή.

Δυτικά και βορειοανατολικά της περιοχής εντοπίζονται υπόγειοι υδροκρίτες, μέσω των οποίων οριοθετούνται υπόγειες λεκάνες μικρής δυναμικότητας με απορροές προς τα δυτικά και προς τα ανατολικά αντίστοιχα. Στην ευρύτερη περιοχή, πάντως, βάσει μελετών, ο κύριος άξονας κατεύθυνσης του νερού των υπόγειων υδροφορέων καταλήγει στις πηγές Κολενίου.

5.3.3. Υδρολογία (Hydrology)

Οι υδρολογικές συνθήκες μιας περιοχής, καθορίζονται από κάποιους βασικούς παράγοντες, όπως είναι το ύψος βροχής, οι κλίσεις του εδάφους, η θερμοκρασία κλπ. Από τους πλέον, σημαντικούς, όμως, είναι η γεωλογία της και η τεκτονική της δομή. Η μορφολογία του εδάφους είναι αυτή, που επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό τη ροή των επιφανειακών υδάτων, εφόσον οδηγεί στο σχηματισμό σημαντικού αριθμού υδρολογικών λεκανών. [21]

Στο νομό Χανίων υφίστανται έξι λεκάνες απορροής, διαμέσου των οποίων απορρέει το σύνολο του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Η έκταση που καταλαμβάνει καθεμία από αυτές, καθώς και ο προσανατολισμός του φαίνεται στον υδρολιθικό χάρτη που ακολουθεί (Εικόνα 5.3). [21]



Εικόνα 5.4: Υδρολιθικός χάρτης με λεκάνες απορροής ποταμού, [21]

Οι παραπάνω λεκάνες κατονομάζονται ως εξής:

1. Λεκάνη Ταυρωνίτη, Κολενίου
2. Λεκάνη Κερίτη
3. Λεκάνη Στύλου
4. Λεκάνη Κουρνά, Γεωργιούπολης
5. Λεκάνη Πελεκανιώτη, Σαρακινιώτη, Κακοδικιανού, Χρυσосκαλλίτισας, Αγίας Ειρήνης
6. Λεκάνη ορεινού όγκου Λευκών Ορέων, Φραγκοκάστελου

Ο σχηματισμός των λεκανών απορροής σχετίζεται με το επιφανειακό και υπόγειο νερό μιας περιοχής, με τον τρόπο κίνησής του, με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ υπόγειου και επιφανειακού νερού και τους επιφανειακούς και υπόγειους υδροκρίτες. Πρόκειται για αυτόνομες εδαφικές εκτάσεις από τις οποίες, συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής του νερού και παροχετεύεται στη θάλασσα με ενιαίο στόμιο ποταμού. [21]

Όπως φαίνεται και από το χάρτη (Εικόνα 5.4) η περιοχή που εξετάζεται εκτίνεται εντός των ορίων της υδρολογικής λεκάνης Ταυρωνίτη, Κολενίου. Από το υδρολογικό χάρτη μπορεί να διακρίνει κανείς, τις θέσεις των χειμάρρων της περιοχής. Από τους χειμάρρους που διασχίζουν την περιοχή ο πιο σημαντικός είναι ο χειμάρρος Πυριανός. Τα υπόγεια νερά, εκτονώνονται κυρίως μέσω πηγών. Διαφορετικά κινούνται υπόγεια διαμέσου υδατοπερατών γεωλογικών σχηματισμών και κατ' αυτόν τον τρόπο εκφορτίζονται στη θάλασσα μακριά από τις ακτές, ή παραμένουν αποθηκευμένα σε υπόγειους καρστικούς υδροφορείς. Σ' αυτήν την περίπτωση η εκμετάλλευσή τους μπορεί να επιτευχθεί μέσω γεωτρήσεων.

5.4. Κλιματολογικά Χαρακτηριστικά (Climate characteristics)

Η Κρήτη ανήκει στη Μεσογειακή κλιματολογική ζώνη, η οποία και δίνει και τον κύριο κλιματολογικό χαρακτήρα στο κλίμα της. Το κλίμα της, συνεπώς, χαρακτηρίζεται ως εύκρατο. Η ατμόσφαιρα μπορεί να είναι αρκετά υγρή, ανάλογα με την απόσταση από τη θάλασσα. Στις παράκτιες περιοχές τα ποσοστά της είναι αυξημένα. Οι περαιτέρω διαφοροποιήσεις του κλίματος κατά τόπους, οφείλονται στις υψομετρικές διαφοροποιήσεις, στην ποικιλία των ανέμων που πνέουν στην περιοχή και στις μεταβολές του ανάγλυφου.


Ο χειμώνας είναι αρκετά ήπιος και υγρός, κάτι που είναι αποτέλεσμα της συχνής άφιξης στην περιοχή θερμών και υγρών νοτιοδυτικών αέριων μαζών. Οι βροχοπτώσεις είναι αυξημένες, ιδιαίτερα στα δυτικά τμήματα του νησιού. Οι χιονοπτώσεις, απ' την άλλη, είναι σπάνιες στις πεδινές εκτάσεις, σε αντίθεση με τις ορεινές όπου αποτελούν συχνό φαινόμενο. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 25 ως 30 °C, χαμηλότερες από αυτές που σημειώνονται στην ηπειρωτική Ελλάδα. Γενικά ο τύπος του κλίματος είναι μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ χερσαίου Μεσογειακού και ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Έτσι, αυτές οι περιοχές απολαμβάνουν περισσότερες ηλιόλουστες μέρες και πιο υψηλές θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, σε σχέση με την υπόλοιπη μεγαλόνησο. [40]

Όσο αφορά την εξεταζόμενη περιοχή, η μορφολογία του εδάφους και η θέση της Κρήτης, έχουν άμεσο αντίκτυπο στο κλίμα της, το οποίο χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό και ιδιαίτερα ξηροθερμικό. Η ηλιοφάνεια καλύπτει το 70% των ημερών του έτους. Ο χειμώνας είναι ήπιος. Συγκεκριμένα ο καιρός από το Νοέμβριο μέχρι το Μάρτιο χαρακτηρίζεται ως κρύος, όχι όμως παγερός. Οι βροχοπτώσεις, όπως αναφέρεται και πιο πάνω, είναι πολύ συχνό φαινόμενο. Η περιοχή επηρεάζεται έντονα από το Κρητικό πέλαγος απ' όπου πνέουν βόρειοι ισχυροί άνεμοι, αυτήν την εποχή, αλλά και από το Ιόνιο πέλαγος απ' όπου καταφθάνουν, πολύ συχνά, βροχοφόρα νέφη. [40]

Η άνοιξη είναι μικρής διάρκειας. Αρχίζει τον μήνα Απρίλιο και τελειώνει στα μέσα περίπου του Μαΐου. Χαρακτηρίζεται ως ξηρή με τις περισσότερες μέρες να σημειώνεται ηλιοφάνεια, η οποία πολύ σπάνια αντικαθίσταται από βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι διαρκεί από τα μέσα Μαΐου έως και το τέλος του Σεπτεμβρίου και είναι αρκετά ζεστό και ξηρό. Ο Ιούνιος και ο Ιούλιος είναι οι πλέον θερμοί μήνες του χρόνου, χωρίς βροχοπτώσεις. Τέλος, το φθινόπωρο αρχίζει μετά το τέλος του Σεπτεμβρίου και είναι αρκετά ζεστό και ξηρό. Τα περισσότερα επεισόδια βροχής αυτής της περιόδου σημειώνονται κατά τη διάρκεια του Οκτώβριου. Το φθινόπωρο και το χειμώνα οι άνεμοι, οι οποίοι κυριαρχούν είναι οι βόρειοι και οι βορειοδυτικοί, οι οποίοι είναι ασθενής τους καλοκαιρινούς μήνες. Τότε, επικρατούν οι νοτιοδυτικοί άνεμοι και τα μελτέμια, οι οποίοι και μετριάζουν τη ζέστη της ατμόσφαιρας. Οι ανατολικοί άνεμοι είναι σπάνιοι στην περιοχή. [40]

Το σύνολο των μετεωρολογικών και βροχομετρικών σταθμών, που εντοπίζονται στο νομό Χανίων παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα:

Κωδικός σταθμού	Είδος σταθμού	Ονομασία
MT4	Μετεωρολογικός	Αλικιανός
MT3	Μετεωρολογικός	Αγροκήπιο
MT11	Μετεωρολογικός	Δραπανιάς
MT12	Μετεωρολογικός	Φαλάσαρνα
MT41	Μετεωρολογικός	Ταυρωνίτης
MT46	Μετεωρολογικός	Ζιμβραγού
RG20	Βροχομετρικός	Παλαιά Ρούματα
RG29	Βροχομετρικός	Πρασσές



Πίνακας 5.1: Μετεωρολογικοί και βροχομετρικοί σταθμοί νομού Χανίων, [20]

5.4.1. Βροχόπτωση (Precipitation)

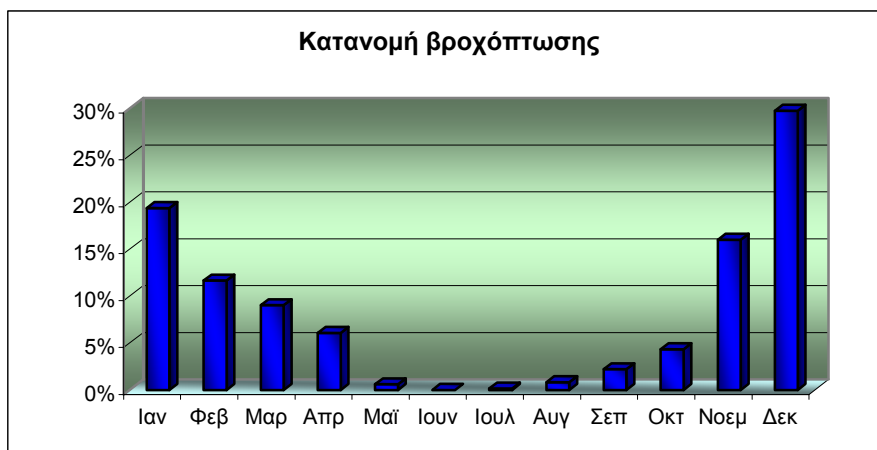
Η Κρήτη γενικώς παρουσιάζει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης τόσο γεωγραφικά (από ανατολικά προς δυτικά και βόρεια προς νότια), όσο και φυσιογραφικά (πεδινές, ορεινές περιοχές). Ο νομός Χανίων είναι ο πλουσιότερος από τους νομούς της Κρήτης σε υδατικό δυναμικό. Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού των βροχοπτώσεων, ανέρχεται στα $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ το μέσο ύψος βροχής τα 1100 mm το χρόνο. Από αυτά το 55% επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω εξατμισοδιαπνοής, το 15% απορρέει επιφανειακά, και το 30% υπόγεια, με μεγάλη χρονική υστέρηση στην απορροή του. Στην τελευταία αυτή ιδιότητα οφείλεται και η άνιση χρονική κατανομή της βροχόπτωσης στο νομό. Συγκεκριμένα, βρέχει κατά μέσο όρο 85 με 90 μέρες το χρόνο, δηλαδή περίπου το 25% του έτους. Από αυτές, οι 40 με 45 μέρες ανήκουν στους μήνες του χειμώνα. Δηλαδή το 50% των βροχοπτώσεων συντελείται μέσα σε μόλις τρεις μήνες (1/4 του έτους). Αντίστοιχα τους καλοκαιρινούς μήνες βρέχει κατά μέσο όρο 2 μέρες, δηλαδή μόλις το 2% των βροχοπτώσεων συντελείται το καλοκαίρι. [21]

Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.2), φαίνονται αναλυτικά πλέον, τα δεδομένα βροχόπτωσης (mm), που αναφέρονται στην περιοχή μελέτης, έτσι όπως αυτά καταγράφηκαν από τον εθνικό μετεωρολογικό σταθμό Φαλασάρνων (του Ινστιτούτου Υποτροπικών και Ελιάς Χανίων, υψόμετρο 24 m, συντεταγμένες: γεωγραφικό πλάτος $35^\circ 30' \text{ B}$, γεωγραφικό μήκος $23^\circ 35' \text{ A}$), για την περίοδο από το 1999 ως το 2002.

	1999	2000	2001	2002	Μέση τιμή
Ιαν.	129	150	160	107	136,5
Φεβ.	82	85	133	28	82
Μαρ.	114	32	22	86	63,5
Απρ.	18	42	86	25	42,7
Μαϊ.	4	9	3	1	4,2
Ιουν.	0	0	0	0	0
Ιουλ.	0	0	0	4	1
Αυγ.	0	0	0	23	5,7
Σεπ.	28	4	0	30	15,5
Οκτ.	18	12	1	93	30,5
Νοεμ.	42	77	196	136	112,7
Δεκ.	231	177	212	218	209,5
Συν.	664	588	813	751	704

Πίνακας 5.2: Βροχοπτώσεις ΕΜΣ Φαλασάρνων περιόδου 1999-2000, [22]

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις, μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή της βροχόπτωσης, στα πλαίσια ενός έτους. Στο επόμενο σχήμα (Εικόνα 5.5), φαίνεται γραφικά το ποσοστό βροχόπτωσης που αντιστοιχεί σε κάθε μήνα. Όπως, ήταν αναμενόμενο, το μεγαλύτερο ποσοστό σημειώνεται κατά τους χειμερινούς μήνες και συγκεκριμένα, ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος, είναι οι πλέον βροχεροί μήνες, του έτους. Αντίθετα, τους καλοκαιρινούς μήνες τα ποσοστά είναι πολύ χαμηλά, έως και μηδενικά την περίοδο Ιουνίου – Ιουλίου.



Εικόνα 5.5: Γραφική αναπαράσταση κατανομής βροχόπτωσης, [22]

5.4.2. Θερμοκρασία (Temperature)

Το κλίμα της Κρήτης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρείται ήπιο, χωρίς σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια του έτους. Αυτό οφείλεται στην κεντρική θέση, που κατέχει στην Ανατολική Μεσόγειο. Η καλοκαιρινή περίοδος είναι παρατεταμένη και χαρακτηρίζεται από αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (25 με 30 °C). Εξίσου, υψηλές είναι οι μέσες θερμοκρασίες του χειμώνα, για τα δεδομένα της εποχής (7 με 15 °C). Η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά στα ορεινά, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, ειδικά τους χειμερινούς μήνες και οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις πιο έντονες.

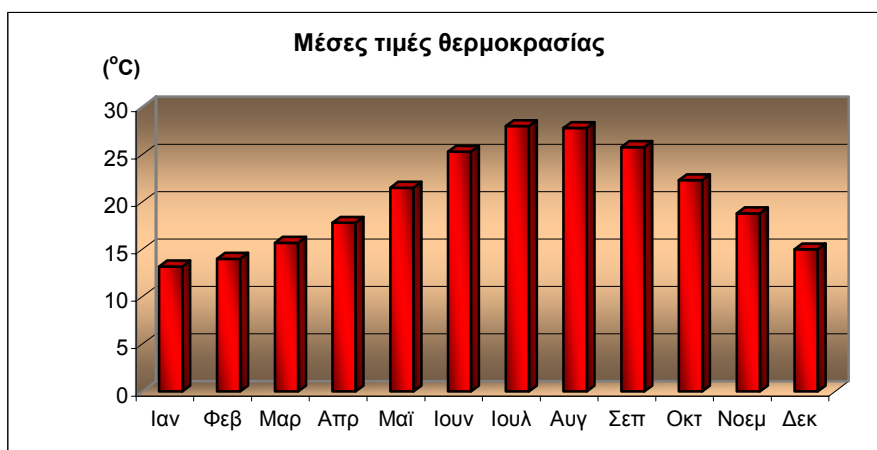
Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 5.3), φαίνονται οι ελάχιστες, οι μέγιστες, καθώς και οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια ενός έτους, που αφορούν την περιοχή μελέτης και οι οποίες καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμών Φαλασάρνων.

	Μέγιστη (°C)	Ελάχιστη (°C)	Μέση (°C)
Ιαν.	20,2	6,2	13,2
Φεβ.	22,5	5,2	14,0
Μαρ.	27,2	6,8	15,7
Απρ.	32,7	9,5	17,8
Μαϊ.	33,5	12,5	21,5
Ιουν.	36,5	16,0	25,3
Ιουλ.	38,5	20,3	28,0
Αυγ.	38,8	19,0	27,8
Σεπ.	35,3	18,0	25,8
Οκτ.	32,0	14,3	22,3
Νοεμ.	39,5	11,0	18,8
Δεκ.	22,5	9,5	15,0

Πίνακας 5.3: Τιμές θερμοκρασίας ΕΜΣ Φαλασάρνων περιόδου 1999-2002, [22]

Σύμφωνα με τις τιμές των μετρήσεων, ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Ιανουάριος, ενώ θερμότερος ο Ιούλιος. Ο Ιούνιος είναι ο πιο δροσερός μήνας

του καλοκαιριού και παρουσιάζει ανάλογα επίπεδα θερμοκρασίας με αυτά που σημειώνονται κατά τη διάρκεια του Σεπτεμβρίου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει, η σχετικά απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, κατά τους μήνες του Μαΐου και του Ιουνίου, όπου και τοποθετείται η έναρξης της καλοκαιρινής περιόδου. Αντίστοιχα, απότομη μείωση στη θερμοκρασία, παρατηρείται τον Οκτώβριο και κυρίως τον Νοέμβριο, οπότε και γίνεται η μετάβαση στη χειμερινή περίοδο.



Εικόνα 5.6: Γραφική αναπαράσταση μέσων τιμών θερμοκρασίας, [22]

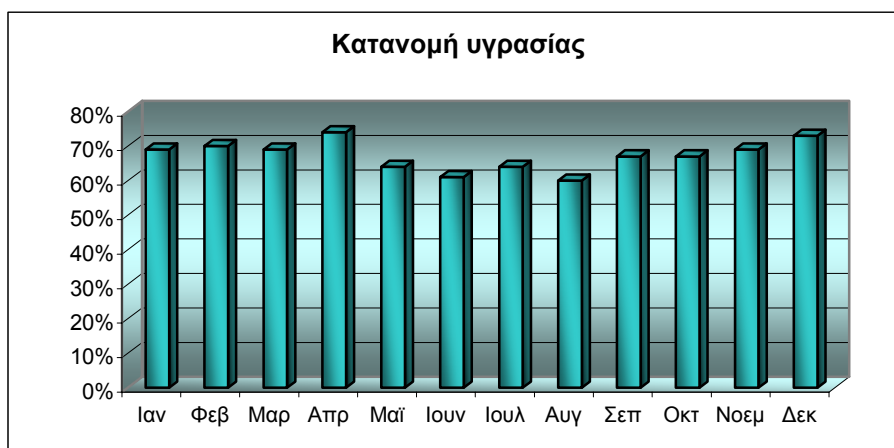
5.4.3. Υγρασία (Humidity)

Η Κρήτη, στο σύνολό της δεν παρουσιάζει υψηλά ποσοστά υγρασίας. Μάλιστα στην κεντρική και ανατολική πλευρά τα ποσοστά αυτά είναι αρκετά χαμηλά. Δεν ισχύει, όμως το ίδιο και για το νομό Χανίων. Εκεί τα επίπεδα της υγρασίας είναι αρκετά υψηλά, συγκριτικά με τις υπόλοιπες περιοχές του νησιού. Αυτό, οφείλεται κατά κύριο λόγο στη γεωγραφική θέση του νομού, ο οποίος αποτελεί το βορειοδυτικό άκρο της μεγαλονήσου. Τα επίπεδα υγρασίας, που σημειώνονται στην περιοχή μελέτης, εμφανίζονται ακόμα πιο αυξημένα, εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτή, είναι παραθαλάσσια.

	Μέγιστη (%)	Ελάχιστη (%)	Μέση (%)
Ιαν.	95	48	69
Φεβ.	97	26	70
Μαρ.	98	30	69
Απρ.	99	11	74
Μαΐ.	99	18	64
Ιουν.	98	18	61
Ιουλ.	98	22	64
Αυγ.	97	21	60
Σεπ.	98	24	67
Οκτ.	99	30	67
Νοεμ.	98	22	69
Δεκ.	98	46	73

Πίνακας 5.4: Επίπεδα υγρασίας περιόδου 1999-2002, Ινστιτούτο υποτροπικών και ελαίας Χανίων, [22]

Η υγρασία, όπως φαίνεται και από τον πίνακα (Πίνακας 5.4), παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις το χειμώνα και ειδικά τον Δεκέμβριο. Υψηλά, όμως είναι και τα επίπεδά της, κατά τη διάρκεια της άνοιξης, όπου τον Απρίλιο συγκριμένα αγγίζουν, αυτά του χειμώνα. Αντίστοιχα, οι χαμηλότερες τιμές της εμφανίζονται το καλοκαίρι και συγκεκριμένα τον Ιούνιο και τον Αύγουστο πέφτει στο 60%, που αποτελεί και τη χαμηλότερη τιμή της.



Εικόνα 5.7: Γραφική αναπαράσταση κατανομής υγρασίας, [22]

5.4.4. Άνεμοι και ηλιοφάνεια (Prevailing winds and sunlight)

Δεν υπάρχουν από το μετεωρολογικό παρατηρητήριο Φαλασάρνων διαθέσιμα στοιχεία ωρών ηλιοφάνειας και κατεύθυνσης ανέμου. Από χάρτες ηλιοφάνειας φαίνεται ότι η περιοχή βρίσκεται στην γραμμή ωρών ηλιοφάνειας 2.600-2.800 το χρόνο. Όσον αφορά στους ανέμους φαίνεται να επικρατούν οι βόρειοι, βορειοδυτικοί.

5.5. Ανθρώπινες δραστηριότητες (Human activities)

5.5.1. Πληθυσμός (Population)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περιοχή που εξετάζεται αποτελεί τμήμα του δήμου Κισσάμου. Καλύπτει εκτάσεις από τα δημοτικά διαμερίσματα Κισσάμου, Γραμβούσης, Λουσακιών και Πλατάνου και πιο συγκεκριμένα σε αυτήν εντάσσονται οι οικισμοί Πύργος του δημοτικού διαμερίσματος Κισσάμου, Αζογυράς, Γραμβούσα, Ζερβιανά, Καλυβιανή, Καρεφιλιάνα, Νέο Χωριό και Φουρνάδος του δημοτικού διαμερίσματος Γραμβούσης, Ζαχαριανά του δημοτικού διαμερίσματος Λουσακιών και τέλος Πλάτανος, Καβούσι, Λιμενίσκος και Φαλάσαρνα του δημοτικού διαμερίσματος Πλατάνου.

Η αξιολόγηση του πληθυσμού της περιοχής πραγματοποιήθηκε σε συμφωνία με τα πληθυσμιακά στοιχεία της απογραφής του 2001, όπως αυτά δημοσιεύτηκαν από την εθνική στατιστική υπηρεσία Ελλάδος. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.5) φαίνεται αναλυτικά ο πραγματικός πληθυσμός για κάθε οικισμό που εκτίνεται εντός των ορίων της περιοχής. Με εξαίρεση το χωριό του Πλατάνου, το οποίο κατοικείται από περισσότερους των χιλίων κατοίκων, οι υπόλοιποι οικισμοί είναι φανερά αραιοκατοικημένοι. Γεγονός, που υποδηλώνει την τάση των κατοίκων, με τα χρόνια, για μετεγκατάσταση

τους, στην πόλη των Χανίων. Μια τέτοια μετακίνηση, έχει κύριο γνώμονα την επαγγελματική αποκατάσταση και οδηγεί σταδιακά στη μείωση, του ανθρώπινου δυναμικού, πολλών εκ των οικισμών της επαρχίας Κισσάμου.

Δ.Δ.	Οικισμός	Κάτοικοι
Κισσάμου	Πύργος	57
Γραμβούσης	Αζογυράς	34
	Γραμβούσα	117
	Ζερβιανά	106
	Καλυβιανή	114
	Καρεφιλιάνα	53
	Νέο Χωριό	91
	Φουρνάδος	26
Λουσακιών	Ζαχαριανά	86
Πλατάνου	Πλάτανος	1029
	Καβούσι	18
	Λιμενίσκος	45
	Φαλάσαρνα	21

Πίνακας 5.5: Πληθυσμιακά στοιχεία περιοχής μελέτης, [36]

Παρά το γεγονός ότι ο αριθμός των μόνιμων κατοίκων είναι μικρός, υπάρχει ένα αξιόλογο ποσοστό ανθρώπων, οι οποίοι ακόμα και αν δεν κατοικούν μόνιμα, δραστηριοποιούνται στην περιοχή, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της καλύπτεται από γεωργικά εκμεταλλεύσιμη γη (αγροτεμάχια) και παράλληλα αξιοποιείται τουριστικά κατά μήκος της ακτής (πχ. Φαλάσαρνα κλπ.). Ιδιαίτερα, κατά τη διάρκεια των μηνών του καλοκαιριού, σημειώνεται σημαντική πληθυσμιακή αύξηση λόγω τουριστικής κίνησης, αλλά και επιστροφής, κατοίκων των Χανίων, καταγόμενων από την περιοχή, στην οποία ενδεχομένως διατηρούν εξοχική κατοικία ή λοιπά περιουσιακά στοιχεία (αγροτικές εκτάσεις, καλλιέργειες κλπ.), τα οποία απαιτούν επίβλεψη.

5.5.2. Οικονομικές δραστηριότητες (Financial activities)

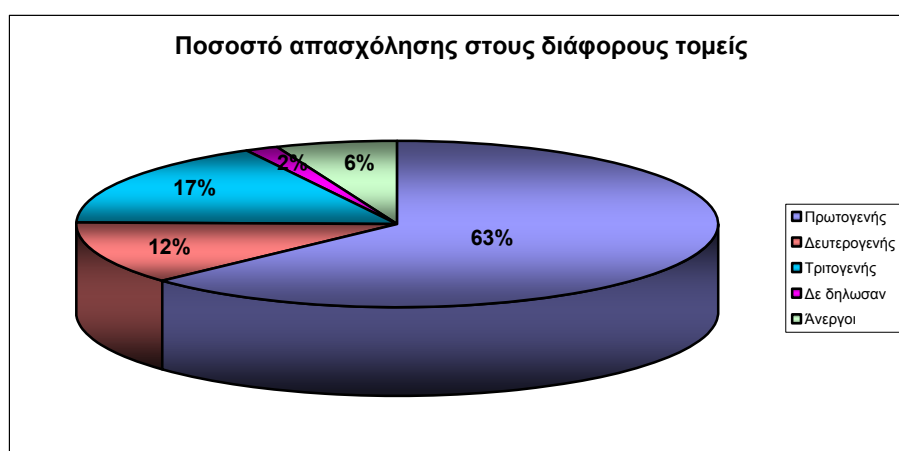
Όπως φαίνεται και από τον προηγούμενο πίνακα (Πίνακας 5.5), το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης, υπάγεται στα δημοτικά διαμερίσματα Γραμβούσης και Πλατάνου. Συνεπώς, η περιοχή δέχεται τις μεγαλύτερες επιδράσεις και πιέσεις, από τις οικονομικές δραστηριότητες, που αναπτύσσονται εντός των ορίων των συγκεκριμένων διαμερισμάτων. Τα δεδομένα, που αφορούν τον επαγγελματικό προσανατολισμό, έχουν δοθεί στη δημοσιότητα από την εθνική στατιστική υπηρεσία. Συγκεκριμένα, στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.6) φαίνεται αναλυτικά το πλήθος των κατοίκων κάθε δημοτικού διαμερίσματος που είναι οικονομικά ενεργό καθώς επίσης και ο διαμοιρασμός του, στους διάφορους τομείς δραστηριοποίησης. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά στο πλήθος των κατοίκων που είναι οικονομικά μη ενεργοί.

Φαίνεται, λοιπόν, πως ο χαρακτήρας της περιοχής είναι έντονα αγροτικός, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού απασχολείται στον πρωτογενή

τομέα (Εικόνα 5.8). Ο πρωτογενής τομέας, γενικότερα περιλαμβάνει τη γεωργία και την κτηνοτροφία. Στην περιοχή, παρόλα αυτά, το μεγαλύτερο μέρος του, αφορά στη γεωργία, με πιο διαδεδομένες τις καλλιέργειες ελιάς, αμπελιού και κηπευτικών. Οι άνθρωποι, που δραστηριοποιούνται στην κτηνοτροφία, ασχολούνται κατά κύριο λόγο με την εκτροφή αιγοπροβάτων. Ο τριτογενής τομέας με κυρίαρχη δραστηριότητα, την εξυπηρέτηση του τουρισμού, καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση στην οικονομία της περιοχής. Το τουριστικό δυναμικό της, δεν έχει φτάσει, πάντως, σε σημείο κορεσμού και αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω, εντός των προσεχών ετών, απασχολώντας μεγαλύτερο ακόμα ποσοστό του πληθυσμού. Την τρίτη θέση σε ποσοστό απασχόλησης πληθυσμού, καταλαμβάνει ο δευτερογενής τομέας, δηλαδή η βιομηχανική μεταποίηση. Το μεγαλύτερο μέρος της βιομηχανικής δραστηριότητας εντάσσεται στη βιομηχανία τροφίμων, με την μεταποίηση τη ελιάς να βρίσκεται στην πρώτη θέση. Σε μικρότερο βαθμό έχουν αναπτυχθεί βιομηχανίες ξύλου και κατασκευής επίπλων.

Δ.Δ.	Οικονομικώς Ενεργοί							Οικονομικώς μη ενεργοί
	Σύνολο	Απασχολούμενοι					Άνεργοι	
		Σύνολο	Πρωτογενής Τομέας	Δευτερογενής Τομέας	Τριτογενής Τομέας	Δε δήλωσαν κλάδο	Σύνολο	
Γραμβούσης	344	313	179	45	75	13	31	410
Πλατάνου	605	579	419	71	87	2	27	526

Πίνακας 5.6: Στοιχεία απασχόλησης του πληθυσμού της περιοχής, [36]



Εικόνα 5.8: Κατανομή πληθυσμού στους διάφορους τομείς απασχόλησης, [36]

5.6. Φυσικό περιβάλλον (Natural environment)

Η σημαντικότητα της περιοχής από οικολογική άποψη, φαίνεται από τους πολλούς τύπους οικοτόπων, οι οποίοι απαντώνται σε μικρή έκταση. Καλαμιώνας, εποχιακά τέλματα, αμμοθίνες με θαλασσόκεδρα, μακκία βλάστηση, φρυγανότοποι, βραχώδεις σχηματισμοί, απόκρημνες ακτές, νησίδες και καλλιέργειες, δημιουργούν ένα μωσαϊκό, που προσφέρει ποικιλία ενδιατημάτων για πολλά είδη πανίδας και χλωρίδας. Η πλειονότητα των ειδών, συναντάται στον καλαμιώνα και τα γύρω τέλματα. Μπορεί κανείς, όμως να παρατηρήσει μεταναστευτικά πουλιά στις αμμοθίνες κατά μήκος της ακτογραμμής, στους θαμνώνες και τις κάθετες πλαγιές προς τα βόρεια.



Εικόνα 5.9: Υγρότοπος στην παραλία Φαλάσαρνα, [25]

5.6.1. Ορνιθοπανίδα (Bird-fauna)

Ο κατάλογος αριθμεί πάνω από 150 είδη, τα περισσότερα από τα οποία, είναι μεταναστευτικά πουλιά που σταθμεύουν για να τραφούν και να ξεκουραστούν. Από τα φωλιάζοντα, ξεχωρίζουν όσα χρησιμοποιούν τις νησίδες και τις κάθετες ακτές: μύχος, θαλασσοκόρακας, αρτέμης, πετρίτης, μαυροπετρίτης, αγριοπερίστερο, βουνοσταχτάρα, γαλαζοκότσυφας και κόρακας. Η θαμνώδης έκταση γύρω από τον αρχαιολογικό χώρο και το ελληνιστικό λιμάνι είναι κατάλληλη για φώλιασμα δεινοσαυρίων, ασπροκόλλων, μαυροτσιροβάκων, κοκκινοτσιροβάκων, καλόγερων και γαλαζοπαπαδίτσων. Στον καλαμιώνα και τις κοντινές αμμοθίνες φωλιάζουν το ψευταηδόνη, ο κατσουλιέρης, ο κοκκινοκεφαλός και ο ποταμοσφυριχτής. Οι πλαγιές των κοντινών βουνών είναι κατάλληλες για φώλιασμα αρπακτικών και στην περιοχή αναφέρονται, είδη όπως, ο φιλάδελφος, ο χρυσαετός και ακόμη ο γυπαετός. [23]



Εικόνα 5.10: Κατσουλιέρης, [23]



Εικόνα 5.12: Ποταμοσφυριχτής, [23]

Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, έρχονται πολλά νεροπούλια, όπως το μπεκατσίνι, η καλημάνα, το κικίρι, ο κορμοράνος και σπανιότερα ο γελαδάρης, ο κύκνος και η βαρβάρα, καθώς επίσης και αρπακτικά, όπως ο καλαμόκιρκος και ο βαλτόκιρκος. Μεταξύ των περαστικών πουλιών, ο κατάλογος περιλαμβάνει τα ακόλουθα: ήταυρος, μικροτσικνιάς, κρυπτοτσικνιάς, λευκοτσικνιάς, σταχτοτσικνιάς, τσιχλογέρακο, διπλοσάϊνο, ακτίτης, μικρογαλιάνδρα, δεινοσαυρίδιο, οχθοχελίδονο, καστανολαίμης, αηδόνη, τσιχλοποταμίδα, μαυρομυγοχάφτης, αμπελουργός, κηποτσιροβάκος,

θαμνοτσιροβάκος, μαυροσκούφης, νανοσκαλίδρα, δρεπανοσκαλίδρα, χαλικοκυλιστής, ψαλιδιάρης, αετομάχος, χωραφοσπουργίτης, πετροτριλίδα.

5.6.2. Πανίδα (Fauna)

Η υπόλοιπη πανίδα περιλαμβάνει τα εξής είδη: Κρητικός βάτραχος (*Rana cretensis*), δενδροβάτραχος (*Hyla arborea*), φρύνος (*Bufo viridis*), σπιτικό σαμιαμίθι (*Hemidactylus turcicus*), τρανόσαυρα (*Lacerta trilineata*), λιακόνι (*Chalcides ocellatus*), δεντρογαλιά (*Coluber gemonensis*), όχεντρα (*Elaphe situla*), νερόφιδο (*Natrix setellata*), όφης (*Telescopus fallax*), άρκαλος (*Meles meles*), καλλιγιαννού (*Mustela nivalis*), ζουρίδα (*Martes foina*), σκαντζόχοιρος (*Erinaceus concolor*), μυγαλή (*Crocidura suaveolens*), νανομυγαλή (*Suncus etruscus*), λαγός (*Lepus europaeus*), δασοποντικός (*Apodemus sylvaticus*), ποντικός (*Mus musculus*), αρουραίος (*Rattus rattus*). [25]



Εικόνα 5.13: Κρητικός βάτραχος, [37]



Εικόνα 5.14: Δασοποντικός, [38]

5.6.3. Χλωρίδα (Flora)

Στην περιοχή, συναντάται μεγάλη ποικιλία στα είδη της χλωρίδας. Χαρακτηριστικά αναφέρονται, το κρινάκι της θάλασσας – *Pancratium maritimum*, το γαλιαναγκάθι ή αγκάθι της θάλασσας – *Eryngium maritimum*, ο γιούγκος – *Juncus effesus*, το θυμάρι – *Coridothymus capitatus*, το ενδημικό κρινάκι *Androcymbium Reichingeri*, το *Isoetes histrix*, το *Centaureum pulchellum*, το *Anthemis glaberrima* και πολλά άλλα. [24]



Εικόνα 5.15: Κρινάκι της θάλασσας, [24]



Εικόνα 5.20: Γαλιαναγκάθι, [24]

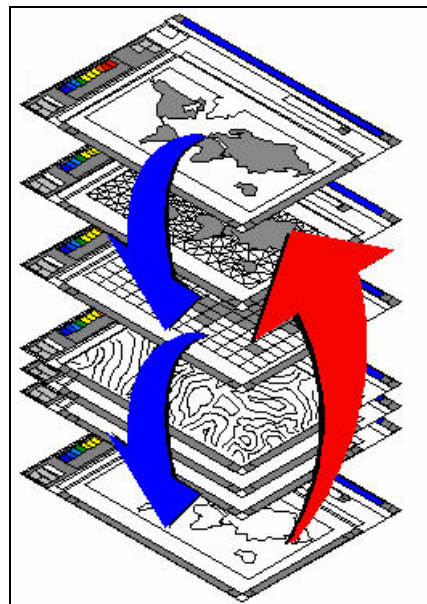
6. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ARGUS ONE Student Version 4.2.0.q σε συνδυασμό με το Princeton Transport Code PTC.

6.1. Argus ONE

Το Argus ONE είναι ένα πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών, με γραφικό και παράλληλα εύκολο τρόπο. Περιλαμβάνει ένα σύνολο από υπηρεσίες, οι οποίες προσφέρουν τη δυνατότητα στο χρήστη, να εισάγει ψηφιοποιημένους χάρτες, να επεξεργάζεται κατάλληλα τμήματά τους, και αυτομάτως να δημιουργεί πλέγματα στην περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα, να συνδυάζει διαφοροποιημένες μεταβλητές εντός του πλέγματος στο σύνολό του, ή σε συγκεκριμένα σημεία ή κόμβους του, όπως για παράδειγμα, τιμές των οριακών ή αρχικών συνθηκών, συγκεντρώσεις κλπ. Αυτός ο συνδυασμός επιτυγχάνεται διαμέσου, της χρήσης των στρωμάτων (layers). Τα διαμορφωμένα στοιχεία, μπορούν να εξαχθούν σε εύχρηστη μορφή για όλους τους τύπους αριθμητικών κωδικών. [7]

Το στρώμα (layer) είναι το θεμελιώδες στοιχείο για τη χρήση του Argus ONE. Εμφανίζεται ως διαφανές φύλλο εργασίας, στο οποίο ο χρήστης αντιγράφει τις πληροφορίες κάθε θέματος. Επίσης, σχεδιάζοντας, περιοχές μελέτης πλέγματος, ή χάρτες σε διαφορετικές διαφάνειες εργασίας, μπορεί να διαγράψει στοιχεία ή απλά να αποκρύψει την εμφάνισή τους, να προσθέσει καινούρια ή να αλλάξει δεδομένα με γραφικό τρόπο. Διαφορετικά είδη πληροφοριών μπορούν να αποθηκευτούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες των layers. Για παράδειγμα, τα βασικά στοιχεία με βάση τα οποία μπορεί το Argus ONE να εκτελεστεί, τα όρια της περιοχής μελέτης, οι βρόγχοι και το πλέγμα, καθορίζονται στα layers: Domain, Mesh και Grid αντιστοίχως. Πέρα από τα παραπάνω, υπάρχουν και τα layers: Information, Maps και Data. Το layer Information χρησιμοποιείται προκειμένου να συνδυάζονται οι μεταβλητές με τους βρόγχους ή το πλέγμα. Είναι δυνατόν, να καθοριστεί σημαντικός αριθμός μεταβλητών σε ένα και μόνο Information layer. Μπορεί, για παράδειγμα, να καθοριστεί η διαπερατότητα του εδάφους σε αυτό το layer. Συνεπώς, μπορούν να δοθούν σε αυτήν την μεταβλητή μία σταθερή τιμή, ή διαφορετικά



Εικόνα 6.1: Layers στο Argus ONE, [7]

τιμές, οι οποίες θα μεταβάλλονται χωρικά. Εφόσον, συνδεθούν, οι εν λόγω με το πλέγμα, μεταβιβάζονται στους κόμβους ή στα διαθέσιμα στοιχεία. Το Map layer, χρησιμεύει στην εισαγωγή του ψηφιοποιημένου χάρτη της περιοχής μελέτης στο Argus ONE. Με αυτόν τον τρόπο, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη, να καθορίσει με σαφήνεια τα όρια της περιοχής

μελέτης πάνω στο χάρτη. Μία επιπλέον εφαρμογή, του Map layer, περιλαμβάνει τη σύνθεση διαφόρων ειδών γραφικών, όπως ισοϋψείς ή τρισδιάστατες επιφάνειες. Το Data layer, χρησιμοποιείται, όταν χρειάζεται να εισαχθούν δεδομένα στο πρόγραμμα, που έχουν κατασκευαστεί από άλλα προγράμματα (όπως είναι το PTC). Τα δεδομένα αυτά, υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθούν με διάφορους τρόπους, όπως επί παραδείγματι, στη δημιουργία γραφικών. [7]

Τα layers, μπορούν να δημιουργηθούν ή να διαγραφούν από το χρήστη. Τα επιμέρους στοιχεία μιας εργασίας στο Argus ONE, μπορούν να αποθηκευτούν ως ξεχωριστά αρχεία. Ο φάκελος, στον οποίο περιέχονται όλες οι πληροφορίες, τις οποίες ο χρήστης έχει τη δυνατότητα αυξήσει ή να διαγράψει κατά τη διάρκεια μιας εργασίας, επωνομάζεται Argus Project και έχει την επέκταση “.mmb”.

6.2. Princeton Transport Code (PTC)

Το Princeton Transport Code, (PTC) αποτελεί έναν κώδικα επίλυσης, της υπόγειας ροής του νερού σε τρεις διαστάσεις και προσομοίωσης, της μεταφοράς των ρυπαντών του υπόγειου νερού. Είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 και συνεργάζεται με το Argus ONE, για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για την επίλυση των πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων, που προκύπτουν κατά τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και μεταφορά μάζας στα σύνθετα φυσικά συστήματα, απαιτείται η εφαρμογή πολύπλοκων μαθηματικών μεθόδων. Το PTC χρησιμοποιεί ένα αλγόριθμο διαχωρισμού, ώστε να επιλύει τις τρισδιάστατες εξισώσεις, μειώνοντας σημαντικά, τη δυσκολία των υπολογισμών. Χρησιμοποιεί, τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για τη προσέγγιση του κάθετου προβλήματος και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το οριζόντιο (δισδιάστατο) πρόβλημα. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε τρισδιάστατο στοιχείο είναι μια στήλη με τριγωνική διατομή. Για τον υπολογισμό των εξισώσεων ροής και μεταφοράς μάζας, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος διαχωρισμού. Σε πρώτη φάση, επιλύονται τα οριζόντια στρώματα και σε δεύτερη, οι κάθετες γραμμές. Το αποτέλεσμα, συνίσταται σε μια πλήρη λύση τριών διαστάσεων, η οποία επιτυγχάνεται χωρίς να είναι απαραίτητη η επίλυση του πίνακα, που προκύπτει από το τρισδιάστατο πλέγμα. [8]

Το PTC, προκειμένου να επεξεργαστεί τα δεδομένα, που αφορούν την κίνηση του υπόγειου ύδατος, χρησιμοποιεί τις ακόλουθες βασικές εξισώσεις.

► Εξίσωση συνέχειας (Continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-S\frac{\partial h}{\partial t}+\sum_{i=1}^r Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)=0 \quad (6.1)$$

Όπου, h : το υδραυλικό ύψος, [L]

K_{xx} : η υδραυλική αγωγιμότητα στη x οριζόντια διεύθυνση, [LT⁻¹]

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

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

S : ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας, [L⁻¹]

Q_i : ο όρος εκροής/κατείσδυσης (ή απλά Q), [L^3T^{-1}]

δ : η συνάρτηση Dirac Delta, []

r : ο αριθμός σημείων εκροής/κατείσδυσης, []

► Ταχύτητα του Darcy (Darcy's velocity)

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (6.2)$$

Όπου, $V_{x,y,z}$: η ταχύτητα στις διευθύνσεις x, y, z , αντίστοιχα, [LT^{-1}]

► Υδροδυναμική διασπορά (Advection – dispersion)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + Q(c^\omega - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Όπου, D_{ij} : ο φαινόμενος συντελεστής μοριακής διασποράς, [L^2T^{-1}]

c : η χημική συγκέντρωση στο σημείο x, y, z , τη στιγμή t , [ML^{-3}]

c^ω : η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού στη θέση i , [ML^{-3}]

θ : το πορώδες του εδάφους, []

$E(c)$: η συνάρτηση χημικής προσρόφησης, []

Οι όροι της διασποράς που εμφανίζονται στην παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται ως εξής:

$$D_{xx} = (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_V V_z^2) V^{-1} + D_M \quad (6.4)$$

$$D_{yy} = (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_V V_z^2) V^{-1} + D_M \quad (6.5)$$

$$D_{zz} = (\alpha_V V_x^2 + \alpha_V V_y^2 + \alpha_L V_z^2) V^{-1} + D_M \quad (6.6)$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y V^{-1} \quad (6.7)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_V) V_y V_z V^{-1} \quad (6.8)$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (\alpha_L - \alpha_V) V_z V_x V^{-1} \quad (6.9)$$

Όπου, D_M : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, [L^2T^{-1}]

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 της ταχύτητας, [LT^{-1}]

Η διαδικασία επίλυσης των παραπάνω εξισώσεων, περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: Πρωταρχικά επιλύεται η εξίσωση (6.1) ως προς τα υδραυλικά ύψη. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy από τις σχέσεις (6.2). Τελευταία, προσδιορίζεται, η συγκέντρωση των ρυπαντών με βάση την εξίσωση (6.3).

6.2.1. Πεπερασμένα στοιχεία (Finite elements)

Η διαδικασία που ακολουθεί το PTC για την επίλυση της εξίσωσης (6.1) περιλαμβάνει την προσέγγιση των όρων, που περιέχουν x και y παραγώγους, μέσω μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιούνται ευρέως στο οριζόντιο επίπεδο. Η μέθοδος αυτή, υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο σύνολο συναρτήσεων, που αντιπροσωπεύει ακριβώς τη λύση, στη μερικώς διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής. Μια πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι η ακόλουθη: [8]

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^n h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (6.9)$$

Όπου, h : το υδραυλικό ύψος [L],

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

h_i : ένας εκκρεμής συντελεστής [L],

w_i : μία συνάρτηση βάσης (παρεμβολής), []

N : ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, []

Η εξίσωση (6.9), παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση, καθώς το N τείνει στο άπειρο (εφόσον, το \hat{h} πλησιάζει το h). Με μια προσεκτική επιλογή των συναρτήσεων w_i , ο απροσδιόριστος συντελεστής h_i , μπορεί να αποτελέσει τις αρχικές τιμές των κόμβων, με συντεταγμένες $(x, y$ και $z)$. Προκειμένου η μέθοδος, να είναι όσο το δυνατόν, πιο αποτελεσματική, κατά τη διεξαγωγή των υπολογισμών, ενδείκνυται, η χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων, με ξεχωριστά βήματα, οι οποίες είναι μη μηδενικές, μόνο άνωθεν ενός μικρού τμήματος εκ του συνόλου, της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, το PTC, χρησιμοποιεί γραμμικές βασικές συναρτήσεις, με ξεχωριστά βήματα, ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων. Επισημαίνεται, ότι αν και ο διαφορικός τελεστής L (για παράδειγμα στην εξίσωση (6.1)), που συντελεί στο h , ισούται με μηδέν, τότε στο L της προσεγγιστικής συνάρτησης, σημειώνεται ένα σφάλμα. Μαθηματικά, εκφράζεται ως εξής: [8]

$$L(h) = 0 \quad (6.10)$$

ενώ,

$$L(\hat{h}) = R \quad (6.11)$$

Όπου, R : το υπολειμματικό σφάλμα, []

Για την επίλυση της εξίσωσης (6.9) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση του υπολειμματικού σφάλματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, λαμβάνοντας υπόψη, ένα ολοκληρωμένο σύστημα συναρτήσεων w_i , έτσι ώστε το σφάλμα, να υφίσταται

για όλες τις τιμές του w_i , οπότε στην πραγματικότητα να πλησιάζει το μηδέν και κατ' αυτόν τον τρόπο, να καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός λύσης για την εξίσωση. Δηλαδή:

$$L(h) = L(\hat{h}), \text{ όταν } R = 0 \quad (6.12)$$

6.2.2. Πεπερασμένες διαφορές (Finite differences)

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών εκφράζεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση: [8]

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (6.13)$$

Όπου, A, B : μαθηματικοί πίνακες με διαστάσεις $[N \times N]$
 $H, \partial h / \partial t, v, f$: διανύσματα στήλης με μήκος $[N]$

Συγκεκριμένα:

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (6.14)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (6.15)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \iint_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (6.15)$$

$$v_i = \sum_{i=1}^N \left[\iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{zz} \frac{\partial h_i}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (6.16)$$

Όπου, η f περιλαμβάνει και οριακές συνθήκες.

6.2.3. Κάθετη παράγωγος (Vertical derivative)

Το βασικό χαρακτηριστικό του κώδικα PTC είναι η χρήση ενός κεντρικού σχεδίου διαχωρισμού των χωρικών παραγώγων στην κατεύθυνση z . Ο κάθετος διαχωρισμός επιτυγχάνεται, εφόσον τα οριζόντια πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων αντιγράφονται σε επίπεδα (Εικόνα 6.2). Αυτό σημαίνει ότι η κάθετη κατεύθυνση σε μια δυσδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια προσέγγιση της εξίσωσης (6.16). Χρησιμοποιώντας το k ως κάθετο δείκτη και με $k=1$ το στρώμα του πυθμένα, η προσέγγιση μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση που έπεται: [8]

$$v \approx C_k^+(h_{k+1}) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad (6.17)$$

Όπου, η αρμονία υποδηλώνει, ότι οι ιδιότητες του γειτονικού στρώματος χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν: τα στοιχεία C_k^+ , ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και $k+1$ και C_k^- , ο κάθετος όρος μεταξύ του στρώματος k και του $k-1$.

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \frac{2}{\Delta_{zk} [\Delta_{zk\pm 1}/(K_{zz})_k + \Delta_{zk}/(K_{zz})_{k\pm 1}]} w_i w_j dx dy \quad (6.18)$$

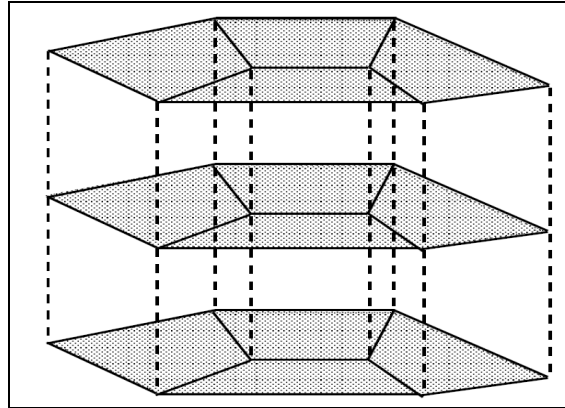
Όπου, Δ_{zk} : το πάχος του στρώματος k στο σημείο της προσέγγισης, [L]

Η αρμονία υποδηλώνει ότι δίνεται περισσότερη ρεαλιστική ποσότητα όταν αντιμετωπίζονται καταστάσεις με φυσική ετερογένεια. Με αντικατάσταση της εξίσωσης (6.17) στην (6.18), προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τυπικά στρώματα k :

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (6.19)$$

Όπου, h_k : αντικαθιστά τον παράγοντα h του υδραυλικού ύψους στο στρώμα k , ($k=1, 2, \dots, M$), [L]

M : ο αριθμός των στρωμάτων στην z κατεύθυνση, []



Εικόνα 6.2: Οριζόντια πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων σε στρώσεις, παράγοντας 3D διαχωρισμό, [8]

6.2.4. Παράγωγος του χρόνου (Time derivative)

Η εμπειρία έχει δείξει, ότι η ενδεχόμενη αντίστροφη προσέγγιση της διαφοράς της παραγώγου του χρόνου, εξασφαλίζει την πιο ακριβή λύση της υπόγειας ροής για δεδομένο κόστος. Ο βασικότερος λόγος, για τον οποίο εφαρμόζεται, είναι για να προσεγγίσει την παράγωγο του χρόνου και τις χωρικές παραγώγους, που δίνονται σε καινούργια επίπεδα χρόνου. Συνεπακόλουθα, εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου στην προηγούμενη εξίσωση (Εξίσωση (6.19)), για κάθε στρώμα προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση (Εξίσωση (6.20)), βάσει της οποίας, συντίθεται ένα σύστημα $M \times N$ εξισώσεων, N αγνώστων από την (6.9) για κάθε M στρώματα. [8]

$$A_k h_k^{t+\Delta t} + \frac{(BD)_k}{\Delta t} [h_k^{t+\Delta t} - h_k^t] - [C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (6.20)$$

6.2.5. Οριακές συνθήκες (Boundary conditions)

Το PTC, υποστηρίζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Τις συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και Cauchy (ροή εξαρτώμενη από το υδραυλικό ύψος - διαρροή). Οι οριακές συνθήκες, μπορεί να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια, είναι μηδενικής ροής κάτι, που συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα και πλευρικά τοιχώματα. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. [8]

► Καθορισμένο υδραυλικό ύψος (Specified head)

Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται, επιλέγοντας τους κόμβους και προσαρμόζοντας τις τιμές του υδραυλικού ύψους, σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Εφόσον, οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος απαλείφονται από την εξίσωση του πίνακα, θα απομένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις, με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, με τον N_c να αποτελεί τον ολικό αριθμό οριακών κόμβων, με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης. [8]

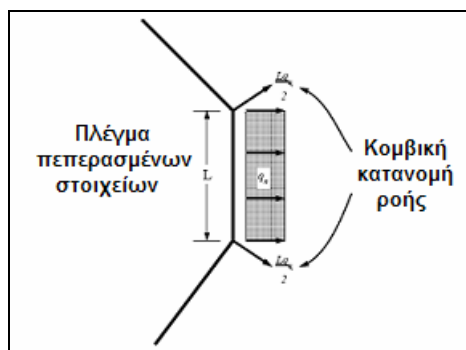
► Καθορισμένη ροή (Specified flux)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό τρόπο για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών ροής. Πάνω στην εφαρμογή του Green Theorem, εμφανίζεται ένας οριακός όρος. Ο όρος αυτός, μπορεί να αναγραφεί ως εξής:

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (6.21)$$

Όπου, q_n : η κανονική ροή κατά μήκος ενός τμήματος επιφανείας (μήκος×ύψος) του κάθετου ορίου σ [LT^{-1}].

Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχειώδους μήκους L η ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης (Εξίσωση (6.21)) παρέχει τις κομβικές κατανομές, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα (Εικόνα 6.3). [8]



Εικόνα 6.3: Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος ενός στοιχειώδους μήκους L , [8]

Συνεπώς, ο χρήστης χρειάζεται απλά να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο, για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή, λόγω άντλησης εισάγεται επίσης μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο (Εξίσωση (6.15)), για αυτό και, ο χρήστης χρειάζεται να καθορίζει την ογκομετρική παροχή στον κόμβο. Για την διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον προσδιορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης. Η ολοκλήρωση της επιφανείας, προκειμένου να αποκομισθεί η ογκομετρική παροχή, εφαρμόζεται αυτόματα από το πρόγραμμα. [8]

► Διαρροή (Leakage)

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται αντικαθιστώντας στην εξίσωση (6.15):

$$Q = k_L (h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (6.22)$$

Όπου, $h_{j,L}^t$: το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο j , στο στρώμα k τη χρονική στιγμή t , [L]

$h_{j,k}^t$: το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής, [L]

k_L : η υδραυλική αγωγιμότητα διαιρεμένη με την απόσταση (conductance), [T^{-1}]

Ο όρος conductance ολοκληρώνεται για την περιοχή και με αυτόν τον τρόπο αναπαριστά μια κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο ορισμό της σταθεράς k , μπορεί να προσδιοριστεί οποιαδήποτε κατεύθυνση διαρροής.

► Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα (Water table conditions)

Ο ορισμός των συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή τον μη περιορισμένο υδροφορέα, προϋποθέτει την εισαγωγή δυο οριακών συνθηκών της στάθμης των υδάτων στο επίπεδο του ανώτερου στρώματος. Η αναπαράσταση της κίνησης του νερού καθώς υπόκειται σε διήθηση, λόγω βαρύτητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 6.4). Το σταθερό υψόμετρο των ανώτερων ορίων στο πεδίο ορισμού της ροής ισούνται με $z=z_{M+1}(x,y,t)$ και το πραγματικό με $z=z_{WT}(x,y,t)$. Η πρώτη οριακή συνθήκη υποδηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα (h_M) καθορίζει το εκεί πάχος του υδροφορέα. Συνεπακόλουθα, σε κάθε κόμβο απαιτείται:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (6.23)$$

Γίνεται η υπόθεση ότι, η στάθμη του νερού εντοπίζεται εντός του ανώτερου στρώματος ($k=M$). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο αυτό στρώμα ελέγχει παράλληλα, κατά πόσο οι τιμές του h_M στους κόμβους, βρίσκονται εντός του εύρους των υψομέτρων, που προκύπτει από την ανίσωση (6.24):

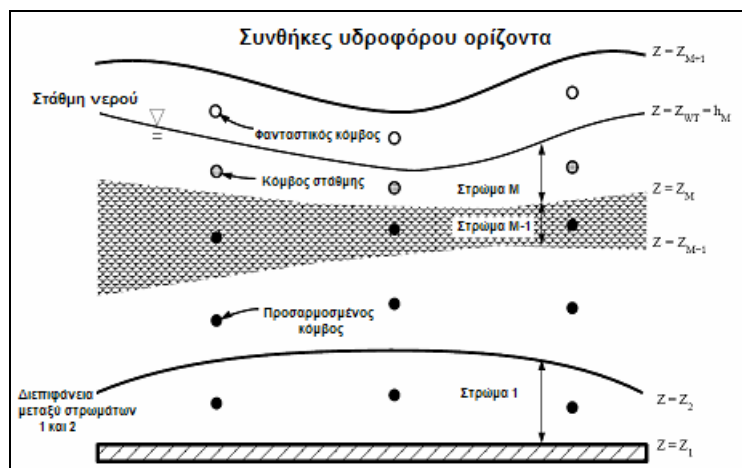
$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (6.24)$$

Εάν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις το πρόγραμμα ενημερώνει το χρήστη μέσω μηνύματος και η εκτέλεση τερματίζεται.

Επιπλέον, η ανίσωση (6.24) πρέπει να ικανοποιείται και από τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους. Αφού το z_{WT} ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, το οποίο βρίσκεται στους πίνακες των συντελεστών, η εξίσωση (6.23) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα εξομαλύνεται, μέσω της επαναλήψεως, του δεύτερου βήματος του χωριστικού αλγορίθμου. Οι επαναλήψεις γίνονται σε ένα συγκεκριμένο βήμα χρόνου, με όλες τις ιδιότητες του πάχους ενημερωμένες. Όταν το h μεταβάλλεται λιγότερο από μια δεδομένη τιμή ανοχής, οι επαναλήψεις σταματούν και οι υπολογισμοί προχωρούν στο επόμενο βήμα.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την προσωρινή ανταπόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διείσδυση. Ορίζοντας ως S_y την ειδική παραγωγή πλησίον της στάθμης του νερού, οι εξισώσεις που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη κατάσταση ορίζονται ως:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (6.25)$$



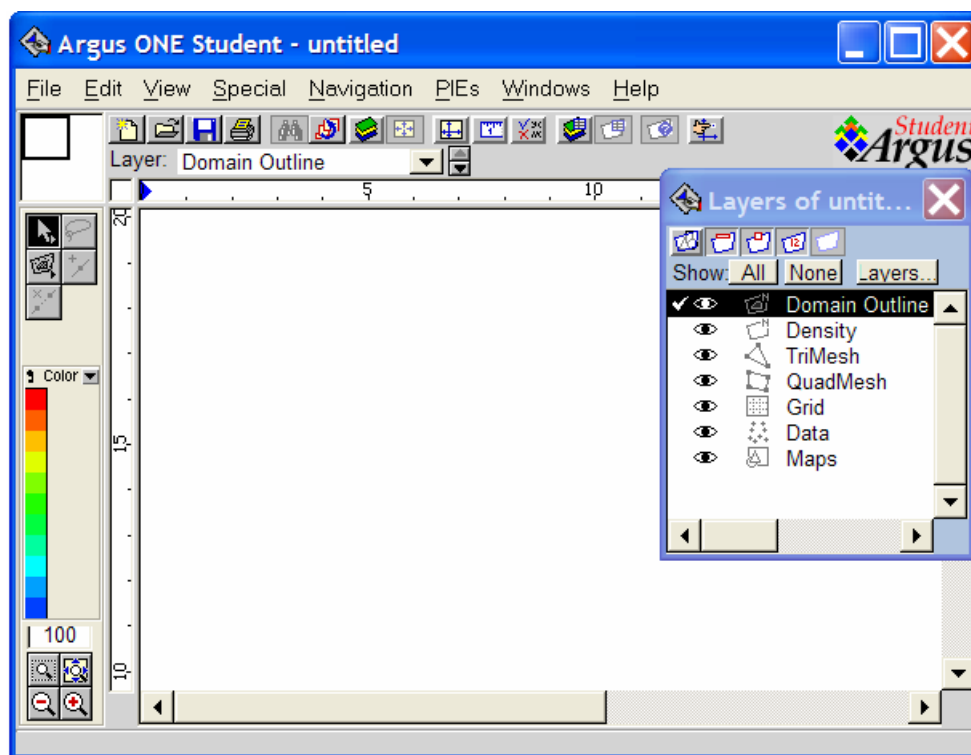
Εικόνα 6.4: Συνθήκες υδροφόρου οριζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα, [8]

6.3. Προσομοίωση (Simulation)

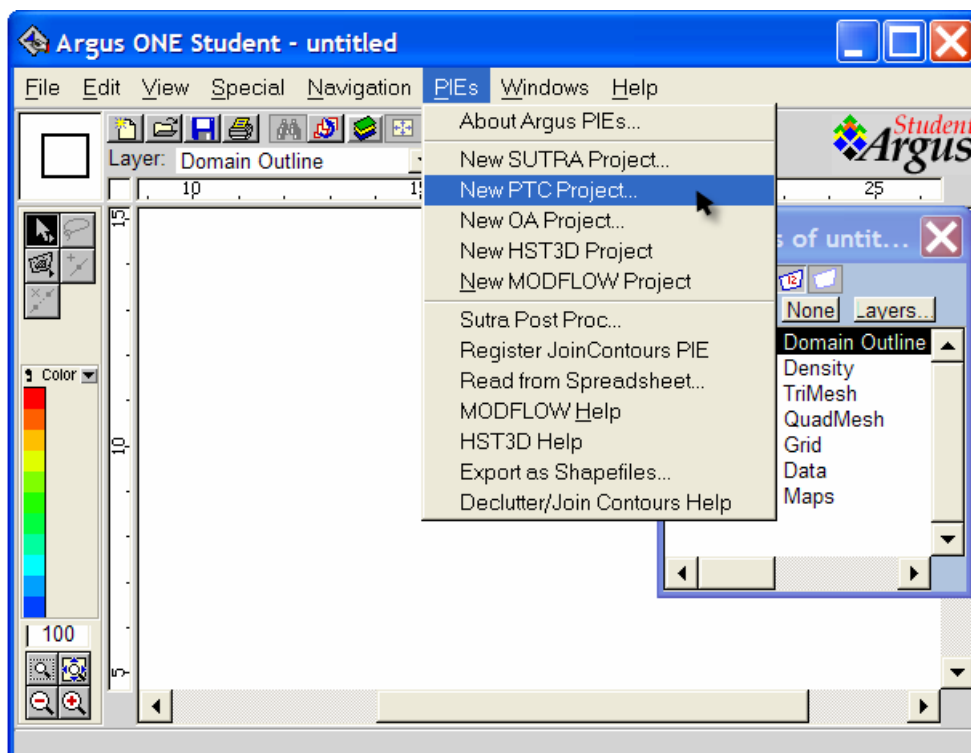
Προκειμένου να επιτευχθεί η προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων υδάτων στην περιοχή, απαιτείται μία σειρά από στοιχεία, τα οποία συνιστούν τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, καθώς και του υφιστάμενου υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν, υδραυλικές αγωγιμότητες, υψόμετρα, οριακές και αρχικές συνθήκες, βροχόπτωση, ρυθμούς άντλησης από φρεάτια, όπως επίσης και το χρόνο στα πλαίσια του οποίου, λαμβάνει χώρα η προσομοίωση. Με σημείο αναφοράς τα παραπάνω στοιχεία το πρόγραμμα PTC, μπορεί να συνθέσει μία αναπαράσταση της περιοχής και να δώσει σαν αποτέλεσμα τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους του ύδατος του υδροφορέα, καθώς και των συνιστωσών της ταχύτητας του. Οι αρχικές συνθήκες, είναι απαραίτητες για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Επιπρόσθετα, είναι δυνατός, ο υπολογισμός της συγκεντρώσεως τυχών ρύπων, οι οποίοι μεταφέρονται παράλληλα με την κίνηση του νερού.

6.3.1. Διαδικασία προσομοίωσης (Simulation process)

Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινά, με τη δημιουργία ενός αρχείου PTC, επιλέγοντας την εντολή “New PTC Project” από το μενού “PIEs”.

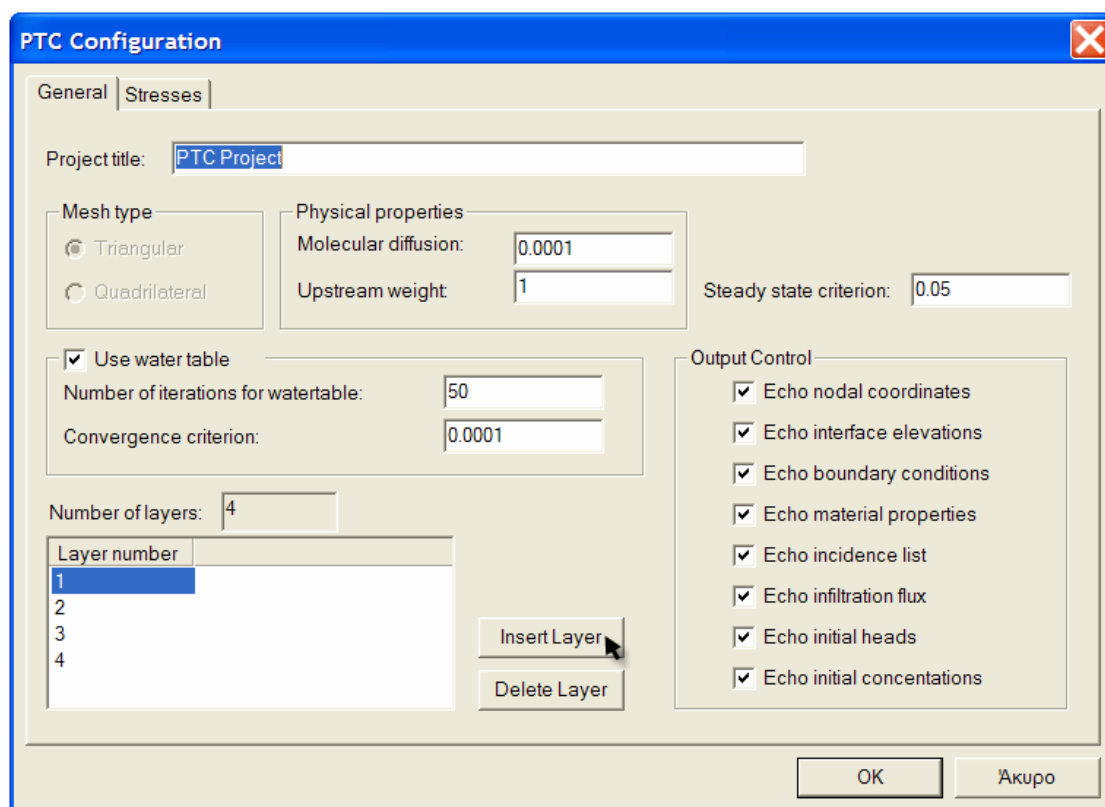


Εικόνα 6.5: Βασικό παράθυρο προγράμματος Argus ONE



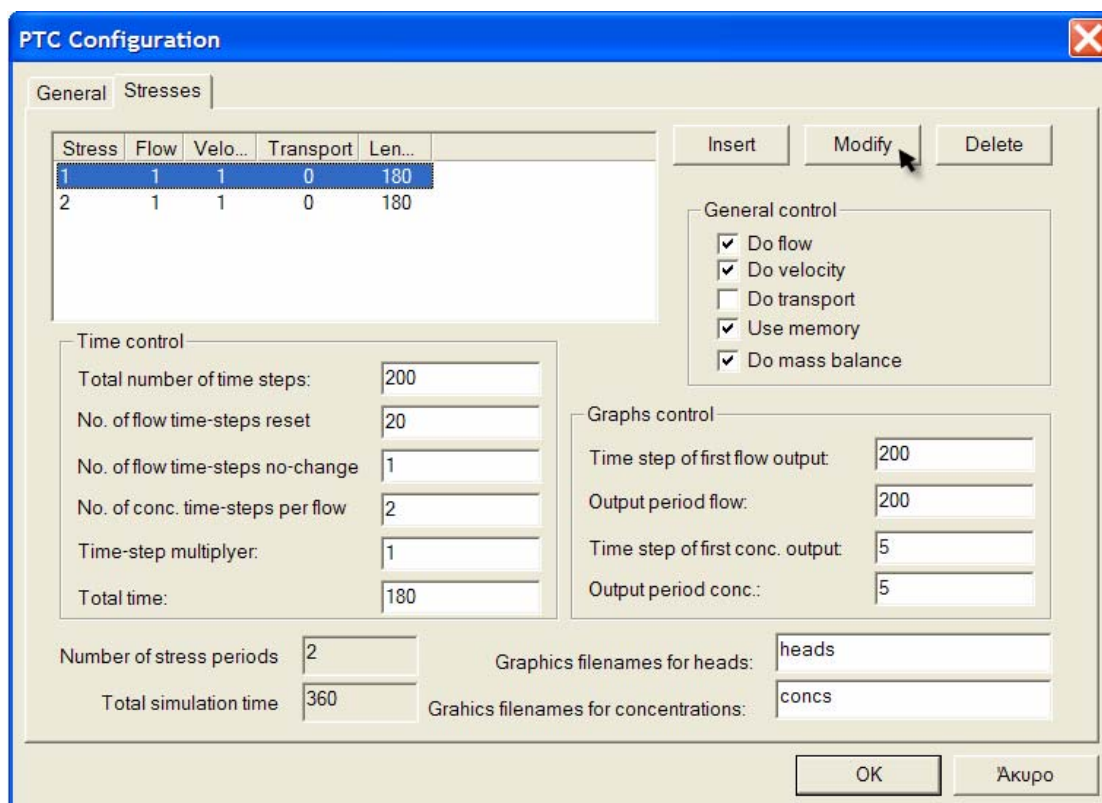
Εικόνα 6.6: Δημιουργία μιας νέας εργασίας στο PTC

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα ορίζονται τέσσερα στρώματα (layers), από τα οποία αντλείται νερό. Το πρώτο στρώμα θα καταλαμβάνει την έκταση από υψόμετρο 0 m ως 80 m, το δεύτερο στρώμα θα εκτείνεται μεταξύ 80 m και 140 m, το τρίτο από 140 m ως 195 m και το τέταρτο από 195 m ως 200 m. Το επίπεδο της θάλασσας ορίζεται στα 200 m (βλ. Παράρτημα II). Η προσθήκη νέων στρωμάτων επιτυγχάνεται με την εντολή “Insert Layer”. Όπως, φαίνεται και από την εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 6.7) στην καρτέλα “General” του παραθύρου “PTC Configuration”, έχει επιλεγεί το τριγωνικό είδος πλέγματος (Triangular Mesh type), το οποίο είναι και περισσότερο αξιόπιστο, όπως επίσης και η εντολή “Use water table”, που χρησιμοποιείται προκειμένου να δηλωθεί ότι, ο υδροφορέας είναι ελεύθερος.



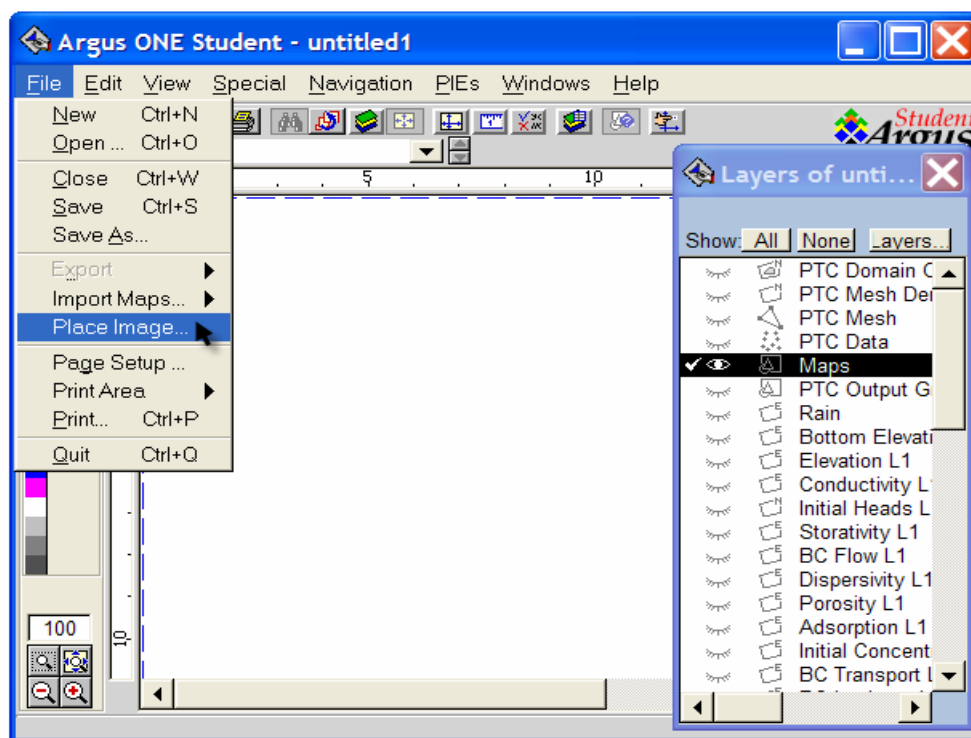
Εικόνα 6.7: Καθορισμός γενικών μεταβλητών του PTC Project

Στη συνέχεια καθορίζεται το συνολικό διάστημα, εντός του οποίου θα γίνει η προσομοίωση. Όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 6.8), το χρονικό αυτό διάστημα περιλαμβάνει 360 μέρες, που αντιστοιχίζονται στην καλοκαιρινή (Απρίλιος – Σεπτέμβριος) και χειμερινή (Οκτώβριος – Μάρτιος) περίοδο, αντίστοιχα. Επίσης, καθορίζεται το σύνολο των χρονικών βημάτων (100), ο αριθμός των χρονικών βημάτων υπολογισμού των συγκεντρώσεων ανά ροή (2) και ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής, πέρα από τον οποίο ακολουθεί αναρίθμηση του μοντέλου (20). Σε αυτή τη φάση, γίνεται ο υπολογισμός της ροής και της διατήρησης της μάζας και αργότερα θα πραγματοποιηθεί και ο υπολογισμός της ταχύτητας της ροής. Ο υπολογισμός της μεταφοράς δεν είναι απαραίτητος για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ιδιαίτερη προσοχή, πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι, για να αποθηκευτεί οποιαδήποτε αλλαγή στην καρτέλα “Stresses”, του συγκεκριμένου παραθύρου διαλόγου, θα πρέπει να επιλεγεί η εντολή “Modify”, πριν αυτής του “OK”.



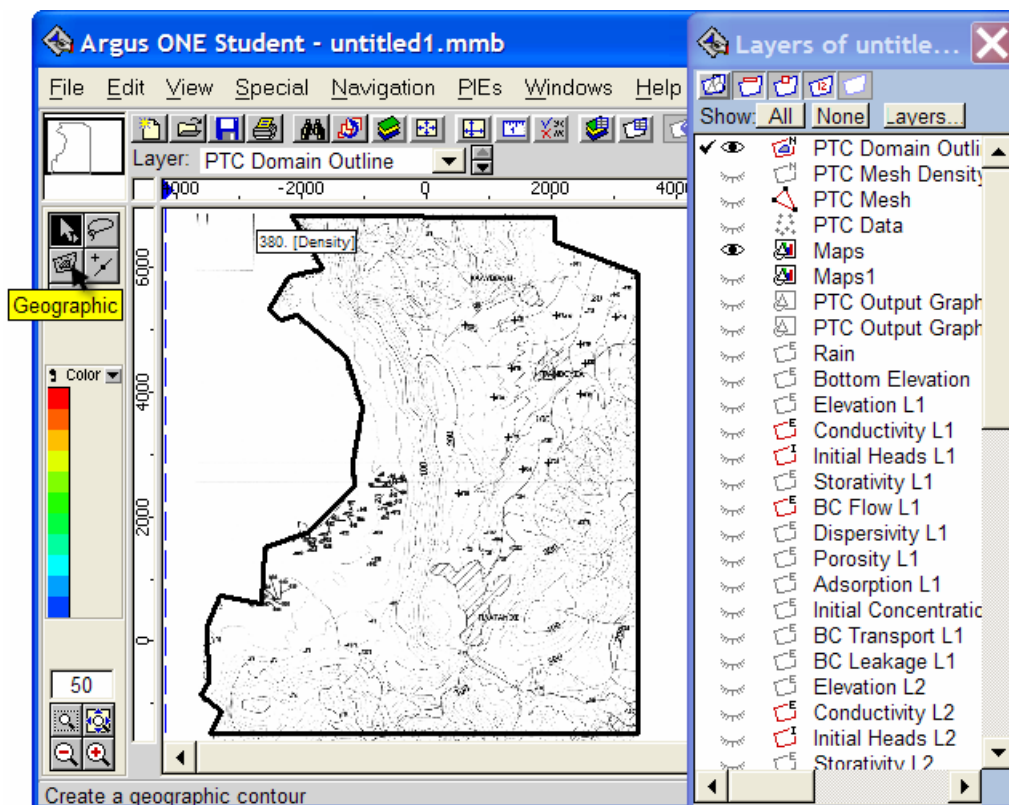
Εικόνα 6.8: Έλεγχος της ροής και επιλογή χρονικών βημάτων

Στη συνέχεια, εισάγονται οι χάρτες της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται και στην εικόνα (Εικόνα 6.9). Τα αρχεία των χαρτών, πρέπει να έχουν την επέκταση “.tif”. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εισάγονται ένας τοπογραφικός χάρτης εμφάνισης νερού και ένας γεωλογικός.



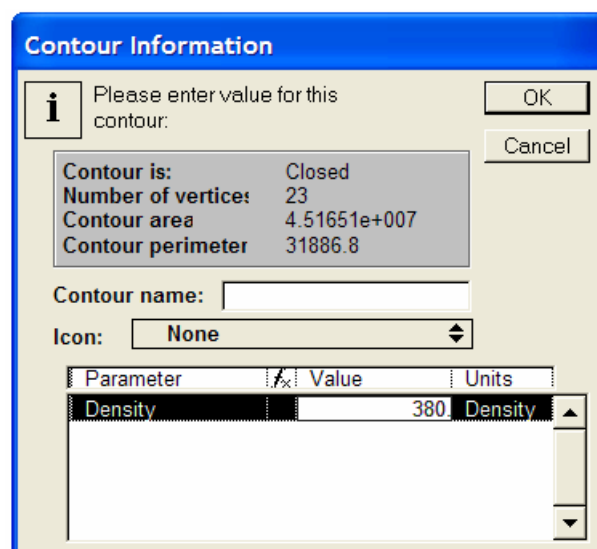
Εικόνα 6.9: Εισαγωγή χαρτών

Η κλίμακα του χάρτη ρυθμίζεται μέσω της εντολής “Rotate and scale” του μενού “Special”. Εν συνεχεία, επιλέγεται το layer “PTC Domain Outline” και σχεδιάζεται το περίγραμμα της περιοχής μελέτης με χρήση του “Geographic”.



Εικόνα 6.10: Περίγραμμα περιοχής μελέτης

Όταν ολοκληρωθεί το περίγραμμα της περιοχής μελέτης, ζητείται από το χρήστη ο καθορισμός της πυκνότητας των στοιχείων του πλέγματος. Όπως φαίνεται και από τις εικόνες (Εικόνα 6.10 και 6.11), στην πυκνότητα αυτή έχει δοθεί η τιμή 380. Σημειώνεται, ότι όσο μικρότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο μεγαλώνει ο αριθμός των στοιχείων του πλέγματος.



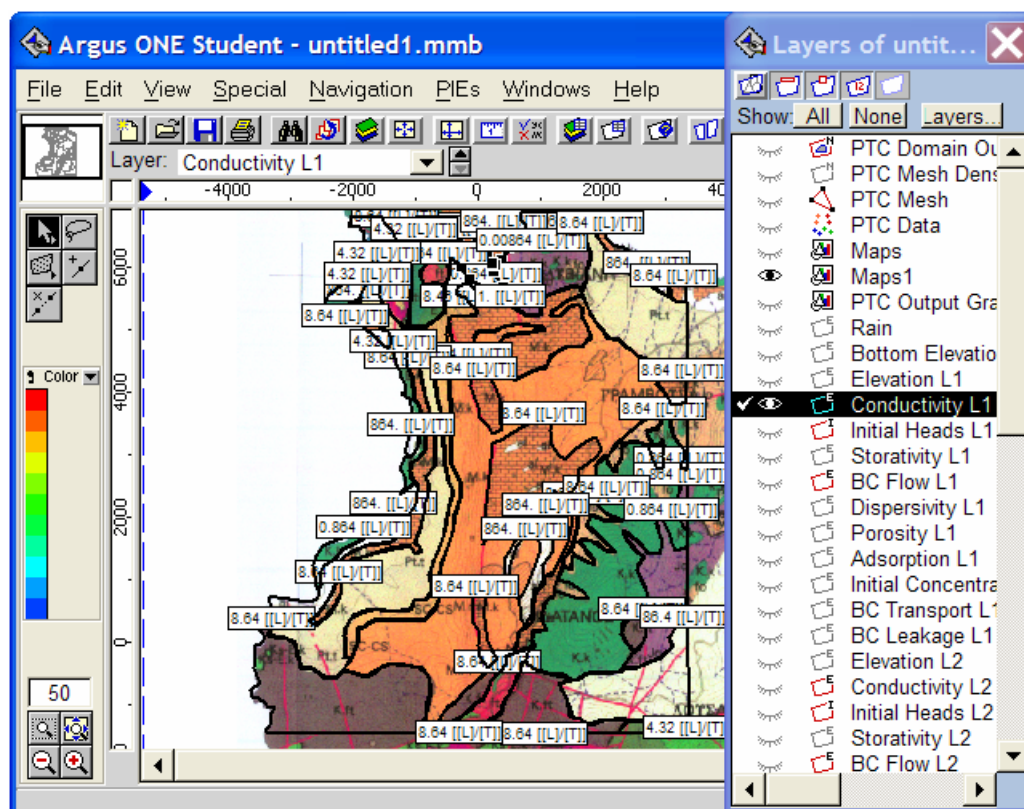
Εικόνα 6.11: Καθορισμός πυκνότητας πλέγματος

Στην πορεία, προσδιορίζονται οι υδραυλικές αγωγιμότητες. Οι τιμές των υδραυλικών αγωγιμοτήτων, των σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 6.1)

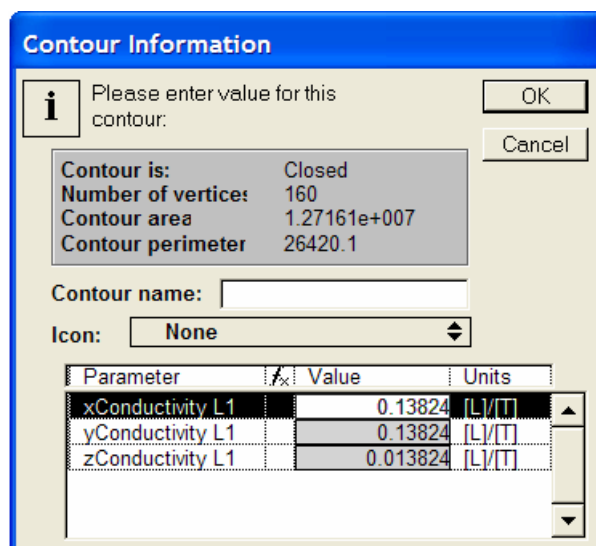
Γεωλογικός σχηματισμός	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/d)
Μάργες	1,38
Μαργαίκοι ασβεστόλιθοι	8,64
Ποτάμιες αναβαθμίδες	864
Πλακώδεις ασβεστόλιθοι	8,64
Νηριτικοί ασβεστόλιθοι	4,32
Αλλουβιακές αποθέσεις	864
Πολύχρωμοι κερατόλιθοι	0,864
Φλύσχης	8,64
Φυλλίτες-Χαλαζίτες	8,64
Νεογενές	86,4

Πίνακας 6.1: Υδραυλικές αγωγιμότητες


Οι παραπάνω τιμές εισάγονται στο πρόγραμμα, πρώτα στο layer 1 (Conductivity L1) και στη συνέχεια, αντιγράφονται και μεταφέρονται και στα υπόλοιπα layers. Συγκεκριμένα, κάθε φορά που ολοκληρώνεται το περίγραμμα ενός γεωλογικού σχηματισμού εμφανίζεται και πάλι το παράθυρο “Contour Information”, όπου και καταχωρούνται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στους τρεις άξονες (x, y, z). Μόνο στον άξονα z αλλάζουν οι δεδομένες τιμές της, όπου και είναι κατά δέκα φορές μικρότερες.

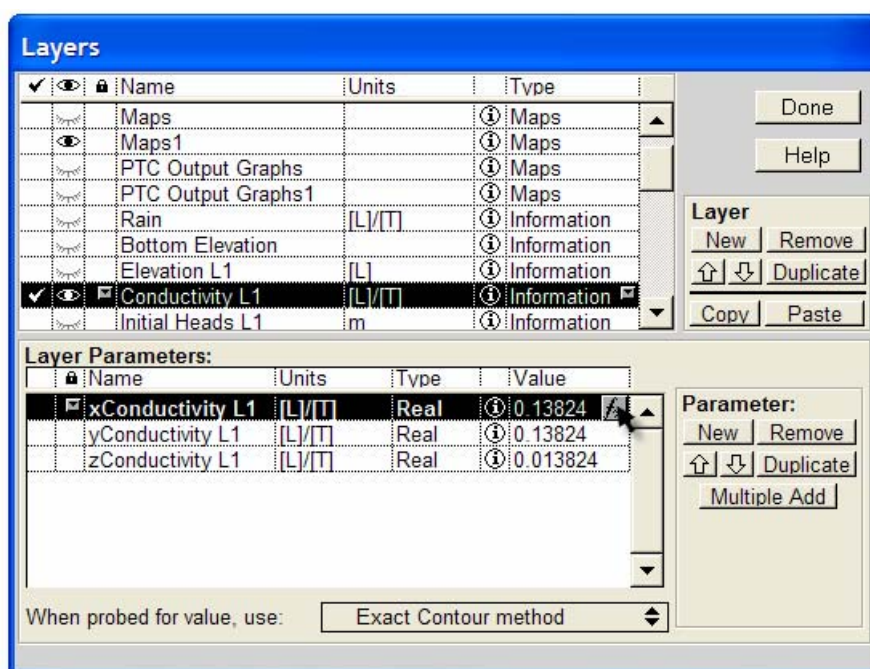


Εικόνα 6.12: Καταχώριση υδραυλικών αγωγιμοτήτων

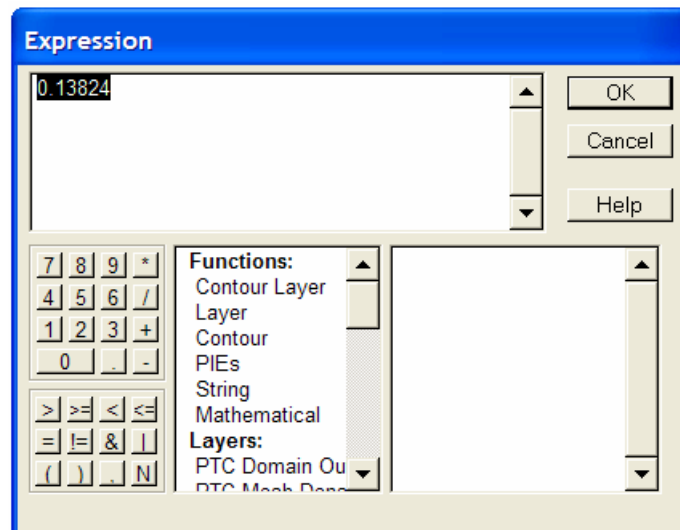


Εικόνα 6.13: Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στους τρεις άξονες

Επιπρόσθετα, ορίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα του επικρατούντος γεωλογικού σχηματισμού ως χαρακτηριστική για το σύνολο της περιοχής, που εξετάζεται. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας την εντολή “Layers...” (Εικόνα 6.12), όπου και καθορίζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του στρώματος. Επιλέγοντας μία συνιστώσα της υδραυλικής αγωγιμότητας του παραθύρου “Layers” εμφανίζεται το σύμβολο της συνάρτησης,  (Εικόνα 6.14). Μέσω αυτού είναι δυνατόν να αλλάξει η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε έναν από τους τρεις άξονες, στους οποίους και αναλύεται. Συγκεκριμένα, ανοίγει ένα νέο παράθυρο διαλόγου, με την επωνομασία “Expression” (Εικόνα 6.15), στο οποίο μπορεί ο χρήστης να πληκτρολογήσει την επιθυμητή τιμή. Η νέα τιμή, της χαρακτηριστικής για το στρώμα, υδραυλικής αγωγιμότητας, πρέπει να μεταφερθεί και στα υπόλοιπα στρώματα (layers).

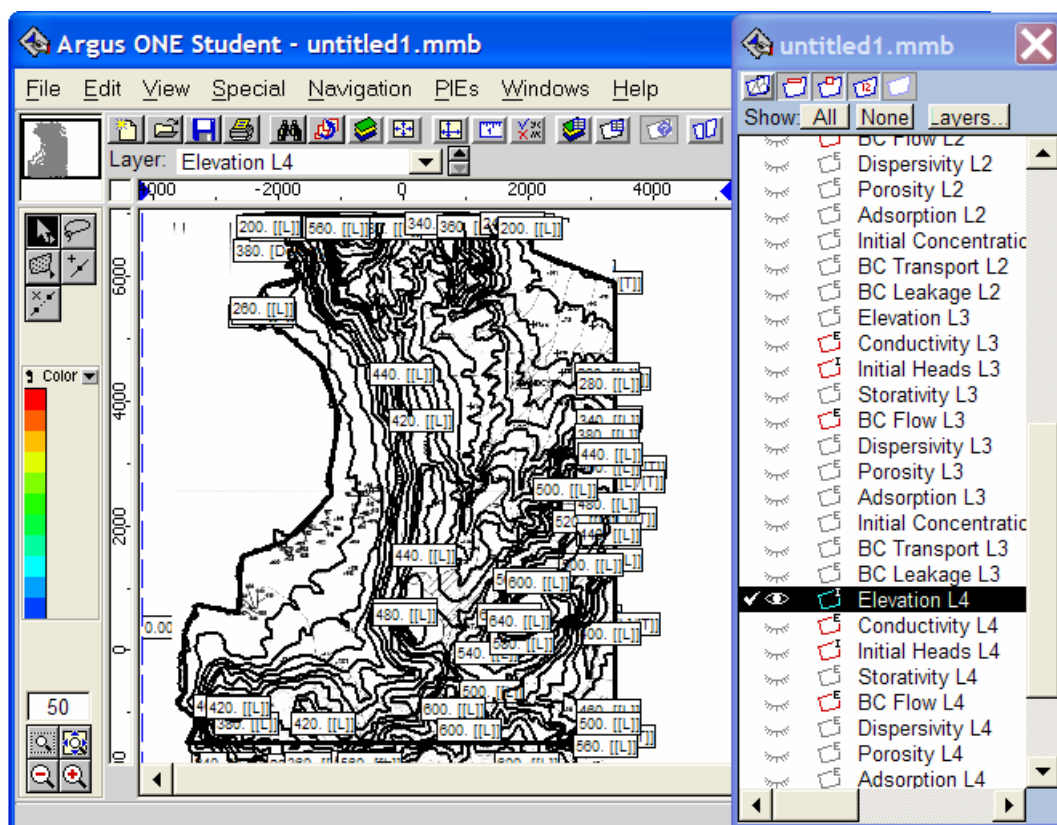


Εικόνα 6.14: Παράθυρο διαλόγου “Layers”



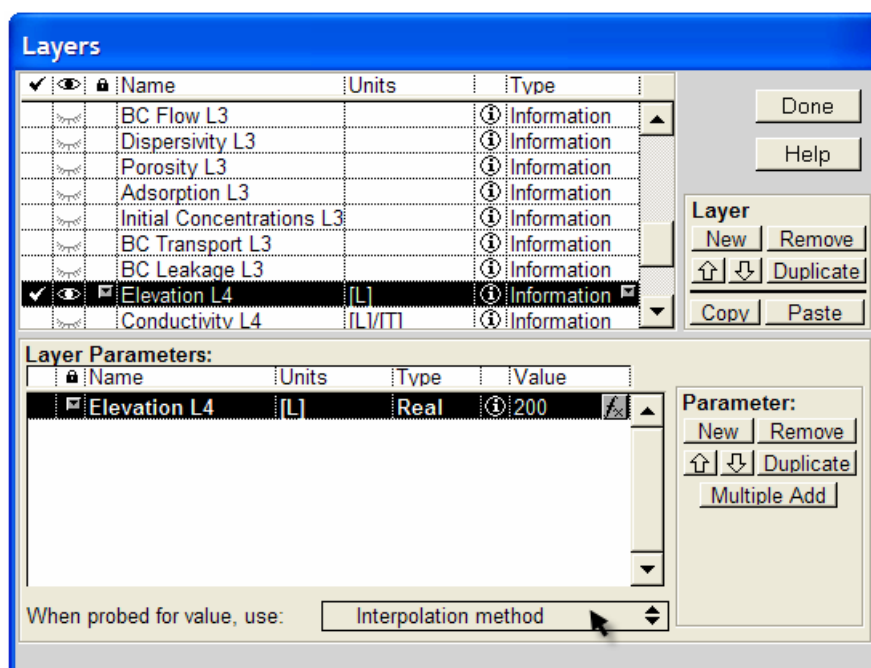
Εικόνα 6.15: Καταχώριση της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας του στρώματος

Κατόπιν, σχεδιάζονται οι ισοϋψείς στο τέταρτο layer, έτσι όπως αυτές έχουν χαραχθεί στον τοπογραφικό χάρτη εμφάνισης νερού.



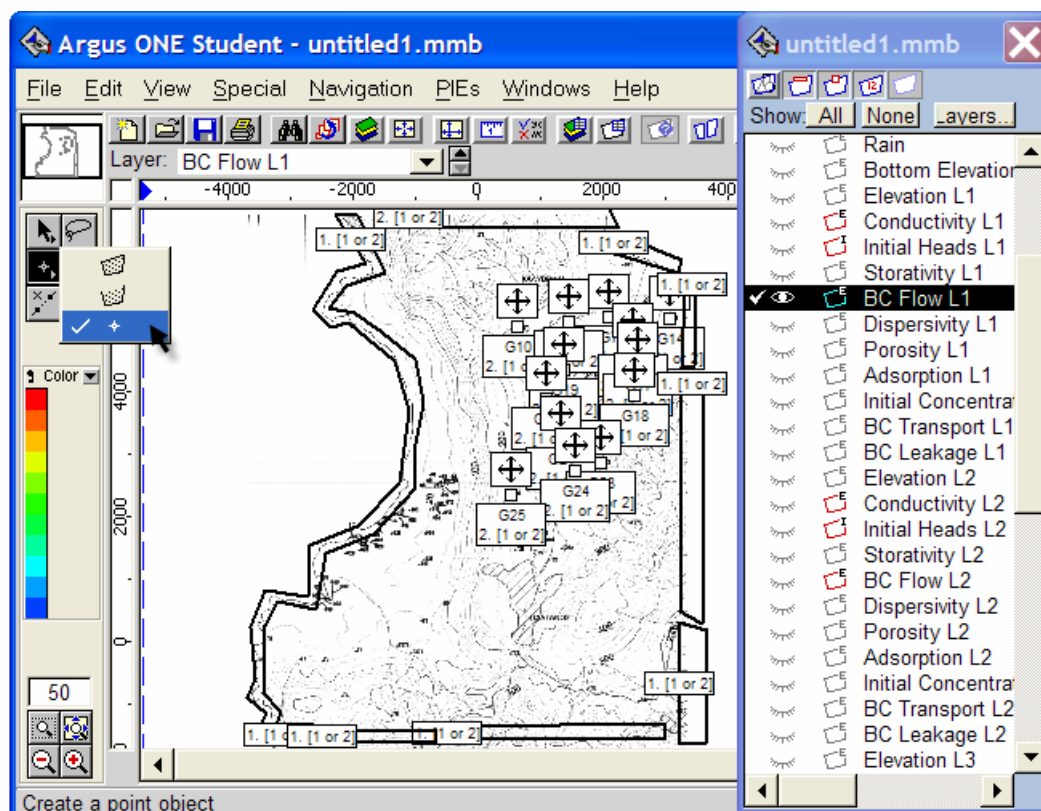
Εικόνα 6.16: Χάραξη ισοϋψών

Εφόσον, χαραχθεί ικανοποιητικός αριθμός ισοϋψών, το πρόγραμμα στη συνέχεια υπολογίζει το υψόμετρο σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, μέσω γραμμικής παρεμβολής, η οποία ενεργοποιείται επιλέγοντας την εντολή “Interpolation Method” στο παράθυρο “Layers” (Εικόνα 6.17).



Εικόνα 6.17: Επιλογή εφαρμογής γραμμικής παρεμβολής

Στο παράθυρο “Layers” καθορίζεται και η τιμή του υψομέτρου, στο οποίο εντοπίζεται κάθε layer (πχ. το layer 4 εμφανίζεται στα 200 m), με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για τη χαρακτηριστική υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος. Ακολούθως προσδιορίζονται, οι οριακές συνθήκες (1^{ου} είδους – Σταθερό υδραυλικό ύψος) και τοποθετούνται τα φρεάτια άντλησης, στα διάφορα layers, ανάλογα με το στρώμα από το οποίο αντλούν νερό.



Εικόνα 6.18: Οριακές συνθήκες και επιλογή σημειακής πηγής, που αντιπροσωπεύει φρεάτιο άντλησης

Οι περιμετρικές τιμές στις οριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις υποθετικές τιμές εισροών-εκροών. Οι σημειακές τιμές είναι διαφορετικές, δεδομένου ότι αναπαριστούν τις παροχές από τις αντλήσεις των γεωτρήσεων.

Contour Information

Please enter value for this contour: OK Cancel

Contour is: Closed
 Number of vertices: 5
 Contour area: 1.36673e+006
 Contour perimeter: 8235.22

Contour name:

Icon: None

Parameter	Value	Units
BC Type L1	1	1 or 2
BC Stress1	243	
BC Stress2	243	

Εικόνα 6.19: Καθορισμός οριακών συνθηκών (1^ο είδους)

Contour Information

Please enter value for this contour: OK Cancel

Contour is: One point
 Number of vertices: 1
 Contour area: 0
 Contour length: 0

Contour name:

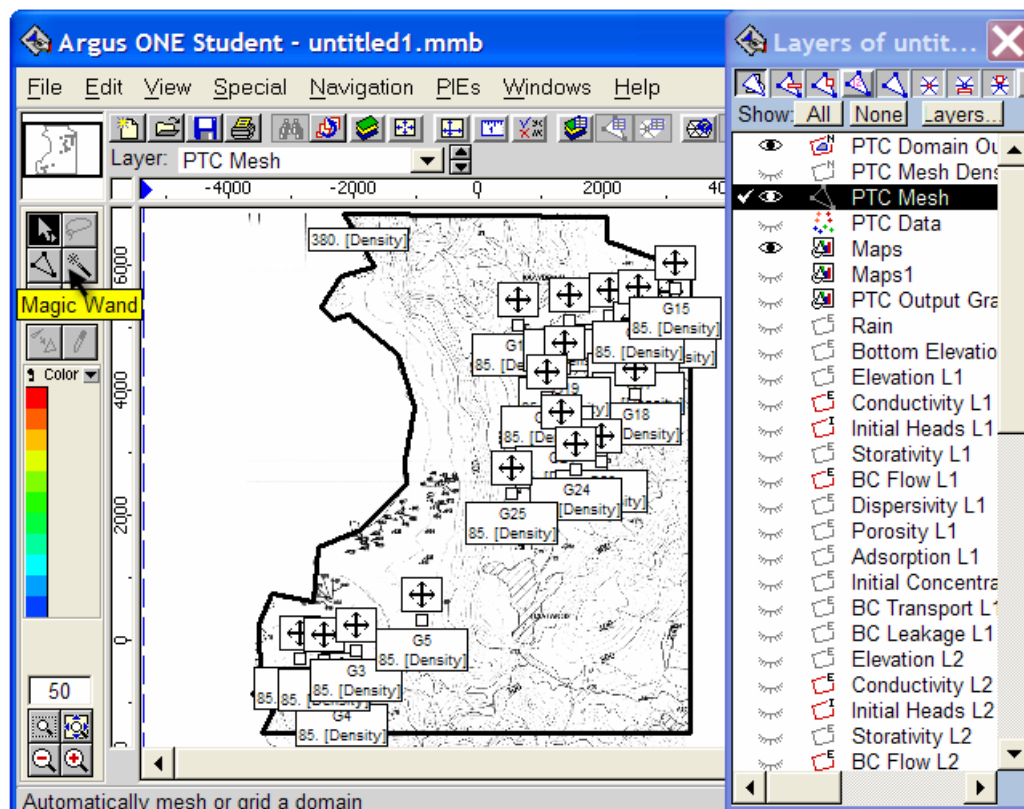
Icon: Source

Parameter	Value	Units
BC Type L1	2	1 or 2
BC Stress1	-480	
BC Stress2	-240	

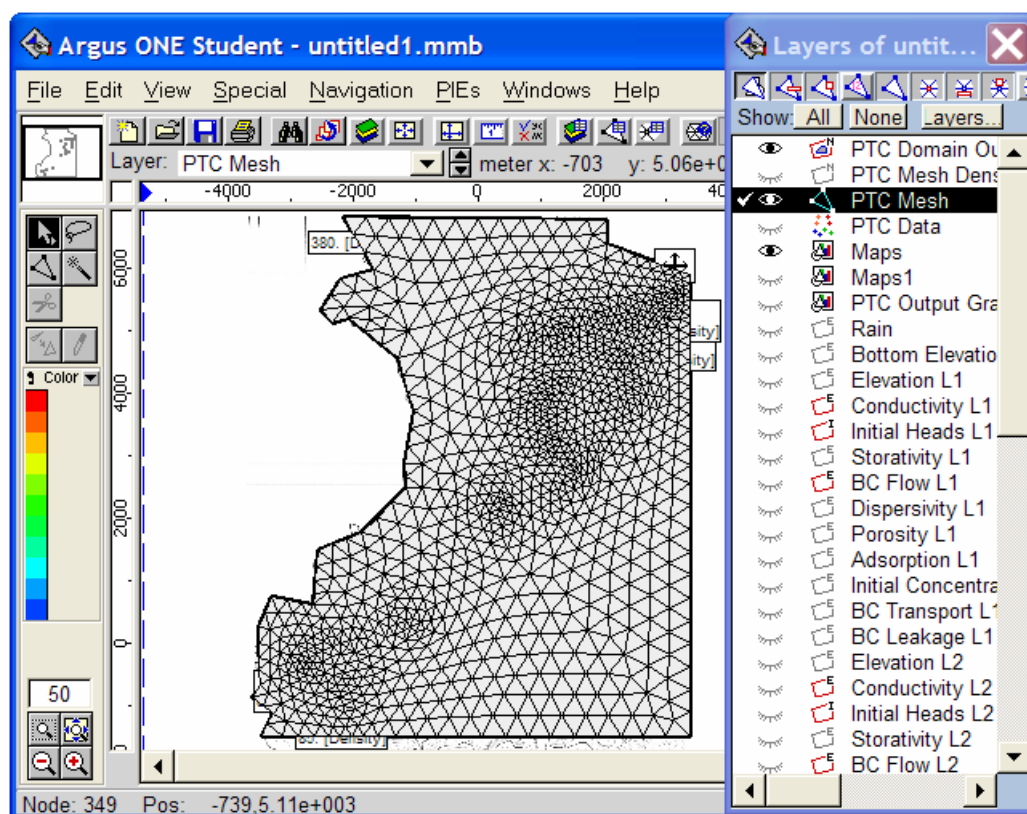
Εικόνα 6.20: Καθορισμός παροχών άντλησης (2^ο είδους)

Οι οριακές συνθήκες, έτσι όπως έχουν καθοριστεί στο layer 1, μεταφέρονται και στα υπόλοιπα layers. Επίσης προκειμένου, το πρόγραμμα να λάβει υπόψη του, την ύπαρξη των φρεατίων άντλησης, θα πρέπει αυτά, να μεταφερθούν στο σύνολό τους, στο layer “PTC Domain Outline”. Η πυκνότητα των στοιχείων του πλέγματος στις θέσεις των φρεατίων είναι μικρότερη (= 85) από αυτή της περιοχής μελέτης (= 380). Η αλλαγή αυτή οφείλεται, στο γεγονός ότι περιμετρικά των φρεατίων άντλησης αναπτύσσονται διάφορα σύνθετα φαινόμενα, όπως για παράδειγμα ακτινική ροή. Μειώνοντας, λοιπόν, την πυκνότητα στα σημεία, που υπάρχουν φρεάτια άντλησης επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των παραπάνω φαινομένων εφόσον, όπως έχει εξηγηθεί και προηγούμενα, όσο μειώνεται η τιμή της πυκνότητας, τόσο αυξάνονται τα στοιχεία του πλέγματος στις συγκεκριμένες θέσεις.

Το πλέγμα δημιουργείται, μέσω της ενεργοποίησης του layer “PTC Mesh” σε συνδυασμό με τη χρήση του “Magic Wand” (Εικόνα 6.21).

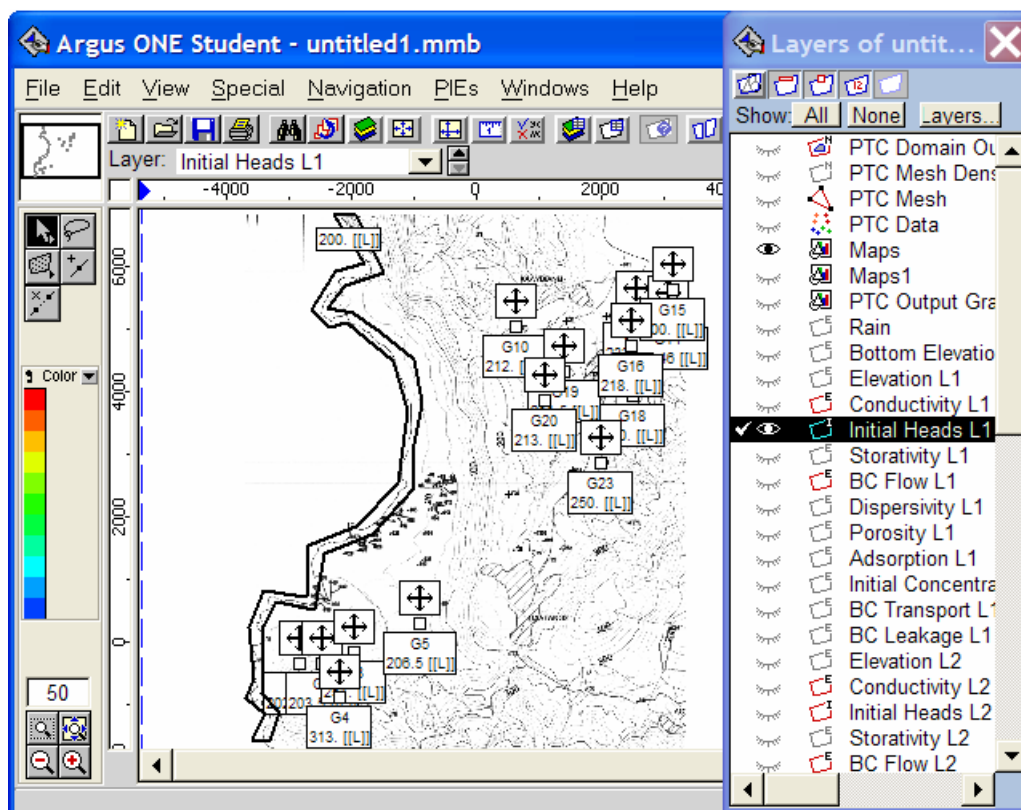


Εικόνα 6.21: Διαδικασία δημιουργίας πλέγματος

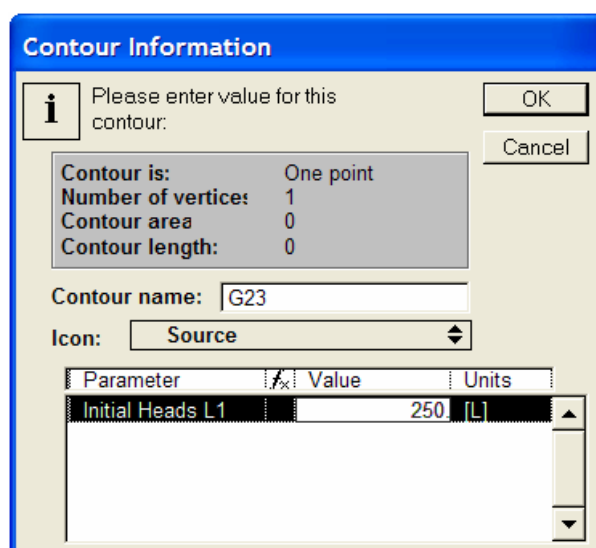


Εικόνα 6.22: Απεικόνιση του πλέγματος

Στη συνέχεια, καθορίζονται τα υδραυλικά ύψη του νερού στις θέσεις των φρεατίων άντλησης, με βάση τις μετρήσεις του πεδίου. Αυτά θα αποτελέσουν και τις αρχικές συνθήκες για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Επίσης, παραλιακά, ορίζεται το επίπεδο της θάλασσας στα 200 m. Τα δεδομένα αυτά τοποθετούνται και στα υπόλοιπα layers.

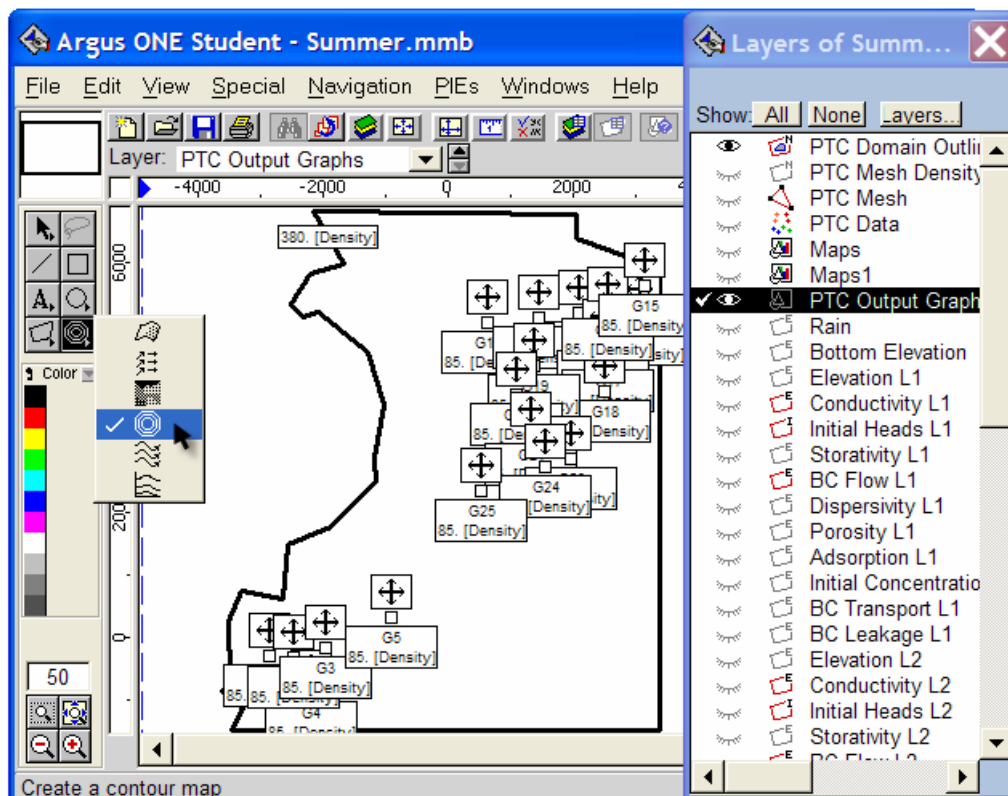


Εικόνα 6.23: Στάθμη νερού εντός των φρεατίων βάσει μετρήσεων πεδίου



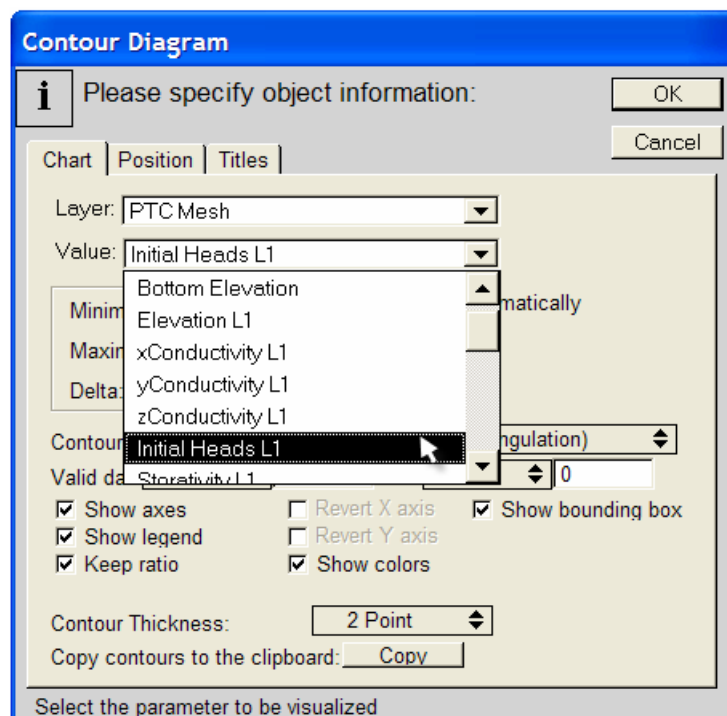
Εικόνα 6.24: Καθορισμός τιμών υδραυλικού ύψους

Το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των παραπάνω δεδομένων στα πλαίσια της περιοχής μελέτης, μέσω της επιλογής “PTC Output Graph” (Εικόνα 6.25).

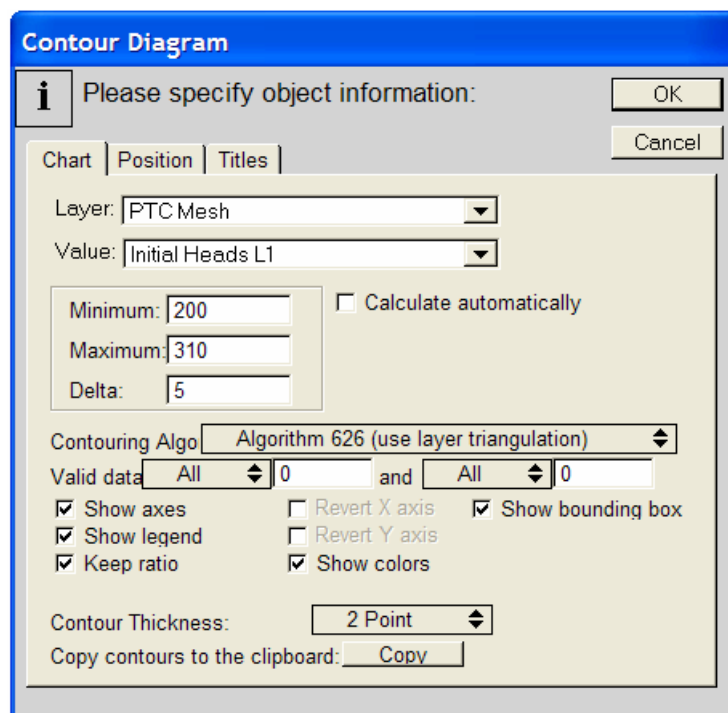


Εικόνα 6.25: Καθορισμός ορίων περιοχής για την αναπαράσταση των μετρήσεων πεδίου

Με τη βοήθεια του εργαλείου, που φαίνεται στην εικόνα 6.25, επιλέγεται η περιοχή μελέτης, οπότε και εμφανίζεται το παράθυρο “Contour Diagram” (Εικόνα 6.26). Επιλέγεται, η παράμετρος “Initial Heads L1” και καθορίζονται η μέγιστη και ελάχιστη τιμή στο γράφημα, καθώς και το βήμα (Εικόνα 6.27).

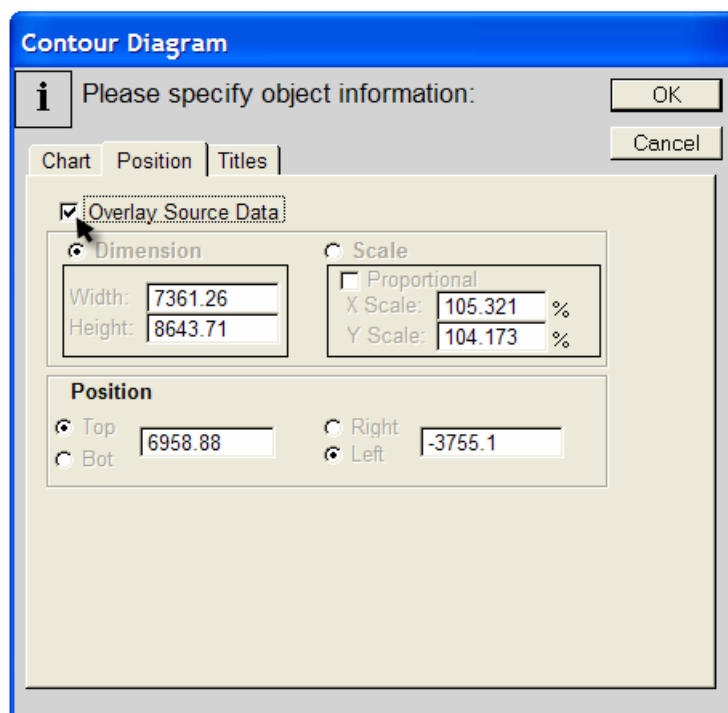


Εικόνα 6.26: Καθορισμός παραμέτρων που θα αναπαρασταθούν γραφικά



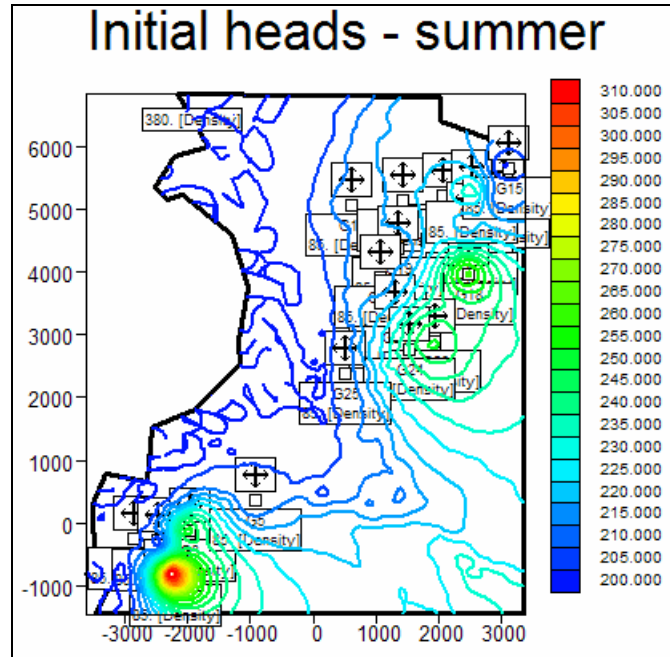
Εικόνα 6.27: Καθορισμός μέγιστης, ελάχιστης τιμής και βήματος

Επίσης, από την καρτέλα “Position” του παραθύρου “Contour Diagram” επιλέγεται η εντολή “Overlay Source Data” (Εικόνα 6.28). Η καρτέλα “Titles” παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να ονοματίσει το γράφημα που θα προκύψει (πχ. Initial heads – summer / Initial heads – winter).



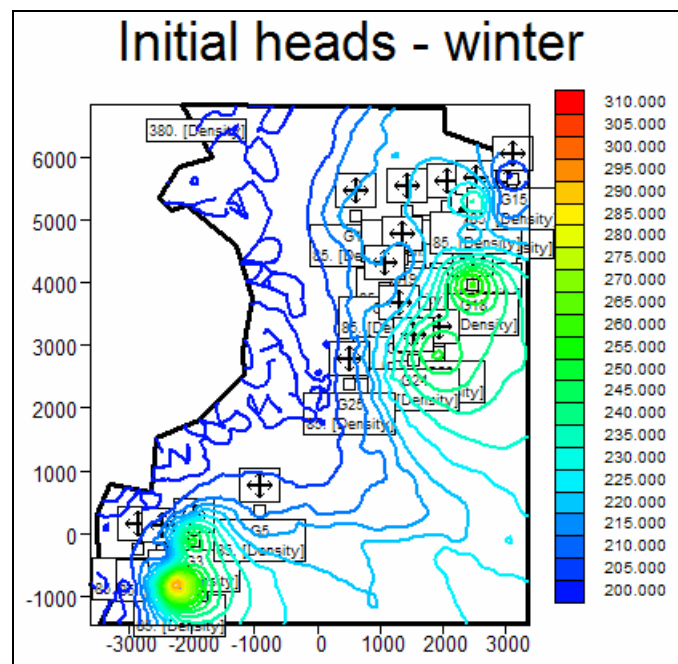
Εικόνα 6.28: Επιλογή το διάγραμμα να φαίνεται πάνω από τα υπόλοιπα δεδομένα

Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει το γράφημα των υδραυλικών υψών για την καλοκαιρινή περίοδο, που φαίνεται παρακάτω (Εικόνες 6.29 – 6.30).



Εικόνα : 6.29: Γραφική αναπαράσταση των υδραυλικών υψών για την καλοκαιρινή περίοδο

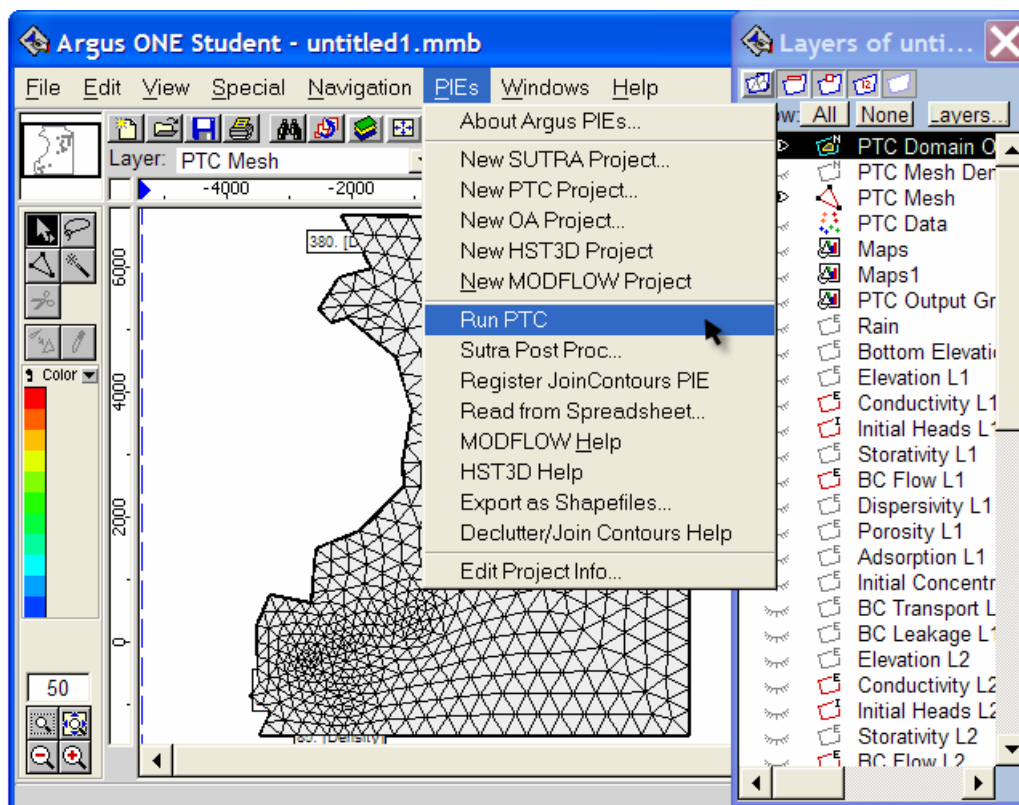
Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τα δεδομένα της χειμερινής περιόδου.



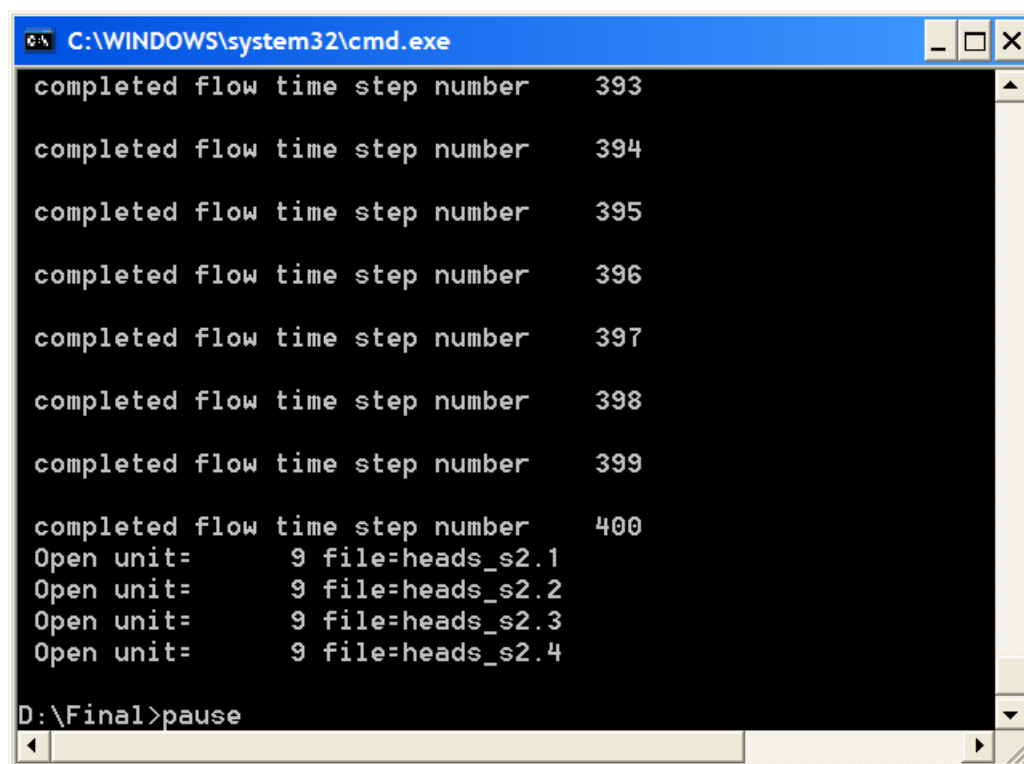
Εικόνα 6.30: Γραφική αναπαράσταση των υδραυλικών υψών για τη χειμερινή περίοδο

Η βροχόπτωση, καθορίζεται από το παράθυρο “Layers” και για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει οριστεί μηδενική για το καλοκαίρι και περίπου 0,00041 m/d για το χειμώνα (~ 20% της συνολικής μέσης βροχόπτωσης). Όπως, όμως, μπορεί να διαπιστώσει κανείς, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στα υδραυτικά ύψη, μεταξύ των δύο περιόδων. Για το λόγο αυτό, θα δοθεί βαρύτητα στην καλοκαιρινή περίοδο, η οποία αλώςτε, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη ευαισθησία, όσο αφορά το ενδεχόμενο της υφαλμύρινης.

Σε αυτό το σημείο έχουν καταχωρηθεί όλα τα δεδομένα, που απαιτούνται, για την εκτέλεση του μοντέλου. Επιλέγεται, λοιπόν, το layer PTC Mesh και εν συνεχεία από το μενού “PIES”, η εντολή “Run PTC”.

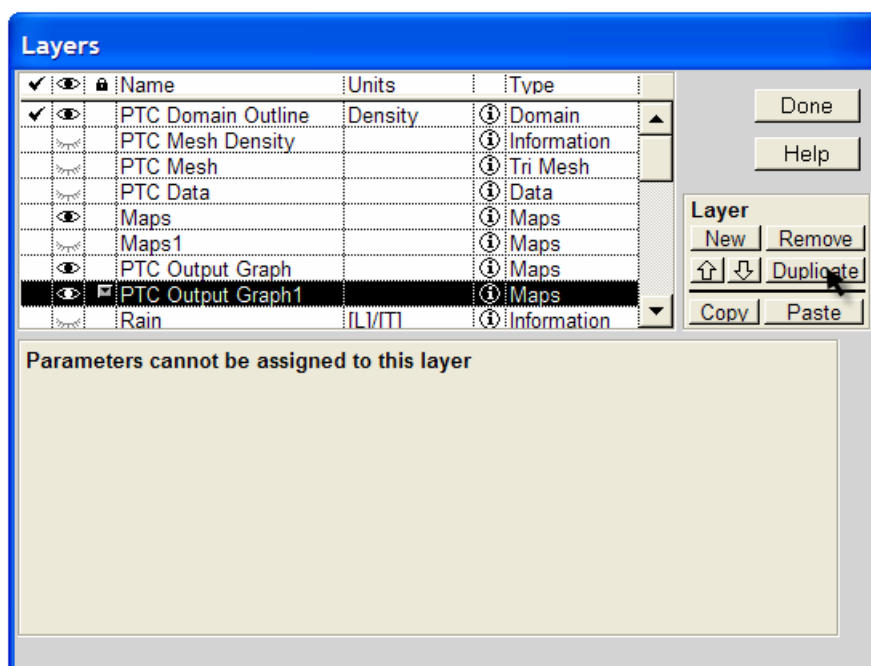


Εικόνα 6.31: Εκτέλεση του μοντέλου



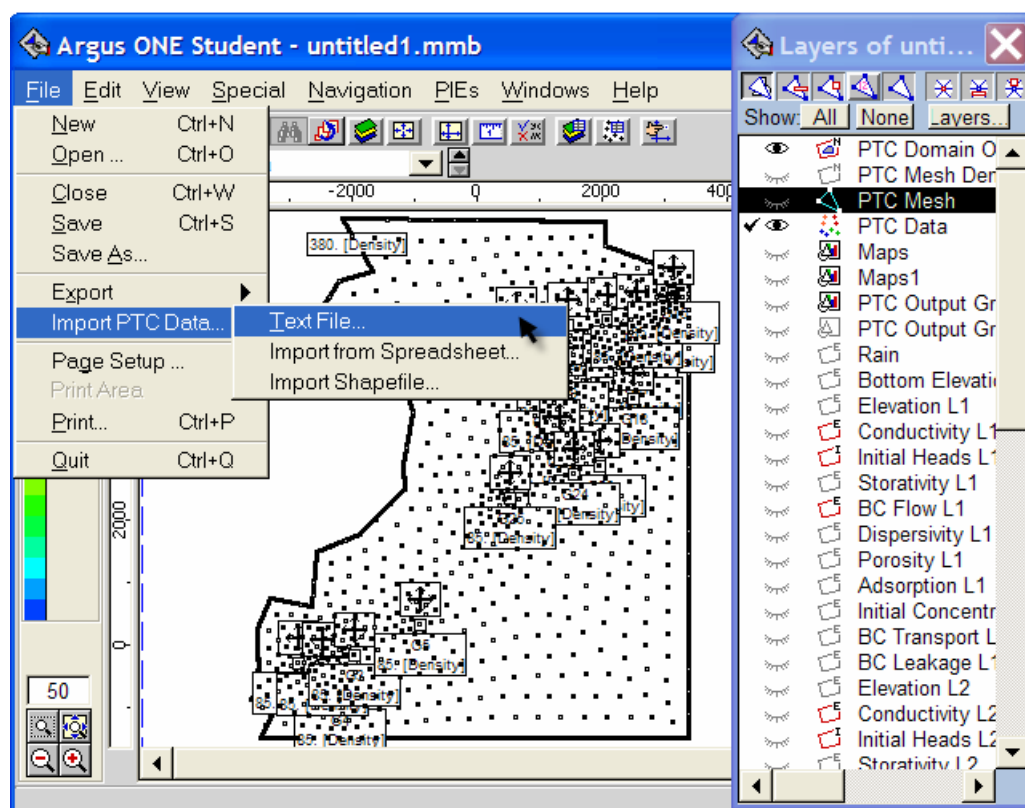
Εικόνα 6.32: Αποτελέσματα εκτέλεσης σε περιβάλλον DOS

Για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων θα χρειαστεί ένα επιπλέον layer “PTC Output Graph”. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή “Duplicate” από το παράθυρο “Layers” (Εικόνα 6.33).



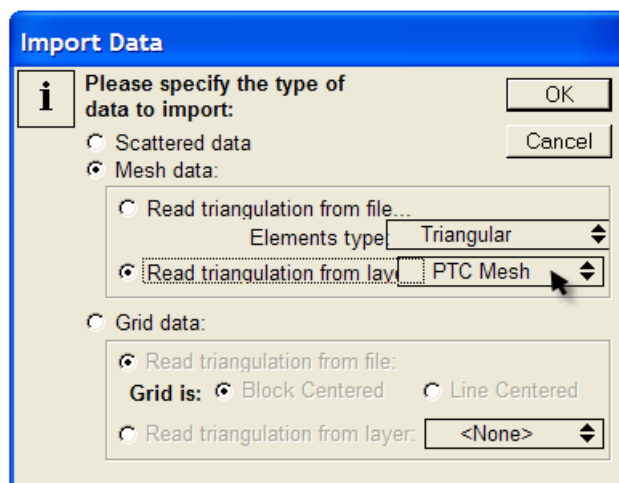
Εικόνα 6.33: Διπλασιασμός των layers των γραφημάτων

Σε αυτή τη φάση, μπορεί να γίνει η εισαγωγή των αποτελεσμάτων, όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα.

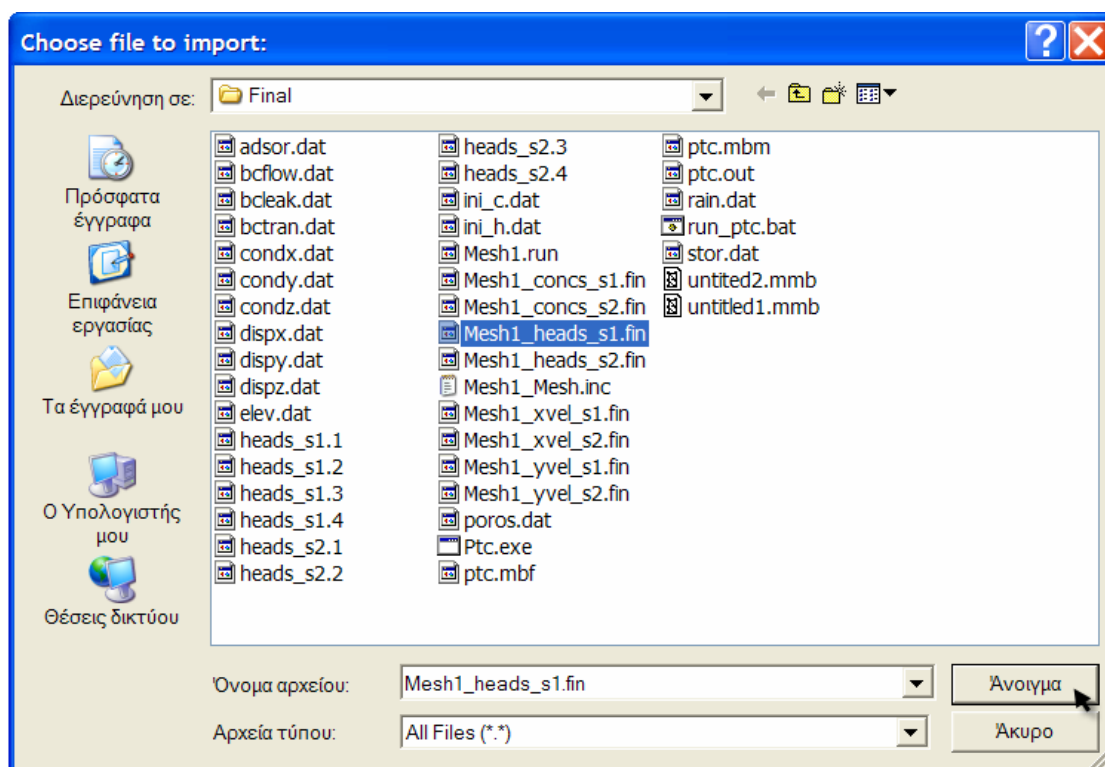


Εικόνα 6.34: Εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης

Με την επιλογή της εντολής “Text File” προβάλλεται το ακόλουθο παράθυρο.

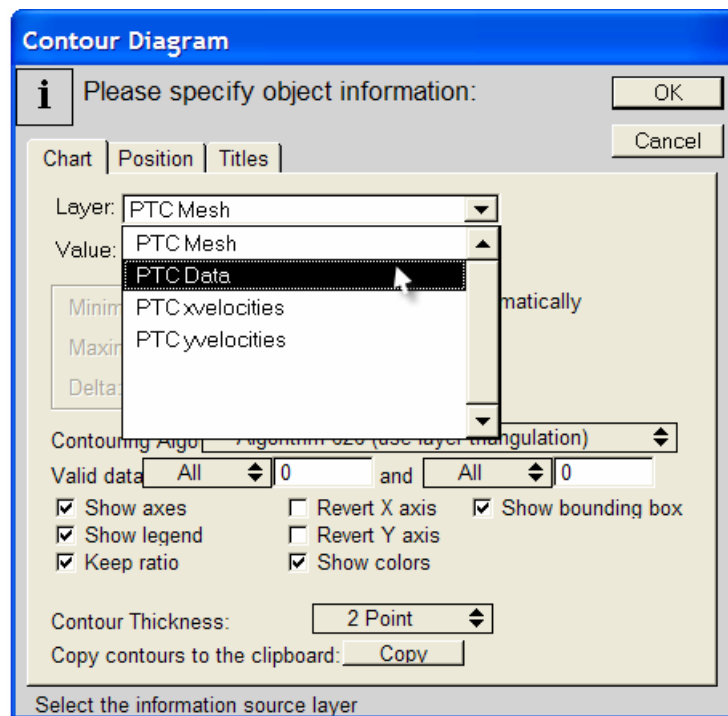


Εικόνα 6.35: Καθορισμός του είδους του αρχείου εισαγωγής

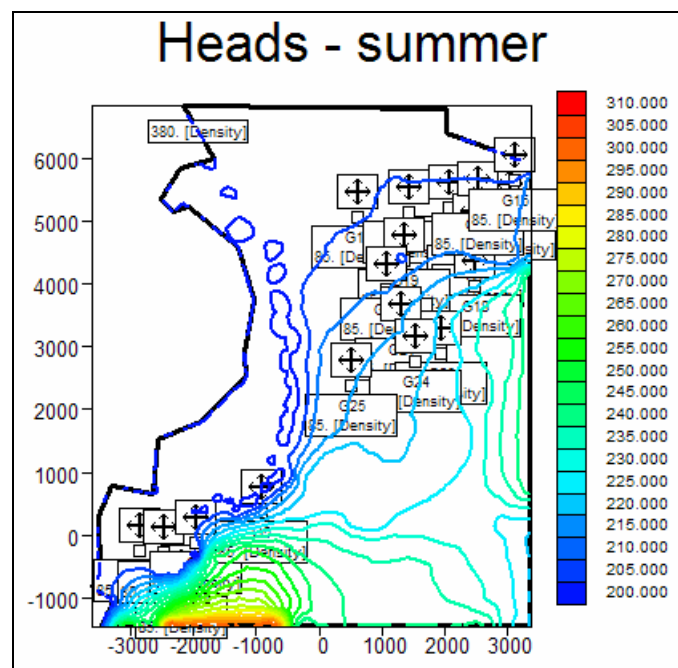


Εικόνα 6.36: Επιλογή του αρχείου που περιέχει τα υδραυλικά ύψη

Εφόσον, ολοκληρωθεί η εισαγωγή των δεδομένων, για τη γραφική τους απεικόνιση, ακολουθείται η ίδια διαδικασία με βάση την οποία αναπαραστάθηκαν τα υδραυλικά ύψη του πεδίου. Όταν, όμως εμφανιστεί το παράθυρο “Contour Diagram”, στην καρτέλα “Chart”, η αναζήτηση των καταχωρημένων πλέον, δεδομένων, γίνεται διαμέσου του “Layer”, όπου και επιλέγεται το “PTC Data” (Εικόνα 6.37). Μεταβάλλοντας κάθε φορά, τις οριακές συνθήκες, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βαθμονομήσει το μοντέλο, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν τις τιμές του πεδίου. Κάθε αλλαγή απαιτεί, εκ νέου εισαγωγή των δεδομένων. Το τελικό διάγραμμα της προσομοίωσης, φαίνεται στην εικόνα 6.38.



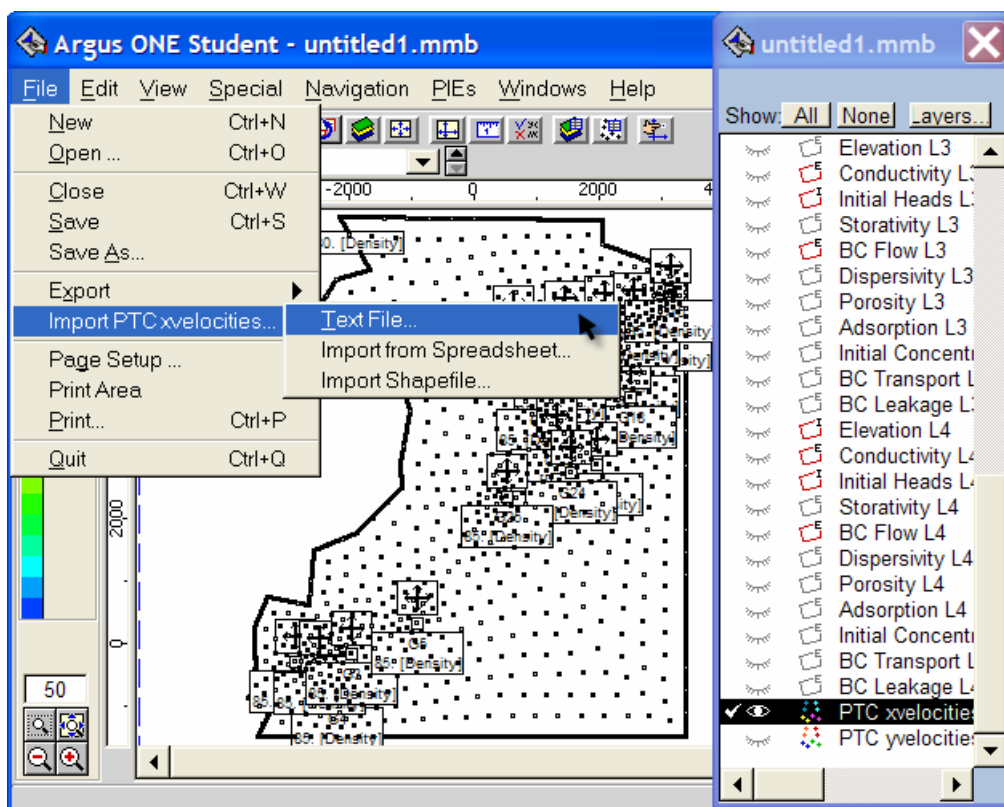
Εικόνα 6.37: Επιλογή του “PTC Data”



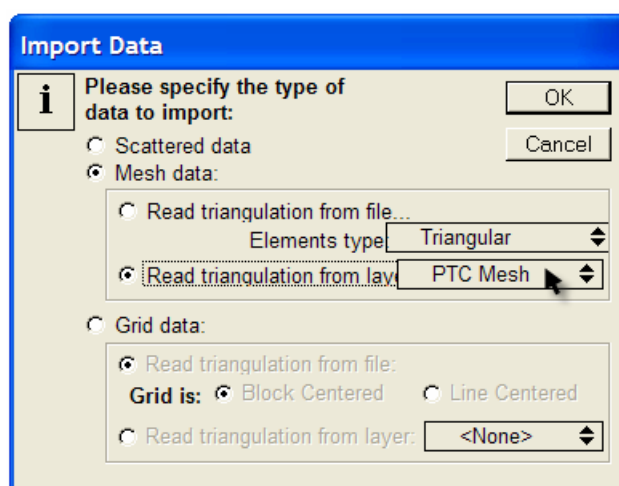
Εικόνα 6.38: Γραφική αναπαράσταση υδραυλικών υψών προσομοίωσης

Σύμφωνα με τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας, εφόσον το υψόμετρο της θάλασσας τοποθετείται στα 200 m, η διεπιφάνεια εντοπίζεται 5 m, περίπου πιο πάνω ($200/40=5$), δηλαδή στα 205 m. Αυτό σημαίνει, ότι στο γράφημα των υδραυλικών υψών (Εικόνα 6.38), στα σημεία που η στάθμη του ύδατος βρίσκεται στα 205 m ή και περισσότερο, το νερό έχει υποστεί υφαλμύριση. Όπως, μπορεί να παρατηρήσει, λοιπόν κανείς, η ζώνη της υφαλμύρισης έχει εισχωρήσει, αρκετά στον υπόγειο υδροφόρα. Συνεπώς, αντιμετώπιση του φαινομένου αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

Για τη γραφική απεικόνιση της ταχύτητας της κίνησης του νερού η διαδικασία είναι ανάλογη. Συγκεκριμένα για την οριζόντια x-διεύθυνση, επιλέγεται το layer “PTC xvelocities” και στη συνέχεια και πάλι από το μενού “File”/ “Import PTC xvelocities”/ “Text File”, (Εικόνα 6.39), ώστε τελικά να εμφανιστεί το παράθυρο “Import Data”, (Εικόνα 6.40), από το οποίο και θα γίνει η εισαγωγή των δεδομένων (Εικόνα 6.41). Τα ίδια ακριβώς βήματα ακολουθούνται και για τη ταχύτητα στην οριζόντια y-διεύθυνση.



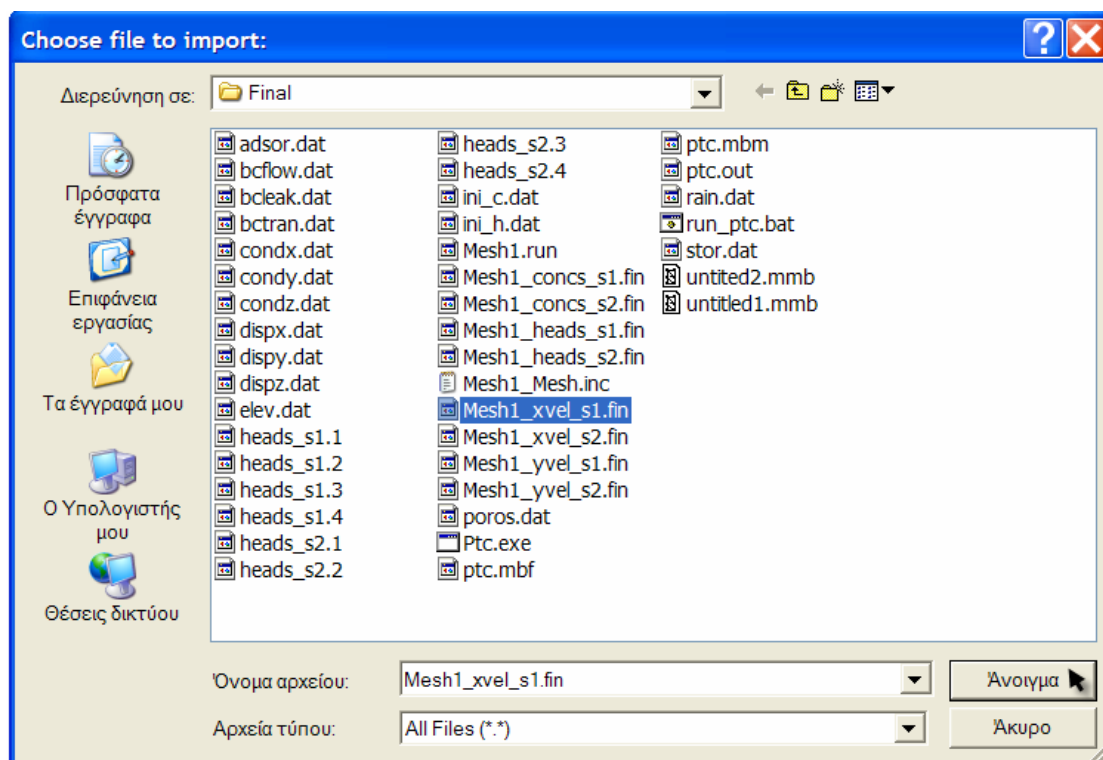
Εικόνα 6.39: Εισαγωγή δεδομένων ταχύτητας



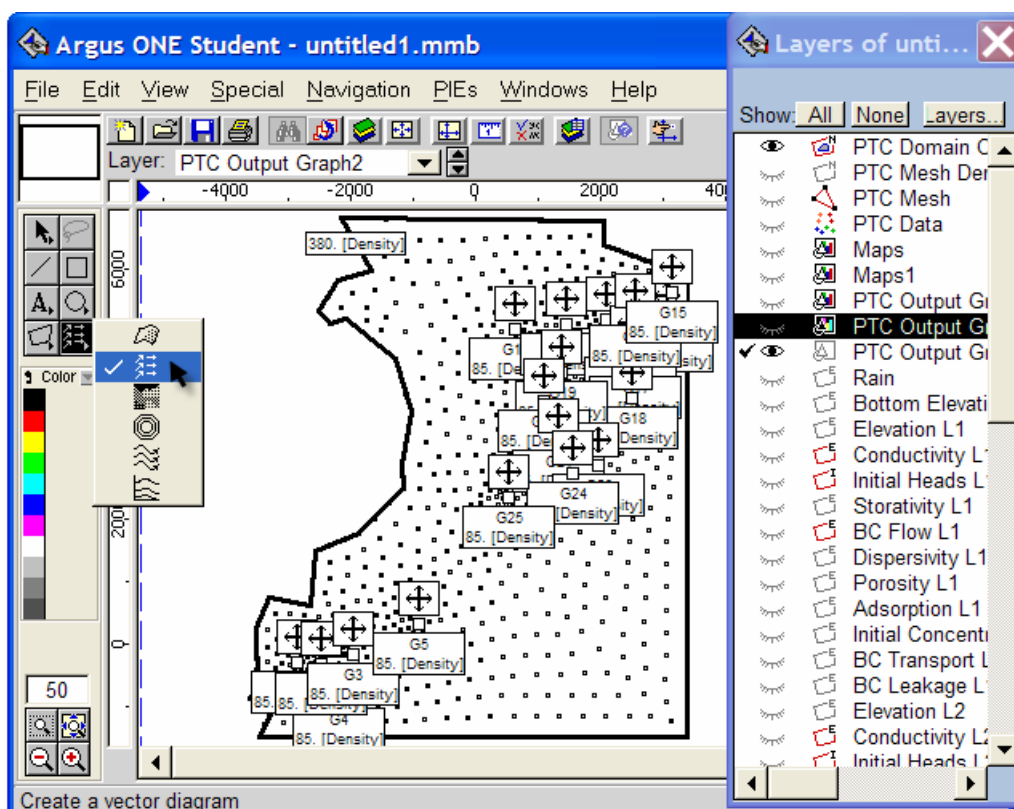
Εικόνα 6.40: Καθορισμός του είδους του αρχείου που περιέχει την οριζόντια ταχύτητα ροής

Προκειμένου να δημιουργηθεί το διάγραμμα των ταχυτήτων, πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό εργαλείο, από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για να

οριοθετήσει την περιοχή μελέτης, στην περίπτωση των υδραυλικών υψών. Το εργαλείο αυτό φαίνεται στην εικόνα 6.42 και χρησιμοποιείται ειδικά για την απεικόνιση των ροών.

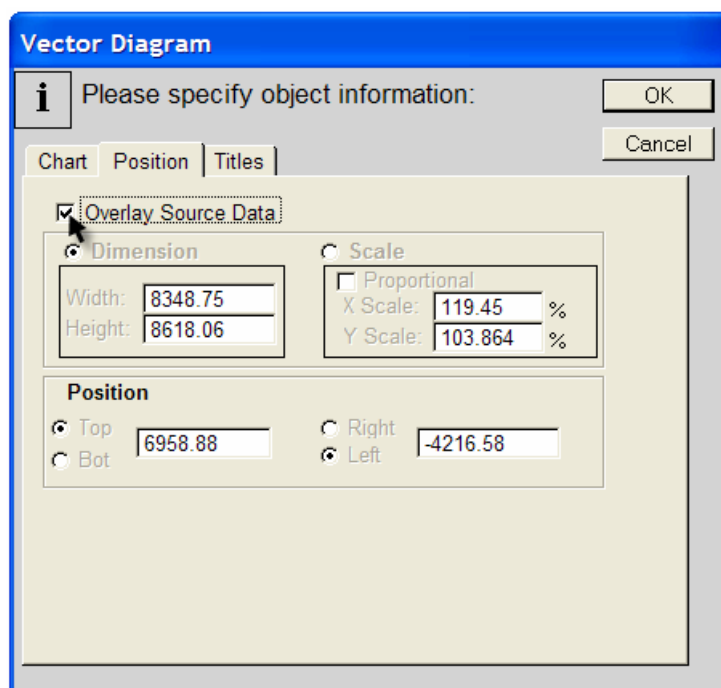


Εικόνα 6.41: Εισαγωγή δεδομένων ταχύτητας οριζόντιας ροής



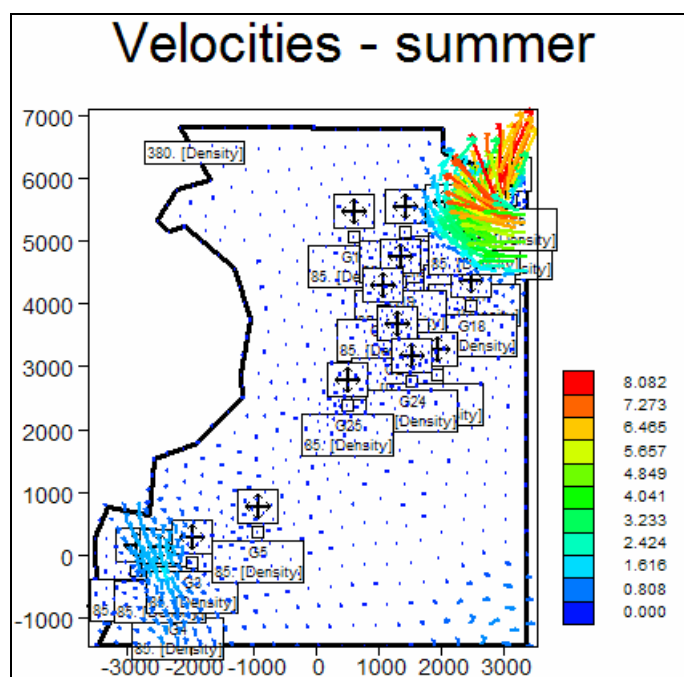
Εικόνα 6.42: Εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη γραφική αναπαράσταση της ταχύτητας

Αμέσως, μετά εμφανίζεται το παράθυρο “Vector Diagram” (Εικόνα 6.43), στο οποίο το μόνο που χρειάζεται να αλλάξει είναι ότι επιλέγεται η εντολή “Overlay Source Data” και φυσικά αν επιθυμεί, μπορεί ο χρήστης να δώσει ονομασία στο γράφημά του από την καρτέλα “Titles”.



Εικόνα 6.43: Επιλογές για το διάγραμμα της ταχύτητας

Τελικά δημιουργείται το διάγραμμα της ταχύτητας στην οριζόντια x και y-διεύθυνση (Εικόνα 6.44), εφόσον έχουν καταχωρηθεί τα απαραίτητα δεδομένα και για τις δύο διευθύνσεις όπως, περιγράφηκε παραπάνω.



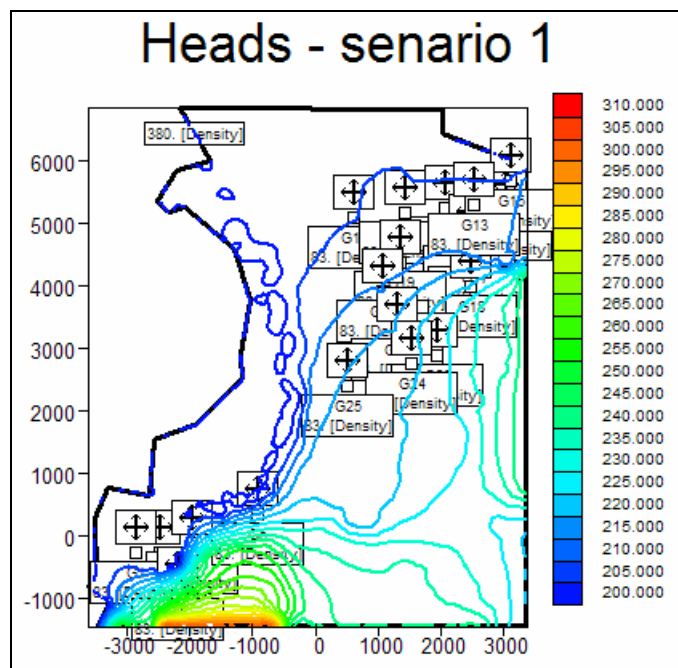
Εικόνα 6.44: Γράφημα οριζόντιας ροής υπόγειου νερού

Πρέπει, να σημειωθεί ότι, εν γένει, στο μοντέλο Argus ONE, δεν ορίζονται μονάδες για τα αριθμητικά μεγέθη. Συνεπώς, πρέπει, ο ίδιος ο χρήστης να αποφασίσει τις μονάδες που θα χρησιμοποιήσει από την αρχή ως το τέλος της εφαρμογής του. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει επιλεγεί ως μονάδα μέτρησης του μήκους, το μέτρο (m) και του χρόνου, η μέρα (day). Συνεπακόλουθα, οι έμμεσες μονάδες που προκύπτουν θα είναι σε αναλογία με τις παραπάνω (πχ. μονάδες παροχής: m^3/d).

6.3.2. Υποθετικά Σενάρια (Hypothetical scenarios)

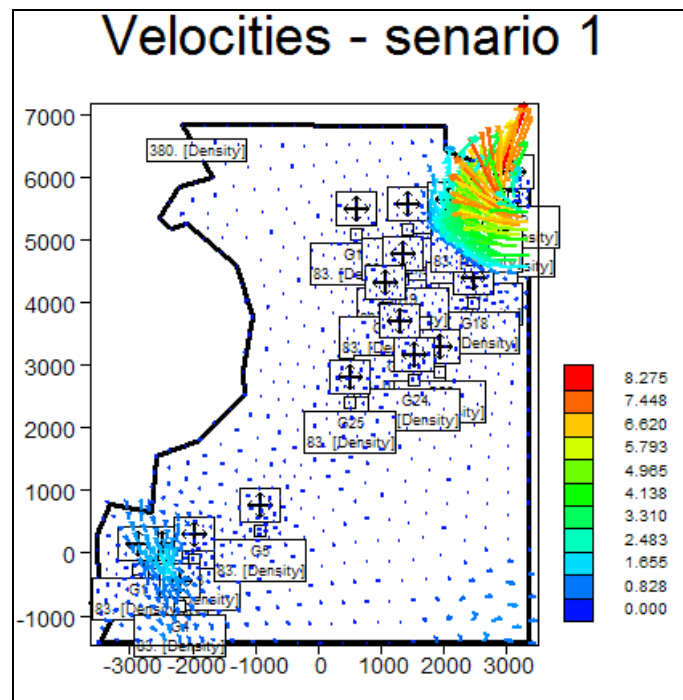
► **Σενάριο 1^ο: Μείωση της παροχής άντλησης του συνόλου των φρεατίων που υφίστανται στην περιοχή κατά 25%.**

Σε αυτό το σενάριο, θα εξεταστεί η επίδραση που θα έχει στην υφιστάμενη ζώνη υφαλμύρινσης, το ενδεχόμενο, να μειωθεί ο ρυθμός αντλήσεως των φρεατίων, σε ποσοστό 25%. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, φαίνονται από τα γραφήματα που ακολουθούν.



Εικόνα 6.45: Υδραυλικά ύψη σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 25%

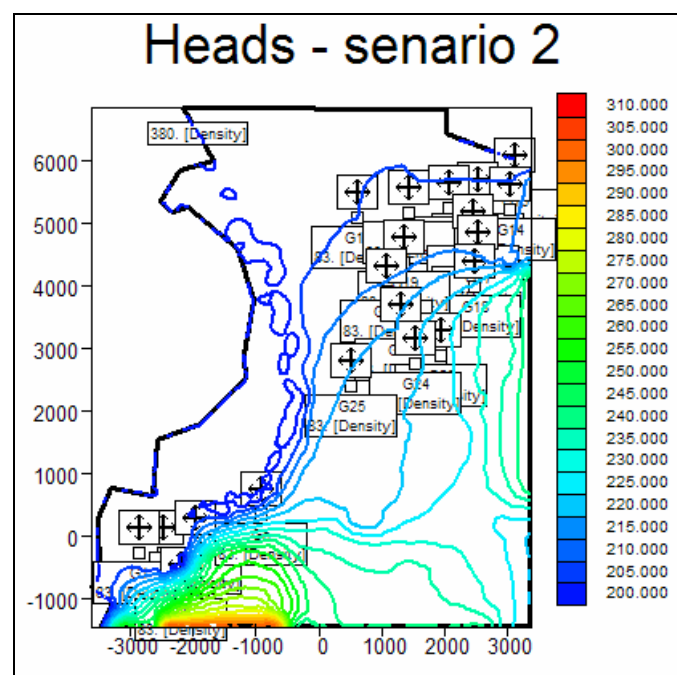
Όπως φαίνεται, από το γράφημα το μέτωπο της υφαλμύρινσης έχει υποχωρήσει, ανεπαίσθητα. Με λίγα λόγια, το συγκεκριμένο σενάριο δεν δίνει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, αλλά αντίθετα κρίνεται ανεπαρκές. Επιπλέον, δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμο. Είναι πάρα πολύ δύσκολο, αν όχι ανέφικτο, να επιτευχθεί συνολική ανταπόκριση, από τη μεριά των καλλιεργητών για περιορισμό του ρυθμού άντλησης από τον υπόγειο υδροφόρα, κατά 25%. Σύμφωνα με τα παραπάνω, δηλαδή, το σενάριο αυτό, εμφανίζει μεγάλο βαθμό δυσκολίας ως προς την εφαρμογή του και παράλληλα δεν επιφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, δεν είναι σε θέση να αποτελέσει πρόταση για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Τα μέτρα που θα ληφθούν στην περιοχή οφείλουν να είναι περισσότερο δραστηρικά. Να περιλαμβάνουν για παράδειγμα τεχνολογίες τεχνητού εμπλουτισμού.



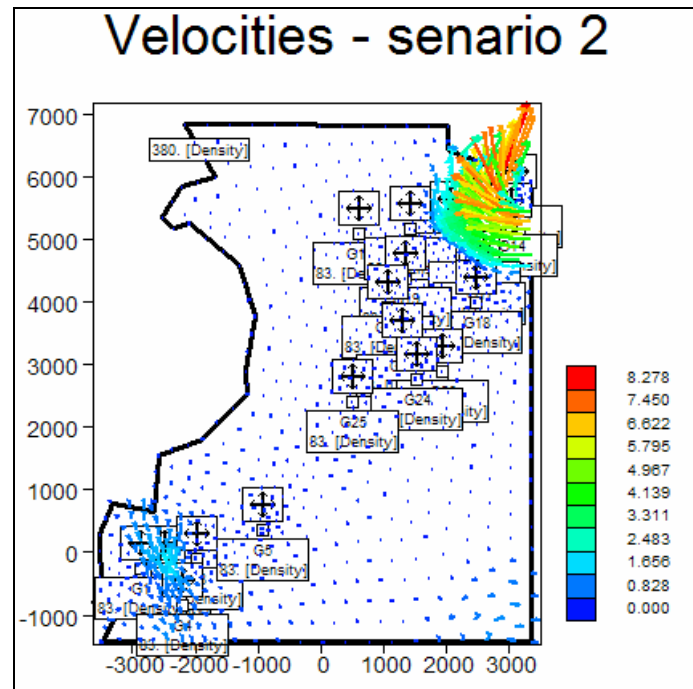
Εικόνα 6.46: Ταχύτητες ροής σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 25%

Η αναπαράσταση της ταχύτητας της ροής του υπόγειου υδροφορέα παρέχει μια πιο σφαιρική εικόνα για την κίνηση του υπόγειου νερού. Φαίνεται, λοιπόν, ότι μεγαλύτερη κινητικότητα σημειώνεται βορειανατολικά της περιοχής, γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη υδροπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών σε αυτά τα σημεία (νεογενείς και αλουβιακές αποθέσεις).

- **Σενάριο 2ο:** Μείωση της παροχής άντλησης του συνόλου των φρεατίων που υφίστανται στην περιοχή κατά 50%.



Εικόνα 6.47: Υδραυλικά ύψη σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 50%



Εικόνα 6.48: Ταχύτητες ροής σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 50%

Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου είναι ανάλογα με αυτά του προηγούμενου. Δηλαδή μη ικανοποιητικά. Το μέτωπο της υφαλμύρισης και στις δύο περιπτώσεις δε φαίνεται να αναχαιτίζεται. Η μετατόπιση του προς τη θάλασσα είναι πολύ μικρή και συνεπακόλουθα, ούτε αυτή η λύση μπορεί να αποτελέσει μέτρο αντιμετώπισης.

6.4. Συμπεράσματα (Conclusion)

Η περιοχή μελέτης όσο αφορά τον οικονομικό προσανατολισμό των κατοίκων της, είναι κατεξοχήν αγροτική, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλη ζήτηση σε νερό, για την άρδευση των υφιστάμενων καλλιεργειών, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Συγκεκριμένα, έχει σημειωθεί διάνοια σημαντικού αριθμού ιδιωτικών φρεατίων άντλησης, ο ρυθμός παροχής των οποίων, είναι πλέον αυξημένος τους θερμούς μήνες του έτους. Η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα σε συνδυασμό με τις επικρατούσες υδρογεωλογικές συνθήκες, είχε σαν άμεσο επακόλουθο την διείδυση του μετώπου της υφαλμύρισης στο εσωτερικό της περιοχής.

Τα συμπεράσματα, που προέκυψαν από την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης και τα οποία αφορούν την ευρύτερη περιοχή Φαλασάρνων ως προς το φαινόμενο της υφαλμύρισης συνοψίζονται ακολούθως.

- ✓ Η περιοχή παρουσιάζει έντονο πρόβλημα υφαλμύρισης, καθώς το μέτωπό της, έχει εισχωρήσει σε αρκετά μεγάλο βαθμό στο εσωτερικό της περιοχής, εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα και της γενικότερης κακής διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων.
- ✓ Το φαινόμενο δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο, καθώς η αντιμετώπισή του περιλαμβάνει αφενός την αναχαίτιση του μετώπου της

υφαλμύρινσης, η οποία αποτελεί σύνθετη και χρονοβόρα διαδικασία και αφετέρου την απομάκρυνση του προσροφημένου αλατιού στους κόκκους του εδάφους. Συνεπώς ενδείκνυται η πρόληψη του φαινομένου, σε σχέση με την αντιμετώπισή του.

- ✓ Στα πλαίσια της μη περεταίρω επιδείνωσης του προβλήματος, είναι επιτακτική ανάγκη, η ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα, ώστε να ελαχιστοποιηθούν, αν όχι να εξαλείφουν τα φαινόμενα υπεράντλησης.
- ✓ Για την προσομοίωση των επικρατούντων συνθηκών, αξιοποιήθηκαν πληροφορίες που αφορούν την υδρογεωλογία της ευρύτερης περιοχής, καθώς επίσης και στοιχεία στάθμης του ύδατος εντός των υφιστάμενων φρεατίων, που έχουν καταγραφεί από μετρήσεις πεδίου. Τα γεωλογικά στοιχεία που εισήχθησαν στο μοντέλο περιορίζονται στα επιφανειακά στρώματα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως φαίνεται από τις τομές των φρεατίων (βλ. Παράρτημα II) υπάρχουν εναλλαγές γεωλογικών σχηματισμών σε συνάρτηση με το βάθος. Λόγω έλλειψης δεδομένων δεν κατέστη δυνατόν να ληφθούν υπόψη, γεγονόσ που μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.
- ✓ Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υφαλμύρινσης, ώστε αυτό να μην επιδεινωθεί και στα πλαίσια της ορθολογικής διαχείρισης των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα, εφαρμόστηκε η μέθοδος του ελέγχου της αντλήσεως, κατά την οποία μειώνεται ο ρυθμός άντλησης των φρεατίων, με επιδιωκόμενο αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης του υδροφορέα, έτσι ώστε να περιοριστεί η κίνηση του γλυκού νερού προς το θαλασσινό και αντίστροφα.
- ✓ Μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού δεν χρησιμοποιήθηκαν, μιας και οι φυσικές συνθήκες τις καθιστούν ιδιαίτερα σύνθετες (ο σχεδιασμός τους απαιτεί διεξοδική μελέτη) και ταυτόχρονα οικονομικά δαπανηρές. Επιπρόσθετα, προϋποθέτουν συνεχή και επιμελή παρακολούθηση, εφόσον υπάρχει υψηλό ποσοστό κινδύνου μόλυνσης ή ρύπανσης του υπόγειου νερού, έστω και αν επεισοδιακά χρησιμοποιηθεί μολυσμένο ή ρυπασμένο νερό για τον εμπλουτισμό.
- ✓ Τα σενάρια που εξετάστηκαν παρουσιάζουν μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την υφιστάμενη κατάσταση, αλλά δεν συνιστούν επίλυση του προβλήματος. Η μείωση του ρυθμού άντλησης κατά 25% ή 50% δεν περιορίζει ικανοποιητικά το φαινόμενο, με αποτέλεσμα η θέση του μετώπου της υφαλμύρινσης να εξακολουθεί να βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή.
- ✓ Η αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου προϋποθέτει την εκπόνηση ενός γενικού και ολοκληρωμένου σχεδίου, το οποίο θα προβλέπει το σύνολο των περιοχών, που παρουσιάζουν φαινόμενα υφαλμύρινσης του νερού του υπόγειου υδροφορέα και μετά από την εξέταση όλων των πιθανών σεναρίων θα παρέχει τη βέλτιστη λύση για την ευρύτερη παράκτια ζώνη.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γεώργιος Π. Καρατζάς, Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002
- [2] Herman Bouwer, Groundwater hydrology, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, 1978
- [3] K. R. Rushton, Groundwater hydrology: conceptual and computational models, Wiley, 2003
- [4] Κουτάντου Παρασκευή, Καρστικοί υδροφορείς – αναχαίτιση φαινομένου υφαλμύρωσης στην περιοχή Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης προσομοιώνοντας τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2006
- [5] Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport, Academic Press, 1992
- [6] Κοσκινά Κωνσταντίνα, Υδρογεωλογική μελέτη και μοντελοποίηση του υπόγειου υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής κόλπου Κισσάμου Χανίων, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2004
- [7] Argus Holdings, Argus ONE User Guide version 4.0, 1994-1997
- [8] D. K. Babu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfed, S. A. Stothoff, Chemical Transport by three-dimensional groundwater flows, 1997
- [9] José-Luis Olivares, Argus ONE – PTC interface v.2.2, User's Guide
- [10] Stuart A. Stothoff, Princeton Transport Code Tutorial

Δημοσιεύσεις

- [11] Κ. Χαλβατζάκης, Ο υδροφόρος ορίζοντας υποβαθμίζεται επικίνδυνα, Εφημερίδα «Το Βήμα» Αρ. φύλλου 12455, 1997
- [12] Κ. Χαλβατζάκης, Κώδωνας του κινδύνου από τους επιστήμονες για την κατάσταση των υπόγειων υδάτων της χώρας, Εφημερίδα «Το Βήμα» Αρ. φύλλου 12771, 1999
- [13] Howard Perlman, Χρήστος Μαρκόπουλος, Δημήτρης Κουτσογιάννης, Ο υδρολογικός κύκλος, Γεωλογική υπηρεσία Η.Π.Α.
- [14] Jacob Bear, Modeling groundwater flow and contaminant transport, 2001
- [15] Philip B. Bedient, Civil and environmental engineering, Rice University

- [16] Α. Νάνου-Γιάνναρου, Υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001
- [17] Borja Serván Camas, Saltwater intrusion simulation in heterogeneous aquifer using lattice Boltzmann method, Master of Science, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2007
- [18] Atunao Marui, Groundwater conditions along the seawater/freshwater interface on a volcanic island and depositional area in Japan, Panstwowy Instytut Geologiczny, 2003
- [19] Phreatos Limited, Waiwhetu artesian aquifer saltwater intrusion risk management review, Wellington Regional Council Investigations Department Technical Report, 2001
- [20] Συμπράττοντα γραφεία μελετών Μιχάλη Λιόνη, Βασίλη Περγλέρου, Υδρογεωλογική μελέτη κάμπου Χανίων, Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Γενικών Διαρθρώσεων, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας – Υδρολογίας, Τμήμα: Υδρογεωλογίας – Γεωτρήσεων και Μαθηματικών Ομοιωμάτων, 2000
- [21] Βοζινάκης Κωνσταντίνος, Κουτσουγιάννη Σταυρούλα, Υδατικοί πόροι Νομού Χανίων και διαχείρισή τους, Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων και Υδατικών Πόρων Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Χανίων, 2004
- [22] Life “Cretaplant”, Διαχειριστικό σχέδιο για το μικρο-απόθεμα του φυτού *Anthemis glaberina*, στην άγρια Γραμβούσα, Κρήτη, 2005
- [23] Ηλίας Δημητρίου, Εύα Κολομπάρη, Καταγραφή ειδών ορνιθοπανίδας στις περιοχές των μεσογειακών εποχιακών λιμνίων της δυτικής Κρήτης, 2007
- [24] Ηλίας Δημητρίου, Εύα Κολομπάρη, Καταγραφή ειδών χλωρίδας στις περιοχές των μεσογειακών εποχιακών λιμνίων της δυτικής Κρήτης, 2007
- [25] Θεόδωρος Σ. Κουσουρής, Συμβολή στην παγκόσμια ημέρα για τους υγροτόπους, 2006

Ιστοσελίδες

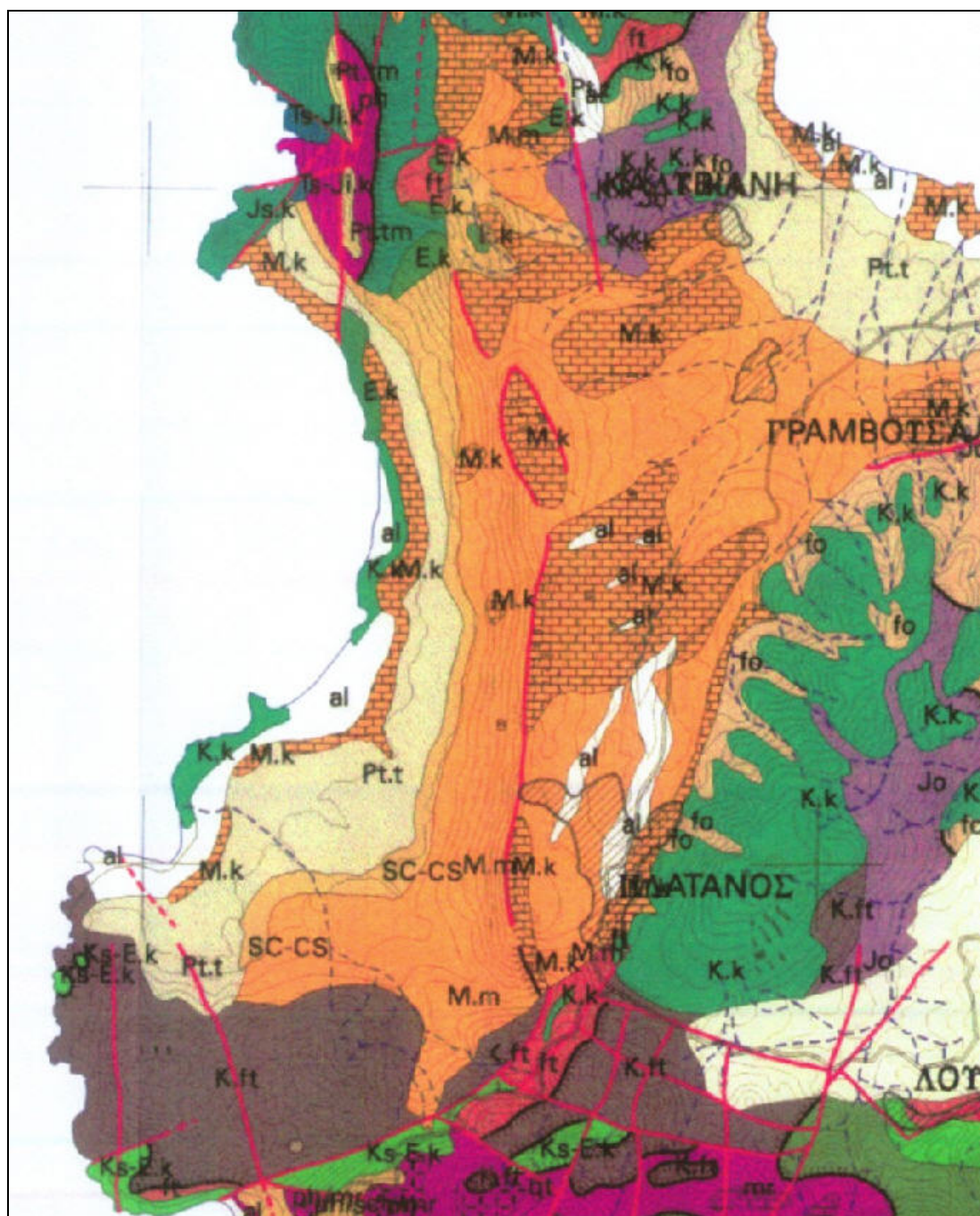
- [26] www.tol.bc.ca, Township of Langley
- [27] geosurvey.state.co.us, Colorado Geological Survey
- [28] <http://web.ead.anl.gov>, Argonne National Laboratory, Environmental Science Division
- [29] www.ncwater.org, North Carolina Department of Environment and Natural Resources, Division of Water Resources

-
- [30] www.waterencyclopedia.com, Water Encyclopedia, Science and Issues
- [31] water.usgs.gov, U.S. Geological Survey, Ground Water Division
- [32] www.geo.auth.gr, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας
- [33] www.sepa.org.uk, Scottish Environmental Protection Agency
- [34] www.awi.de, Alfred Wegner Institut
- [35] www.lenntech.com, Water Purification and Air Treatment
- [36] www.statistics.gr, Εθνική Στατιστική Υπηρεσία
- [37] www.club100.net, European Field Herpetology
- [38] www.biopix.eu, Digital Nature Photos
- [39] www.kairatos.com.gr, Εκδόσεις «Καιράτος»
- [40] www.chaniacrete.gr, Χανιά Κρήτης, Οδηγός

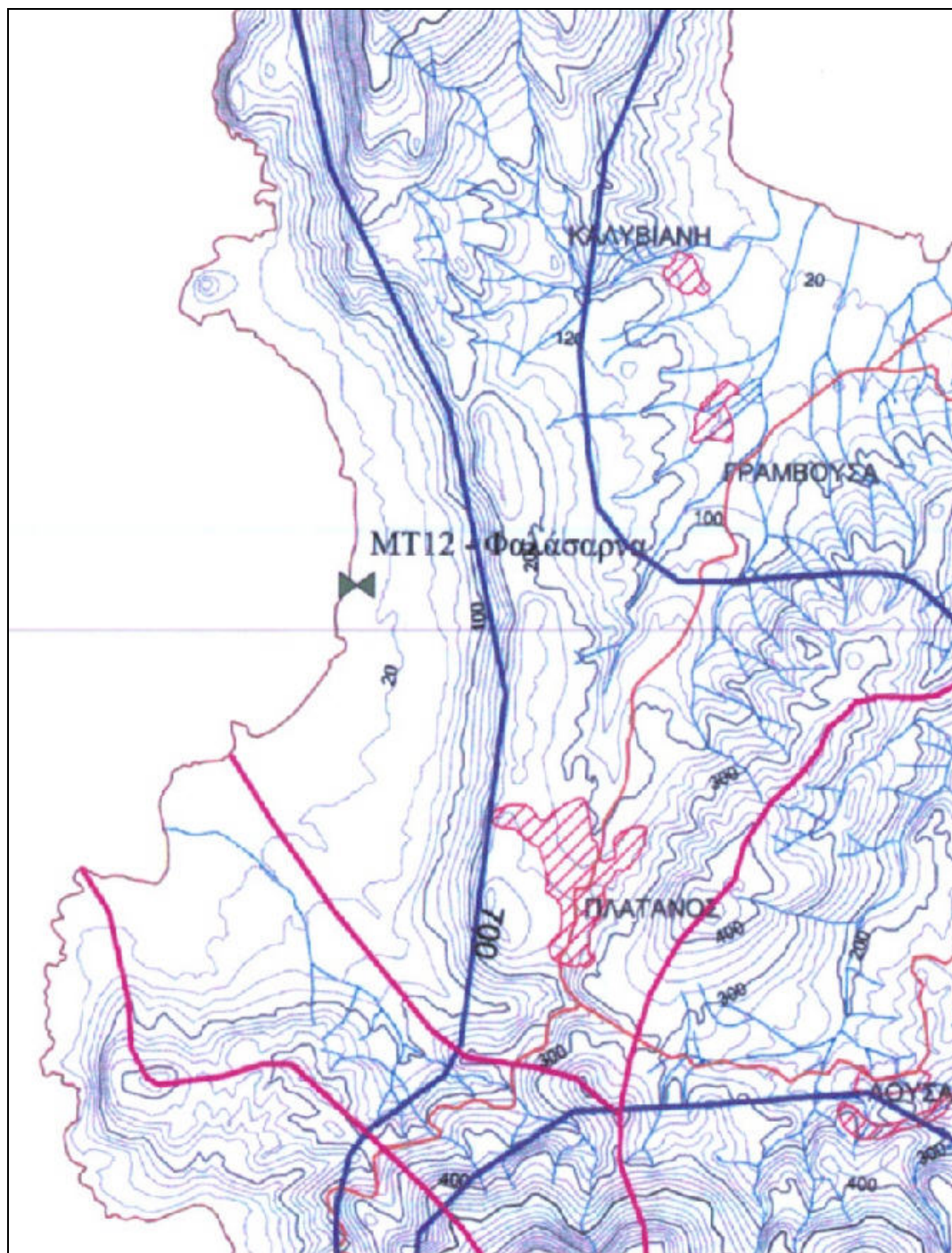
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Ι: Χάρτες

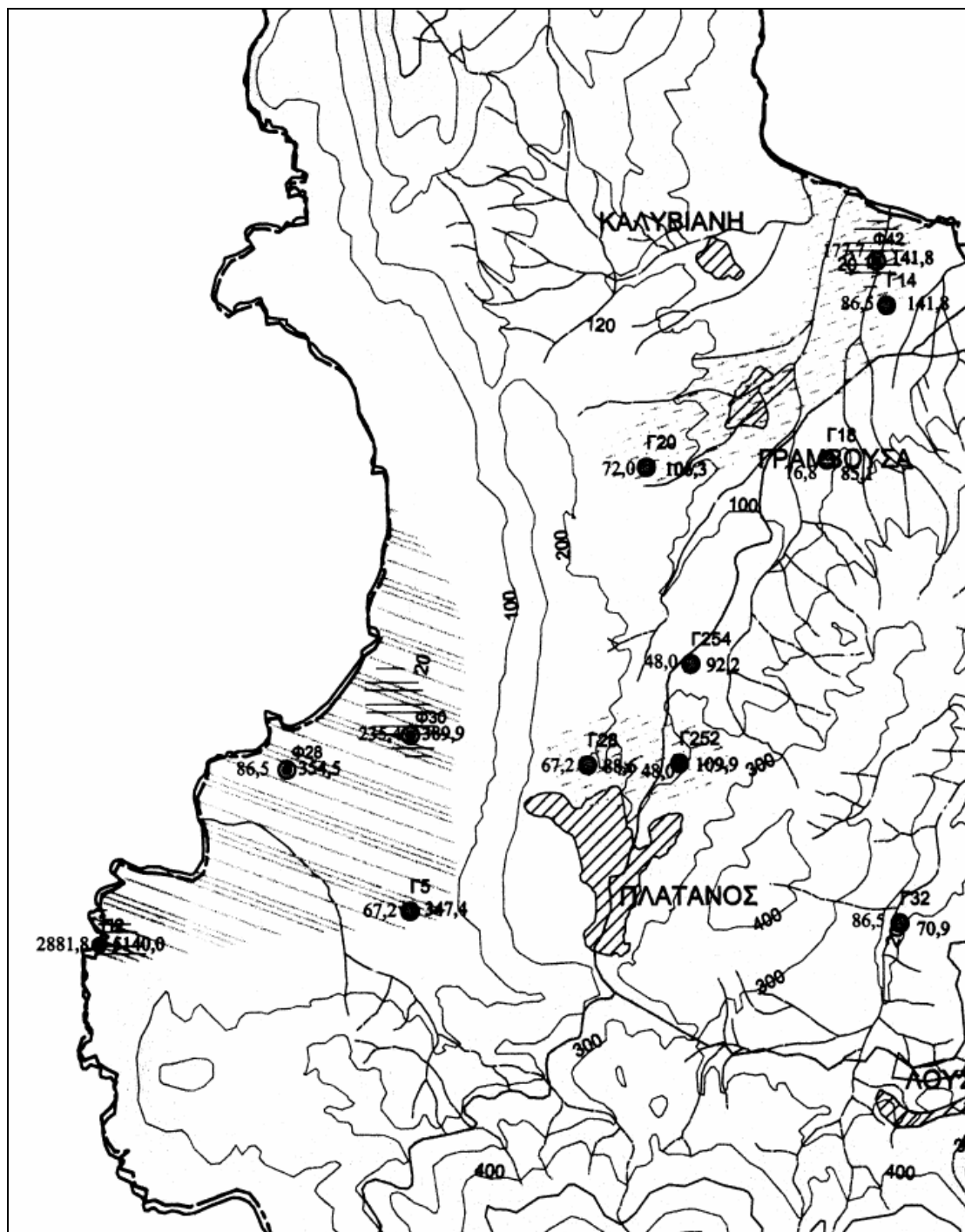
1. Γεωλογικός χάρτης (Κλίμακα 1:50.000)



2. Υδρολογικός Χάρτης (Κλίμακα 1:50.000)




3. Υδροχημικός χάρτης (Κλίμακα 1:50.000)




ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Χημική ανάλυση νερού περιόδου Οκτωβρίου '99


Γ213	Είδος σημείου δειγματοληψίας
●	Γεώτρηση
Φ158	Πηγάδι
Π54	Πηγή
(α) ● (β) ●	(α) περιεκτικότητα σε θειικά ιόντα (SO ₄)
24,0 42,5	(β) περιεκτικότητα σε χλωρίοντα (Cl)

 Ζώνη αυξημένης παρουσίας θειικών αλάτων (SO₄>150 ppm) λόγω παρουσίας γύψων ή και υφαλμύρισης. Στις ζώνες αυτές τοπικά συναντώνται και καλής ποιότητας νερά όταν οι γεωτρήσεις δεν συναντήσουν τους γύψους.


 Αυξημένη παρουσία θειικών (SO₄>150 ppm) σε καρστικό υδροφόρα πιθανόν εξαιτίας της επικοινωνίας του με στρώματα γύψων των φυλλιτών.


Ζώνη αυξημένης παρουσίας χλωριόντων κυρίως λόγω υφαλμύρισης :


 Ζώνη υφαλμύρισης με συγκέντρωση χλωριόντων 100-200 ppm

 Ζώνη υφαλμύρισης με συγκέντρωση χλωριόντων > 200 ppm

 Όριο Καποδιστριακών Δήμων

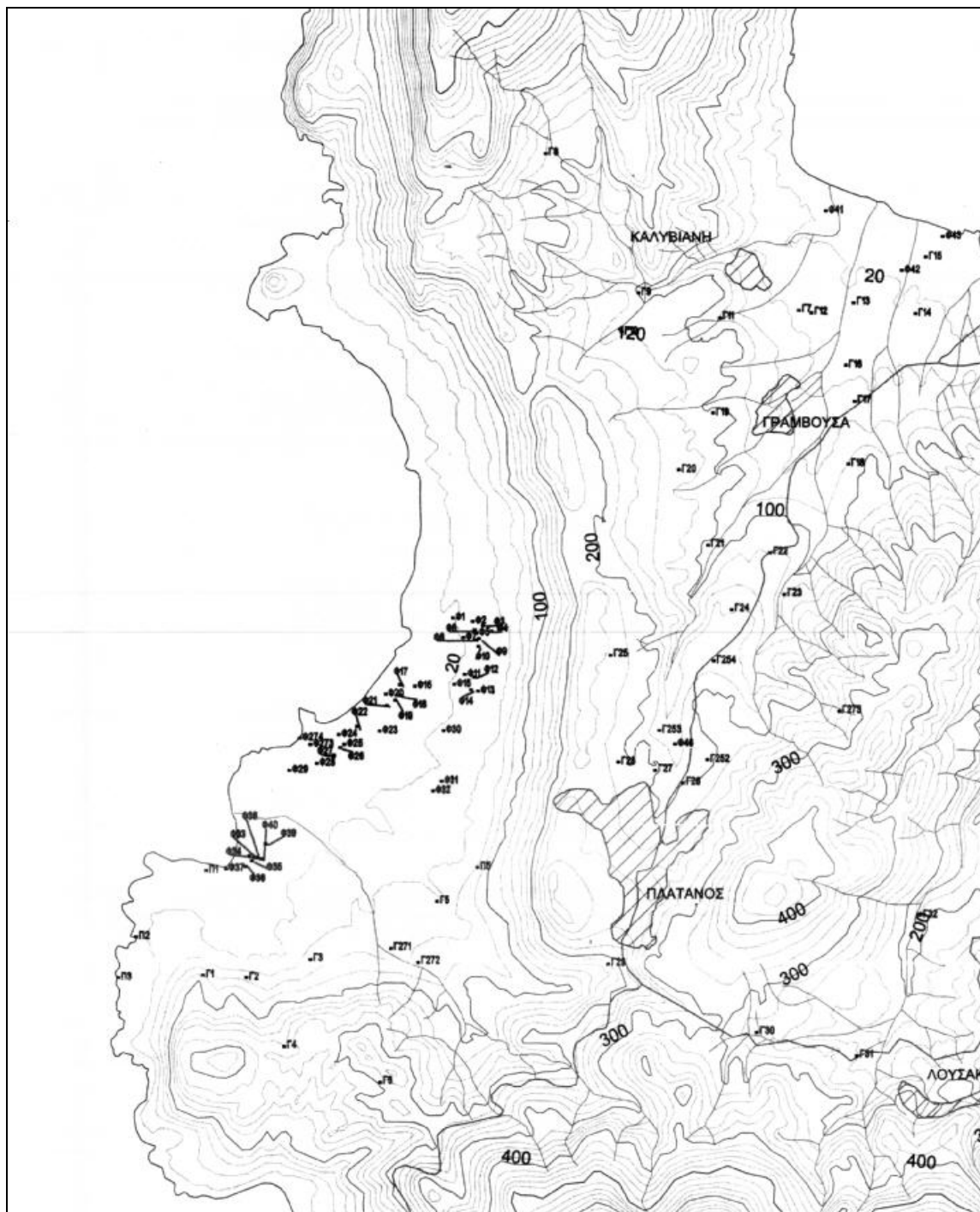
 Υδροκρίτης λεκανών απορροής - Όριο περιοχής μελέτης

 Όριο οικισμού

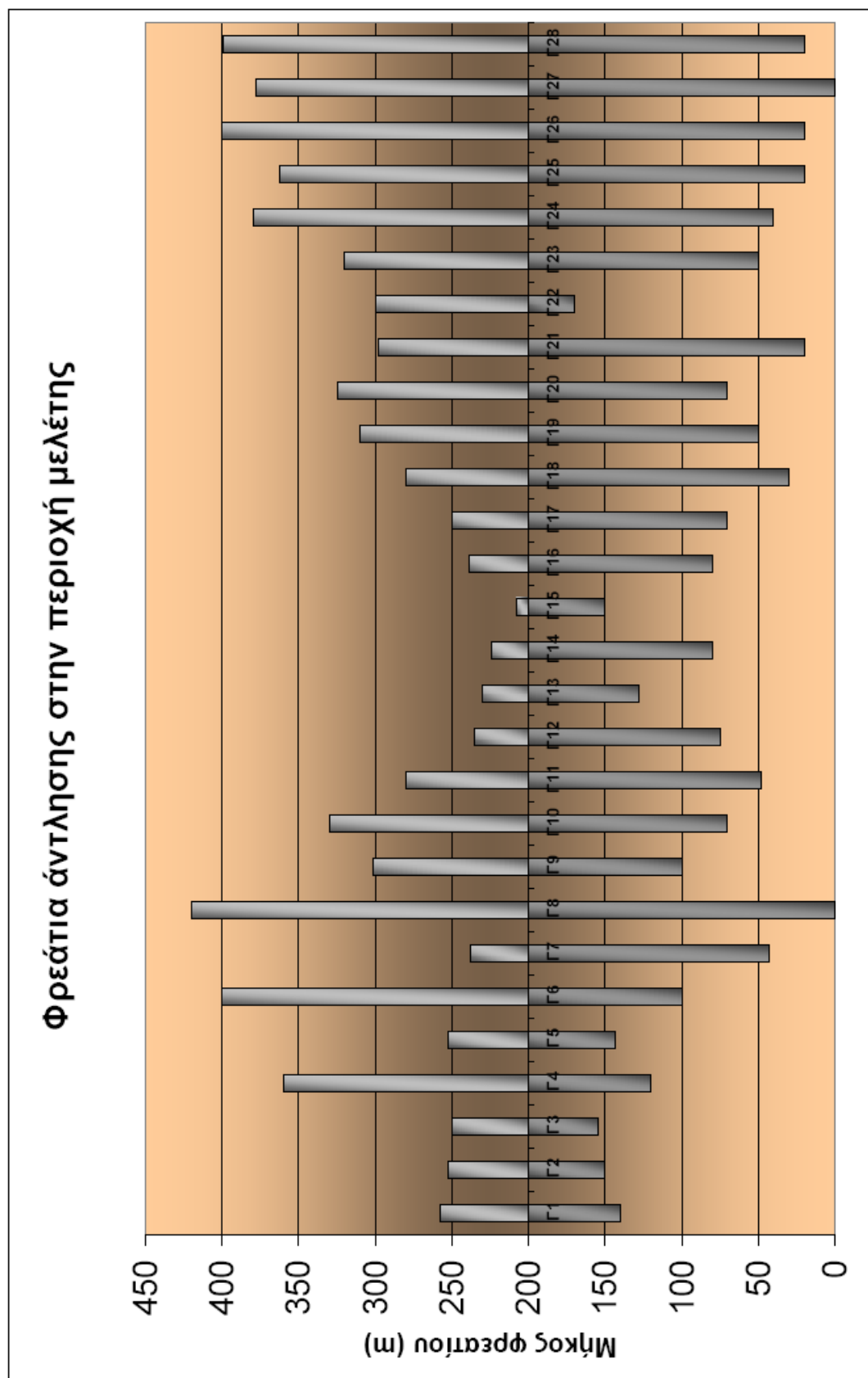
 Οδικό δίκτυο

Παρατήρηση: Στο χάρτη σημειώνονται κάποιες ζώνες υψηλών χλωριόντων και θειικών, χωρίς να υπάρχουν την αντίστοιχη περίοδο χημικές αναλύσεις. Η οριοθέτηση των ζωνών αυτών γίνεται με βάση τη γενικότερη ποιοτική κατάσταση των υδροφοριών με βάση προγενέστερες αναλύσεις.

4. Χάρτης απογραφής σημείων εμφάνισης ύδατος (Κλίμακα 1:50.000)



Παράρτημα II: Στοιχεία γεωτρήσεων



Χαρακτηριστικά βάθους – υψομέτρων της τοποθέτησης των φρεατίων στην περιοχή μελέτης

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΓΕΝ. Δ/ΝΣΗ Ε.Ε. & Γ.Δ.
Δ/ΝΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ,
ΓΕΩΤΡ. & ΜΑΘ. ΟΜ/ΤΩΝ

Α/Α: Γ2

ΑΡΙΘΜ. ΕΡΓΟΥ: ΚΑ 9481721

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ							
Δήμος:	Κισσάμου		Χάρτης:	Αρ. Σχ. 9.1 και 9.2/ 1:20000			
Δημοτικό Διαμέρισμα:	Πλάτανος - Φαλάσαρνα		Χ=	Ψ=			
Τοποθεσία:	Αγ. Φώτιος		Απολ.Υψομ. Repere (Z):	52,85			
Ονομ/μο Ιδιοκτήτη:	Κοινότητα		Χρονολογία κατασκευής:				
ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ							
ΣΩΛΗΝΩΣΗ	Βάθος:	50 μ.	ΑΝΤΛΙΑ	<input type="checkbox"/> ναι	(ναι - όχι)		
	Διάμετρ.:	8"		<input type="checkbox"/> 2	1. ΠΟΜΩΝΑ 2. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ 3. d=4"		
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟ	<input type="checkbox"/> ναι	(ναι - όχι)		<input type="checkbox"/> Α	Α. ΗΛΕΚΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Β. ΠΕΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Γ. ΑΛΛΗ		
Βάθος :	49 μ.		Βάθος τοποθέτησης:				
Δυνατότητα μέτρησης στάθμης:	<input type="checkbox"/> ναι						
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΗΣ				ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ			
Σε χρήση	<input type="checkbox"/> χ	Αρδευση	<input type="checkbox"/> χ	ΒΑΘΟΣ-ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ		
Ανεκμετάλλευτη	<input type="checkbox"/>	Υδρευση	<input type="checkbox"/>	μ			
Εγκαταλελειμμένη		Άλλη χρήση:		3,0 :	Ψαμμίτης		
Αντλούμενη παροχή:	50,00	m ³ /h					
Αρδευόμενη επιφάνεια:	στρέμματα						
Είδος καλλιέργειας:							
Εκτίμηση ετήσιας αντλ. ποσότητας νερού:	m ³						
Είδος υδροφορέα:							
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ							
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ		ΘΕΡΜ/ΣΙΑ - ΧΗΜΙΣΜΟΣ				
	ΒΑΘΟΣ μ	ΑΠ. ΥΨΟΜ. μ	ΑΕΡΑ °C	ΝΕΡΟΥ °C	CL ⁻ PPM	ΗΛ. ΑΓ μs	
14.05.1998	46,83	6,02					
21.10.1998	49,65	3,20					
23.04.1999	46,64	6,21					
18.10.1999	48,89*	3,96*					
20.04.2000	46,98	5,87					
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:				R 0,07 E		Χανιά 14/05/1998 Ο Απογραφέας Μ.Λιονής - Β. Περλέρος	

*Στάθμη άντλησης

ΑΡΙΘΜ. ΕΡΓΟΥ: ΚΑ 9481721

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΗΣ

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ

8,0		Ψαμμίτης (Αμμόλιθος)
		Ασβεστόλιθος

[illegible]

0,15	
------	--

Μ.Λιονής - Β. Περλέρος

125

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΓΕΝ. Δ/ΝΣΗ Ε.Ε. & Γ.Δ.
Δ/ΝΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ,
ΓΕΩΤΡ. & ΜΑΘ. ΟΜ/ΤΩΝ

Α/Α: Γ9

ΑΡΙΘΜ. ΕΡΓΟΥ: ΚΑ 9481721

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ						
Δήμος:	Κισσάμου	Χάρτης:	Αρ. Σχ. 9.1 και 9.2/ 1:20000			
Δημοτικό Διαμέρισμα:	Γραμβούσας	Χ=	Ψ=			
Τοποθεσία:	Αζωγύρας	Απολ.Υψομ. Repere (Z):	101,07			
Ονομ/μο Ιδιοκτήτη:	Κοινότητα	Χρονολογία κατασκευής:				
ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ						
ΣΩΛΗΝΩΣΗ	Βάθος: 100? μ.	ΑΝΤΛΙΑ	<input type="checkbox"/> Όχι	(ναι - όχι)		
	Διάμετρ.: 8"		<input type="checkbox"/>	1. ΠΟΜΩΝΑ 2. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ 3. ΑΛΛΗ		
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟ	<input type="checkbox"/> Όχι	(ναι - όχι)	<input type="checkbox"/>	Α. ΗΛΕΚΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Β. ΠΕΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Γ. ΑΛΛΗ		
Βάθος :	μ.			Βάθος τοποθέτησης:		
Δυνατότητα μέτρησης στάθμης:	<input type="checkbox"/> ναι	(ναι - όχι)				
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΗΣ				ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ		
Σε χρήση	<input type="checkbox"/>	Αρδευση	<input type="checkbox"/>	ΒΑΘΟΣ-ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
Ανεκμετάλλευτη	<input checked="" type="checkbox"/> x	Υδρευση	<input type="checkbox"/>	μ		
Εγκαταλελειμένη	<input type="checkbox"/>	Άλλη χρήση:			κερατόλιθοι	
Αντλούμενη παροχή:		m^3/h			ζώνης Πίνδου	
Αρδευόμενη επιφάνεια:		στρέμματα				
Είδος καλλιέργειας:						
Εκτίμηση ετήσιας αντλ. ποσότητας νερού:		m^3				
Είδος υδροφορέα:						
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ						
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
	ΒΑΘΟΣ μ	ΑΠ. ΥΨΟΜ μ	ΑΕΡΑ °C	ΝΕΡΟΥ °C	CL - PPM	ΗΛ. ΑΓ. μs
18.10.1999	51,56	49,64				
20.04.2000	50,78	50,42				
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:						
Κατά την απόγραφή βρισκόταν υπό κατασκευή						
Δυνατότητα μέτρησης στάθμης τον Οκτώβρη '99						
				0,13	R ↑ E	Χανιά 13/6/1998 Ο Απογραφέας Β.Περλέρος-Κ.Παυλόπουλος

*Στάθμη άντλησης

[illegible]

ΑΡΙΘΜ. ΕΡΓΟΥ: ΚΑ 9481721

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΓΕΝ. Δ/ΝΣΗ Ε.Ε. & Γ.Δ.
Δ/ΝΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ,
ΓΕΩΤΡ. & ΜΑΘ. ΟΜ/ΤΩΝ

Α/Α: Γ27

ΑΡΙΘΜ. ΕΡΓΟΥ: ΚΑ 9481721

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΟΓΡΑΦΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ						
Δήμος:	Κισσάμου		Χάρτης: Αρ. Σχ. 9.1 και 9.2 / 1:20000			
Δημοτικό Διαμέρισμα:	Γραμβούσας		X=	Ψ=		
Τοποθεσία:	Λαγουδιανά		Απολ. Ύψομ. Repere (Z):			
Ονομ/μο Ιδιοκτήτη:	Κοινοτική		Χρονολογία κατασκευής:			
ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ						
ΣΩΛΗΝΩΣΗ	Βάθος:	201 μ.	ΑΝΤΛΙΑ	<input type="checkbox"/> ναι	(ναι - όχι)	
	Διάμετρ.:	8"		<input type="checkbox"/> 2	1. ΠΟΜΩΝΑ 2. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ 3. ΑΛΛΗ	
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΟ	<input type="checkbox"/> ναι	(ναι - όχι)		<input type="checkbox"/> Α	Α. ΗΛΕΚΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Β. ΠΕΤΡ/ΚΙΝΗΤΗ Γ. ΑΛΛΗ	
Βάθος :	152 μ.		Βάθος τοποθέτησης:			
Δυνατότητα μέτρησης στάθμης:	<input type="checkbox"/> ναι		(ναι - όχι)			
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΡΗΣΗΣ				ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ		
Σε χρήση	<input checked="" type="checkbox"/> x	Άρδευση	<input checked="" type="checkbox"/> x	ΒΑΘΟΣ-ΣΚΑΡΙΦΗΜΑ	ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
Ανεκμετάλλευτη	<input type="checkbox"/>	Υδροευσή	<input type="checkbox"/>	μ		
Εγκαταλελειμμένη	<input type="checkbox"/>	Άλλη χρήση:		201,0	Εναλλαγές μαργών, μαργαϊκών ασβ/θων	
Αντλούμενη παροχή:		m^3/h				
Αρδευόμενη επιφάνεια:		στρέμματα				
Είδος καλλιέργειας:						
Εκτίμηση ετήσιας αντλ. ποσότητας νερού:		m^3				
Είδος υδροφορέα:						
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ						
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ			
	ΒΑΘΟΣ μ	ΑΠ. ΎΨΟΜ. μ	ΑΕΡΑ °C	ΝΕΡΟΥ °C	CL - PPM	ΗΛ. ΑΓ. μs
13/6/1998	10,72					
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:				R ↑ 0,17 ↓ E	Χανιά 13/6/1998 Ο Απογραφάς	
					Β.Περλέρος-Κ.Παυλόπουλος	

*Στάθμη άντλησης

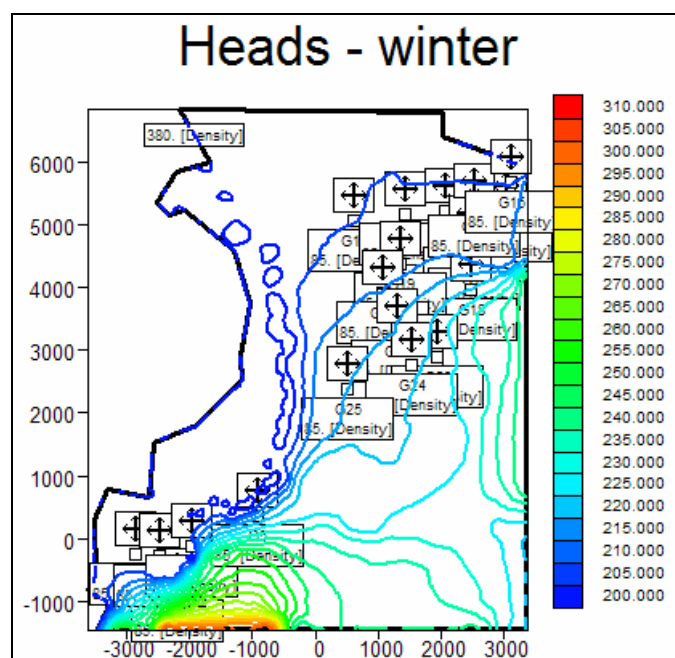
Παράρτημα III: Πίνακες

Πίνακας τιμών για την εφαρμογή της μεθόδου Theis

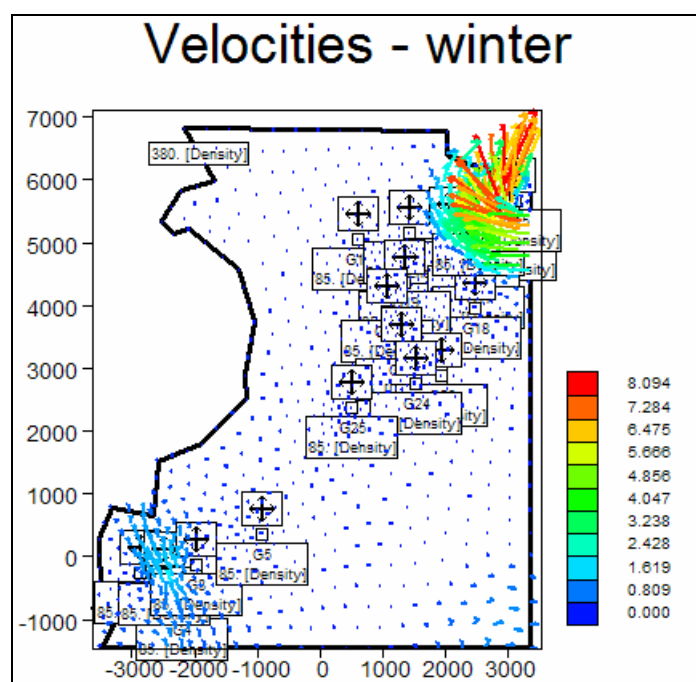
u	1/u	W(u)	u	1/u	W(u)
1,00E-10	1,00E+10	22,45	1,00E-05	1,00E+05	9,84
2,00E-10	5,00E+09	21,76	2,00E-05	5,00E+04	9,55
3,00E-10	3,33E+09	21,35	3,00E-05	3,33E+04	9,33
4,00E-10	2,50E+09	21,06	4,00E-05	2,50E+04	9,14
5,00E-10	2,00E+09	20,84	5,00E-05	2,00E+04	8,99
6,00E-10	1,67E+09	20,66	6,00E-05	1,67E+04	8,86
7,00E-10	1,43E+09	20,5	7,00E-05	1,43E+04	8,74
8,00E-10	1,25E+09	20,37	8,00E-05	1,25E+04	8,63
9,00E-10	1,11E+09	20,25	1,80E-04	5,56E+03	7,94
1,00E-09	1,00E+09	20,15	2,80E-04	3,57E+03	7,53
2,00E-09	5,00E+08	19,45	3,80E-04	2,63E+03	7,25
3,00E-09	3,33E+08	19,05	4,80E-04	2,08E+03	7,02
4,00E-09	2,50E+08	18,76	5,80E-04	1,72E+03	6,84
5,00E-09	2,00E+08	18,54	6,80E-04	1,47E+03	6,69
6,00E-09	1,67E+08	18,35	7,80E-04	1,28E+03	6,55
7,00E-09	1,43E+08	18,2	8,80E-04	1,14E+03	6,44
8,00E-09	1,25E+08	18,07	9,80E-04	1,02E+03	6,33
9,00E-09	1,11E+08	17,95	1,98E-03	5,05E+02	5,64
1,00E-08	1,00E+08	17,84	2,98E-03	3,36E+02	5,23
2,00E-08	5,00E+07	17,15	3,98E-03	2,51E+02	4,95
3,00E-08	3,33E+07	16,74	4,98E-03	2,01E+02	4,73
4,00E-08	2,50E+07	16,46	5,98E-03	1,67E+02	4,54
5,00E-08	2,00E+07	16,23	6,98E-03	1,43E+02	4,39
6,00E-08	1,67E+07	16,05	7,98E-03	1,25E+02	4,26
7,00E-08	1,43E+07	15,9	8,98E-03	1,11E+02	4,14
8,00E-08	1,25E+07	15,76	9,98E-03	1,00E+02	4,04
9,00E-08	1,11E+07	15,65	2,00E-02	5,01E+01	3,35
1,00E-07	1,00E+07	15,54	3,00E-02	3,34E+01	2,96
2,00E-07	5,00E+06	14,85	4,00E-02	2,50E+01	2,68
3,00E-07	3,33E+06	14,44	5,00E-02	2,00E+01	2,47
4,00E-07	2,50E+06	14,15	6,00E-02	1,67E+01	2,3
5,00E-07	2,00E+06	13,93	7,00E-02	1,43E+01	2,15
6,00E-07	1,67E+06	13,75	8,00E-02	1,25E+01	2,03
7,00E-07	1,43E+06	13,6	9,00E-02	1,11E+01	1,92
8,00E-07	1,25E+06	13,46	1,00E-01	1,00E+01	1,823
9,00E-07	1,11E+06	13,34	2,00E-01	5,00E+00	1,223
1,00E-06	1,00E+06	13,24	3,00E-01	3,33E+00	0,906
2,00E-06	5,00E+05	12,55	4,00E-01	2,50E+00	0,702
3,00E-06	3,33E+05	12,14	5,00E-01	2,00E+00	0,56
4,00E-06	2,50E+05	11,85	6,00E-01	1,67E+00	0,454
5,00E-06	2,00E+05	11,63	7,00E-01	1,43E+00	0,374
6,00E-06	1,67E+05	11,45	8,00E-01	1,25E+00	0,311
7,00E-06	1,43E+05	11,29	9,00E-01	1,11E+00	0,26
8,00E-06	1,25E+05	11,16	1,00E+00	1,00E+00	0,219
9,00E-06	1,11E+05	11,04	2,00E+00	5,00E-01	0,049
1,00E-05	1,00E+05	10,94	3,00E+00	3,33E-01	0,013
2,00E-05	5,00E+04	10,24	4,00E+00	2,50E-01	0,004
3,00E-05	3,33E+04	9,84	5,00E+00	2,00E-01	0,001

Πίνακας τιμών της συνάρτησης $W(u) = f(1/u)$

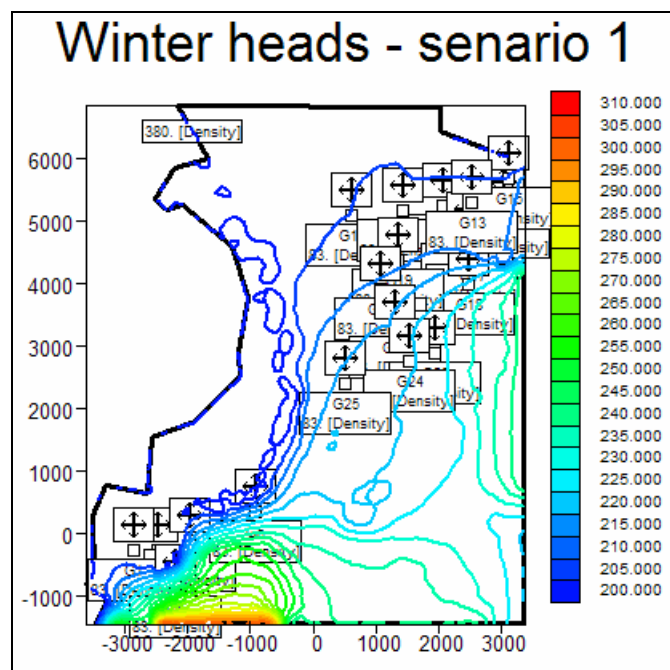
Παράρτημα IV: Αποτελέσματα χειμερινής περιόδου



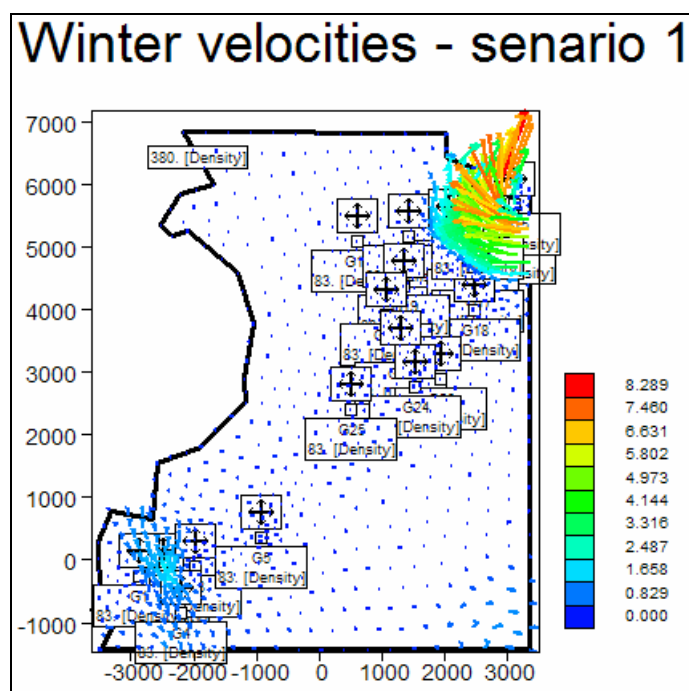
Εικόνα 6.49: Γραφική αναπαράσταση υδραυλικών υψών χειμερινής περιόδου



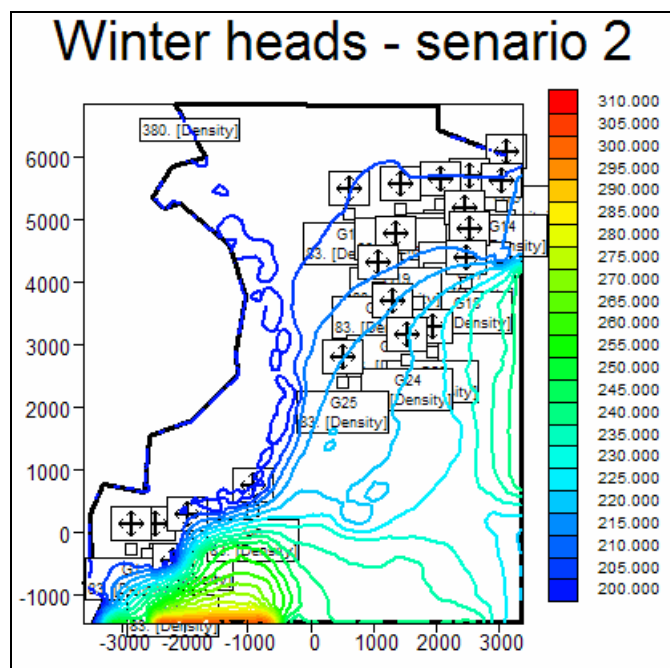
Εικόνα 6.50: Γραφική αναπαράσταση ταχυτήτων ροής χειμερινής περιόδου



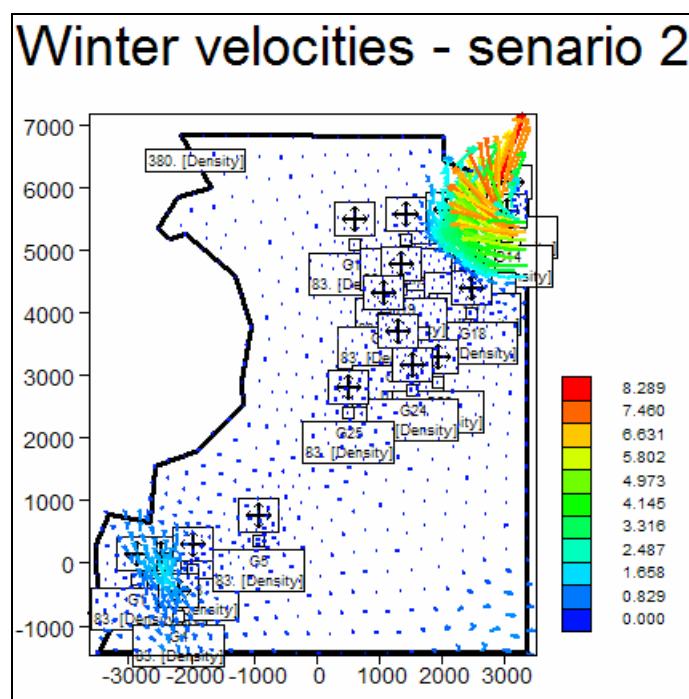
Εικόνα 6.47: Υδραυλικά ύψη σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 25%



Εικόνα 6.48: Ταχύτητες ροής σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 25%



Εικόνα 6.47: Υδραυλικά ύψη σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 50%



Εικόνα 6.48: Ταχύτητες ροής σε περίπτωση μείωσης συνολικής άντλησης κατά 50%