



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΜΑΖΑΣ ΣΤΟΥΣ ΠΛΑΚΩΔΕΙΣ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥΣ ΤΟΥ ΔΥΤΙΚΟΥ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΡΕΙΝΟΥ ΟΓΚΟΥ ΤΗΣ ΔΙΚΤΗΣ
ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΑΡΑΤΖΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: ΧΡΥΣΟΥΛΑ ΑΒΡΑΜΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ 2003

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών ειδίκευσης «Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλον» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, κατά τη χρονική περίοδο Μάιος 2002 – Μάιος 2003, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Γεωργίου Π. Καρατζά.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Γεώργιο Π. Καρατζά, για την ουσιαστική βοήθεια του, στην κατανόηση του επιστημονικού αντικειμένου της εργασίας και του υπολογιστικού πακέτου ARGUS ONE. Κυρίως όμως, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την αποδοχή επίβλεψης της διατριβής και για την ιδιαίτερα ανθρώπινη και φιλική συμπεριφορά του, καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Ευχαριστώ επίσης και το γεωλόγο της Τ.Υ.Δ.Κ. Ηρακλείου, κ. Ηρακλή Μ. Μπουλουκάκη, για την καθοδήγηση και την παραχώρηση πολύτιμων πληροφοριών και δεδομένων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου για τη αστείρευτη ηθική τους συμπαράσταση στην προσπάθεια μου αυτή, καθώς και τις φίλες μου Λένα Χατζηιορδάνου και Αλεξάνδρα Παπαγεωργίου, για τη καλή παρέα και τις αξέχαστες στιγμές που ζήσαμε μαζί στα θρανία του μεταπτυχιακού προγράμματος και στη πόλη των Χανίων.

Χρυσούλα Γρ. Αβραμάκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της υπόγεια ροής και της μεταφοράς μάζας στον υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής Καστελίου, Νιπιδιτού, Παναγιάς και Εμπάρου του Νομού Ηρακλείου. Στην περιοχή αυτή, ο υδροφορέας συνίσταται από πλακώδεις ασβεστόλιθους, οι οποίοι αποτελούν τους δυτικούς πρόποδες του ορεινού όγκου της Δίκτης. Αρχικά μοντελοποιήθηκε η υπόγεια ροή, έτσι ώστε να αναπαραχθεί το καθεστώς ροής για τα επόμενα δέκα χρόνια. Στη συνέχεια μελετήθηκε η μεταφορά διαλυμένων ουσιών, σε ολόκληρη την έκταση του υδροφορέα, με σκοπό την ανάλυση της επικινδυνότητας ρύπανσης.

Ο υπό μελέτη υδροφορέας, καταλαμβάνει έκταση είκοσι επτά στρεμμάτων (270.594 m^2). Πρόκειται για έναν ελεύθερο υδροφορέα, ο οποίος δομείται εξολοκλήρου από πλακώδεις ασβεστόλιθους της τεκτονικής ενότητας Κρήτης-Μάνης. Για τους σκοπούς της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετρήσεις πεδίου, σε συνδυασμό με γεωτρητικά δεδομένα.

Για την μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας, χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο P.T.C. (Princeton Transport Code). Πρόκειται για ένα χωροχρονικό μοντέλο, γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77, το οποίο βασίζεται σε αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Μέσω του παραθυρικού περιβάλλοντος του προγράμματος Argus One, τα δεδομένα εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο και τα εξαγόμενα αποτελέσματα λαμβάνονται με τη μορφή γραφημάτων.

Από τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής προέκυψαν συμπεράσματα για τα υδραυλικά ύψη και για το διάνυσμα της οριζόντιας ταχύτητας ροής σε όλη την έκταση του υδροφορέα. Η αξιοπιστία του μοντέλου κρίνεται αρκετά καλή, με βάση τις στατιστικές παραμέτρους που υπολογίσθηκαν. Από τη μελέτη της δυναμικής του υδροφορέα, προέκυψε ότι αναπτύσσεται αξιόλογη υδροφορία στη μάζα του. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά τη μοντελοποίηση της μεταφοράς μάζας, παρατηρείται πλήρης εξασθένηση της διαλυμένης ουσίας που εισέρχεται στον υδροφορέα, ανεξάρτητα από τις τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς (α_L , α_T), το μέγεθος και τη θέση ρύπανσης. Επίσης παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένης ουσίας σε μικρή απόσταση και περιμετρικά της εστίας ρύπανσης, παρόλο που στον εν λόγω υδροφορέα επικρατεί ο μηχανισμός συμμεταφοράς (advection) κατά τη μεταφορά μάζας έναντι του μηχανισμού διάχυσης (diffusion). Ο τοπικός χαρακτήρας διάδοσης της διαλυμένης ουσίας συνεπάγεται τη μικρή επικινδυνότητα ρύπανσης του υπό μελέτη υδροφορέα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη της υπόγειας ροής και της μεταφοράς μάζας, στον ενιαίο υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων του δυτικού τμήματος των Λασιθιώτικων ορέων (Όρη Δίκτη). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών Argus ONE και το τρισδιάστατο χωροχρονικό μοντέλο P.T.C. (Princeton Transport Code).

Η εργασία διαρθρώνεται από τις εξής ενότητες:

- ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η Αναφέρονται γενικά στοιχεία για τα μαθηματικά μοντέλα που αφορούν τα υπόγεια νερά. Παρουσιάζεται το μοντέλο P.T.C. και περιγράφονται οι εξισώσεις που εφαρμόζει καθώς και η μεθοδολογία επίλυσης αυτών.
- ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η Δίνονται πληροφορίες για τη γεωλογία, την τεκτονική, την υδρογεωλογία, το υδρολογικό ισοζύγιο και τις γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Επίσης παρουσιάζονται στοιχεία για την υδροχημική κατάσταση των υπόγειων νερών της περιοχής.
- ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η Περιγράφεται η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής, μέσω του προγράμματος Argus ONE και του μοντέλου P.T.C. Μελετάται η δυναμική του υπογείου υδροφορέα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.
- ΕΝΟΤΗΤΑ 4^η Περιγράφεται η μοντελοποίηση της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών μέσα στον υδροφορέα. Στη συνέχεια μελετάται η

επικινδυνότητα ρύπανσης του, υιοθετώντας διάφορες υποθέσεις ως προς το είδος των πηγών ρύπανσης και τις θέσεις αυτών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταφοράς ρύπων και αναλύεται η επικινδυνότητα.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η

Παρατίθενται συγκεντρωτικά, όλα τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τον υπό μελέτη υδροφορέα.

ΕΝΟΤΗΤΑ 1^η

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ - ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ P.T.C.

3.1 Μαθηματικά μοντέλα

Η επιστήμη της Γεωστατιστικής χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης διαφόρων παραμέτρων, σε περιοχές που δεν υπάρχουν δεδομένα. Η εκτίμηση στις περιοχές αυτές γίνεται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων.

Γενικά με τον όρο «Μοντέλο» θεωρούμε μια απλοποιημένη διατύπωση ενός πραγματικού συστήματος, η οποία προσεγγιστικά προσομοιώνει τη συμπεριφορά του τελευταίου σε διάφορες φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές και πιέσεις ή τάσεις. (Bear and Verruijt, 1987).

Σαν «Μαθηματικό μοντέλο» ορίζουμε μια σχέση ή συνάρτηση, η οποία εκφράζει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος ή διαδικασίας σε μαθηματική μορφή. Μπορεί να περιγραφεί με μια συναρτησιακή σχέση της μορφής:

$$\text{Εξαρτημένη μεταβλητή} = f(\text{ανεξάρτητες μεταβλητές, παράμετροι, συναρτήσεις ελέγχου})$$

Η εξαρτημένη μεταβλητή, περιγράφει την κατάσταση του συστήματος. Σαν ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται ο χρόνος και ο χώρος, σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Οι παράμετροι περιγράφουν τις ιδιότητες και τη κατάσταση του συστήματος και οι συναρτήσεις ελέγχου περιγράφουν τις εξωτερικές επιδράσεις και τις τάσεις.

Έχουν αναπτυχθεί τέσσερις βασικές κατηγορίες μοντέλων:

I. Αιτιοκρατικά μοντέλα (Deterministic models)

Τα αιτιοκρατικά μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή στις περιπτώσεις που είναι γνωστός ο τρόπος δημιουργίας του εκάστοτε φαινομένου καθώς επίσης και οι φυσικές και χημικές αρχές που το διέπουν. Τα αιτιοκρατικά μοντέλα δε χρησιμοποιούνται εύκολα στις περιπτώσεις εκτίμησης δεδομένων γης, γιατί ακόμα και αν είναι γνωστές όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες, υπεισέρχεται ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων, που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν.

II. Στοχαστικά μοντέλα (Probabilistic models)

Τα μοντέλα αυτά θεωρούν τις δειγματοληπτικές μετρήσεις σαν αποτέλεσμα κάποιας τυχαίας διαδικασίας, καταφέροντας έτσι να λαμβάνουν υπόψη τους την αβεβαιότητα κατά την εκτίμηση των τιμών. Τα αποτελέσματα εκφράζονται με συναρτήσεις κατανομών πιθανότητας. Οι εκτιμήσεις των στοχαστικών μοντέλων θεωρούνται αρκετά καλές, σε περιπτώσεις δεδομένων γης, γιατί μπορεί να προσδιορισθεί η ακρίβεια τους και να καθοριστούν διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης.

III. Αναλυτικά μοντέλα (Analytical models)

Στα μοντέλα αυτά, εφαρμόζονται αναλυτικές μέθοδοι για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν το υπό μελέτη φυσικό φαινόμενο. Οι εξισώσεις απλοποιούνται, ώστε να είναι δυνατή η επίλυση τους με αναλυτικές μεθόδους. Οι απλοποιήσεις που γίνονται, αφορούν την ομοιογένεια και τις διαστάσεις (X,Y,Z) της περιοχής μοντελοποίησης. Το πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως προβλήματα ροής ή μεταφοράς διαλυτών ουσιών, οι εκτιμήσεις τους εμπεριέχουν μικρό ποσοστό σφάλματος. Ενώ το μειονέκτημα τους είναι ότι παρέχουν αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο σε περιπτώσεις που το φυσικό σύστημα είναι ομοιογενές.

IV. Αριθμητικά μοντέλα (Numerical models)

Το κύριο χαρακτηριστικό των αριθμητικών μοντέλων είναι ότι βρίσκουν εφαρμογή σε ανομοιογενή φυσικά συστήματα. Στα αριθμητικά μοντέλα, οι αρχές που περιγράφουν το υπό μελέτη φαινόμενο, προσεγγίζονται με εξισώσεις μερικών παραγώγων. Μέσω των μερικών παραγώγων εκφράζεται η σχέση μεταξύ μεταβολών συγκεκριμένων ποσοτήτων σε σχέση με τις ποσότητες αυτές. Με βάση το

χαρακτηριστικό αυτό, συσχετίζεται μια φυσική κατάσταση με τη γειτονική της τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς το χώρο.

Το σύνολο των προσεγγιστικών εξισώσεων μπορεί να αντικατασταθεί από ένα πεπερασμένο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση τους γίνεται μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών και εφαρμόζονται αριθμητικές μέθοδοι σε συνδυασμό με μεθόδους επαναληπτικών διαδικασιών (iterative solution methods).

Οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements methods), των πεπερασμένων διαφορών (finite differences methods), των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών (integrate finite differences methods), των συνοριακών στοιχείων (boundary integral equation methods) και των αναλυτικών στοιχείων (analytic methods).

3.2 Κατηγορίες μαθηματικών μοντέλων για τα υπόγεια νερά.

Τα μαθηματικά μοντέλα που αφορούν τα υπόγεια νερά, περιγράφουν τη λειτουργία του φυσικού συστήματος (υπόγειος υδροφορέας) ως προς διάφορες μεταβλητές καταστάσεις (state variable). Με κριτήριο τη μεταβλητή κατάσταση διακρίνονται σε μοντέλα υπόγειας ροής, μεταφοράς διαλυτών ουσιών, μεταφοράς θερμότητας και τέλος παραμορφώσεων – καθιζήσεων.

I. Μοντέλα υπόγειας ροής (Groundwater flow models)

Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν μια μόνο εξαρτημένη μεταβλητή, η οποία συνήθως είναι το υδραυλικό ύψος. Σε μονοφασικές ροές χρησιμοποιείται μια

εξίσωση, ενώ σε πολυφασικές ροές, χρησιμοποιείται διαφορετική εξίσωση για κάθε φάση.

II. Μοντέλα μεταφοράς διαλυτών ουσιών (Mass transport models)

Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν τις εξής τρεις εξισώσεις: *εξίσωση ροής*, μέσω της οποίας υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη του φυσικού συστήματος, *εξίσωση Darcy*, για τον υπολογισμό των ταχυτήτων και *εξίσωση μεταφοράς μάζας*, για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων της διαλυμένης ουσίας.

III. Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας (Heat transport models)

Στα μοντέλα αυτά η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται με μια εξίσωση ροής θερμότητας, ανάλογη με την εξίσωση υπολογισμού των συγκεντρώσεων των διαλυμένων ουσιών. Επιπλέον χρησιμοποιείται μια εξίσωση για την υπόγεια ροή. Σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις, η ροή θερμότητας συνδέεται με τη ροή του υπογείου νερού. Στη περίπτωση αυτή, η εξίσωση υπόγειας ροής, αναφέρεται σε μεταβλητή πυκνότητα νερού.

IV. Μοντέλα παραμορφώσεων – καθιζήσεων (Deformation models)

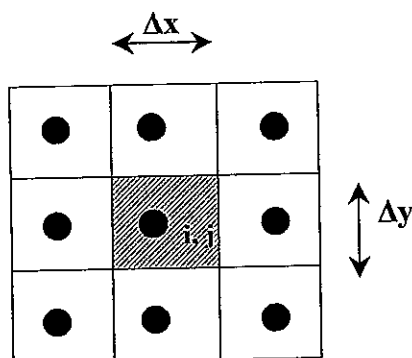
Τα μοντέλα αυτά αναφέρονται σε πορώδη μέσα και περιγράφουν την παραμόρφωση που συμβαίνει στον ιστό του πορώδους μέσου, εξαιτίας της ροής νερού μέσα σε αυτό. Για το σκοπό αυτό συνδυάζονται δεδομένα ροής του υπόγειου νερού μέσα στη μάζα του φυσικού συστήματος, με εξισώσεις, που συνδέουν τις ασκούμενες τάσεις με τις προκαλούμενες παραμορφώσεις.

3.3 Μαθηματικά μοντέλα υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπων

I. Το μοντέλο PLASM

Το μοντέλο Plasm (Prickett - Lonquist Aquifer Simulation Model) είναι από τα πρώτα αριθμητικά μοντέλα για την υπόγεια ροή. Εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1971 από τους Prickett και Lonquist. Ακολούθησαν διάφορες διορθώσεις και προσθήκες, μέχρι την τελευταία έκδοση το 1981.

Το μοντέλο Plasm εφαρμόζει τις αριθμητικές μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών (Finite difference) για τη δισδιάστατη μοντελοποίηση της ροής, τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη διάσταση. Τα διακριτά στοιχεία του καννάβου, στα οποία διαιρείται η υπό μελέτη περιοχή, έχουν σχήμα τετραγώνου ή ορθογωνίου παραλληλογράμμου. Οι κόμβοι, που αποτελούν τα σημεία εισόδου και εξόδου του μοντέλου, τοποθετούνται στο κέντρο του κάθε στοιχείου (Block-centered finite difference code), όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1. Τα δεδομένα εισόδου για το μοντέλο είναι ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας T , ο συντελεστής εναποθήκευσης S , οι διαστάσεις Δx και Δy των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι αρχικές και οριακές συνθήκες.



Σχήμα 1.1: Το πλέγμα του μοντέλου Plasm (Anderson and Woessner, 1992).

II. Το μοντέλο AQUIFEM

Το μοντέλο AQUIFEM – 1 παρουσιάστηκε από τους Townley και Wilson, το 1983, με σκοπό τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής σε ένα υδροφόρο στρώμα. Στη συνέχεια το μοντέλο αυτό βελτιώθηκε, ώστε να χρησιμοποιείται για περισσότερα Ν στρώματα, μετονομαζόμενο σε AQUIFEM – N (Townley, 1990).

Το AQUIFEM μοντελοποιεί την υπόγεια ροή σε δύο διαστάσεις, στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διάσταση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιεί τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων (Finite elements methods), επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ακρίβεια στη διακριτοποίηση της περιοχής μελέτης. Επίσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων μοντέλων σε περιπτώσεις ορίων εντός της περιοχής μοντελοποίησης π.χ. ρήγματα ή ανθρώπινα εμπόδια.

III. Το μοντέλο MODFLOW

Το μοντέλο MODFLOW, είναι το πιο διαδεδομένο αριθμητικό μοντέλο για την υπόγεια ροή και τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών σε πορώδη μέσα. Το μοντέλο αυτό παρουσιάστηκε από τους McDonald και Harbaugh, το 1988.

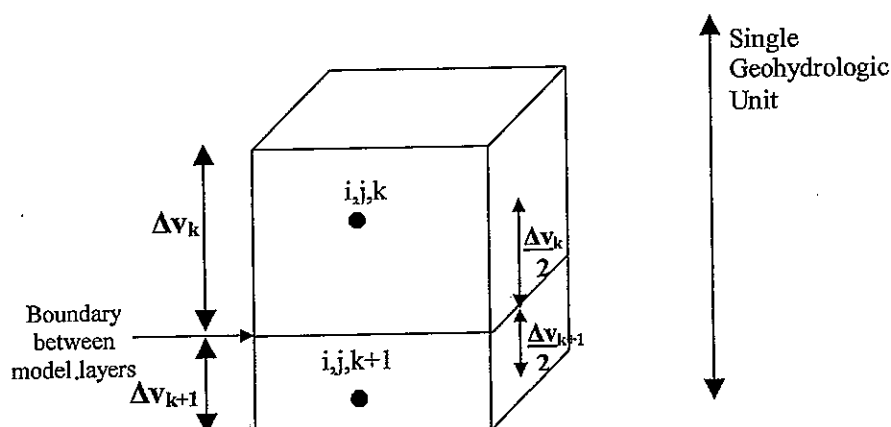
Το μοντέλο MODFLOW χρησιμοποιεί τις αριθμητικές μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών (Finite differences methods) τόσο στην οριζόντια (X,Y) όσο και στην κατακόρυφη διάσταση (Z), προκειμένου να προσομοιάσει τα υπό μελέτη μεγέθη. Για την κατασκευή του καννάβου καθορίζονται οι διαστάσεις ΔX , ΔY των διακριτών στοιχείων, οι οποίες είναι οι ίδιες για όλα τα Layers των γεωλογικών σχηματισμών, που υπάρχουν στον υπό μελέτη υδροφόρο. Οι κόμβοι, τοποθετούνται στο κέντρο του κάθε διακριτού στοιχείου (Block-centered finite difference code).

Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του κάθε σχηματισμού. Για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής το μοντέλο MODFLOW εφαρμόζει τις εξισώσεις του Dupuit, σε ελεύθερο και σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι το υδραυλικό ύψος και ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας T για κάθε διακριτό στοιχείο. Ο συντελεστής υπολογίζεται συναρτήσει της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πάχους της κορεσμένης ζώνης του υδροφορέα, όπως προκύπτει από τα εκτιμώμενα υδραυλικά ύψη.

Εκτός από το συντελεστή μεταβιβαστικότητας T , υπολογίζεται και η κατακόρυφη διαρροή μεταξύ των layers του υδροφορέα. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται $VCONT$ και υπολογίζεται σε κάθε κόμβο με συντεταγμένες (i, j, k) , όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 με βάση τη σχέση:

$$VCONT_{i,j,k+1/2} = \frac{2}{\frac{\Delta v_k}{(K_z)_{i,j,k}} + \frac{\Delta v_{k+1}}{(K_z)_{i,j,k+1}}}$$

όπου: $(K_z)_{i,j,k}$: ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας του layer z για τον κόμβο στη θέση (i, j, k) και Δv_k : το πάχος του διακριτού στοιχείου

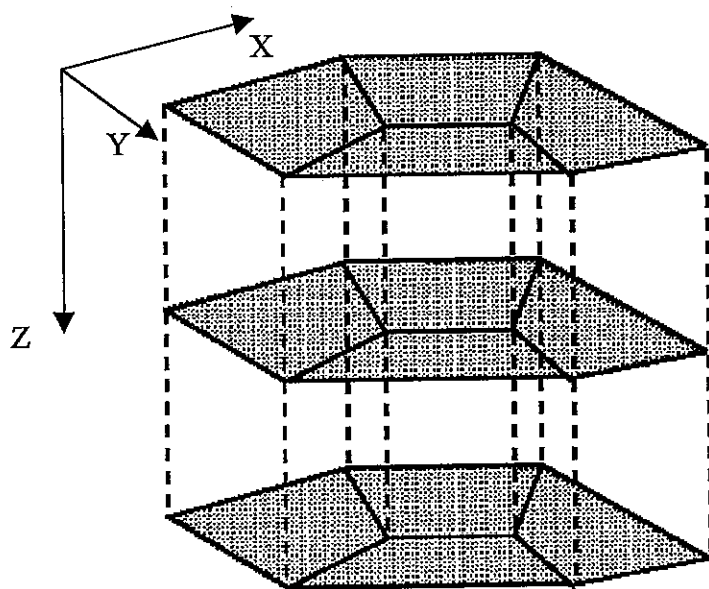


Σχήμα 1.2: Ο υπολογισμός της παραμέτρου $VCONT$ του μοντέλου MODFLOW (Anderson and Woessner, 1992).

3.4 Το μοντέλο P.T.C.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο P.T.C. (Princeton Transport Code) για την υπόγεια ροή και τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών. Το μοντέλο αυτό είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77 και παρουσιάστηκε από τους D. K. Babu και G.F. Pinder το έτος 1992.

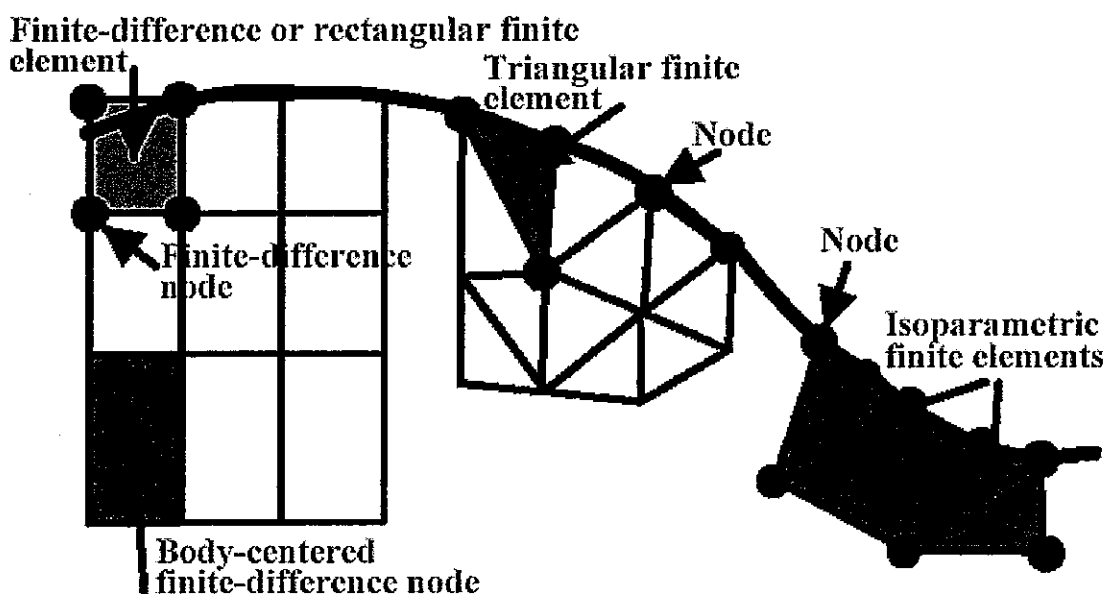
Το μοντέλο P.T.C. χρησιμοποιεί τις αριθμητικές μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, προκειμένου να μοντελοποιήσει σε τρεις διαστάσεις, τον υπό μελέτη υδροφορέα. Συγκεκριμένα στην οριζόντια διάσταση εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και στη κάθετη εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Τρισδιάστατη μοντελοποίηση του υδροφορέα (Pinder, 2001)

Κατά την οριζόντια διάσταση (X, Y) χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ενώ κατά την κατακόρυφη (Z) η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

Κατά την εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων, η υπό εξέταση περιοχή, χωρίζεται σε διακριτά στοιχεία, που όλα μαζί συνθέτουν το πλέγμα (Grid). Για το μοντέλο P.T.C., τα στοιχεία αυτά, μπορεί να έχουν είτε τετραγωνικό είτε τριγωνικό σχήμα. Οι κουκίδες του πλέγματος (σχήμα 1.4), ονομάζονται κόμβοι (nodes). Ανάλογα με τη θέση των κόμβων, διακρίνονται δύο κατηγορίες πλεγμάτων: στην πρώτη, ο κόμβος τοποθετείται στο γεωμετρικό κέντρο κάθε διακριτού στοιχείου. Το πλέγμα αυτό ονομάζεται κεντροειδές πλέγμα (body – centered model) και φαίνεται στο σχήμα 1.4 με κόκκινο χρώμα. Στη δεύτερη κατηγορία, οι κόμβοι τοποθετούνται σε κάθε κορυφή του διακριτού στοιχείου. Το πλέγμα ονομάζεται κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και απεικονίζεται με σκούρο γκρι στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Κατηγορίες δισδιάστατων πλεγμάτων. Διακρίνονται τριγωνικά (σκούρο γκρι) και τετραγωνικά πλέγματα (ανοικτό γκρι). Επίσης διακρίνονται κεντροειδή πλέγματα (κόκκινο χρώμα) πλέγματα πεπερασμένων διαφορών (ανοικτό γκρι) (Pinder, 2001).

Ανεξάρτητα από τη θέση τους, οι κόμβοι αποτελούν τα σημεία εισόδου για τα δεδομένα των εξισώσεων του μοντέλου και τα σημεία εξόδου των αποτελεσμάτων τους. Μέσω των εξισώσεων αυτών περιγράφεται η λειτουργία του υπογείου υδροφορέα ως προς διάφορες μεταβλητές καταστάσεις. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το μοντέλο P.T.C., είναι η εξίσωση ροής, η εξίσωση του Darcy και η εξίσωση μεταφοράς μάζας. Για κάθε κόμβο επιλύονται και οι τρεις εξισώσεις με καθορισμένη σειρά. Αρχικά, υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη σε κάθε κόμβο, σύμφωνα με την εξίσωση ροής και στη συνέχεια οι ταχύτητες κίνησης του νερού, με την εξίσωση του Darcy. Στο τέλος, οι υπολογιζόμενες ταχύτητες εισάγονται στην εξίσωση μεταφοράς μάζας για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων διαλυμένων ουσιών.

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών, εκτός από τις εξισώσεις ροής που εφαρμόζονται σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιούνται και οι οριακές συνθήκες (Boundary conditions) για τον καθορισμό των μεταβλητών αυτών στα σύνορα της περιοχής μοντελοποίησης. Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εκφράσεις που καθορίζουν την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής (υδραυλικό ύψος) ή της παραγώγου της εξαρτημένης μεταβλητής (ροή) στα όρια της περιοχής μελέτης. Η ευστοχία του μοντέλου ροής εξαρτάται από τον τύπο των οριακών συνθηκών και τις θέσεις ορισμού τους.

Ανάλογα με τη μαθηματική τους διατύπωση διακρίνονται οι ακόλουθοι τρεις τύποι υδρογεωλογικών οριακών συνθηκών:

1. **Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Dirichlet conditions):** θέσεις όπου το υδραυλικό ύψος έχει καθορισμένη τιμή.

2. *Όρια καθορισμένης ροής (Neumann conditions):* θέσεις όπου η πρώτη παράγωγος του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του συνόρου είναι σταθερή,

$$\text{δηλαδή } \frac{\partial h}{\partial x} = c.$$

3. *Συνοριακή συνθήκη ροής εξαρτώμενη από το υδραυλικό ύψος (Cauchy conditions):* θέσεις στις οποίες η ροή υπολογίζεται με δεδομένη τιμή συνοριακού υδραυλικού ύψους.

Η μεταφορά διαλυμένων ουσιών, γίνεται με τους μηχανισμούς της μοριακής διάχυσης, της συμμεταφοράς και της μηχανικής διασποράς. Στα κινούμενα υπόγεια νερά η μοριακή διάχυση ταυτίζεται με τη μηχανική διασπορά, για αυτό και η διάλυση μιας ουσίας περιγράφεται με το συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς D . Το μοντέλο P.T.C. χρησιμοποιεί το συντελεστή δυναμικής διασποράς, α (Dynamic dispersivity) κατά τους υπολογισμούς μεταφοράς μάζας. Συγκεκριμένα, κατά μήκος της κύριας κατεύθυνσης ροής, χρησιμοποιείται ο συντελεστής επιμήκους δυναμικής διασποράς, α_L και κάθετα στην κύρια κατεύθυνση ροής, ο συντελεστής εγκάρσιας δυναμικής διασποράς, α_T . Οι συντελεστές αυτοί συνδέονται με το συντελεστή υδροδυναμικής διασποράς D με τις σχέσεις:

$$D_L = \alpha_L v_i + D^*$$

και

$$D_T = \alpha_T v_i + D^*$$

όπου D^* η πραγματική σταθερά διάχυσης και v_i η ταχύτητα ροής σε κάθε κατεύθυνση.

Τέλος, η εκτέλεση του μοντέλου P.T.C. γίνεται μέσα σε περιβάλλον DOS. Τα αποτελέσματα, είναι δυνατόν να καταγραφούν είτε σε ένα Ascii αρχείο, με το όνομα `ptc.out` είτε σε ξεχωριστά αρχεία, υπό μορφή δεδομένων, με την προέκταση `*.dat`.

Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε ο δεύτερος τρόπος καταγραφής των αποτελεσμάτων, προκειμένου να συνεχιστεί περαιτέρω η επεξεργασία τους μέσα στο πρόγραμμα Argus ONE.

3.5 Οι εξισώσεις του μοντέλου P.T.C.

Αναλυτικά, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο P.T.C. είναι οι εξής:

Εξίσωση ροής Μέσω της εξίσωσης ροής υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος h , για κάθε κόμβο του πλέγματος.

$$\frac{\partial \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right)}{\partial z} - S \frac{\partial h}{\partial t} + \left[\sum_{i=1}^r q_i \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i) \right] + I = 0$$

όπου:

K_x, K_y, K_z : ο λόγος της υδραυλικής αγωγιμότητας (k_x, k_y, k_z) του πετρώματος σε κάθε διάσταση του χώρου (x, y, z), προς το πορώδες n του πετρώματος (L/T)

h : το υδραυλικό ύψος του κόμβου (L)

S : ο ειδικός συντελεστής εναποθήκευσης του πετρώματος του υδροφορέα. ($1/L$)

t : η παράμετρος του χρόνου (T)

q_i : ο ρυθμός άντλησης ή εμπλουτισμού των πηγαδιών και των γεωτρήσεων που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Ο ρυθμός άντλησης εισάγεται με αρνητικές τιμές ενώ ο ρυθμός εμπλουτισμού με θετικές τιμές. (L/T)

r : ο αριθμός των πηγαδιών και των γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης

$\delta(\cdot)$: η συνάρτηση δέλτα του Dirac για το κόμβο με συντεταγμένες (x_i, y_i, z_i)

I : το ποσό της καθαρής διήθησης, στον υπό μελέτη υδροφορέα (L/T)

Εξίσωση Darcy Μέσω της εξίσωσης του Darcy, υπολογίζονται οι μέσες ταχύτητες σε καθεμία από τις τρεις διαστάσεις του χώρου.

$$U_x = -K_x \frac{\theta h}{\theta x}, \quad U_y = -K_y \frac{\theta h}{\theta y}, \quad U_z = -K_z \frac{\theta h}{\theta z}$$

Εξίσωση μεταφοράς μάζας Με την εξίσωση αυτή εκτιμάται η συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών, που βρίσκονται μέσα στη μάζα του ρυπαντή. Ισχύει για ουσίες που δεν αποσυντίθενται βιολογικά ή ραδιενεργά, δεν αντιδρούν με το πορώδες μέσο και δεν προσροφώνται από αυτό.

$$\left[\frac{\partial \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right)}{\partial z} \right] - \left[\frac{\partial (V_x \cdot C)}{\partial x} + \frac{\partial (V_y \cdot C)}{\partial y} + \frac{\partial (V_z \cdot C)}{\partial z} \right] + Q(C^\infty - C) - \theta [1 + E(C)] \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = 0$$

όπου:

D : οι όροι της διασποράς (L^2/T) που ορίζονται ως εξής

$$D_{xx} = D_M + (\alpha_L V_x^2 + \alpha_T V_y^2 + \alpha_v V_z^2) / V$$

$$D_{yy} = D_M + (\alpha_T V_x^2 + \alpha_L V_y^2 + \alpha_v V_z^2) / V$$

$$D_{zz} = D_M + (\alpha_v V_x^2 + \alpha_v V_y^2 + \alpha_L V_z^2) / V$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) V_x V_y / V$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_v) V_y V_z / V$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_v) V_x V_z / V$$

D_M : ο μοριακός συντελεστής διάχυσης (L^2 / T)

α_L : η διαμήκης διασπορά (L)

α_T : η κατά πλάτος διασπορά (L)

α_V : η κατακόρυφη διασπορά (L)

V : το διάνυσμα της ταχύτητας στις κατευθύνσεις x,y,z (L/T)

C : η συγκέντρωση στο σημείο (x,y,z) τη χρονική στιγμή t (M/L^3)

θ : το πορώδες του πετρώματος

$E(C)$: χαρακτηριστικός όρος της χημικής προσρόφησης

Q : ο ρυθμός άντλησης (L^3 / T)

C^w, C : η συγκέντρωση στο νερό άντλησης ή εμπλουτισμού. Στην περίπτωση άντλησης $C^w = C$, οπότε ο όρος αυτός εξαφανίζεται.

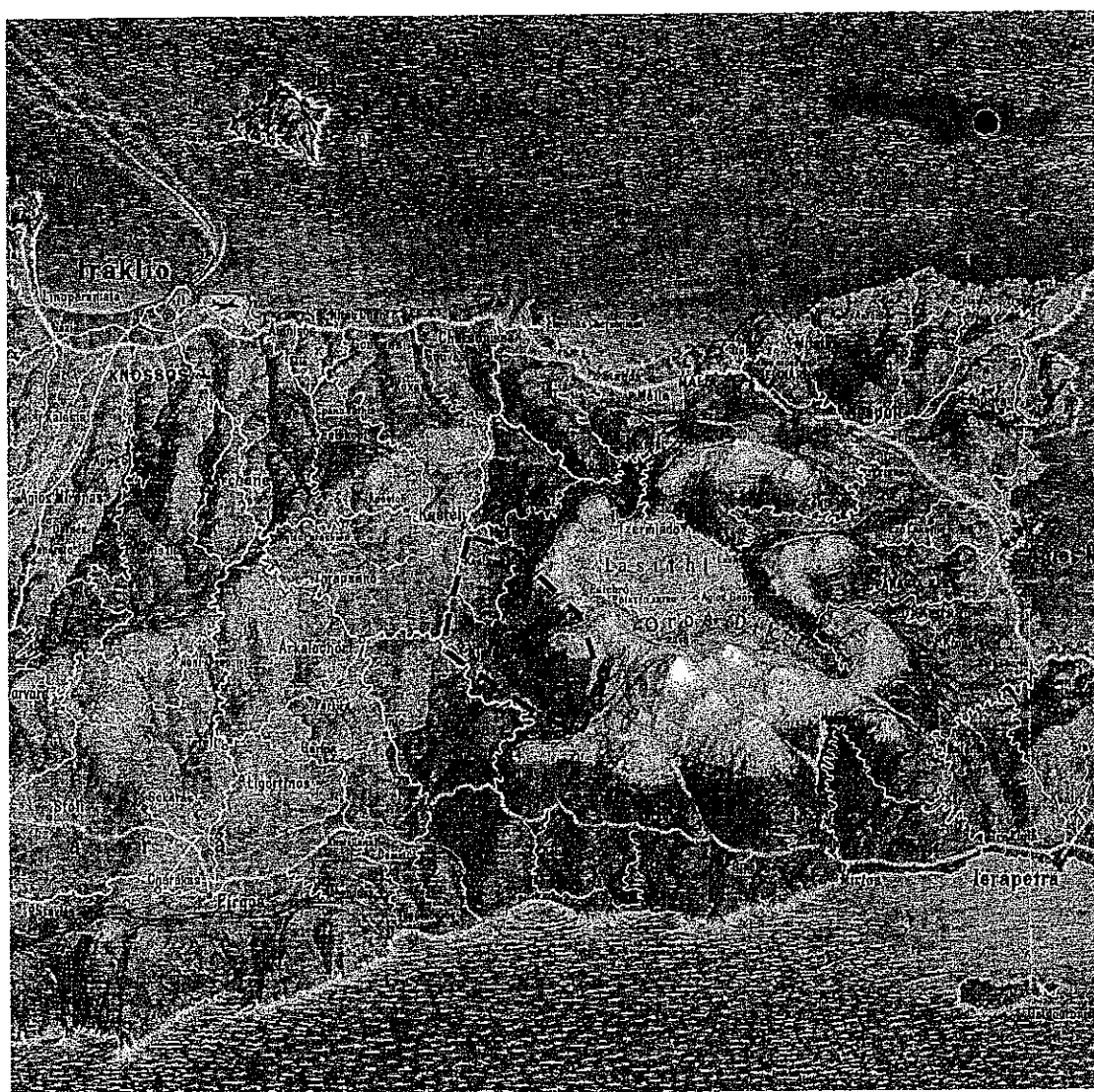
ΕΝΟΤΗΤΑ 2^η

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ.

2.1 Γενικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή μελέτης

Ο υπό μελέτη υδροφορέας καταλαμβάνει έκταση είκοσι επτά στρεμμάτων (270.594 m^2) και είναι εντός των διοικητικών ορίων τριών δημοτικών διαμερισμάτων του Νομού Ηρακλείου. Συγκεκριμένα βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή των χωριών Καστέλι, Μαθιά, Αρμάχα, Αγία Παρασκευή, Γεράκι του Δήμου Καστελίου, των χωριών Ντιδιτός και Παναγιά, του Δήμου Αρκαλοχωρίου και των χωριών Έμπαρος και Ξενιάκο του Δήμου Βιάννου. Τα περισσότερα από αυτά τα χωριά, υδρεύονται και αρδεύονται από γεωτρήσεις που έχουν ανορυχθεί στον υπό μελέτη υδροφορέα.

Γεωγραφικά, η περιοχή μελέτης βρίσκεται στους δυτικούς πρόποδες των ορέων Δίκτη (Λασιθιώτικα όρη), στην κορυφή των οποίων είναι το οροπέδιο Λασιθίου (σχήμα 2.1). Το μεγαλύτερο μέρος των όμβριων υδάτων που συλλέγεται στο οροπέδιο, εμπλουτίζει τους υπογείους υδροφορείς των ορέων κατάντη, ένας από τους οποίους είναι και ο υπό μελέτη υδροφορέας. Δυτικά της περιοχής, βρίσκεται η πεδιάδα του Καστελίου – Θραψανού – Αρκαλοχωρίου.



Σχήμα 2.1: Τρισδιάστατος μορφολογικός χάρτης με την ευρύτερη περιοχή μελέτης

Μορφολογικά, η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από πολύ έντονο ανάγλυφο με μεγάλες και απότομες κλίσεις. Εκτείνεται από την ισοϋψή των 400 m έως την ισοϋψή των 1100 m. Το ιδιαίτερο ανάγλυφο που παρατηρείται, οφείλεται στις ισχυρές δυνάμεις συμπίεσης και εφελκυσμού, που έλαβαν χώρα στην ευρύτερη περιοχή. Αποτέλεσμα αυτών, είναι και το μεγάλο κανονικό ρήγμα, το οποίο εκτείνεται κατά μήκος της περιοχής μελέτης.

2.2 Γεωλογικά στοιχεία

Χαρακτηριστικό γνώρισμα στη γεωλογική δομή της Κρήτης και της ευρύτερης περιοχής μελέτης, είναι η λεπιοειδής ανάπτυξη αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων (ενοτήτων). Κάθε ένα απ' αυτά συγκροτείται από διαφορετικούς λιθολογικούς σχηματισμούς με διαφορετική μεταμορφική και παραμορφωτική ιστορία.

Η λεπιοειδής αυτή διάταξη είναι αποτέλεσμα τεκτονικών διεργασιών (ισχυρών συμπίεσεων και εφελκυσμών) που κορυφώθηκαν κατά τη γεωλογική περίοδο του Τριτογενούς και σχετίζονται με τη βύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Με βάση τις υφιστάμενες μελέτες στην Κρήτη εντοπίζονται οι εξής τεκτονικές ενότητες: Ενότητα Κρήτης – Μάνης, Ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών, Ενότητα Τριπόλεως, Ενότητα Ωλονού – Πίνδου, Ενότητα Οφιολίθων.

Σύμφωνα με τη διατριβή του Φυτρολάκη 1980, «η κατώτερη τεκτονική ενότητα είναι η ενότητα Κρήτης – Μάνης, που αποτελείται από πλακώδεις ασβεστόλιθους. Πάνω σε αυτή αναπτύσσεται η ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών, η οποία συνίσταται

από μεταμορφωμένους πηλίτες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ανθρακικά πετρώματα και γύψους. Ακολουθεί η τεκτονική ενότητα της Τρίπολης που χαρακτηρίζεται από μια μεγάλου πάχους νηριτική ανθρακική ακολουθία, Ανωτριαδικής – Ανωηκαινικής ηλικίας. Καλύπτεται από φλύσχη, Ανωηκαινικής ηλικίας, που αποτελείται από εναλλαγές αργιλικών σχιστολίθων και ψαμμιτών. Στη βάση της ενότητας αυτής αναπτύσσεται μια κλαστική αγχμεταμορφωμένη, ηφαιστειοϊζηματογενής ακολουθία, γνωστή ως «Στρώματα Ραβδούχων». Πάνω στην ενότητα της Τρίπολης και μερικές φορές πάνω στην ενότητα Φυλλιτών – Χαλαζιτών ή στην ενότητα Κρήτης – Μάνης απαντάται η τεκτονική ενότητα της Ωλονού – Πίνδου. Η ενότητα αυτή αποτελεί το ανώτερο και τελευταίο τεκτονικό κάλυμμα της Κρήτης και συγκροτείται από μια ποικιλία ενοτήτων των οποίων η προέλευση τοποθετείται στις εσωτερικές Ελληνίδες ζώνες. Πρόκειται για ένα σύνθετο και πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα που συγκροτείται από οφιολίθους, κρυσταλλοσχιστώδη, φυλλίτες και μη μεταμορφωμένα πετρώματα.

Οι τεκτονικές αυτές ενότητες καλύπτονται κατά θέσεις από: νεογενείς αποθέσεις, αργίλων, άμμων, ψαμμιτών, ιλυολίθων, μαργών, κροκαλοπαγών, και μαργαϊκών ασβεστόλιθων και από τεταρτογενείς αποθέσεις με κροκαλολατυποπαγή, ερυθρούς αργίλους, άμμους, χαλίκια, και κροκάλες ποικίλης σύστασης και μεγέθους. Η απόθεση των σχηματισμών αυτών έχει λάβει χώρα σε μια ποικιλία περιβαλλόντων που ελέγχονται από ένα περιβάλλον εφελκυσμού, συνέπεια του οποίου διαμορφώθηκαν τεκτονικά κέρατα (περιοχές διάβρωσης) και τεκτονικά βυθίσματα (λεκάνες απόθεσης)».

Από το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ και τα φύλλα Μοχός και Άνω Βιάννος, (παράρτημα εργασίας) και τα γεωτρητικά δεδομένα, διαπιστώνεται ότι ο υπό μελέτη υδροφορέας δομείται εξολοκλήρου από τα πετρώματα της ενότητας Κρήτης – Μάνης, η οποία είναι γνωστή με το όνομα «σειρά των Plattenkalk». Η ενότητα Κρήτης – Μάνης έχει σημαντική ανάπτυξη στην περιοχή μελέτης καλύπτοντας το Α/κο περιθώριο της λεκάνης Καστελίου – Θραψανού – Αρκαλοχωρίου – Νιπιδιτού καθώς και στα Α/κά της γραμμής που διαμορφώνεται μεταξύ των χωριών Νιπιδιτός – Μαθιό – Αμαριανό – Τοίχος- Γωνιές.

Στο γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ αναφέρεται ότι: «η ενότητα Κρήτης – Μάνης αντιπροσωπεύεται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και κατά θέσεις μάρμαρα, μεσοκρυσταλλικά, τερφρόμαυρου χρώματος, καλά στρωμένα σε πάγκους, με πάχος που ποικίλει από λίγα εκατοστά μέχρι και 1 m. Στα κατώτερα μέλη τους εμφανίζονται παχυστρωματώδεις, ενώ προς τα πάνω εξελίσσονται σε μεσοστρωματώδεις και στη συνέχεια σε λεπτοστρωματώδεις. Φέρουν ενστρώσεις πυριτολίθων πάχους μέχρι 20 cm περίπου, χρώματος λευκού μέχρι τεφρού ή φακούς και κονδύλους από πυριτόλιθους. Η συχνότητα εμφάνισης των πυριτολιθικών παρεμβολών είναι μεγάλη στα μεσαία μέλη, ενώ ελαττώνεται προς τα ανώτερα και κατώτερα μέλη».

Χαρακτηριστική είναι η παρεμβολή στην περιοχή Α/κα της Αγίας Παρασκευής, Νότια της Μαθιάς και Βόρεια του ρέματος Μπαμπουλάνη, οριζόντων πάχους 5 – 20 m από κιτρινόχρους ή τεφροπράσινους φυλλίτες και ασβεστοφυλλίτες που αποτελούν τα κατώτερα στρώματα του μεταφλύσχη. Εμφανίζονται επίσης Α/κά του Λιλιανού, και σε ανεστραμμένη διάταξη Α/κά της Αρμάχας.

Στα κατώτερα μέλη τους κατά θέσεις παρεμβάλλεται ένσθρωση από ανθρακικούς – χαλαζιακούς σχιστόλιθους, ενώ κατά θέσεις, στους μεσαίους ορίζοντες, παρατηρούνται μικροψαμμιτικά μέχρι μικρολατυποπαγή στρώματα, μικρού πάχους ή παρεμβάλλονται τεφροπράσινοι ή και ερυθροϊώδεις σερικιτικοί φυλλίτες με μορφής λεπτών ενστρώσεων.

2.3 Στοιχεία τεκτονικής

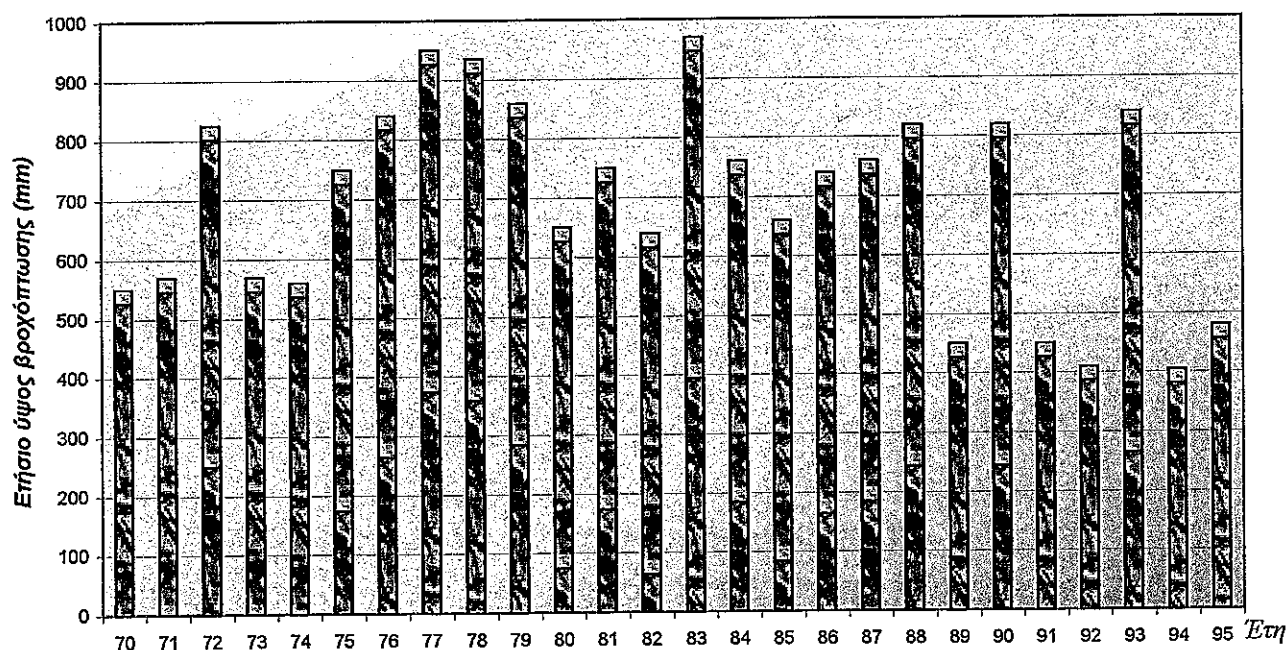
Στην ευρύτερη περιοχή, έχουν δράσει τρεις τεκτονικές φάσεις, οι οποίες με χρονολογική σειρά είναι: της πτυχογόνου τεκτονικής, της ρηγματογόνου τεκτονικής και των τεταρτογενών ρηγμάτων. Και οι τρεις τεκτονικές φάσεις έχουν επιδράσει πάνω στους πλακώδεις ασβεστόλιθους, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πολυπτυχωμένοι με μεγάλου εύρους πτυχές. Αποτέλεσμα της ρηγματογόνου τεκτονικής είναι και η δημιουργία των τριών μεγάλων κανονικών ρηγμάτων που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης.

2.4 Κλιματολογικά στοιχεία

Με βάση τα στοιχεία από τους βροχομετρικούς σταθμούς Καστελίου και Αρμάχας, για την περίοδο 1970-1995, το μέσο ύψος βροχής στο σταθμό Καστελίου, ανέρχεται σε 700 mm και σε 790 mm στο σταθμό Αρμάχας (Μπουλουκάκης και Βουδούρης, 1995). Στο ιστόγραμμα του σχήματος 2.2, παρουσιάζονται τα δεδομένα των βροχοπτώσεων για το σταθμό του Καστελίου. Ακόμη σύμφωνα με τους Μπουλουκάκης και Βουδούρης, 1995, η βροχοβαθμίδα, που αντιπροσωπεύει το μέσο ρυθμό αύξησης του ύψους βροχόπτωσης με την αύξηση του υψομέτρου,

υπολογίστηκε σε 82 mm ανά 100 mm, με συνέπεια το ύψος βροχόπτωσης να υπερβαίνει τα 950 mm στην ευρύτερη περιοχή των πλακωδών ασβεστόλιθων.

Ετήσια πορεία βροχοπτώσεων για το σταθμό Καστελίου



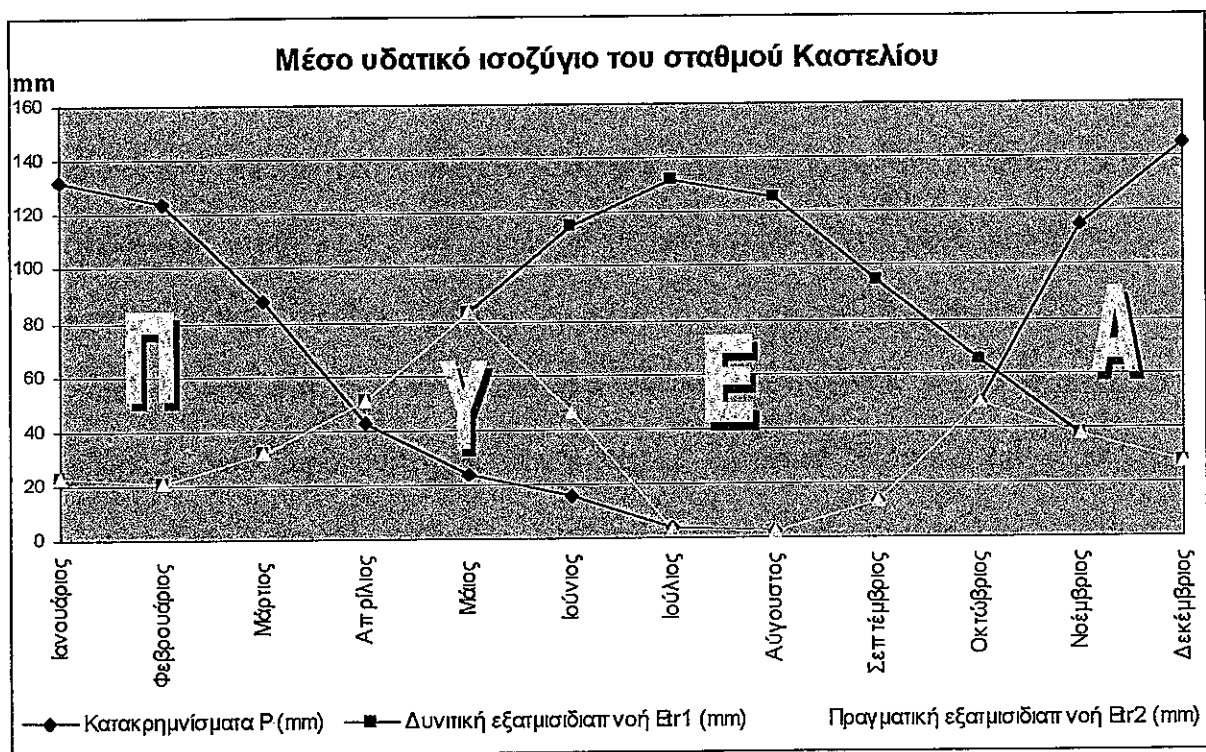
Σχήμα 2.2: Ετήσια κατακρημνίσματα στο μετεωρολογικό σταθμό του Καστελίου, για το χρονικό διάστημα 1970 – 1995.

2.5 Υδρολογικό ισοζύγιο

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thornthwaite – Mather (1955) με τα βροχομετρικά στοιχεία από το σταθμό Καστελίου, κατά την περίοδο 1978-1990. Για τους υπολογισμούς, η ικανότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος, θεωρήθηκε ίση με 100 mm. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα αποτελέσματα και στο διάγραμμα του σχήματος 2.3 απεικονίζεται το μέσο υδατικό ισοζύγιο.

Μήνες	Κατακρημνίσματα P (mm)	Θερμοκρασία T (oC)	Ικανότητα κατακράτησης W (mm)	Δυνιτική εξατμισοδιαπνοή Etr1 (mm)	Πραγματική εξατμισοδιαπνοή Etr2 (mm)	Απορροή & Κατείδουση W+ (mm)
Ιανουάριος	132,04	9,71	100	22,6	22,6	109,5
Φεβρουάριος	123,72	9,34	100	20,7	20,7	103
Μάρτιος	88,1	10,71	100	31,4	31,4	56,7
Απρίλιος	42,42	13,94	100	51,2	51,2	0
Μάιος	23,23	17,59	91,2	83,2	83,2	0
Ιούνιος	15,33	21,43	31,3	115	46,6	0
Ιούλιος	3,32	23,07	0	132	3,3	0
Αύγουστος	1,93	23,16	0	125,3	1,9	0
Σεπτέμβριος	13,41	20,92	0	94,1	13,4	0
Οκτώβριος	49,42	17,29	0	64,8	49,4	0
Νοέμβριος	114,8	13,35	0	37,6	37,6	0
Δεκέμβριος	145,21	11,07	77,2	27,3	27,3	95
Σύνολο	752,93	-	-	805,2	388,6	364,2
Μέσος Όρος	-	15,965	-	-	-	-

Πίνακας 1: Υδατικό ισοζύγιο κατά Thornthwaite – Mather για το σταθμό Καστελίου



Σχήμα 2.3: Μέσο υδατικό ισοζύγιο του σταθμού Καστελίου, όπου Π πλεόνασμα νερού, Υ χρησιμοποίηση εδαφικής υγρασίας, Ε έλλειμμα νερού και Α αναπλήρωση εδαφικού νερού

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς, παρατηρείται πλεόνασμα νερού τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο σε ποσοστά 65,5%, 83%, 83,3% και 64,4% αντίστοιχα. Από τα ποσοστά αυτά, ένα μικρό μέρος απορρέει επιφανειακά (εξαιτίας της μεγάλης εμφάνισης καρστικών σχηματισμών) και το υπόλοιπο κατεισδύει, εμπλουτίζοντας τους υπογείους υδροφορείς. Έλλειμμα νερού παρατηρείται όλους τους υπόλοιπους μήνες, κατά τη διάρκεια των οποίων δαπανάται εδαφική υγρασία για τις ανάγκες της εξατμισοδιαπνοής.

2.6 Υδρογεωλογικά στοιχεία

Στους πλακώδεις ασβεστόλιθους που δομούν τον υπό μελέτη υδροφορέα αναπτύσσονται αξιόλογα καρστικά συστήματα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ασβεστόλιθοι είναι έντονα τεκτονισμένοι, παρουσιάζοντας μέτριο και τοπικά υψηλό συντελεστή δευτερογενούς υδατοπερατότητας. Δεδομένης της απουσίας πηγών στο σχηματισμό αυτό, ενισχύεται η άποψη ότι τα κατεισδύοντα νερά διηθούνται σε μεγάλο βάθος, εμπλουτίζοντας συνεχώς τους υπογείους υδροφορείς που αναπτύσσονται στη μάζα τους. Στο γεγονός αυτό συνηγορούν και τα γεωτρητικά δεδομένα, που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Αρνητικά ως προς την ανάπτυξη ολοκαρστικών μορφών, επιδρά ο λεπτοστρωματώδης χαρακτήρας των ανώτερων τμημάτων της ενότητας σε συνδυασμό με την παρουσία κερατολιθικών ενστρώσεων. Γεωτρητικό ερευνητικό πρόγραμμα του Ι.Γ.Μ.Ε. στην περιοχή του χωριού Λιλιανό έδειξε ότι τα πρώτα φαινόμενα καρστικοποίησης αρχίζουν περίπου 240 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι ασβεστόλιθοι μέχρι το βάθος των 240 m παρουσιάζονται συμπαγείς ενώ τα κατώτερα μέλη της σειράς παρουσιάζονται

περισσότερο καρστικοποιημένα. Το καρστ στα βαθύτερα μέλη είναι συχνά πληρωμένο με ερυθρό αργιλικό υλικό, που προέρχεται από διάβρωση.

Οι υδραυλικές παράμετροι στους πλακώδεις ασβεστόλιθους της περιοχής μελέτης υπολογίσθηκαν από μετρήσεις δοκιμαστικών αντλήσεων (Μπουλουκάκης και Βουδούρης, 1995). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πτώσης και επαναφοράς στάθμης σε 8 γεωτρήσεις και οι υπολογισμοί έγιναν με τη μέθοδο S-logt (μέθοδος Cooper-Jacob). Ο μέσος συντελεστής μεταβιβαστικότητας T βρέθηκε ότι κυμαίνεται από $3.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ έως $11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας k υπολογίσθηκε από το μέσο συντελεστή μεταβιβαστικότητας T , μέσω της μαθηματικής σχέσης:

$$T = k \cdot b$$

όπου b το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα. Με βάση τα γεωτρητικά δεδομένα, για την περιοχή μελέτης το πάχος του υδροφορέα είναι ίσο με 119 m. Ο συντελεστής k υπολογίσθηκε από $2,77 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$ έως $9,24 \cdot 10^{-5} \text{ m/sec}$. Η τιμή αυτή του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας συμπίπτει με βιβλιογραφικές αναφορές. (Σούλιος, 1986)

Το πορώδες των πλακωδών ασβεστόλιθων θεωρήθηκε προσεγγιστικά ίσο με $n = 0.2$, με βάση βιβλιογραφικές αναφορές. (Καρατζάς, 2000)

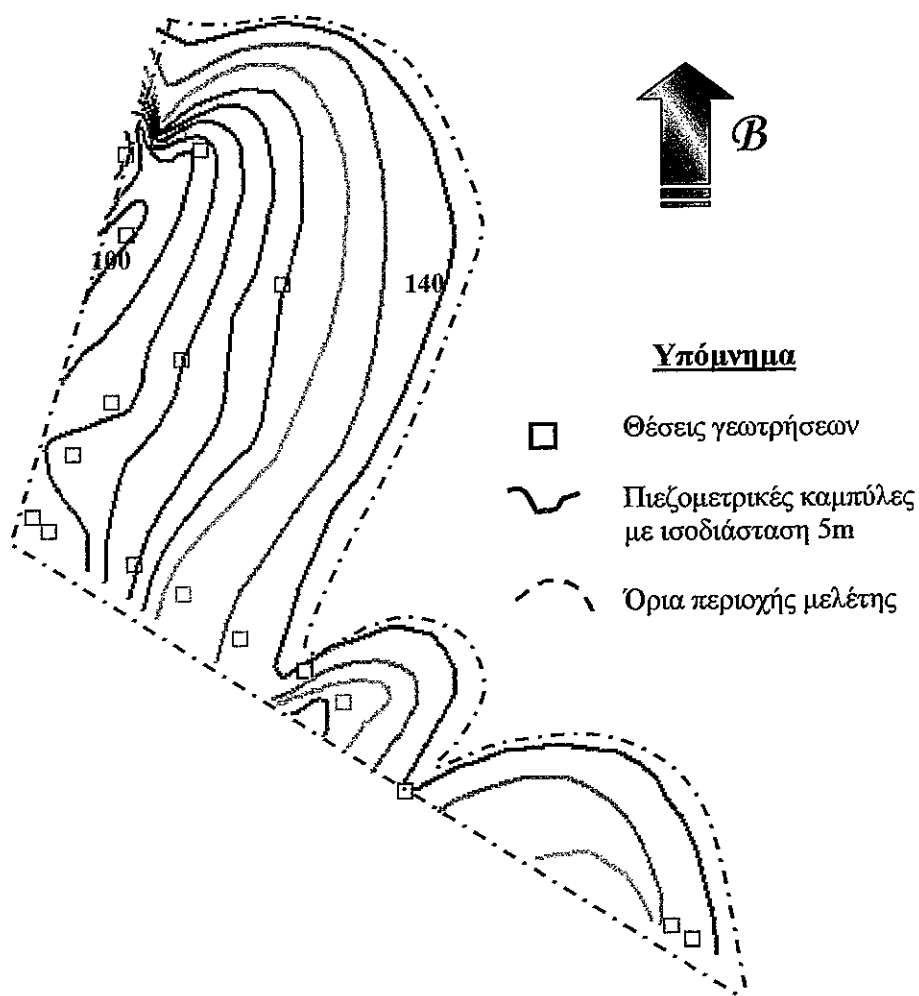
2.7 Στοιχεία γεωτρήσεων

Για την εκμετάλλευση της υδροφορίας των πλακωδών ασβεστόλιθων της περιοχής μελέτης, ανορύχθηκαν 19 γεωτρήσεις, σε ολόκληρη την έκταση του

υδροφορέα. Από υφιστάμενες μελέτες και επιτόπιες μετρήσεις, για κάθε γεώτρηση συλλέχθηκαν τα εξής στοιχεία:

- στοιχεία θέσης (ϕ , λ , h), μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού G.P.S.
- στοιχεία για την περιοχή, που βρίσκεται η γεώτρηση και για το Δήμο, που έχει τα δικαιώματα εκμετάλλευσης της
- το βάθος, η υδροστατική στάθμη, η στάθμη και η παροχή άντλησης

Τα στοιχεία φαίνονται στον πίνακα 2 και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή πιεζομετρικού χάρτη (σχήμα 2.4) και για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής.



Σχήμα 2.4: Πιεζομετρικός χάρτης του υπό μελέτη υδροφορέα

α/α Γεωτρηστή	Δήμος	Περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος φ	Γεωγραφικό μήκος λ	Υψόμετρο (m)	Βάθος (m)	Υδροστατική σταθμική (m)	Παροχή (m ³ /h)	Παροχή (m ³ /day)	Υδραυλικά ώση (m)	Στάθμη απόληξης (m)	
1	W1	Καστελλίου	Αλιανό	350 11' 00" N	250 20' 13" E	375	378	270,55	40	960	104,45	292,65
2	W2	Καστελλίου	Αλιανό	350 10' 53" N	250 20' 18" E	385	445,18	251	65	1560	134	253,8
3	W3	Καστελλίου	Αλιανό	350 10' 48" N	250 20' 35" E	410	485	304,5	60	1440	105,5	307,5
4	W4	Καστελλίου	Αλιανό	350 10' 55" N	250 20' 05" E	380	350	268	25	-	112	-
5	W5	Καστελλίου	Αγία Παρασκευή	350 10' 17" N	250 21' 04" E	415	520	317,4	20	-	97,6	-
6	W6	Καστελλίου	Αριμύχα	350 10' 22" N	250 21' 04" E	480	495	355,6	45	1080	124,4	355,93
7	W7	Καστελλίου	Γεράκι	350 09' 37" N	250 33' 00" E	435	375	322,74	36	864	112,26	327,37
8	W8	Καστελλίου	Γεράκι	350 09' 24" N	250 19' 59" E	417	462	309,3	40	960	107,7	309,55
9	W9	Καστελλίου	Γεράκι	350 09' 24" N	250 19' 51" E	390	410	276,27	60	1440	113,73	285
10	W10	Αρκαλοχωρίου	Νηριότρος	350 08' 49" N	250 19' 31" E	378	413	275,6	62	1488	102,4	275,65
11	W11	Αρκαλοχωρίου	Νηριότρος	350 08' 45" N	250 19' 36" E	410	450	288	55	1320	122	290,5
12	W12	Αρκαλοχωρίου	Νηριότρος	350 08' 45" N	250 19' 36" E	400	415	284,85	88	2112	115,15	288,92
13	W13	Αρκαλοχωρίου	Νηριότρος	350 08' 37" N	250 20' 24" E	460	463,8	326	50	1200	134	334,5
14	W14	Αρκαλοχωρίου	Πλαγιά	350 08' 04" N	250 20' 51" E	455	477	320	60	1440	135	330
15	W15	Αρκαλοχωρίου	Πλαγιά	350 07' 53" N	250 11' 22" E	460	492	318	70	1680	142	345
16	W16	Αρκαλοχωρίου	Πλαγιά	350 07' 19" N	250 11' 45" E	445	467	320,27	70	1680	124,73	320,7
17	W17	Αρκαλοχωρίου	Πλαγιά	350 08' 01" N	250 22' 24" E	410	300	272	35	840	138	275,4
18	W18	Βιάννου	Εμπραπος	350 06' 30" N	250 23' 42" E	535	560	412,7	50	1200	122,3	416,15
19	W19	Βιάννου	Εμπραπος	350 06' 06" N	250 22' 07" E	520	475	380,5	42	1008	139,5	381,17

Πίνακας 2: Στοιχεία γεωτρήσεων

2.8 Υδροχημική κατάσταση των υπογείων νερών

Για τη μελέτη της υδροχημείας των υπογείων νερών, έγιναν χημικές αναλύσεις σε δείγματα νερού, αμέσως μετά τη διάνοιξη των γεωτρήσεων (Μπουλουκάκης και Βουδούρης, 1995). Στις αναλύσεις μετρήθηκαν τα εξής: Ph, Αγωγιμότητα σε (mS/cm), Ολική Σκληρότητα σε γερμανικούς βαθμούς ($^{\circ}$ dH), TDS (mg/l) καθώς και η συγκέντρωση των ανιόντων Cl, SO₄, NO₃ σε (mg/l). Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων φαίνονται στον πίνακα 3. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία η ποιότητα των νερών χαρακτηρίζεται καλή καθώς παρατηρούνται συγκεντρώσεις κάτω των αποδεκτών ορίων για καθένα από τους εξεταζόμενους ρυπαντές.

a/a	Συμβολισμός γεώτρησης	Ph	Αγωγιμότητα (μS/cm)	Ολική Σκληρότητα $^{\circ}$ dH	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	TDS (mg/l)	T (Θ ⁰)
1	W1	7,3	345	10,8	284	17,3			
2	W8	7,35	503	11,8	30,2	6,6	2,7		
3	W10	7,4	623	14,8	30	110	4		
4	W12		596				2,6	407	19,8
5	W14				35				
6	W16	7,3	367	10,4	24,9	21		264	19,3
7	W21	7,55	424	10	28	19	6,6		

Πίνακας 3: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων, σε δείγματα νερού από γεωτρήσεις στους πλακώδεις ασβεστόλιθους της περιοχής μελέτης.

ΕΝΟΤΗΤΑ 3^η

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ P.T.C. ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE.

3.1 Μεθοδολογία μοντελοποίησης της υπόγειας ροής

Σύμφωνα με το βιβλίο του George F. Pinder “Groundwater modeling using geographical information systems”, 2001, η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής με το P.T.C. υλοποιείται με τα ακόλουθα βήματα:

- Καθορισμός της περιοχής μελέτης
- Υπολογισμός των υδρολογικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται σαν όρια από το μοντέλο

- Σύνθεση των γεωλογικών πληροφοριών (π.χ. στρωματογραφική διάρθρωση των γεωλογικών σχηματισμών)
- Σύνθεση των υδρολογικών πληροφοριών (π.χ. διηθούμενη βροχόπτωση)
- Υπολογισμός των φυσικών μεγεθών που χρειάζονται στο μοντέλο (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα)
- Προσδιορισμός του μεγέθους του μοντέλου
- Προσδιορισμός της πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου
- Εισαγωγή των οριακών συνθηκών και των παραμέτρων του μοντέλου
- Εκτέλεση του προγράμματος
- Εξαγωγή των αποτελεσμάτων των υπολογιζόμενων υδραυλικών υψών
- Βαθμονόμηση του μοντέλου με πραγματικά γεωτρητικά δεδομένα, υφιστάμενες μελέτες, υδρολογικούς χάρτες
- Εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

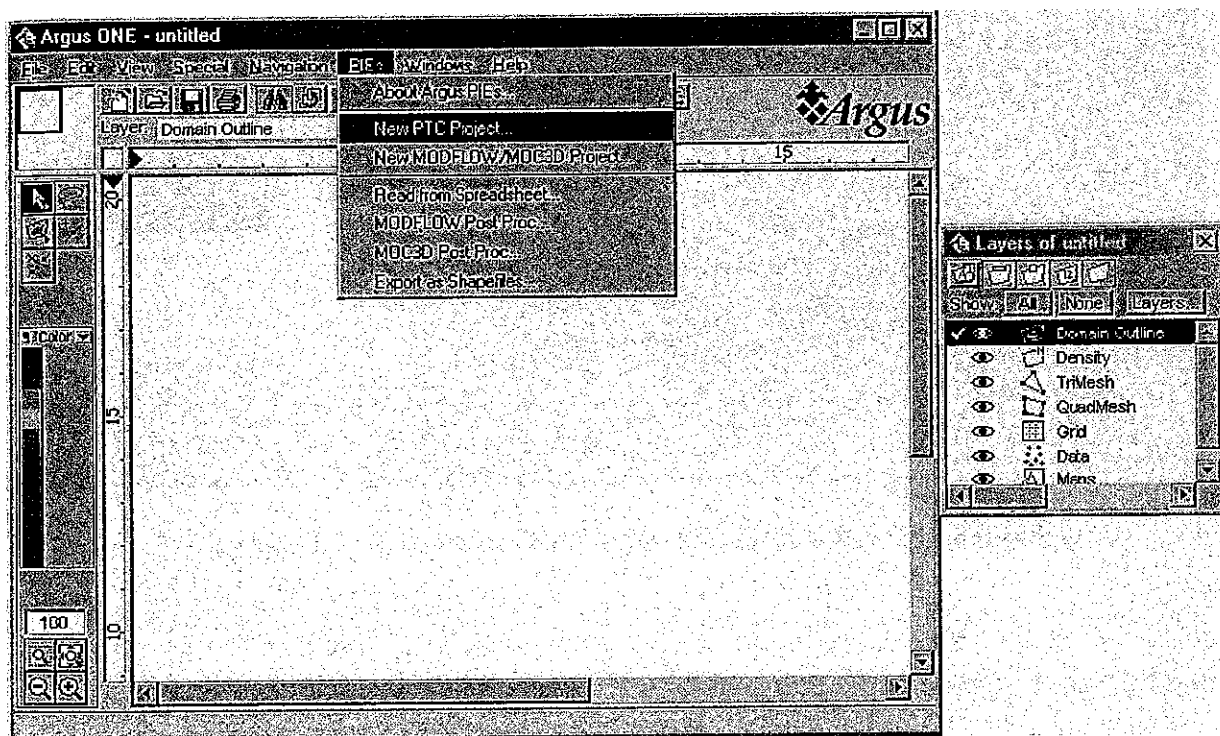
Αυτή η μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στην εργασία, προσαρμοσμένη στις ιδιαιτερότητες του υπογείου υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων και της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή του κάθε βήματος.

I. Καθορισμός της περιοχής μελέτης

Για την οριοθέτηση της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικοί χάρτες της Γ.Υ.Σ., έκδοσης 1972 και κλίμακας 1:50.000. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα φύλλα Μοχός και Άνω Βιάννος, τα οποία συνενώθηκαν, προκειμένου να καλυφθεί ολόκληρη η περιοχή μελέτης.

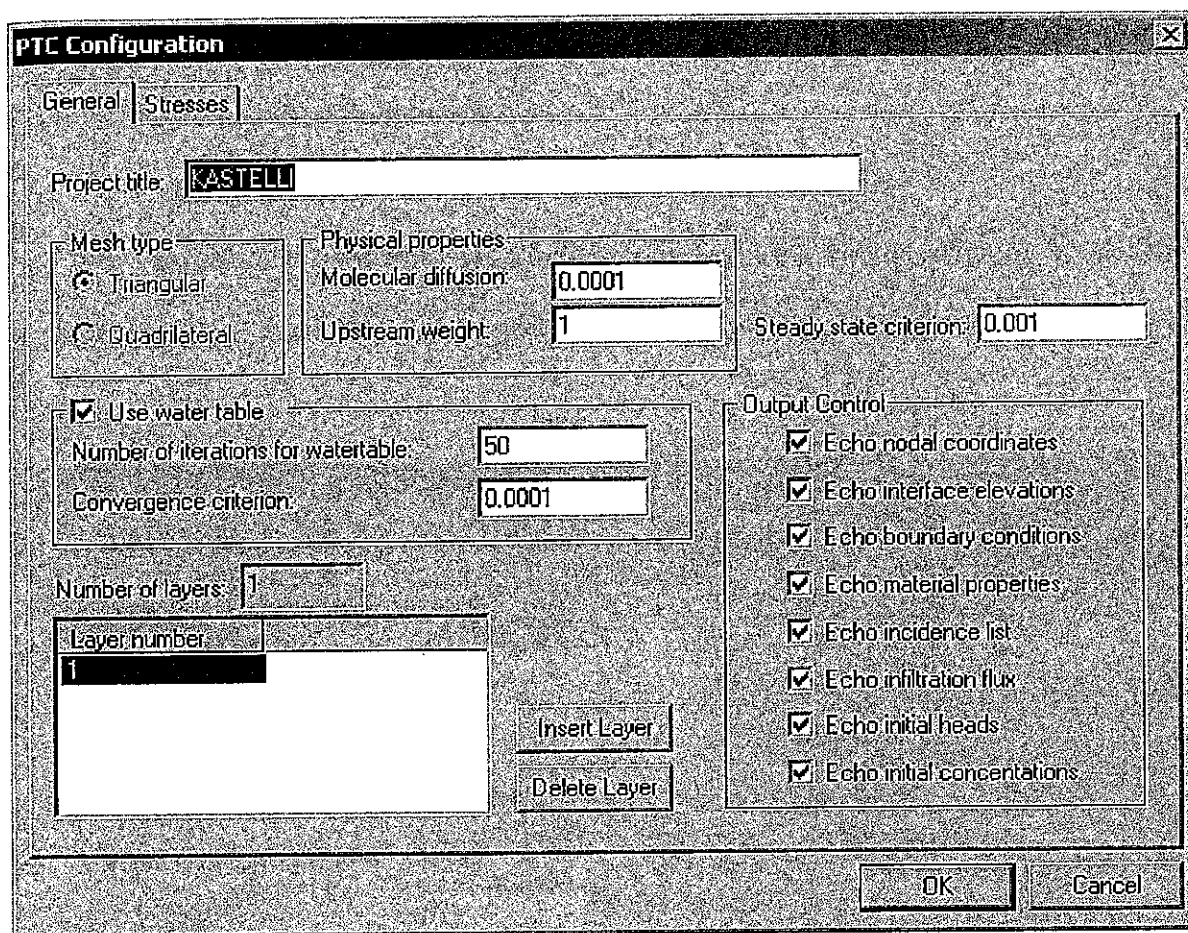
Π. Ορισμός αρχικών παραμέτρων

Για τη δημιουργία ενός νέου κώδικα P.T.C. επιλέγεται η εντολή New PTC Project από το μενού PIE's (σχήμα 3.1). Στο παράθυρο PTC Configuration (σχήμα 3.2) που εμφανίζεται στη συνέχεια, ορίζονται οι αρχικές παράμετροι του μοντέλου.



Σχήμα 3.1: Η εντολή δημιουργίας νέου κώδικα P.T.C.

Στην καρτέλα General του παραθύρου PTC Configuration (σχήμα 3.2), ορίζεται ο τίτλος της εργασίας, που είναι Kastelli, στο πλαίσιο κειμένου Project title. Επιλέγεται το σχήμα των διακριτών στοιχείων του πλέγματος να είναι τριγωνικό, από την επιλογή triangular στο πλαίσιο Mesh type. Στο πλαίσιο κειμένου Steady state criterion, καθορίζεται η τιμή 0.001, σαν την οριακή τιμή που θα απέχουν τα αποτελέσματα, για να θεωρείται ότι το μοντέλο έχει φτάσει σε σταθερές συνθήκες.



Σχήμα 3.2: Η καρτέλα General του παραθύρου PTC Configuration.

Επιλέγεται η εντολή Use water table γιατί ο υδροφορέας είναι ελεύθερος σε ολόκληρη την έκταση της περιοχής μελέτης. Στο πλαίσιο Number of iterations for watertable, εισάγεται ο αριθμός 50, που αντιστοιχεί στο μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, για την επίλυση της non free surface problem. Στο πλαίσιο Convergence criterion, καθορίζεται η ελάχιστη τιμή σύγκλισης των αποτελεσμάτων, ώστε να θεωρείται ότι έχουν επιτευχθεί σταθερές συνθήκες κατά τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών.

Στο πλαίσιο Number of layers, εισάγεται μόνο ένα στρώμα (layer), γιατί ο υπόγειος υδροφορέας θεωρείται ενιαίος γεωλογικός σχηματισμός, κατά τη μοντελοποίηση. Στο

πλαίσιο Output control, επιλέγονται και τα οκτώ εικονίδια, ώστε το μοντέλο να εξάγει τα αποτελέσματα για καθεμία παράμετρο.

Στην καρτέλα Stresses του PTC Configuration (σχήμα 3.3), καθορίζονται το είδος και τα χρονικά πλαίσια των υπολογισμών που πραγματοποιούνται από το μοντέλο.

The screenshot shows the 'PTC Configuration' dialog box with the 'Stresses' tab selected. The dialog is divided into several sections:

- Stress Table:** A table with columns 'Stress', 'Flow', 'Velocity', 'Transport', and 'Length'. The first row has values 1, 1, 1, 0, and 3650 respectively.
- Buttons:** 'Insert', 'Modify', and 'Delete' buttons are located to the right of the stress table.
- General control:** A section containing checkboxes for 'Do flow' (checked), 'Do velocity' (checked), 'Do transport' (unchecked), 'Use memory' (checked), and 'Do mass balance' (unchecked).
- Time control:** A section with input fields for 'Total number of time steps' (3650), 'No. of flow time steps reset' (1), 'No. of flow time steps no change' (1), 'No. of conc. time steps per flow' (2), 'Time-step multiplier' (1), and 'Total time' (3650).
- Graphics control:** A section with input fields for 'Time step of first flow output' (3650), 'Output period flow' (3650), 'Time step of first conc. output' (3650), and 'Output period conc.' (3650).
- Bottom section:** Includes 'Number of stress periods' (1), 'Total simulation time' (3650), 'Graphics filenames for heads' (heads), and 'Graphics filenames for concentrations' (concs).
- Buttons:** 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Σχήμα 3.3: Η καρτέλα Stresses του παραθύρου PTC Configuration.

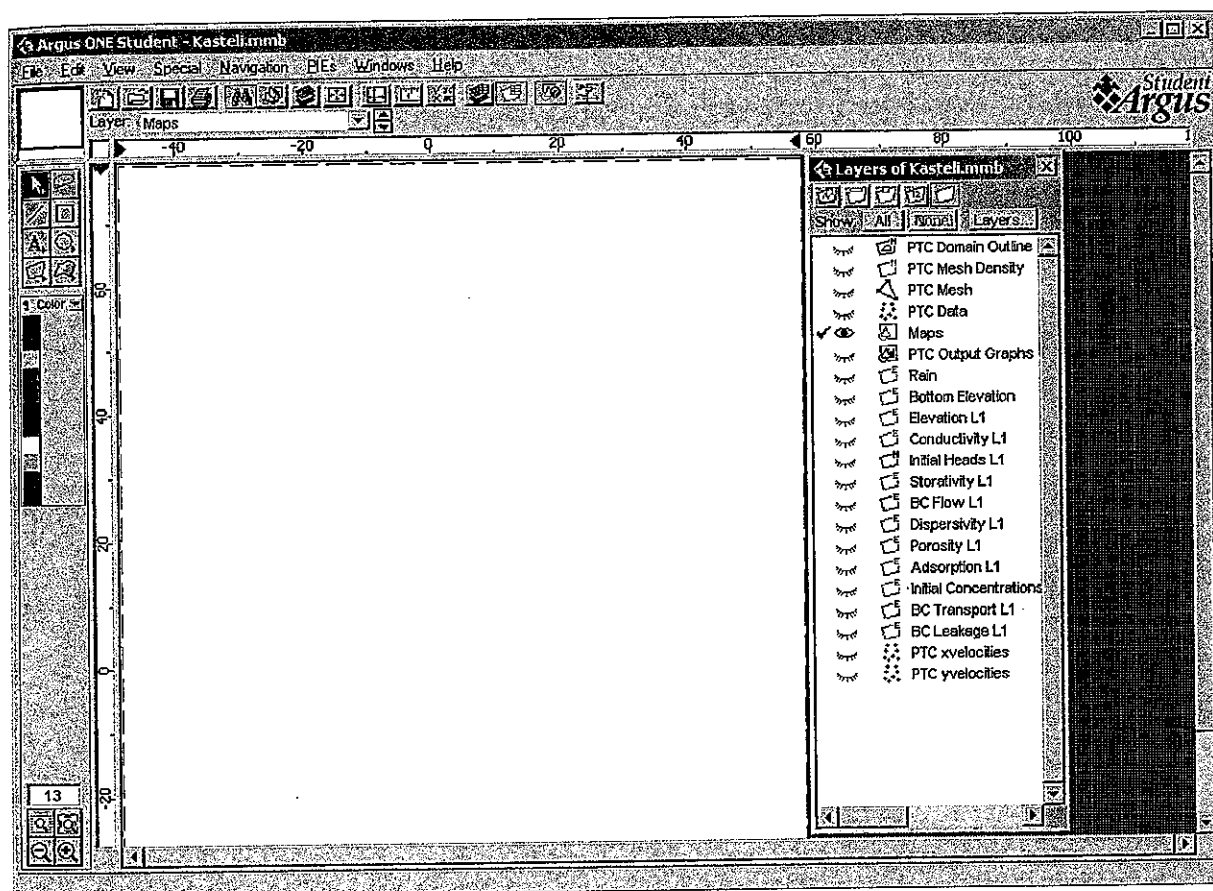
Στο πλαίσιο General control, επιλέγονται οι εντολές Do flow, για τον υπολογισμό της ροής Do velocity, για τον υπολογισμό της οριζόντιας ταχύτητας ροής και Use Memory, για να χρησιμοποιείται η πραγματική μνήμη του ηλεκτρονικού υπολογιστή κατά τους υπολογισμούς. Οι αλλαγές αυτές αποθηκεύονται στο μοντέλο, μέσω του κουμπιού Modify.

Στο πλαίσιο με τίτλο Time control, καθορίζονται τα χρονικά πλαίσια των υπολογισμών. Σαν μονάδα μέτρησης του χρόνου, για όλους τους υπολογισμούς του μοντέλου, επιλέχθηκε η ημέρα (day). Η συνολική διάρκεια της μελέτης ορίστηκε 3650 ημέρες (10 χρόνια) στο πλαίσιο κειμένου Total time. Στο πλαίσιο Total number of time steps ορίστηκε ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων να είναι 3650, με αποτέλεσμα τα υδραυλικά ύψη να υπολογίζονται κάθε μία ημέρα. Επιλέχθηκε οι υπολογισμοί να γίνονται με σταθερό βήμα, για αυτό στα πλαίσια Time step multiplier και No of flow time-steps no-change δόθηκε η τιμή 1. Το χρονικό πλαίσιο για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων του ρυπαντή καθορίζεται σε σχέση με το βήμα υπολογισμού των υδραυλικών υψών. Επειδή οι συγκεντρώσεις πρέπει να υπολογίζονται σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα, εισάγεται στο πλαίσιο No of conc time-step per flow, ο αριθμός 2, διπλασιάζοντας έτσι τον αριθμό των βημάτων σε 7300 και μειώνοντας τη διάρκεια τους σε μισή ημέρα.

Στο πλαίσιο Graphs control, καθορίζεται η αποθήκευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, να γίνεται στο τέλος των 3650 ημερών. Για το αρχείο με τα αποτελέσματα της ροής, δίνεται το όνομα heads, στο πλαίσιο κειμένου Graphics filenames for heads και για τα αποτελέσματα μεταφοράς μάζας, δίνεται το όνομα concs, στο πλαίσιο Graphics filenames for concentrations.

Οι αρχικές παράμετροι, που ορίστηκαν στο παράθυρο PTC Configuration, εισάγονται στο μοντέλο P.T.C., με την επιλογή OK. Τα υπόλοιπα στοιχεία εισάγονται μέσω του παραθυρικού περιβάλλοντος του προγράμματος Argus ONE (σχήμα 3.4). Η επιφάνεια εργασίας για την εισαγωγή των στοιχείων είναι το παράθυρο Argus ONE Student – Kasteli.mmb του σχήματος 3.4. Κάθε στοιχείο αποτυπώνεται σε ένα ξεχωριστό Layer,

που έχει προκαθορισμένο τίτλο και τύπο από το πρόγραμμα (Domain, Mesh, Map, Data and Information layers) και όλα αποθηκεύονται στο αρχείο (Argus Project) με το όνομα Kasteli.mmb. Η διαχείριση των layers γίνεται από το παράθυρο των layers με τίτλο Layers of Kasteli.mmb, που φαίνεται στο σχήμα 3.4.



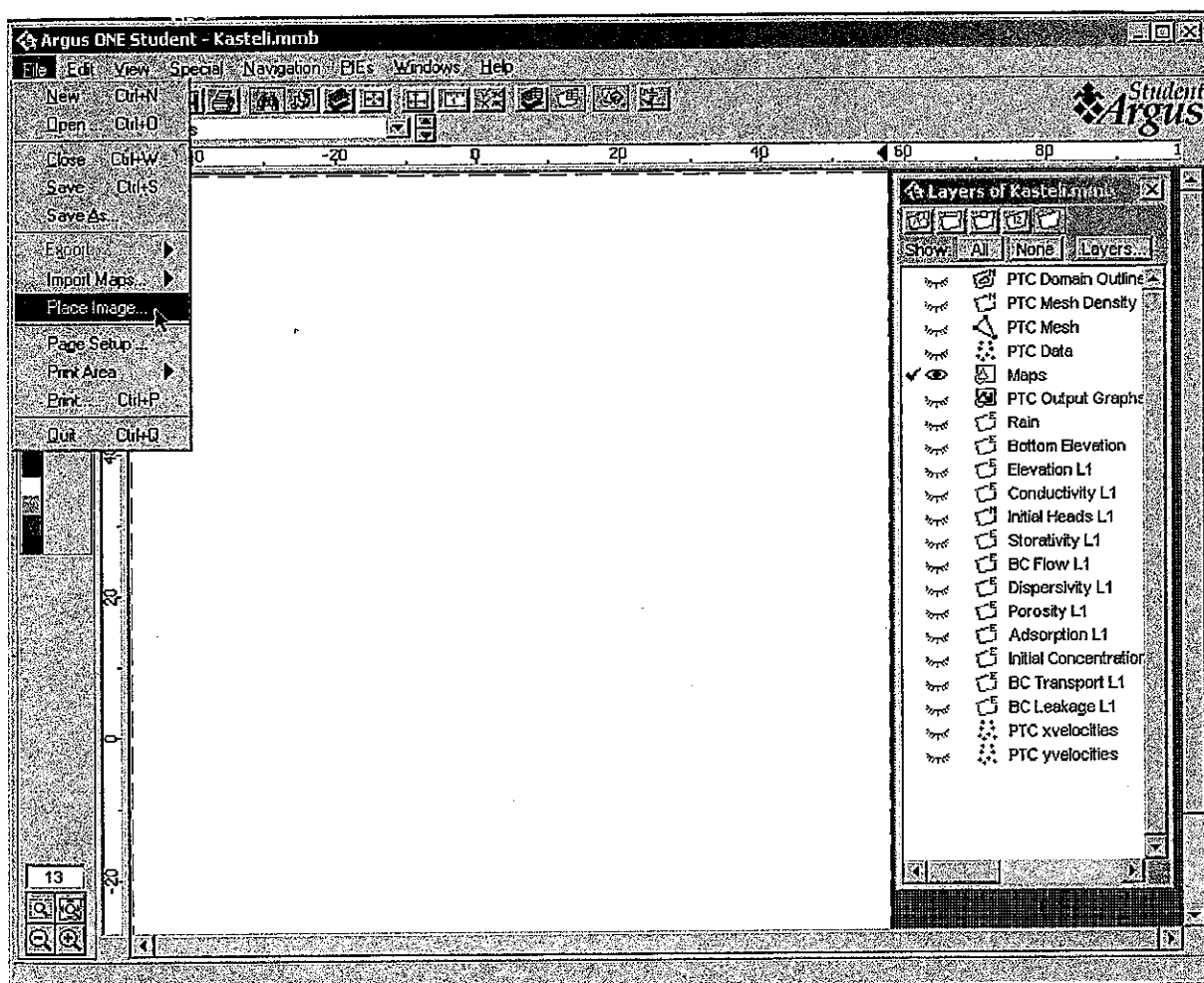
Σχήμα 3.4: Το περιβάλλον του προγράμματος ARGUS ONE.

III. Εισαγωγή χαρτογραφικού υποβάθρου

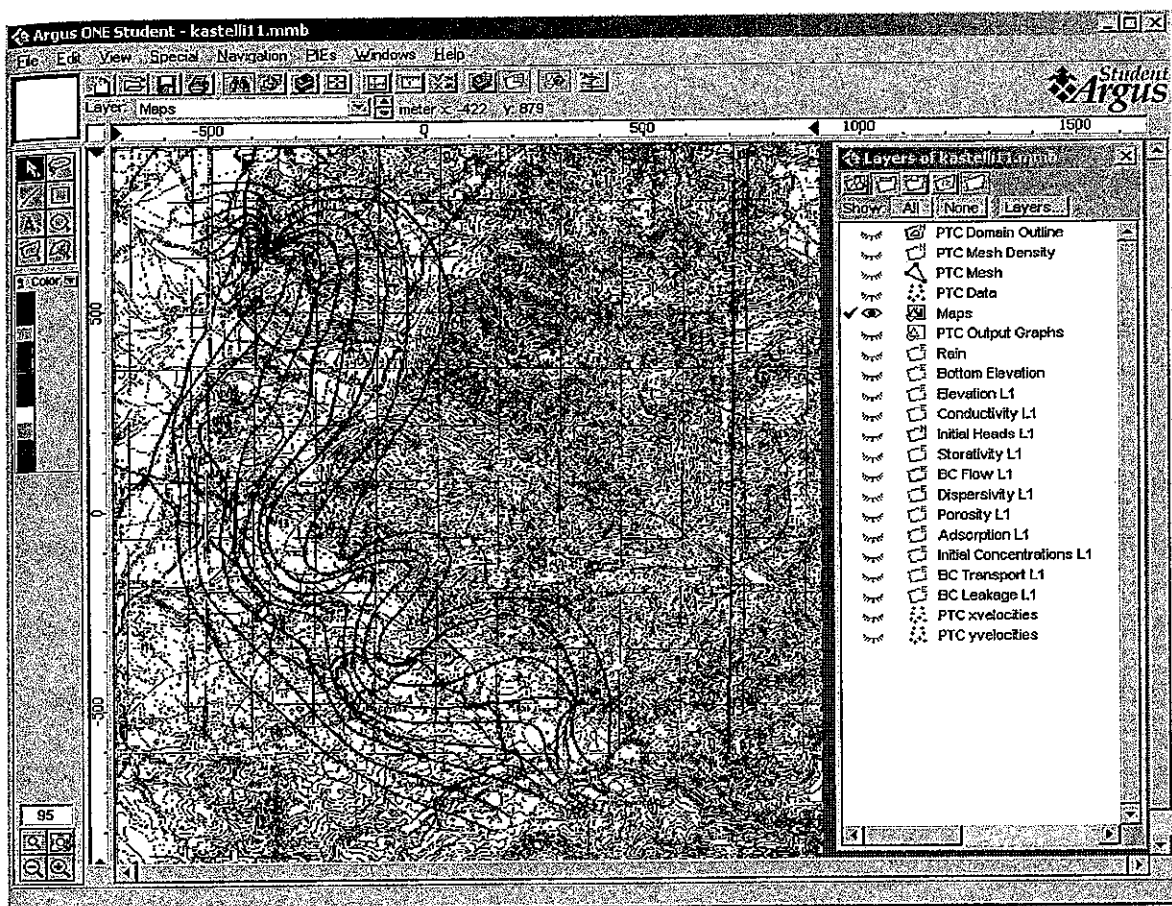
Το ψηφιακό χαρτογραφικό υπόβαθρο είναι απαραίτητο για την εισαγωγή των γεωτρητικών, γεωλογικών και υδρολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα. Για το σκοπό αυτό, στον τοπογραφικό χάρτη, που χρησιμοποιήθηκε για την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης, αποτυπώθηκαν οι ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων, τα γεωλογικά ρήγματα και η πιεζομετρία

του υπό μελέτη υδροφορέα. Στη συνέχεια ο χάρτης αυτός σαρώθηκε και μέσω του προγράμματος CorelDRAW 9, αποθηκεύτηκε σε ένα αρχείο με κατάληξη *.tif, ώστε να είναι συμβατό με το πρόγραμμα Argus ONE.

Για την εισαγωγή του ψηφιακού χάρτη στο Argus ONE, γίνεται ενεργό το layer Maps, στο παράθυρο των layers (σχήμα 3.5). Στη συνέχεια, από το μενού File / Place Image (σχήμα 3.5), επιλέγεται το αρχείο kasteli.tif και ο χάρτης εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.5: Το ενεργό layer Maps στο παράθυρο των layers και η εντολή εισαγωγής εικόνας στο Argus ONE.



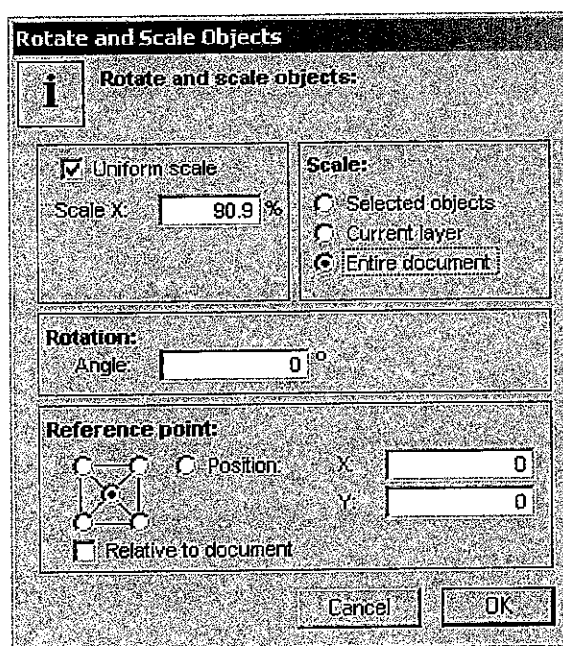
Σχήμα 3.6: Το ψηφιακό χαρτογραφικό υπόβαθρο για την περιοχή μελέτης.

IV. Καθορισμός κλίμακας οθόνης

Ο αρχικός τοπογραφικός χάρτης, έχει κλίμακα 1:50.000 και συντεταγμένες στο προβολικό σύστημα Hatt. Μετά τη σάρωση και την εισαγωγή του στο πρόγραμμα, ο ψηφιακός χάρτης αποκτάει αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων και κλίμακα. Κατά τη μοντελοποίηση διατηρείται το αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων αλλά πρέπει να ορισθεί η αντιστοιχία μεταξύ της κλίμακας του χάρτη και της οθόνης.

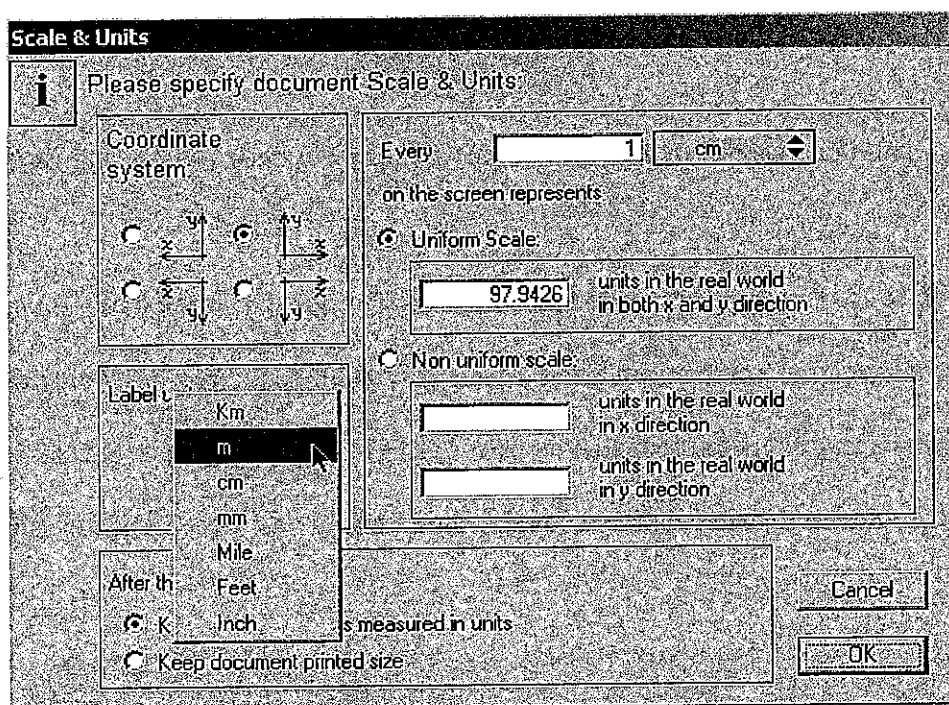
Η αντιστοίχιση της κλίμακας γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία: εστιάζοντας κατάλληλα με το φακό μεγέθυνσης (zoom in), ο κέρσορας τοποθετείται στο ακρότατο σημείο πάνω αριστερά της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος. Η ένδειξη της οθόνης στη θέση αυτή

είναι (-55.8, 85.9). Η ένδειξη της οθόνης στο ακρότατο σημείο πάνω δεξιά είναι (73.6, 86.1). Η διαφορά τους, που αντιστοιχεί στην απόσταση των δύο άκρων, είναι 129.4 cm. Η αντίστοιχη απόσταση στον αναλογικό χάρτη, είναι 23.3 cm. Άρα τα 23.3 cm του χάρτη αντιστοιχούν σε 129.4 cm της οθόνης και κατά συνέπεια το 1 cm του χάρτη με 5.5 cm της οθόνης. Δεδομένου ότι η κλίμακα του χάρτη είναι 1:50.000, το 1 cm του χάρτη αντιστοιχεί 5.5 cm της οθόνης και με 500 m στην πραγματικότητα. Άρα το 1 cm της οθόνης αντιστοιχεί με 90,9 m σε πραγματικές διαστάσεις πεδίου. Η αντιστοιχία αυτή ορίζεται από το παράθυρο (σχήμα 3.7) του μενού Special / Rotate and Scale objects. Στο παράθυρο αυτό επιλέγεται Uniform scale και στο πλαίσιο Scale X αναγράφεται η τιμή 90,9. Για να μετασχηματιστεί ολόκληρη η επιφάνεια εργασίας, σύμφωνα με αυτή την κλίμακα, επιλέγεται Entire document στο πλαίσιο Scale, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Το παράθυρο Rotate and Scale objects.

Σαν μονάδα μέτρησης του μήκους, επιλέγεται το μέτρο (m), οπότε και οι συντεταγμένες της οθόνης εκφράζονται σε μέτρα. Αυτό ορίζεται από την επιλογή Special / Scale and Units, στο πλαίσιο Label Units (σχήμα 3.8).



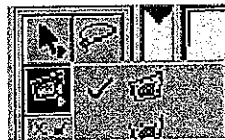
Σχήμα 3.8: Το παράθυρο Scale and Units.

V. Οριοθέτηση της περιοχής μοντελοποίησης

Για την οριοθέτηση της περιοχής μοντελοποίησης επιλέχθηκαν η πιεζομετρική καμπύλη, με υδραυλικό ύψος 140 m και το τμήμα του κανονικού ρήγματος, από το χωριό Καστέλι μέχρι το χωριό Ξενιάκο. Τα όρια αυτά έχουν σχεδιαστεί στον τοπογραφικό χάρτη kasteli.tif, ο οποίος εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας.

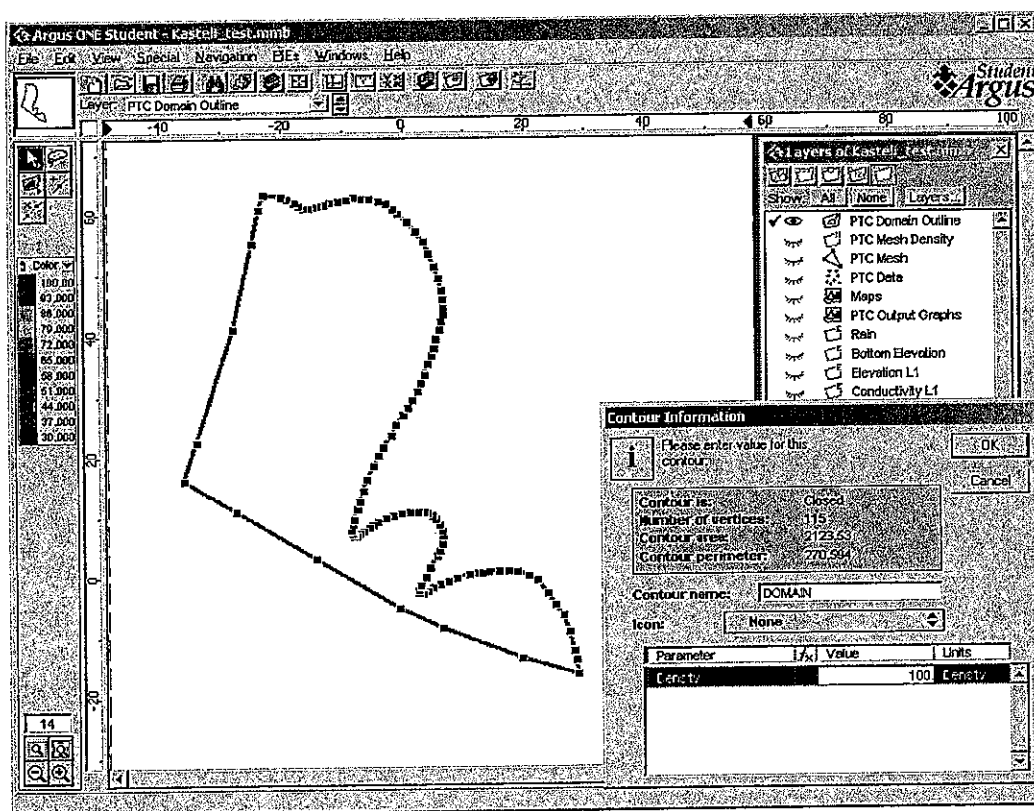
Τα όρια της περιοχής μοντελοποίησης αποτυπώνονται στο layer PTC Domain Outline, το οποίο πρέπει να είναι ενεργό κατά τη διάρκεια εισαγωγής τους. Η ψηφιοποίηση των ορίων

γίνεται με το εργαλείο Geographic tool, που φαίνεται επιλεγμένο στο σχήμα 3.9. Η περιοχή μοντελοποίησης απεικονίζεται σαν κλειστή πολυγωνική γραμμή, χρησιμοποιώντας την πρώτη επιλογή - Closed contours - που φαίνεται τσεκαρισμένη στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Το εργαλείο Geographic tool και η επιλογή Closed contours.

Μετά την ολοκλήρωση της κλειστής πολυγωνικής γραμμής, εμφανίζεται το παράθυρο Contour Information του σχήματος 3.10, στο οποίο εισάγεται η πυκνότητα του τριγωνικού πλέγματος εντός της περιοχής αυτής. Η τιμή της πυκνότητας που δόθηκε είναι 100 και αντιπροσωπεύει το μέσο όρο του μήκους των πλευρών κάθε πεπερασμένου τριγωνικού στοιχείου.



Σχήμα 3.10: Το παράθυρο Contour Information για τον καθορισμό της πυκνότητας του πλέγματος.

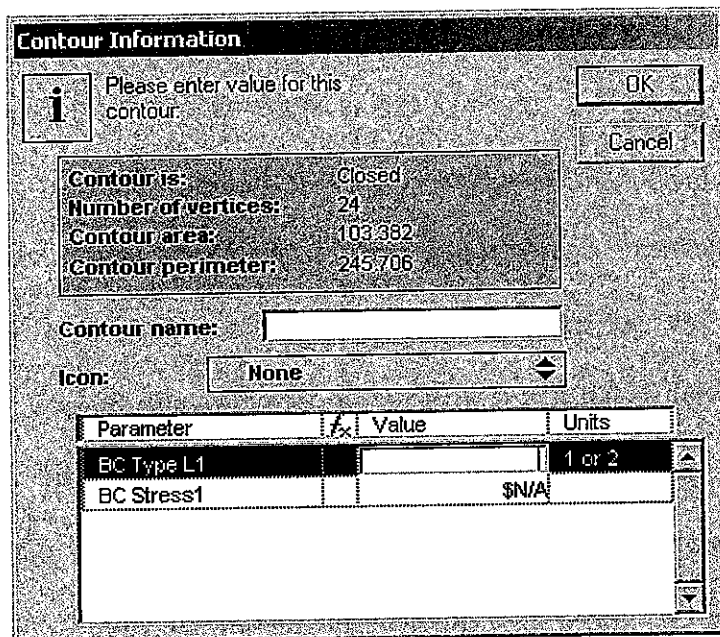
Στο layer PTC Domain Outline εισάγονται και οι θέσεις των αντλητικών γεωτρήσεων, που υπάρχουν εντός της περιοχής μοντελοποίησης. Οι θέσεις αντιγράφονται από το Layer BC Flow L1, όπως θα παρουσιαστεί σε παρακάτω ενότητα .

VI. Ορισμός οριακών συνθηκών

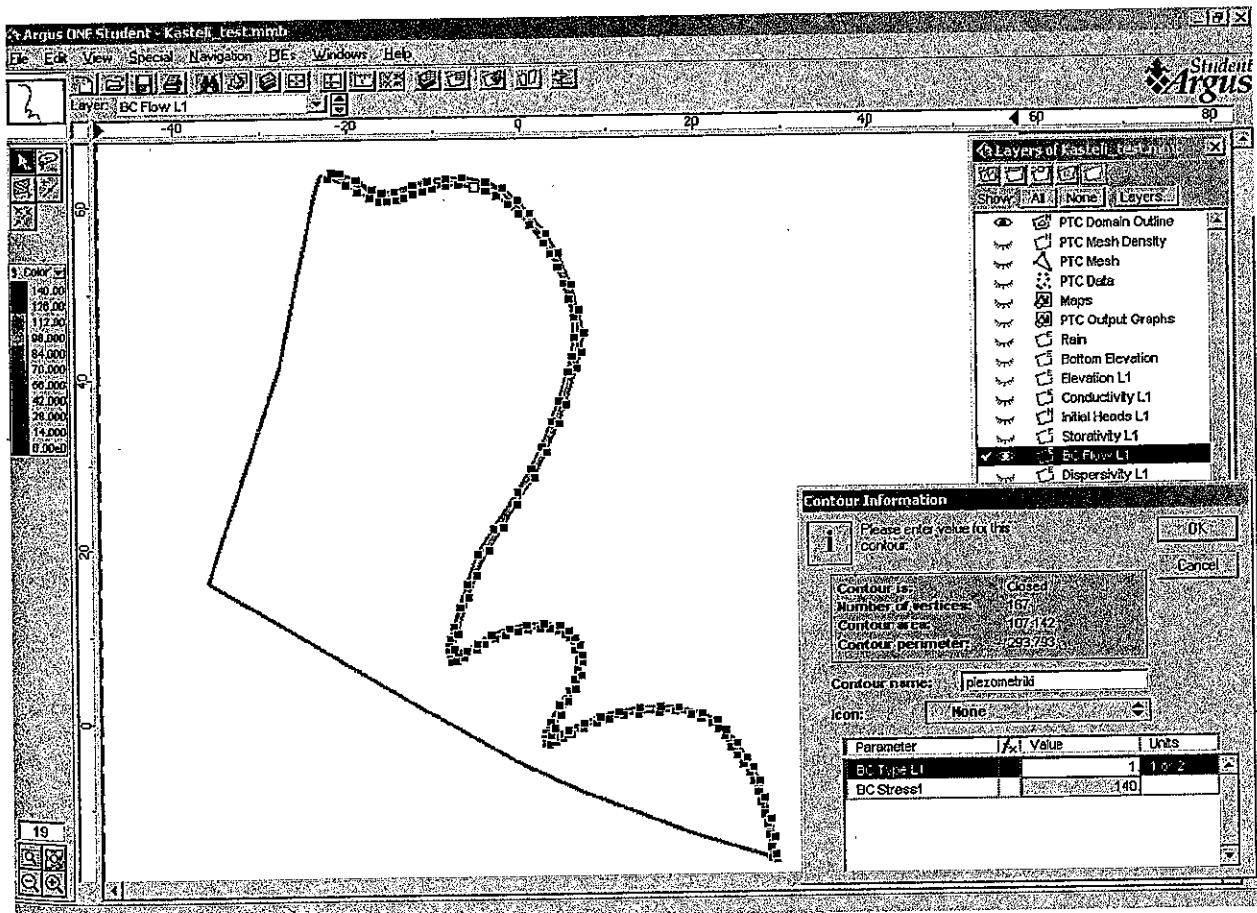
Περιμετρικά της περιοχής μελέτης προσδιορίσθηκαν οι εξής οριακές συνθήκες:

- καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Dirichlet conditions), κατά μήκος της πιεζομετρικής καμπύλης με υδραυλικό ύψος 140 m. Ο λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη καμπύλη είναι γιατί η τιμή του υδραυλικού ύψους δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις αντλήσεις που πραγματοποιούνται στις γειτονικές γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης. Ο κωδικός εισαγωγής αυτής της συνθήκης στο μοντέλο P.T.C. είναι το 1.
- καθορισμένης ροής (Neumann conditions), κατά μήκος του κανονικού ρήγματος, με σταθερή ροή c. Ο κωδικός εισαγωγής αυτής της συνθήκης στο μοντέλο P.T.C. είναι το 2.

Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου αποτυπώνονται στο layer BC Flow L1, με βάση τα όρια της περιοχής, όπως απεικονίζονται στο layer PTC Domain Outline. Έχοντας ενεργό το layer BC Flow L1, κατασκευάζονται με το εργαλείο Geographic tool (σχήμα 3.9), κλειστές πολυγωνικές γραμμές, γύρω από την πιεζομετρική καμπύλη και το ρήγμα αντίστοιχα. Στο παράθυρο Contour Information που εμφανίζεται στη συνέχεια (σχήμα 3.11) ορίζεται ο τύπος της οριακής συνθήκης, στο πλαίσιο BC Type L1 και στο πλαίσιο BC Stress1 εισάγεται η καθορισμένη τιμή του ορίου. Για το όριο γύρω από την πιεζομετρική καμπύλη, οι τιμές είναι 1 και 140 m για κάθε πλαίσιο αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12.

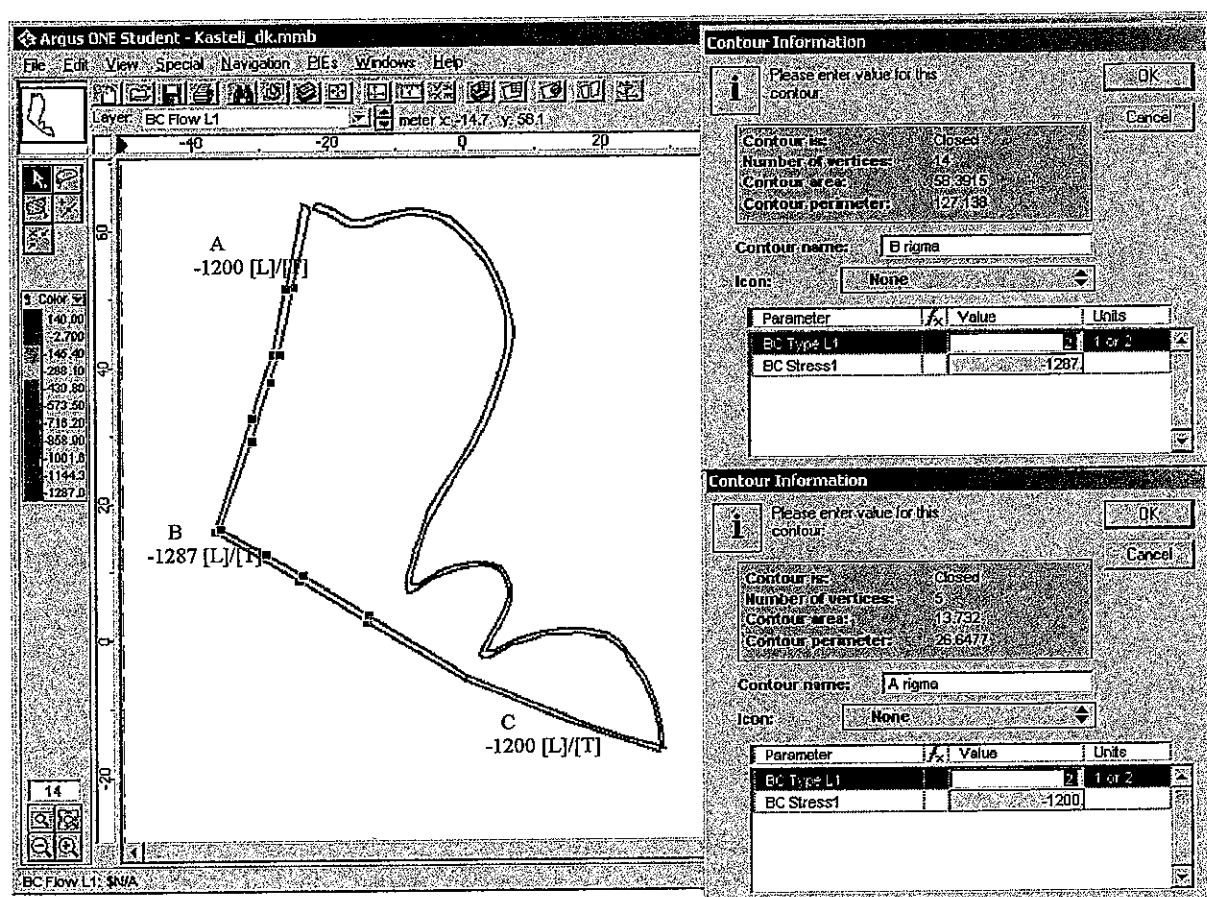


Σχήμα 3.11: Το παράθυρο Contour Information για την εισαγωγή των παραμέτρων των οριακών συνθηκών.



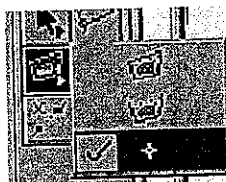
Σχήμα 3.12: Οι παράμετροι για το όριο της πιεζομετρικής γραμμής.

Για το όριο γύρω από το ρήγμα, επιλέγεται η τιμή 2 στο πλαίσιο BC Type L1. Η τιμή 2 αντιστοιχεί σε οριακή συνθήκη δευτέρου είδους, δηλαδή με σταθερή ροή. Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προέκυψε ότι η ροή δεν διατηρεί σταθερή τιμή κατά μήκος όλου του ρήγματος, με αποτέλεσμα να χωριστεί το όριο σε μικρότερες περιοχές με διαφορετική τιμή ροής. Συνολικά το ρήγμα χωρίστηκε σε τρία τμήματα (Α, Β, Γ) και οι τιμές καθορισμένης ροής q που δόθηκαν είναι: στο τμήμα Α με $q = -1200 \text{ m}^3/\text{day}$, στο τμήμα Β με $q = -1287 \text{ m}^3/\text{day}$, στο τμήμα Γ με $q = -12 \text{ m}^3/\text{day}$. Το αρνητικό πρόσημο στις τιμές του q , δηλώνει την εκροή από το φυσικό σύστημα. Καθένα τμήμα σχεδιάστηκε ξεχωριστά και ορίστηκαν οι τιμές στο παράθυρο Contour Information. Στο σχήμα 3.13 φαίνονται τα τρία τμήματα του ορίου καθώς και η τιμή της ροής που καθορίστηκε.



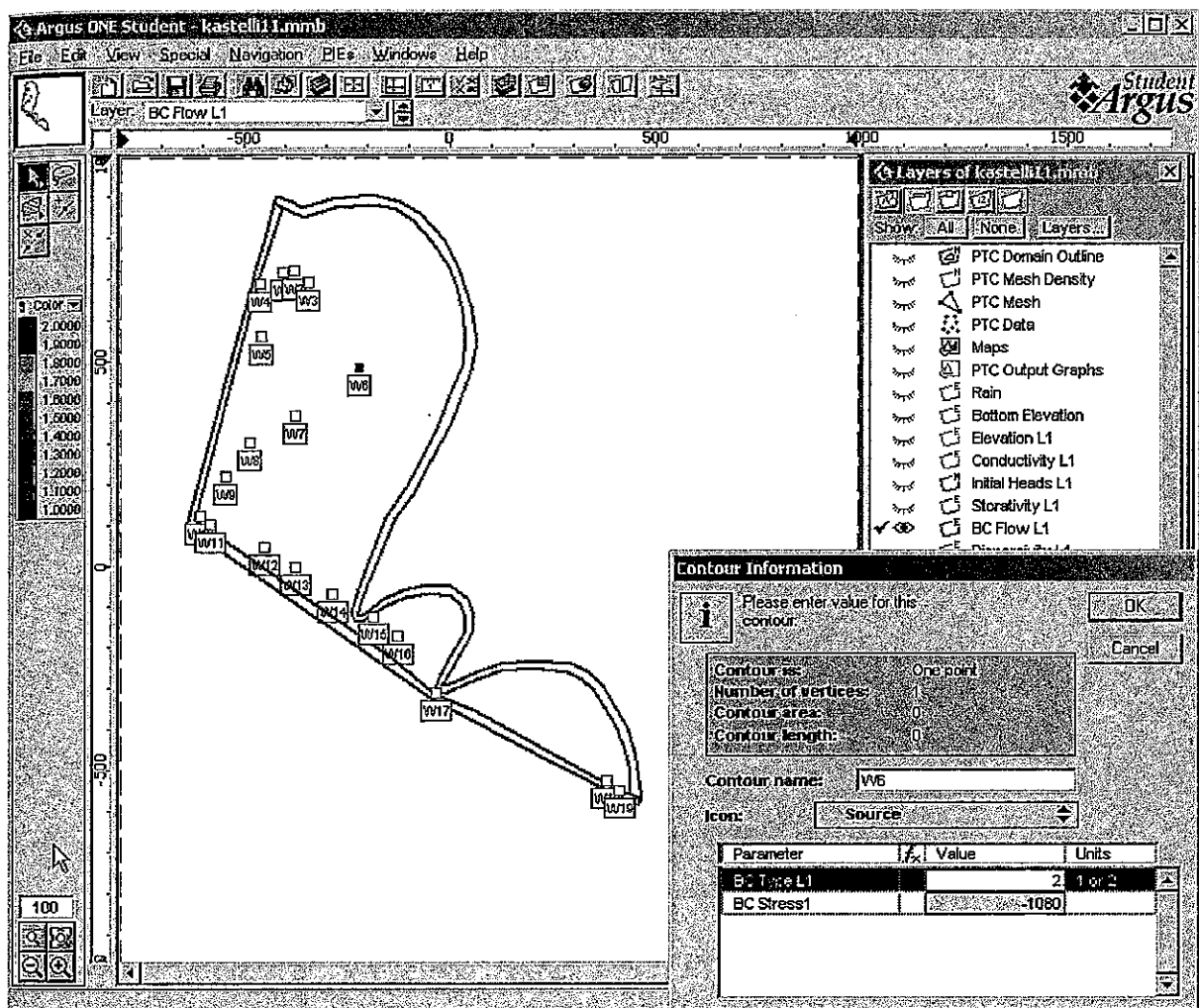
Σχήμα 3.13: Τα τμήματα του ορίου του ρήγματος, με τις διαφορετικές τιμές ροής q για το καθένα.

Σαν οριακές συνθήκες θεωρούνται και οι γεωτρήσεις που υπάρχουν εντός της περιοχής μοντελοποίησης και χαρακτηρίζονται με συνθήκη καθορισμένης ροής (Neumann conditions). Οι θέσεις των αντλητικών γεωτρήσεων απεικονίζονται στο χαρτογραφικό υπόβαθρο και εισάγονται μέσω του εργαλείου Geographic tool, που φαίνεται επιλεγμένο στο σχήμα 3.14. Η κάθε γεώτρηση εισάγεται σαν σημείο με την τρίτη επιλογή - Point contour - του εργαλείου Geographic tool, που φαίνεται τσεκαρισμένη στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Το εργαλείο Geographic tool και η επιλογή για την εισαγωγή σημειακών αντικειμένων.

Οι παράμετροι της συνοριακής συνθήκης ορίζονται για καθεμία γεώτρηση ξεχωριστά στο παράθυρο Contour Information του σχήματος 3.15. Στο πλαίσιο BC Type L1 επιλέγεται ο αριθμός 2 για όλες τις γεωτρήσεις. Στο πλαίσιο BC Stress1 εισάγεται ο σταθερός ρυθμός άντλησης της κάθε γεώτρησης, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 2. Τα ποσά εισάγονται με αρνητικό πρόσημο και οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι m^3/day .



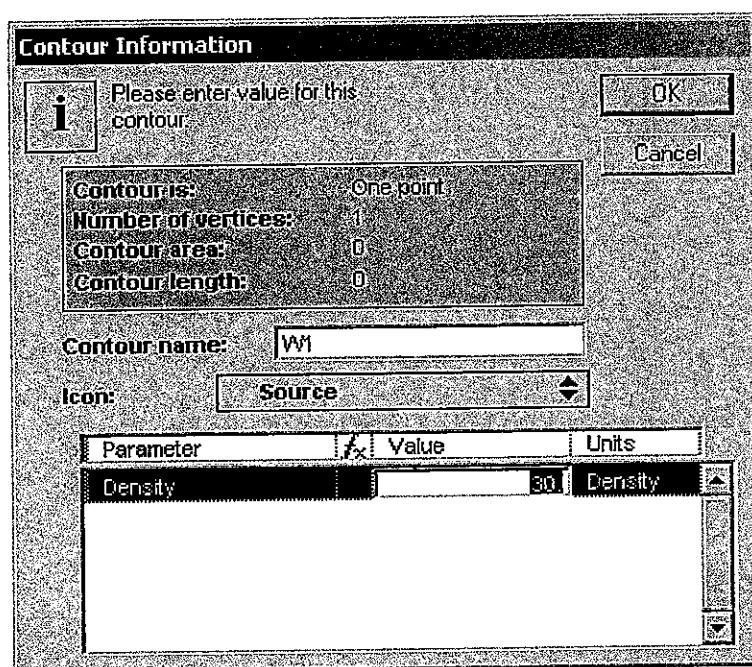
Σχήμα 3.15: Το παράθυρο Contour Information και οι παράμετροι για το όριο των γεωτρήσεων.

Οι γεωτρήσεις αφού περαστούν στο layer BC Flow L1 αντιγράφονται στο layer PTC Domain Outline. Από το ενεργό layer BC Flow L1, επιλέγονται όλες οι γεωτρήσεις, με το εργαλείο lasso, που φαίνεται στο σχήμα 3.16. Στη συνέχεια αντιγράφονται με την εντολή Edit / Copy και επικολλούνται, στο ενεργό layer PTC Domain Outline, με την εντολή Edit / Paste.



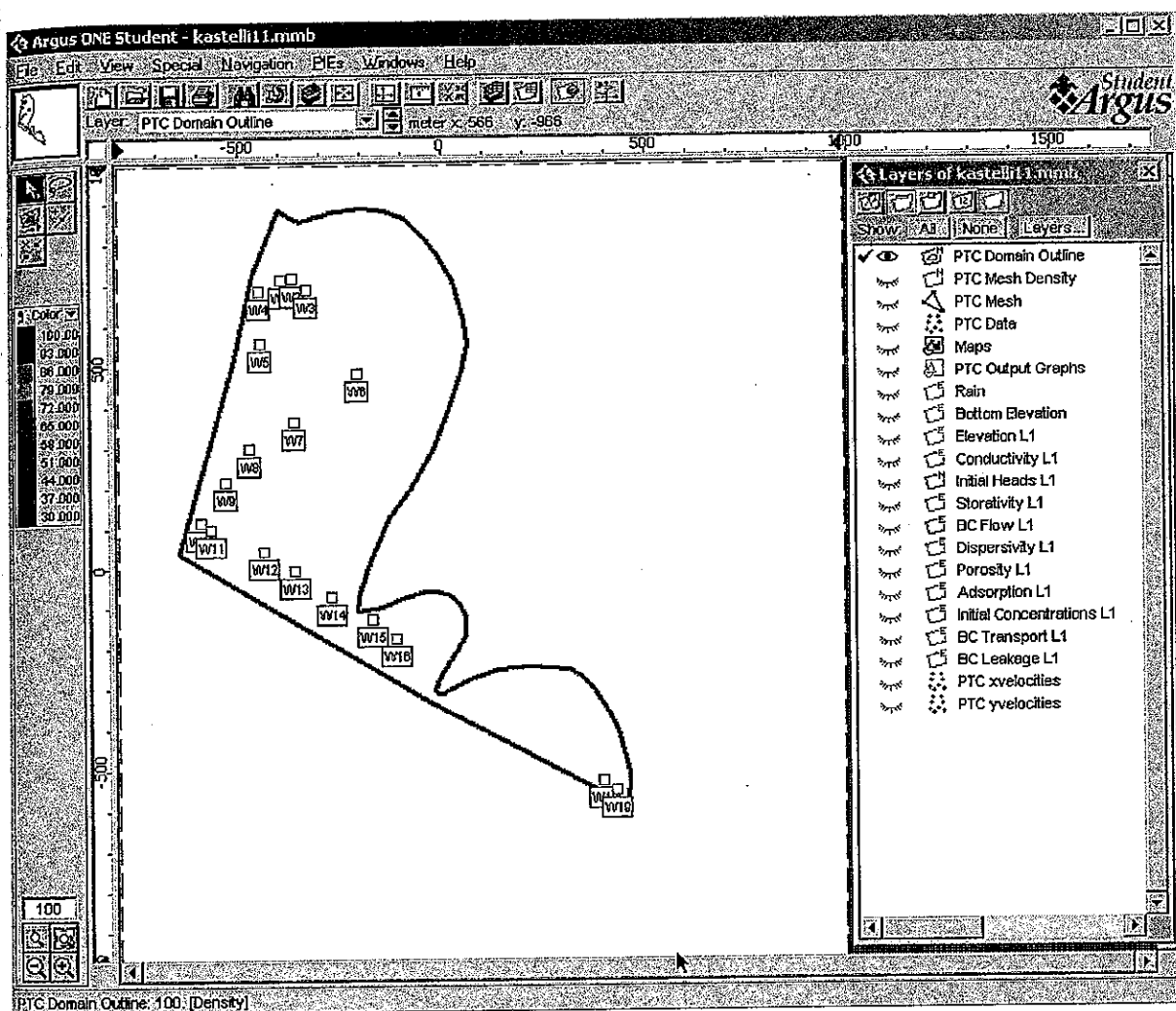
Σχήμα 3.16: Το εργαλείο lasso.

Στη συνέχεια, στο παράθυρο Contour Information (σχήμα 3.17) καθορίζεται η πυκνότητα του πλέγματος σε περιοχές γειτονικές των γεωτρήσεων. Επειδή στις περιοχές αυτές το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να είναι πυκνότερο, δίνεται η τιμή 30 στο πλαίσιο κειμένου Density όλων των σημείων – γεωτρήσεων.



Σχήμα 3.17: Το παράθυρο Contour Information για την εισαγωγή της πυκνότητας του πλέγματος σε περιοχές γειτονικές των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης.

Στο σχήμα 3.18 φαίνεται το layer PTC Domain Outline όπως διαμορφώθηκε τελικά για τη συγκεκριμένη περιοχή μοντελοποίησης.

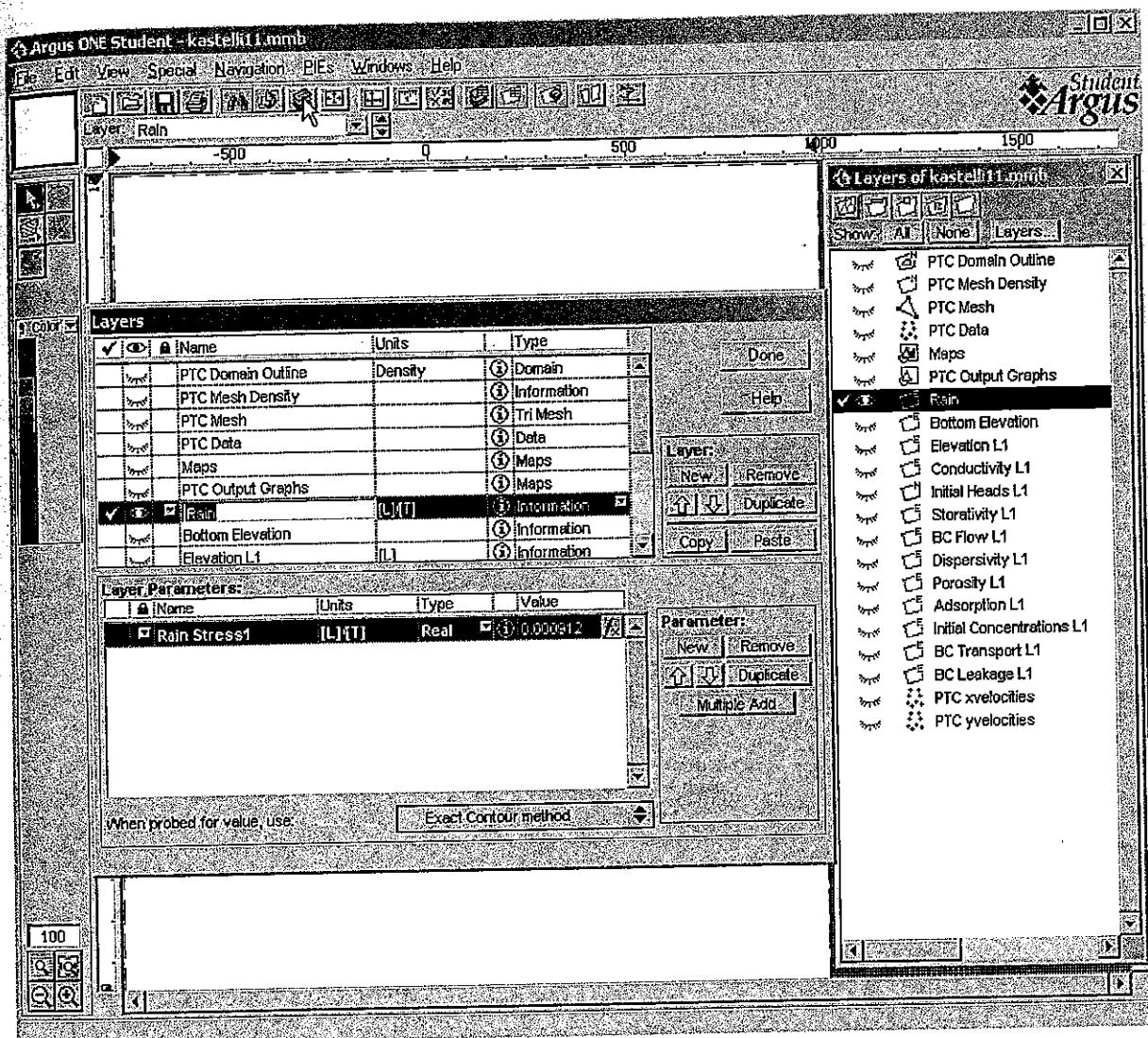


Σχήμα 3.18: Το layer PTC Domain Outline της περιοχής μοντελοποίησης.

VII. Ορισμός λοιπών φυσικών μεγεθών

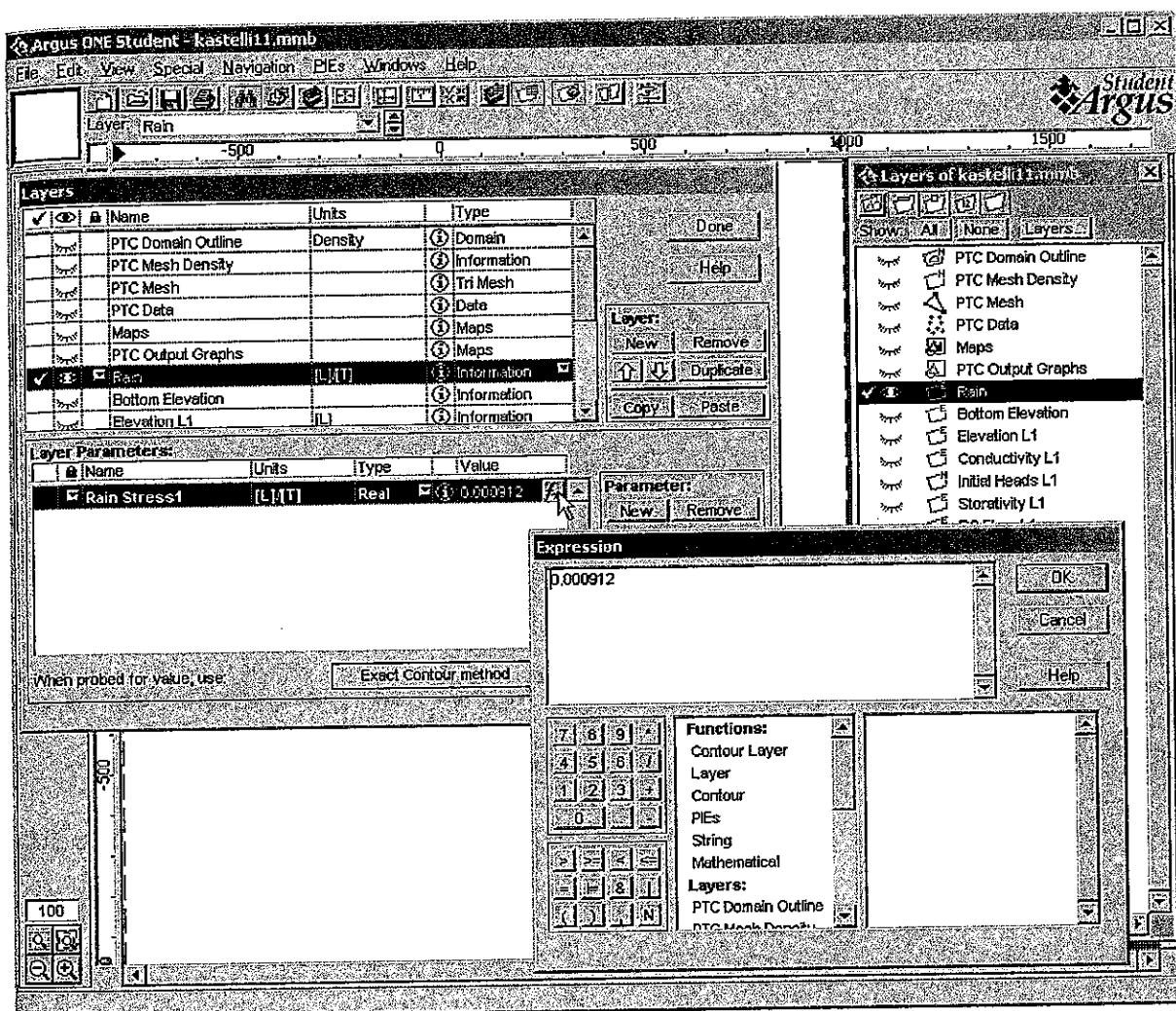
Για αυτό το στάδιο της μοντελοποίησης, τα φυσικά μεγέθη που πρέπει να ορισθούν ακόμη είναι: ο ρυθμός διήθησης των κατακρημνισμάτων, το υψόμετρο του πυθμένα, το υψόμετρο στρώματος, η υδραυλική αγωγιμότητα και οι αρχικές τιμές του υδραυλικού ύψους.

Ο τρόπος ορισμού είναι κοινός για όλα τα μεγέθη και γίνεται μέσα από το παράθυρο διαχείρισης των Layers, που φαίνεται στο σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19: Το παράθυρο Layers.

Οι ζητούμενες τιμές για κάθε μέγεθος, αναγράφονται στη στήλη Value, του πλαισίου Layer parameters. Για την εισαγωγή των τιμών ενεργοποιείται το παράθυρο Expression (σχήμα 3.20), από το κουμπί f_x της στήλης Value.



Σχήμα 3.20: Το παράθυρο Expression.

Στη συνέχεια δίνονται πληροφορίες για κάθε μέγεθος και για τους παραμέτρους του.

➤ Βροχόπτωση (Rain)

Σαν βροχόπτωση θεωρείται ο ρυθμός διήθησης της βροχόπτωσης, με μονάδες μέτρησης m/day. Το ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στο σταθμό Καστελίου, που βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης, είναι 700 mm. Κατά συνέπεια ο μέσος ρυθμός βροχόπτωσης είναι 0,0019 m/day. Ο μέσος συντελεστής διήθησης για τους πλακώδεις ασβεστόλιθους του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη, έχει υπολογισθεί 50%, με τη μέθοδο των ιχνηθετήσεων.

Πιστεύεται¹ όμως ότι στην περιοχή μελέτης, ο συντελεστής αυτός είναι ελάχιστα μικρότερος, και εκτιμάται περίπου στο 48%. Με βάση τα στοιχεία αυτά, η τιμή του ρυθμού διήθησης είναι ίση με 0,000912 m/day.

➤ Υψόμετρο πυθμένα (Bottom elevation)

Σαν υψόμετρο πυθμένα θεωρείται το υψόμετρο του επιπέδου αναφοράς για τον υπολογισμό του πάχους των σχηματισμών και των υδραυλικών υψών. Σαν επίπεδο αναφοράς για το μοντέλο καθορίστηκε το επίπεδο της μέσης στάθμης της θάλασσας, με υψόμετρο 0.

➤ Υψόμετρο στρώματος (Elevation L1)

Σαν υψόμετρο στρώματος θεωρείται το πάχος του γεωλογικού σχηματισμού των πλακωδών ασβεστόλιθων, που συνιστούν τον υπό μελέτη υδροφορέα. Το πάχος αυτό δίνεται σε συνάρτηση με το επίπεδο αναφοράς του μοντέλου. Στην περιοχή μελέτης, δεν υπάρχουν μετρήσεις για το πάχος των ασβεστόλιθων. Σύμφωνα όμως με πληροφορίες², το μέσο πάχος τους είναι περίπου 1200 m.

➤ Υδραυλική αγωγιμότητα (Conductivity L1)

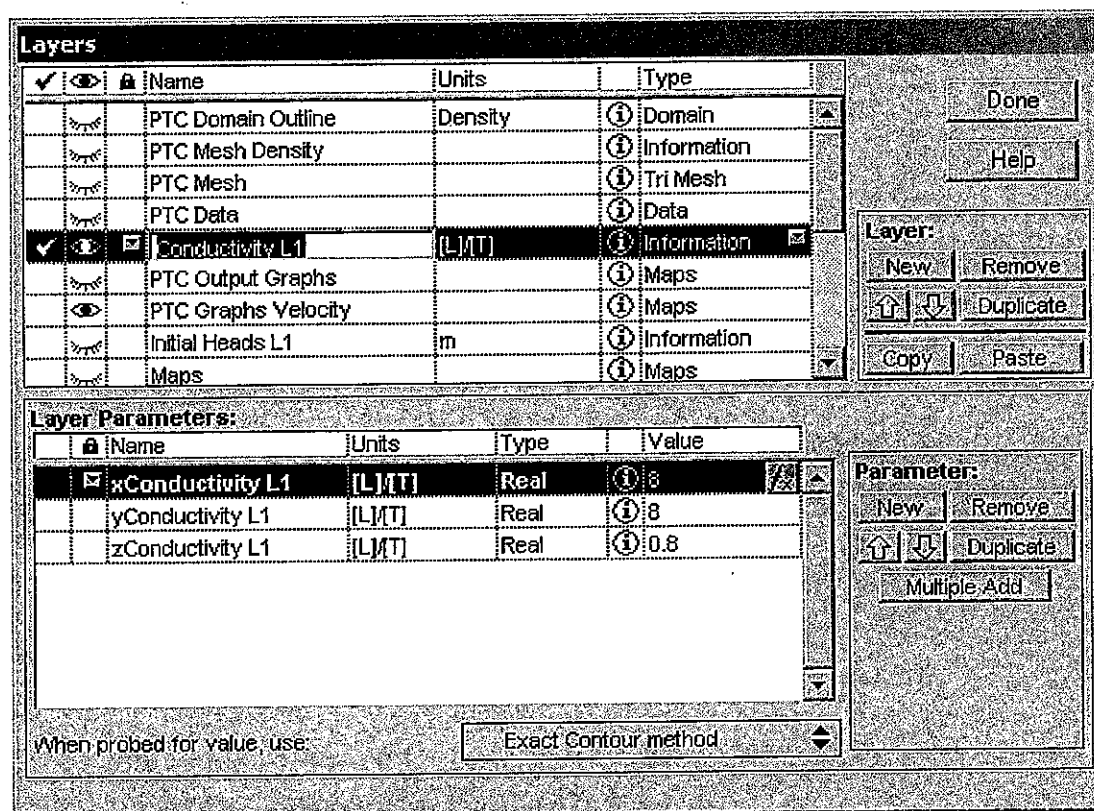
Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας k στους πλακώδεις ασβεστόλιθους της περιοχής μελέτης κυμαίνεται από $2,77 \cdot 10^{-5}$ m/sec έως $9,24 \cdot 10^{-5}$ m/sec ή σύμφωνα με τις καθορισμένες μονάδες του μοντέλου από 2,4 m/day έως 8,0 m/day. Για τους υπολογισμούς του μοντέλου P.T.C., απαιτείται η γνώση της υδραυλικής αγωγιμότητας ως προς τους τρεις άξονες κίνησης του υπογείου νερού. Επειδή δεν υπάρχουν τέτοιες πληροφορίες για το υπό

¹ Σύμφωνα με προφορικές πληροφορίες, της κας Πολυχρονάκη Ανδριαννής, υδρογεωλόγου του Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Ηρακλείου.

² Προφορικές πληροφορίες από τον κο Μονόπωλη, Αν. Καθηγητή του τμήματος ΜΗΧ.Ο.Π του Πολυτεχνείου Κρήτης

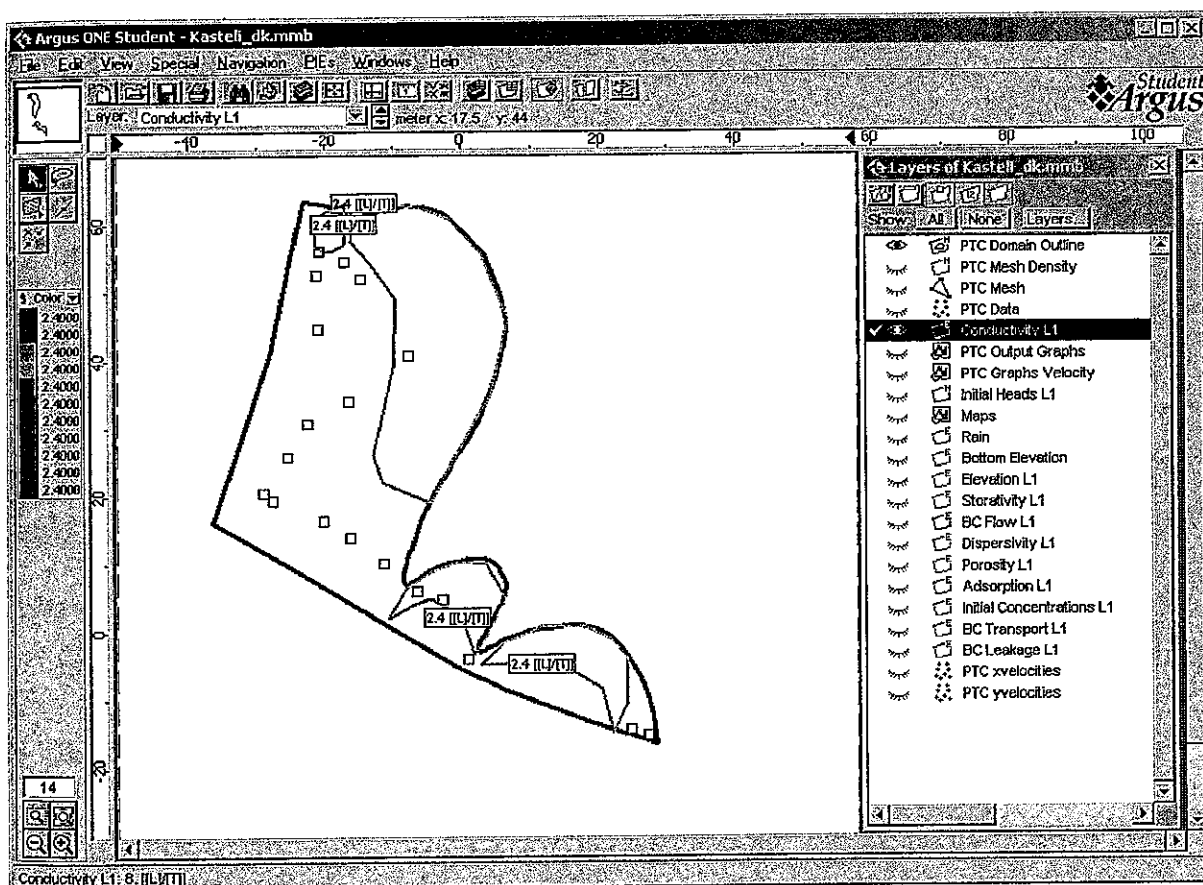
μελέτη σύστημα, έγιναν οι εξής παραδοχές: θεωρήθηκε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα ως προς τους άξονες X,Y έχει την ίδια τιμή, η οποία είναι ίση με την τιμή του μέσου συντελεστή k , δηλαδή $k = k_x = k_y$. Επίσης θεωρήθηκε ότι κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι δέκα φορές μικρότερη της τιμής των άλλων αξόνων, δηλαδή $k_z = 0,1k_x$.

Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προέκυψε ότι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας δεν παρουσιάζει σταθερή τιμή σε όλη την έκταση του υπό μελέτη υδροφορέα. Για αυτό το λόγο καθορίστηκε μια τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας για ολόκληρη την έκταση του υδροφορέα και ορίστηκαν, εντός αυτής, περιοχές με διαφορετικό συντελεστή k . Συγκεκριμένα, για όλο τον υδροφορέα δόθηκαν οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας $k_x = k_y = 8,0 \text{ m/day}$ και $k_z = 0,8 \text{ m/day}$. Οι τιμές αυτές ορίστηκαν στο παράθυρο διαχείρισης των layers, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Οι τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας για ολόκληρη την έκταση της περιοχής μελέτης.

Από τη βαθμονόμηση του μοντέλου προέκυψαν οι περιοχές με το διαφορετικό συντελεστή k . Οι περιοχές ορίσθηκαν με την επιλογή Closed contours του εργαλείου Geographic tool και φαίνονται στο σχήμα 3.22. Στις περιοχές αυτές δόθηκαν οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας $k_x = k_y = 2,4 \text{ m/day}$ και $k_z = 0,24 \text{ m/day}$ στο παράθυρο διαχείρισης των layers.

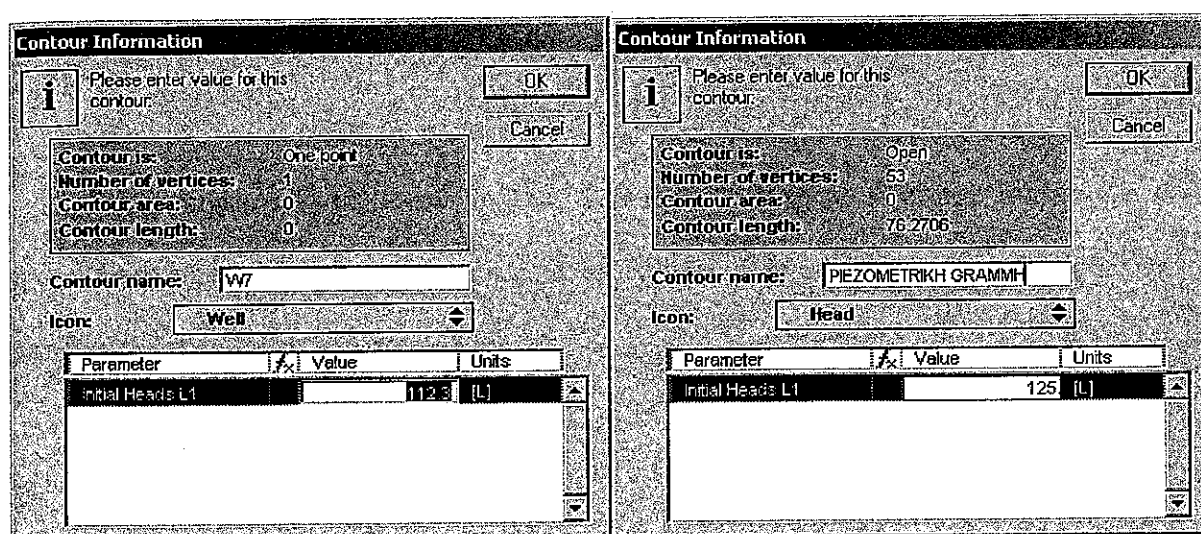


Σχήμα 3.22: Οι περιοχές με μικρότερο συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

➤ Αρχικές τιμές υδραυλικού ύψους (Initial heads L1)

Σαν αρχικές τιμές υδραυλικού ύψους θεωρούνται όλες οι θέσεις με γνωστό υδραυλικό ύψος είτε από μετρήσεις στάθμης γεωτρήσεων είτε από πιεζομετρικούς χάρτες. Οι θέσεις

αυτές εισάγονται στο ενεργό layer Initial heads L1, με βάση το αρχικό χαρτογραφικό υπόβαθρο. Με το εργαλείο Geographic tool, αποτυπώνονται σαν σημεία, οι γεωτρήσεις και σαν ανοικτές πολυγωνικές γραμμές, οι πιεζομετρικές γραμμές. Τα υδραυλικά ύψη των γεωτρήσεων, φαίνονται στον πίνακα 2 και η πιεζομετρία φαίνεται στο σχήμα 2.4. Οι τιμές τους εισάγονται στο πλαίσιο Initial heads L1 του παραθύρου, που φαίνεται στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Το παράθυρο Contour Information για την εισαγωγή των αρχικών υδραυλικών υψών, για τις γεωτρήσεις (αριστερά) και για τις πιεζομετρικές καμπύλες (δεξιά).

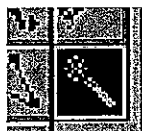
➤ Ενεργό πορώδες (Porosity L1) – Συντελεστής Εναποθήκευσης (Storativity L1)

Το ενεργό πορώδες των πλακωδών ασβεστόλιθων θεωρήθηκε ίσο με $n = 0.2$ και ίσο με τον συντελεστή εναποθήκευσης S , γιατί πρόκειται για ελεύθερο υδροφορέα.

VIII. Δημιουργία πλέγματος

Η πυκνότητα του πλέγματος έχει ορισθεί στο layer PTC Domain Outline και το σχήμα των στοιχείων έχει επιλεγθεί να είναι τριγωνικό. Έχοντας ενεργό το layer PTC Mesh και

κλικάροντας εντός της περιοχής μοντελοποίησης, με το εργαλείο Magic Wand, που φαίνεται στο σχήμα 3.24, δημιουργείται το πλέγμα και αποθηκεύεται στο layer PTC Mesh.



Σχήμα 3.24: Το εργαλείο Magic Wand.

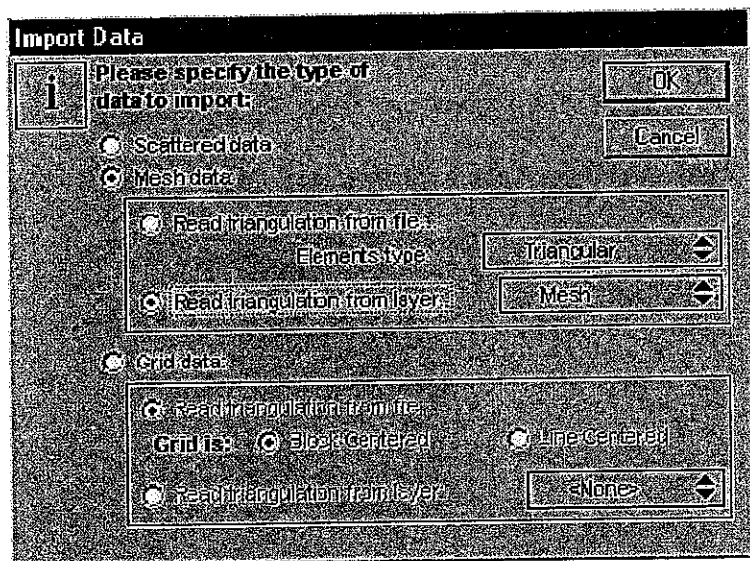
Στη συνέχεια από το μενού Special / Renumber επιλέγεται Optimize Bandwidth, ώστε η αρίθμηση των κόμβων του πλέγματος να έχει την κατάλληλη διάταξη που ελαχιστοποιεί τη υπολογιστική διάρκεια του προγράμματος.

IX. Εκτέλεση προγράμματος

Για την εκτέλεση του προγράμματος, επιλέγεται η εντολή Run PTC από το μενού PTEs. Στη συνέχεια καθορίζονται το όνομα και ο φάκελος αποθήκευσης των αποτελεσμάτων, στο παράθυρο Enter Export File name:, που εμφανίζεται.

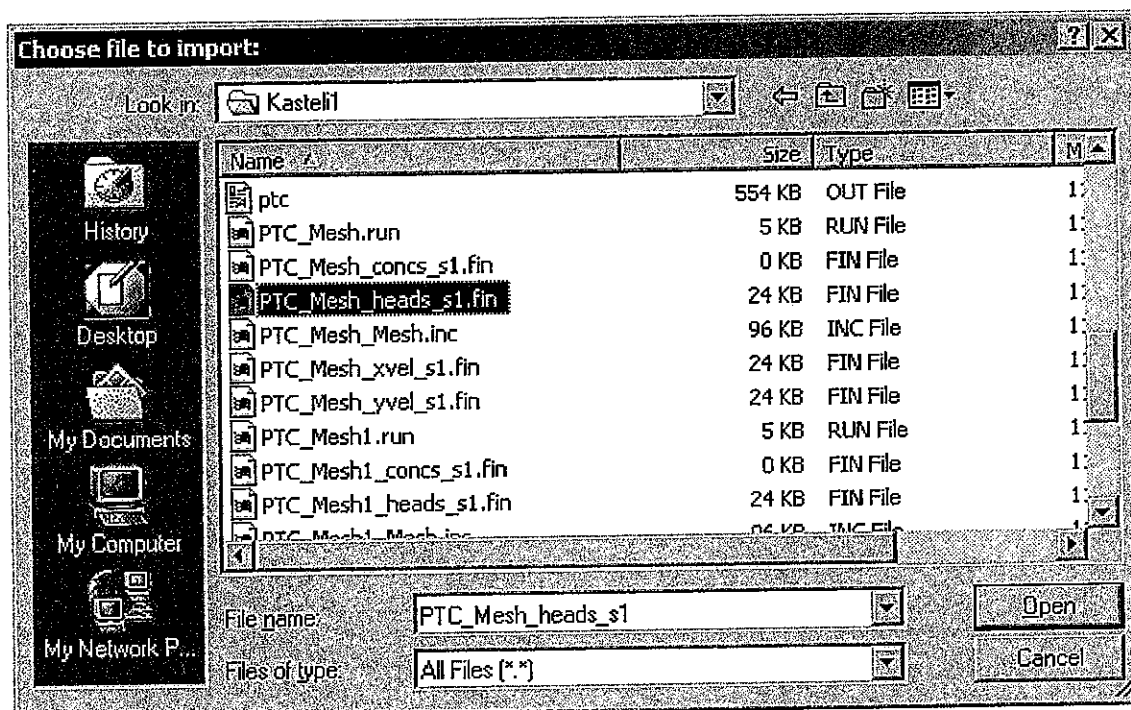
3.2 Αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή γραφημάτων, μέσα στο πρόγραμμα Argus ONE. Αρχικά τα αποτελέσματα του μοντέλου, εισάγονται στο ενεργό layer PTC Data, με την εντολή Import PTC Data από το μενού File. Στο παράθυρο Import Data επιλέγεται Mesh data και Read Triangulation from layer / PTC Mesh, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.25.



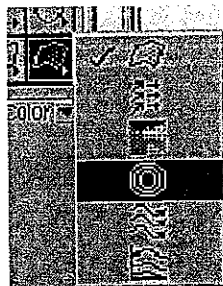
Σχήμα 3.25: Το παράθυρο Import Data.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αφορούν τα υδραυλικά ύψη, επιλέγεται το αρχείο PTC_Mesh_heads_s1.fin, στο παράθυρο Choose file to import:, που εμφανίζεται (σχήμα 3.26).



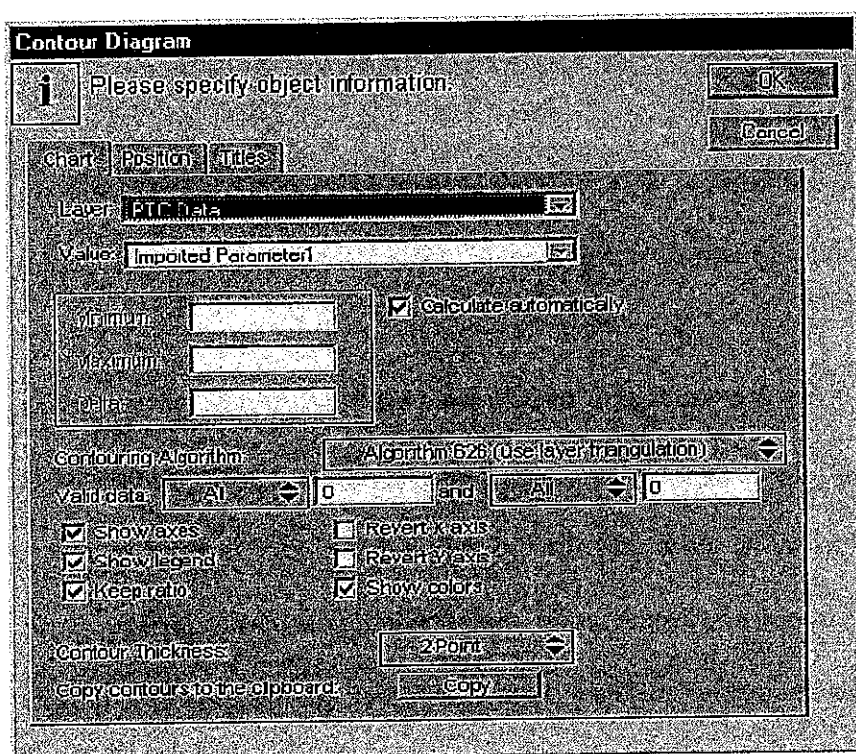
Σχήμα 3.26: Το παράθυρο Choose file to import.

Η δημιουργία των γραφημάτων, γίνεται στο ενεργό layer PTC Outline Graphs, με το εργαλείο Post – Processing tool, που φαίνεται στο σχήμα 3.27. Για την κατασκευή χάρτη ισοπιεζομετρικών καμπυλών χρησιμοποιείται η τέταρτη επιλογή Create contour map.



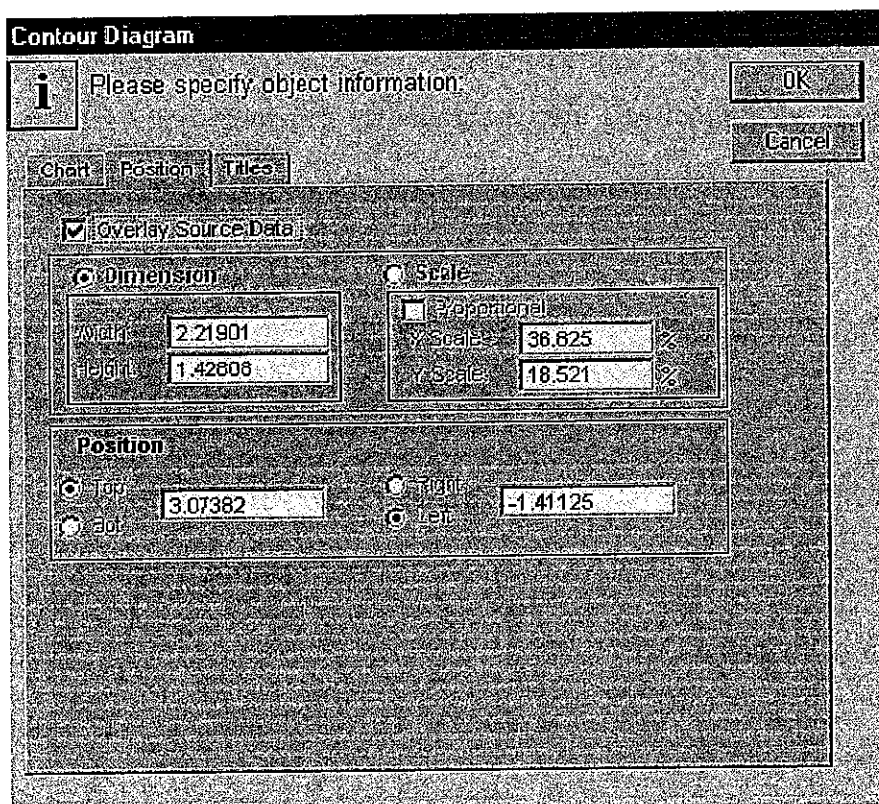
Σχήμα 3.27: Το εργαλείο Post – Processing tool και η επιλογή Create contour map.

Οι παράμετροι για την κατασκευή του χάρτη ορίζονται στο παράθυρο Contour Diagram του σχήματος 3.28. Στην καρτέλα με τίτλο Chart (σχήμα 3.28) καθορίζεται το layer PTC Data το οποίο περιέχει τις πληροφορίες για τα υδραυλικά ύψη.



Σχήμα 3.28: Το παράθυρο Contour Diagram και η καρτέλα Chart.

Στην καρτέλα με τίτλο Position (σχήμα 3.29) επιλέγεται Overlay source data, ώστε οι διαστάσεις του γραφήματος να είναι ίδιες με αυτές των layer του προγράμματος. Τέλος, στην καρτέλα Title δίνεται ο τίτλος του γραφήματος.



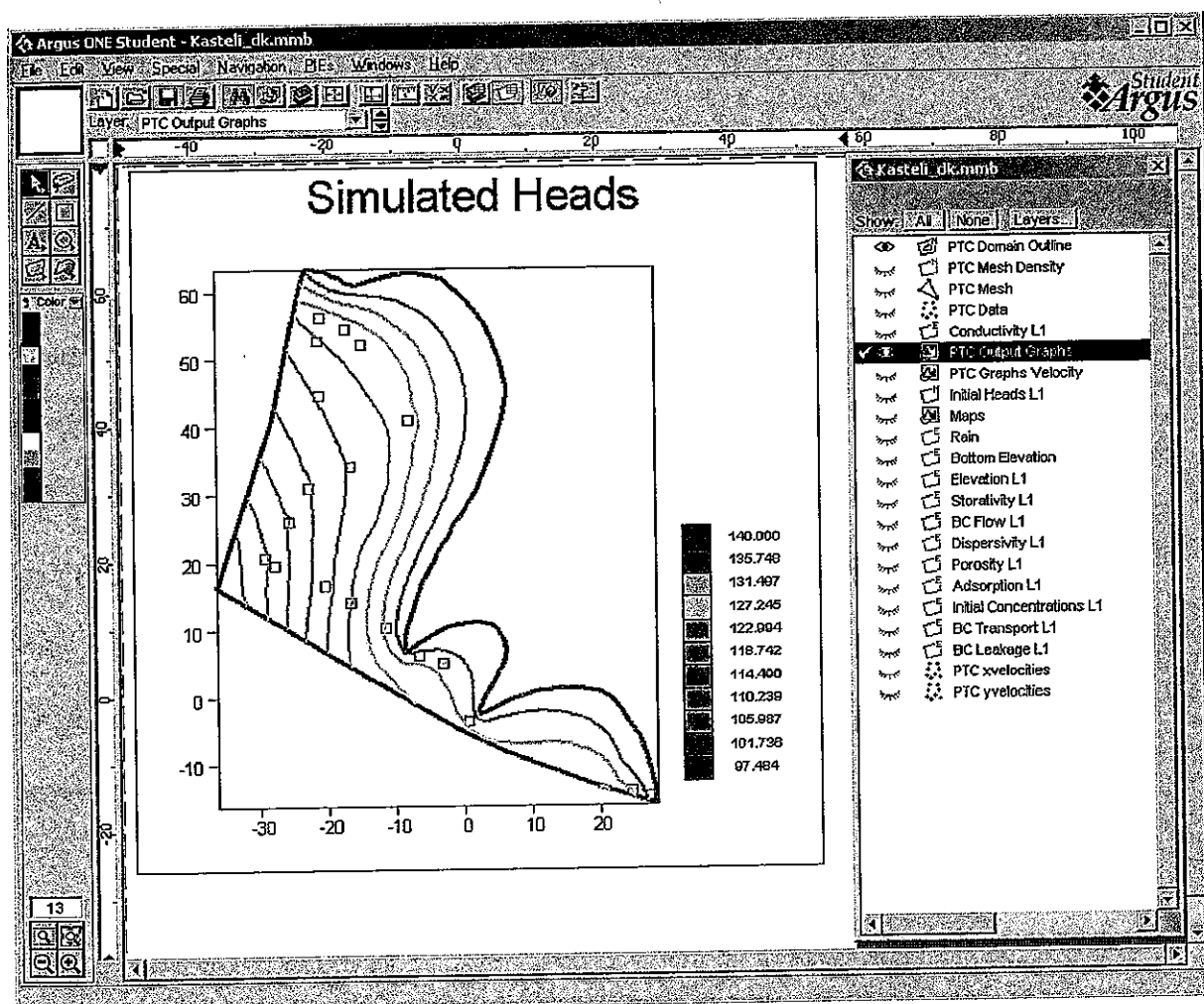
Σχήμα 3.29: Το παράθυρο Contour Diagram και η καρτέλα Position.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για τα υδραυλικά ύψη στον υπόγειο υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων παρουσιάζονται στο σχήμα 3.30. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και του βαθμού αξιοπιστίας του, υπολογίσθηκαν οι εξής στατιστικοί δείκτες: σχετικό σφάλμα (relative error), μέση ενεργός τιμή σφάλματος (R.M.S. error), μέσο σφάλμα (mean error), μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error). Ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων έγινε με βάση τα αρχικά υδραυλικά ύψη και τα υπολογιζόμενα, όπως προέκυψαν από το μοντέλο. Στο παράρτημα παρουσιάζονται οι πίνακες

με τις τιμές για τα υδραυλικά ύψη που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς του κάθε δείκτη. Οι τιμές για κάθε που υπολογίσθηκαν είναι:

- σχετικό σφάλμα 2,95%
- μέση ενεργός τιμή σφάλματος 5,22 m
- μέσο σφάλμα -0,81 m και
- μέσο απόλυτο σφάλμα 3,55 m.

Με βάση αυτές τις στατιστικές παραμέτρους που υπολογίσθηκαν, η αξιοπιστία του μοντέλου και των αποτελεσμάτων του θεωρείται αρκετά καλή.



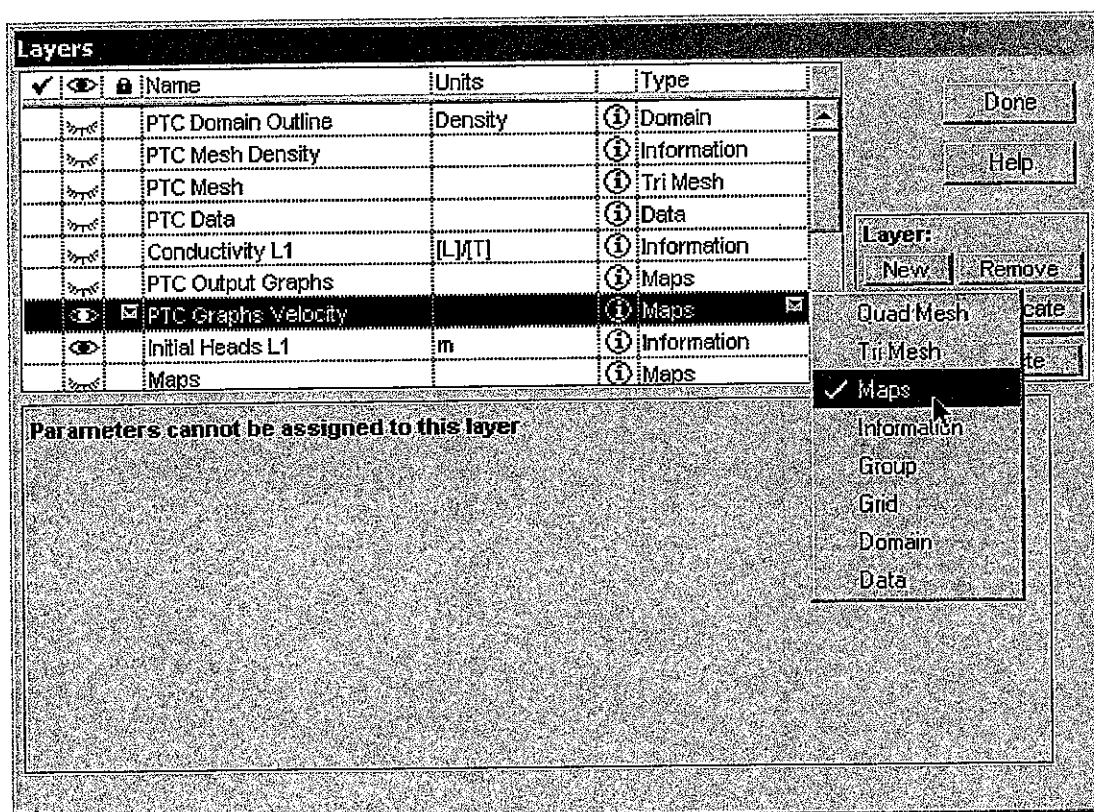
Σχήμα 3.30: Χάρτης με τα εξαγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου P.T.C. για τα υδραυλικά ύψη στον υπό μελέτη υδροφορέα.

3.3 Αποτελέσματα για την οριζόντια πραγματική ταχύτητα ροής του υπογείου νερού

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας ροής, είναι αποθηκευμένα σε διαφορετικά αρχεία. Να σημειωθεί ότι πρόκειται για την πραγματική τιμή της ταχύτητας κίνησης του υπογείου νερού. Στο αρχείο PTC_Mesh_xvel_s1.fin είναι τα αποτελέσματα της συνιστώσας U_x για τον άξονα X και στο αρχείο PTC_Mesh_yvel_s1.fin είναι τα αποτελέσματα της συνιστώσας U_y για τον άξονα Y. Από τη σύνθεση των δύο συνιστωσών υπολογίζεται η οριζόντια ταχύτητα κίνησης του υπογείου νερού.

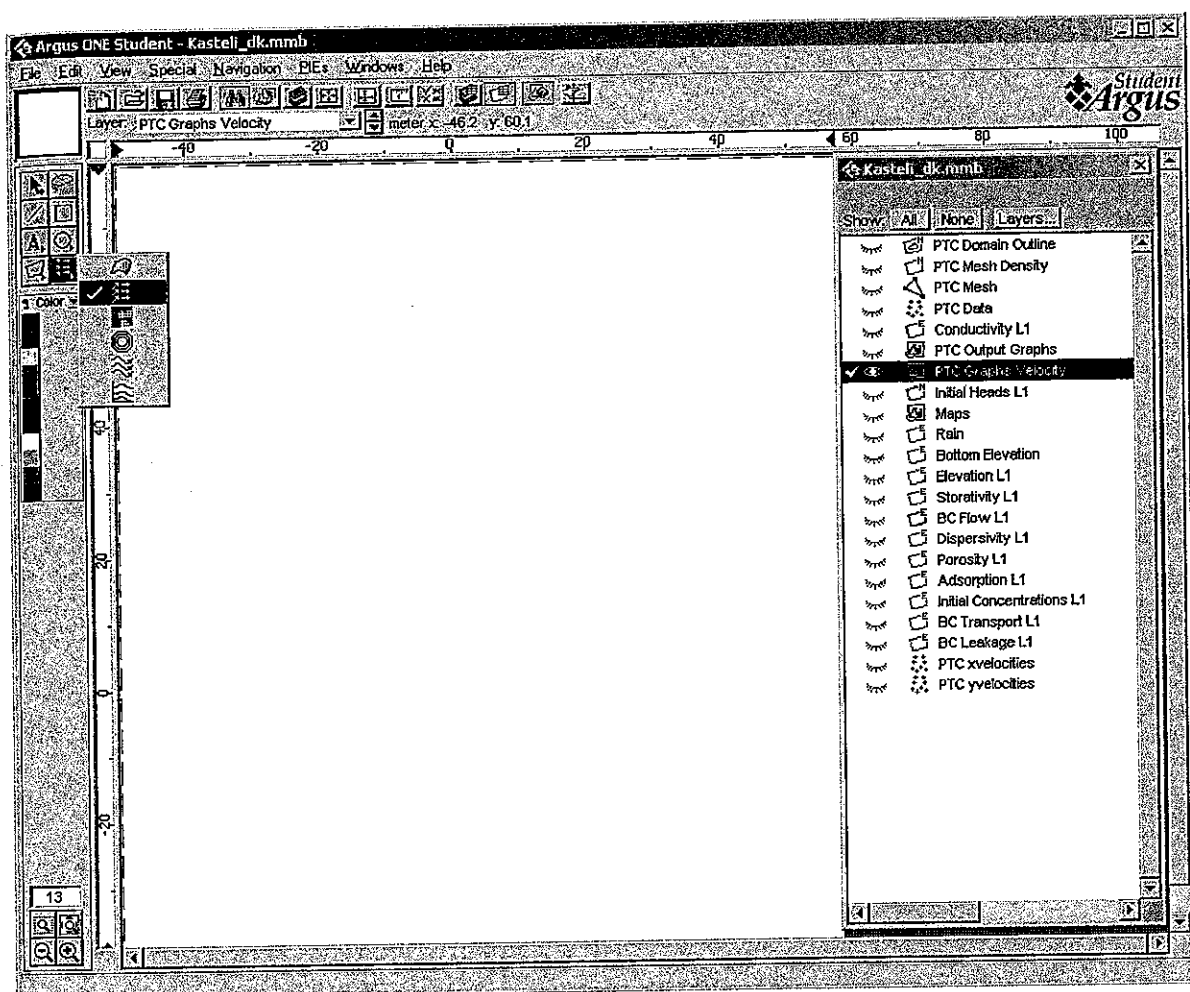
Για την εισαγωγή των αποτελεσμάτων της συνιστώσας U_x , γίνεται ενεργό το layer PTC xvelocities και επιλέγεται η εντολή Import PTC xvelocities από το μενού File. Στο παράθυρο Import Data επιλέγεται Mesh data και Read Triangulation from layer / PTC Mesh. Στη συνέχεια εμφανίζεται το παράθυρο Choose file to import, όπου επιλέγεται το αρχείο PTC_Mesh_xvel_s1.fin. Αντίστοιχα εισάγονται τα αποτελέσματα της συνιστώσας U_y , έχοντας ενεργό το layer PTC yvelocities και επιλέγοντας την εντολή Import PTC yvelocities από το μενού File. Από το παράθυρο Import Data επιλέγεται Mesh data και Read Triangulation from layer / PTC Mesh και στο παράθυρο Choose file to import, επιλέγεται το αρχείο PTC_Mesh_yvel_s1.fin.

Για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ταχύτητας ροής, εισάγεται ένα καινούργιο layer στο παράθυρο διαχείρισης των layers, με την εντολή New. Στην νέα εγγραφή που εισάγεται, καθορίζεται ο τύπος του layer να είναι Maps και ο τίτλος του, να είναι PTC Graphs Velocity, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31: Το νέο layer PTC Graphs Velocity, για την γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ταχύτητας ροής.

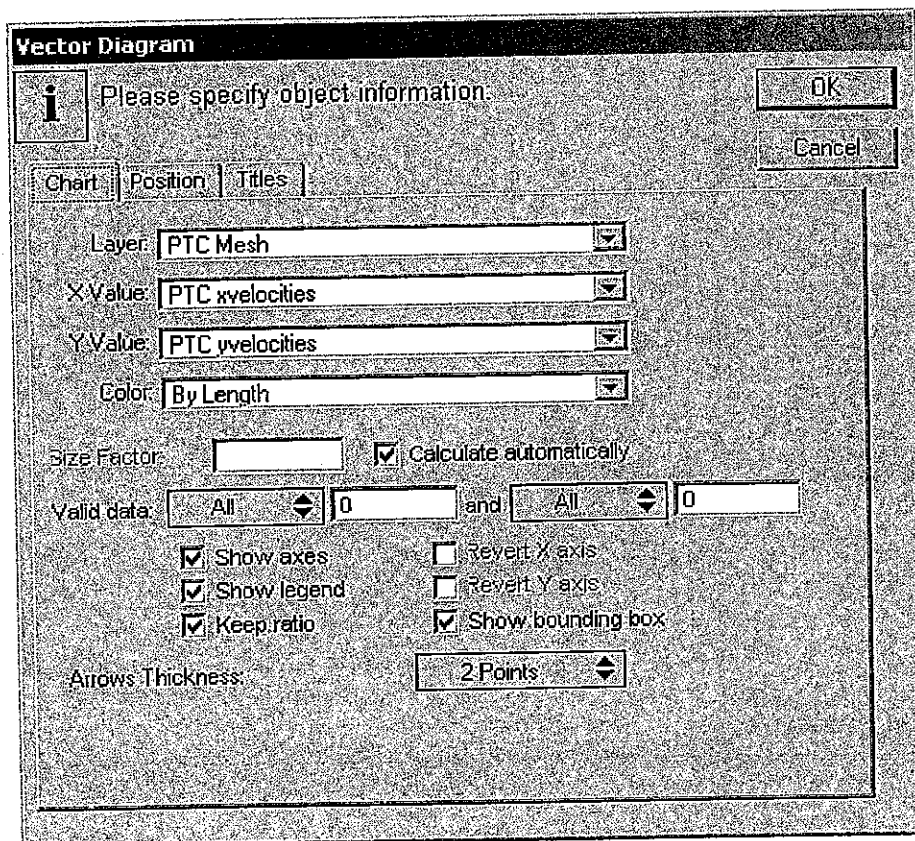
Για την απεικόνιση της ταχύτητας ροής χρησιμοποιείται ένα διανυσματικό γράφημα, όπου σε κάθε θέση η κατεύθυνση του διανύσματος συμπίπτει με της ταχύτητας ροής και το μήκος του αναλογεί με το μέτρο της. Η δημιουργία του γραφήματος, γίνεται στο ενεργό layer PTC Graphs Velocity, με το εργαλείο Post – Processing tool και τη δεύτερη επιλογή Vector diagram, που φαίνεται στο σχήμα 3.32.



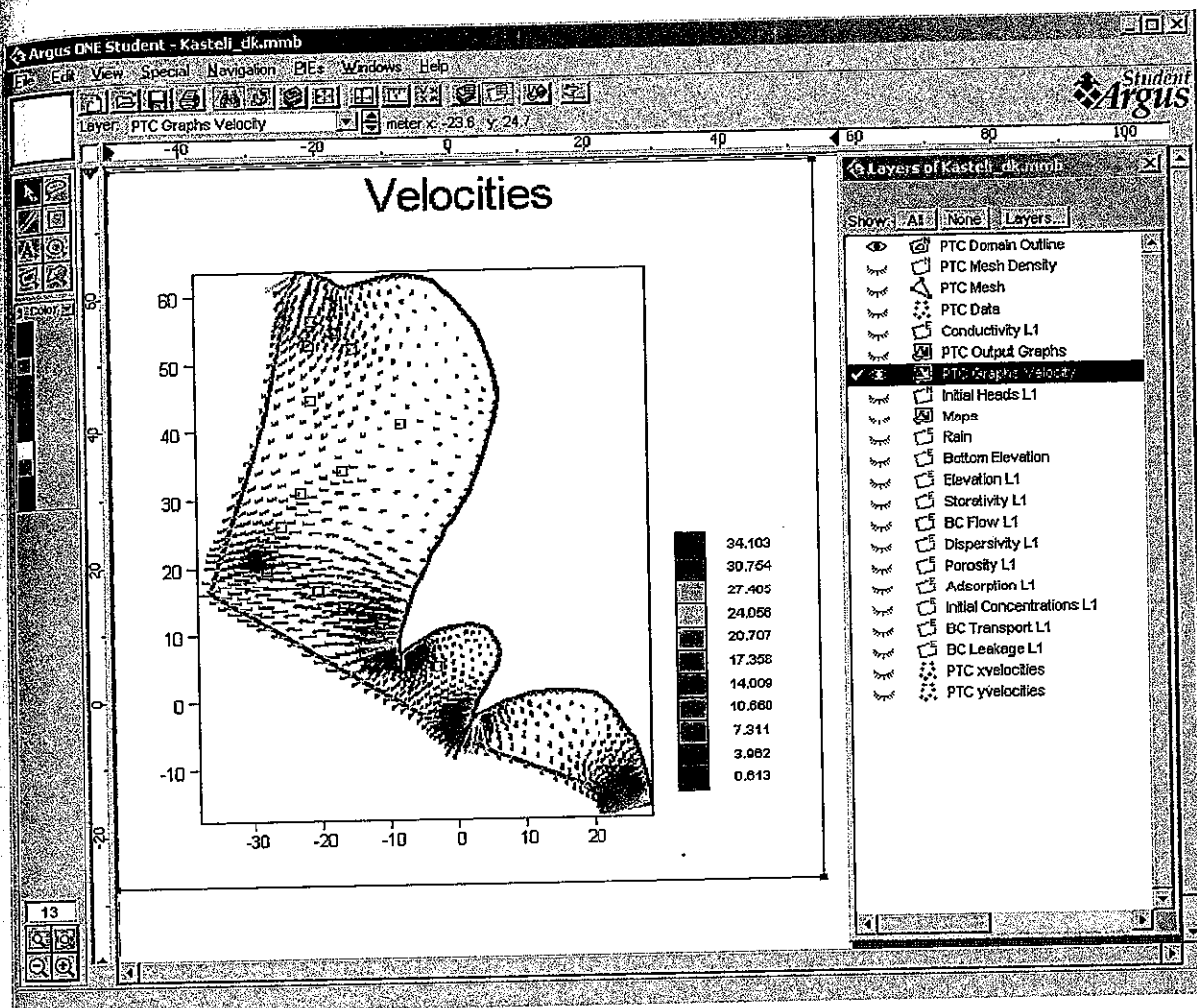
Σχήμα 3.32: Το εργαλείο Post – Processing tool και η επιλογή Vector diagram.

Οι παράμετροι για την κατασκευή του γραφήματος ορίζονται στο παράθυρο Vector Diagram του σχήματος 3.33. Στο πλαίσιο Layer της καρτέλας Chart (σχήμα 3.33) επιλέγεται το PTC Mesh, στο πλαίσιο Layer, το οποίο περιέχει πληροφορίες για τις θέσεις των κόμβων. Στο πλαίσιο X Value, επιλέγεται το layer PTC xvelocities, με πληροφορίες για τη συνιστώσα U_x , σε κάθε κόμβο και στο πλαίσιο Y Value, επιλέγεται το layer PTC yvelocities, με πληροφορίες για τη συνιστώσα U_y αντίστοιχα. Στο πλαίσιο Color επιλέγεται By Length, ώστε ο χρωματισμός του διανύσματος ταχύτητας, να γίνει με βάση το μήκος του διανύσματος, το οποίο αναλογεί με το μέτρο της οριζόντιας ταχύτητας. Τέλος στην καρτέλα Position επιλέγεται Overlay source data και στην καρτέλα Title δίνεται ο τίτλος του

γραφήματος. Τα αποτελέσματα της οριζόντιας ταχύτητας ροής του υπογείου νερού στον υπό μελέτη υδροφορέα παρουσιάζονται στο σχήμα 3.34.

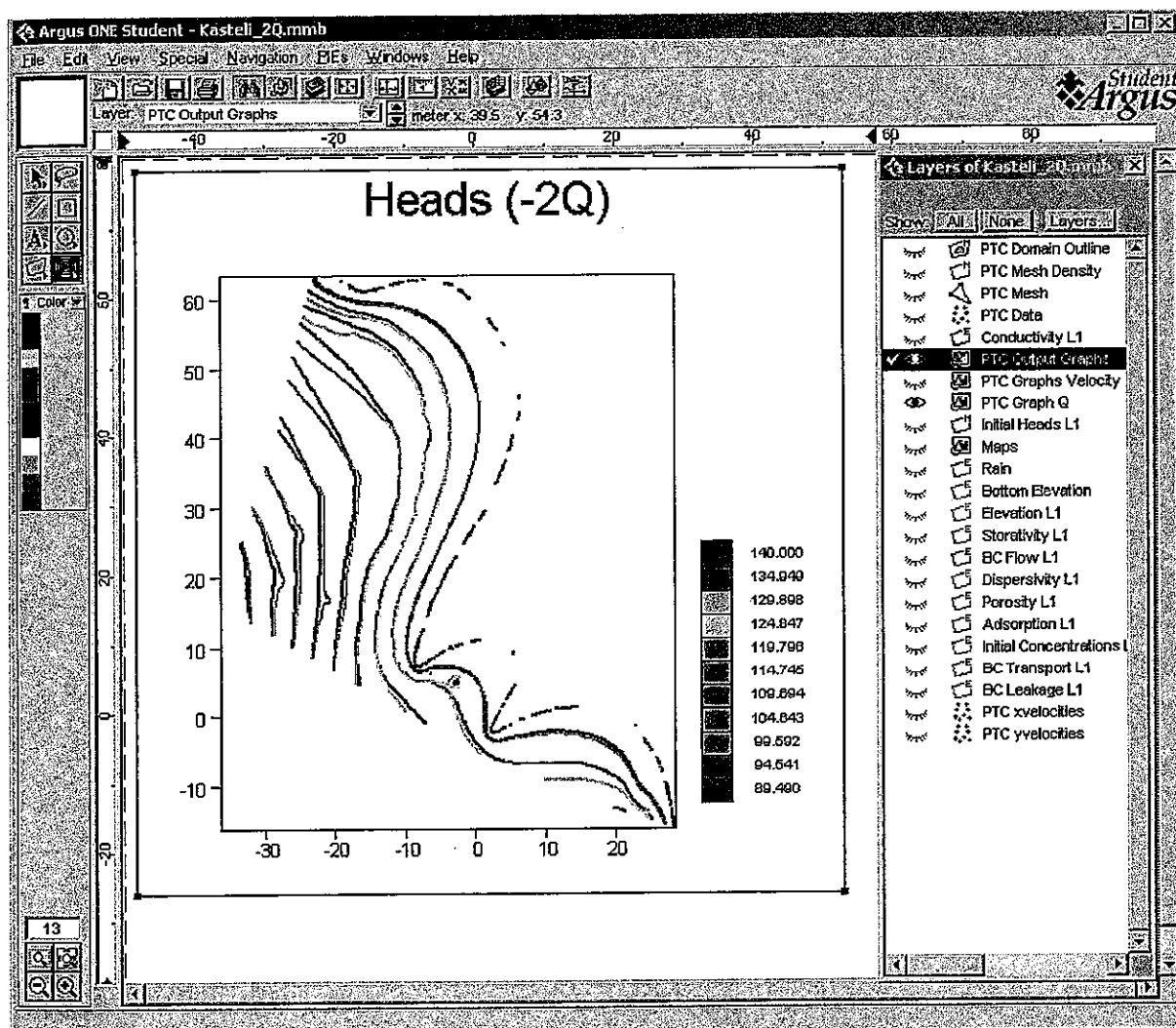


Σχήμα 3.33: Η καρτέλα Chart του παραθύρου Vector Diagram



Σχήμα 3.34: Τα αποτελέσματα της οριζόντιας πραγματικής ταχύτητας ροής του υπογείου νερού στον υπό μελέτη υδροφόρα.

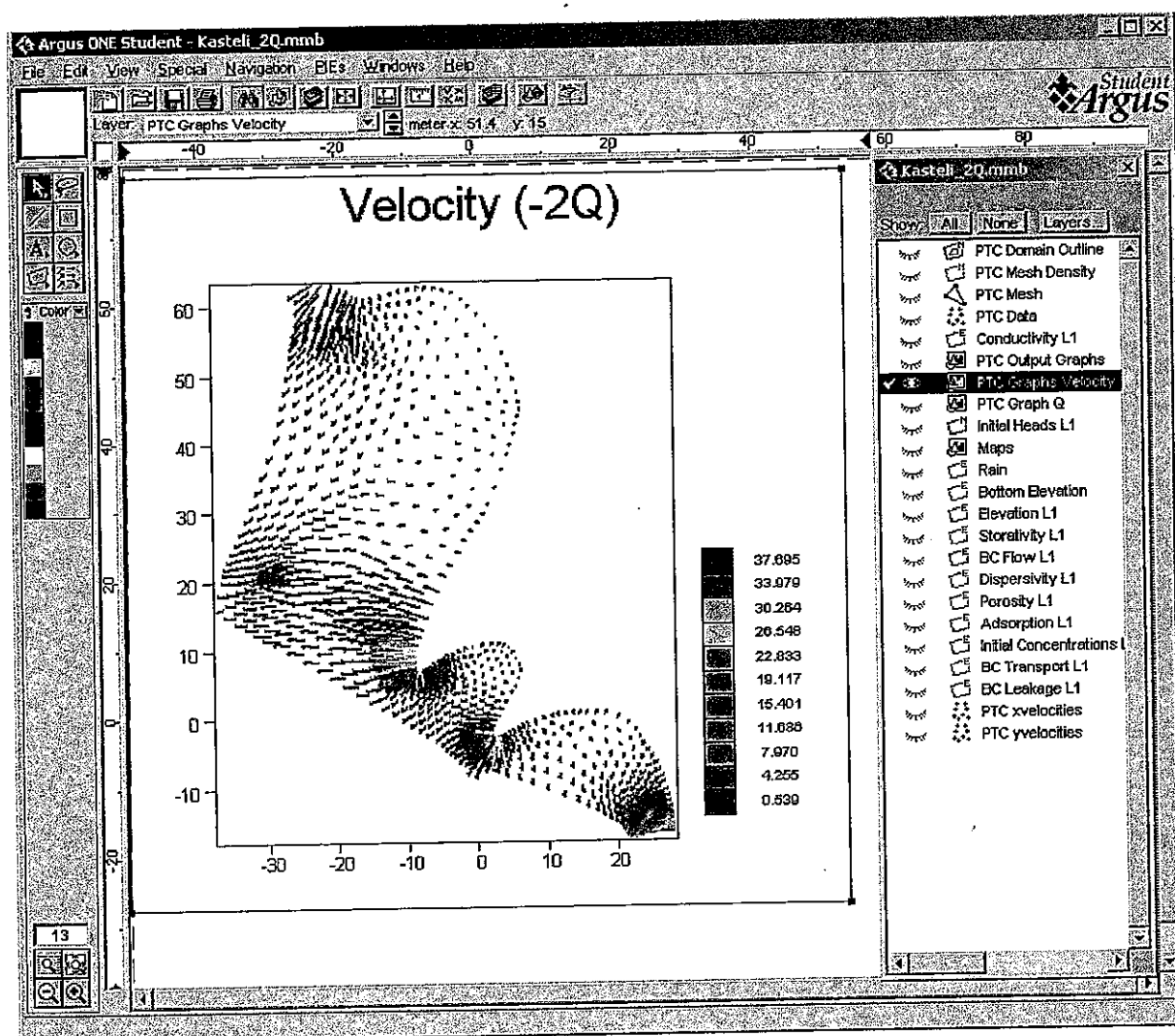
I. Διπλασιασμός της αντλούμενης παροχής στο σύνολο των γεωτρήσεων



Σχήμα 3.35: Τα υπολογιζόμενα υδραυλικά ύψη, μετά από τον διπλασιασμό της αντλούμενης παροχής.

Στην περίπτωση διπλασιασμού της αντλούμενης παροχής, η συνολική παροχή είναι $27.936 \text{ m}^3/\text{day}$. Στο σχήμα 3.35 παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα η αρχική πιεζομετρία και με διαβαθμισμένο χρώμα οι ισοδυναμικές γραμμές μετά τον διπλασιασμό της αντλούμενης παροχής (-2Q). Παρατηρείται μια μετατόπιση των ισοδυναμικών γραμμών που βρίσκονται

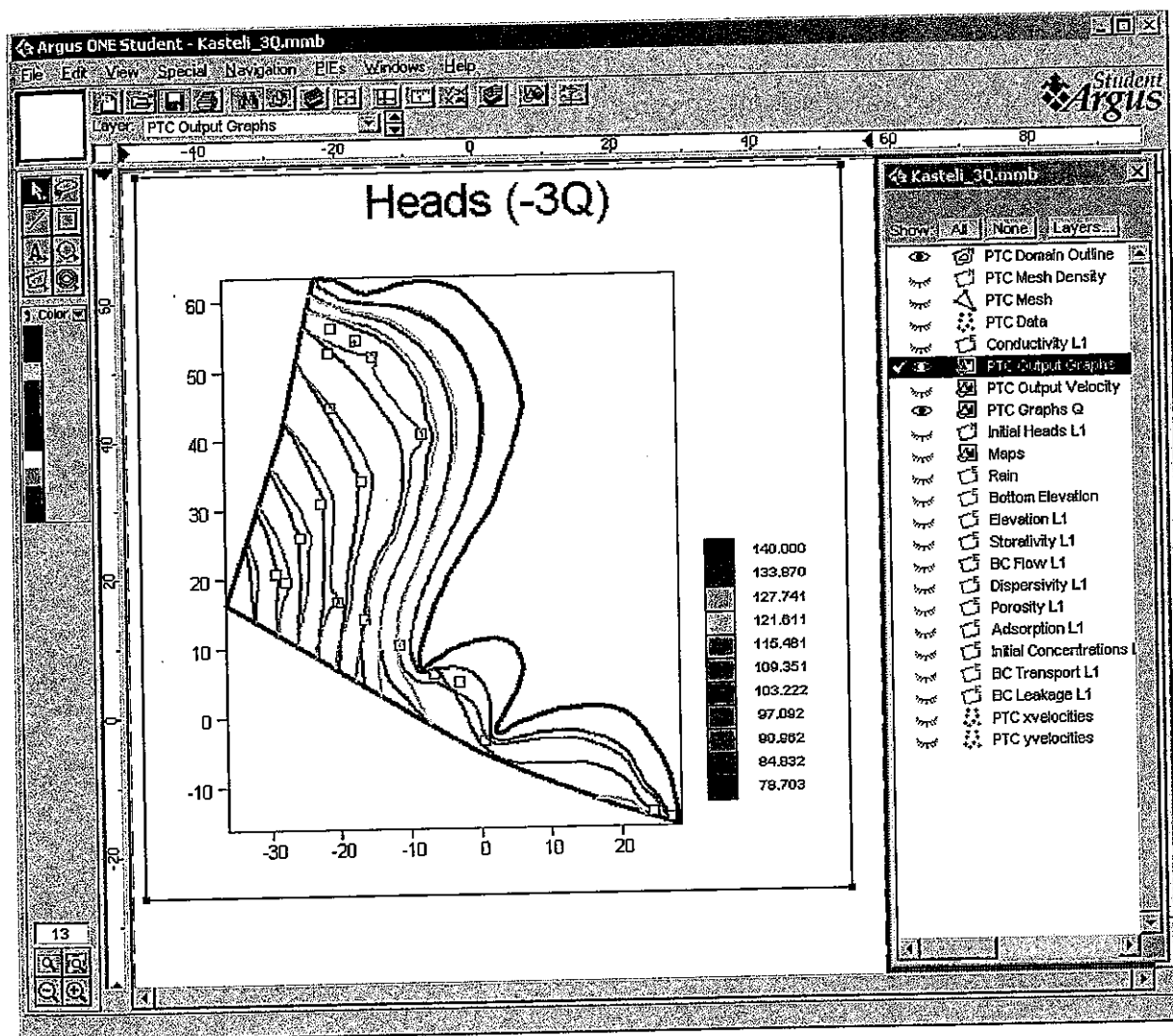
στις άκρες της περιοχής μελέτης προς το κέντρο του ρήγματος και επίσης παρατηρείται ότι η μετατόπιση είναι μεγαλύτερη όσο απομακρυνόμαστε από την ισοδυναμική γραμμή των 140 m, που έχει χαρακτηριστεί σαν οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους. Σε αυτό συμβάλλει η συγκέντρωση των γεωτρήσεων στο κέντρο της περιοχής μελέτης και κυρίως ο διπλασιασμός της αντλούμενης παροχής. Αυτός είναι και ο λόγος που παρατηρείται πτώση στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα, που κατά θέσεις φτάνει τα 8 m.



Σχήμα 3.36: Οι εκτιμήσεις για την οριζόντια ταχύτητα ροής του υπογείου νερού, στην περίπτωση διπλασιασμού της αντλούμενης παροχής των γεωτρήσεων

Στο σχήμα 3.36 παρουσιάζονται οι οριζόντιες ταχύτητες ροής, όπως διαμορφώθηκαν μετά τον διπλασιασμό της αντλούμενης παροχής. Οι ταχύτητες ροής κυμαίνονται από 0,539 m/day έως 37,695 m/day.

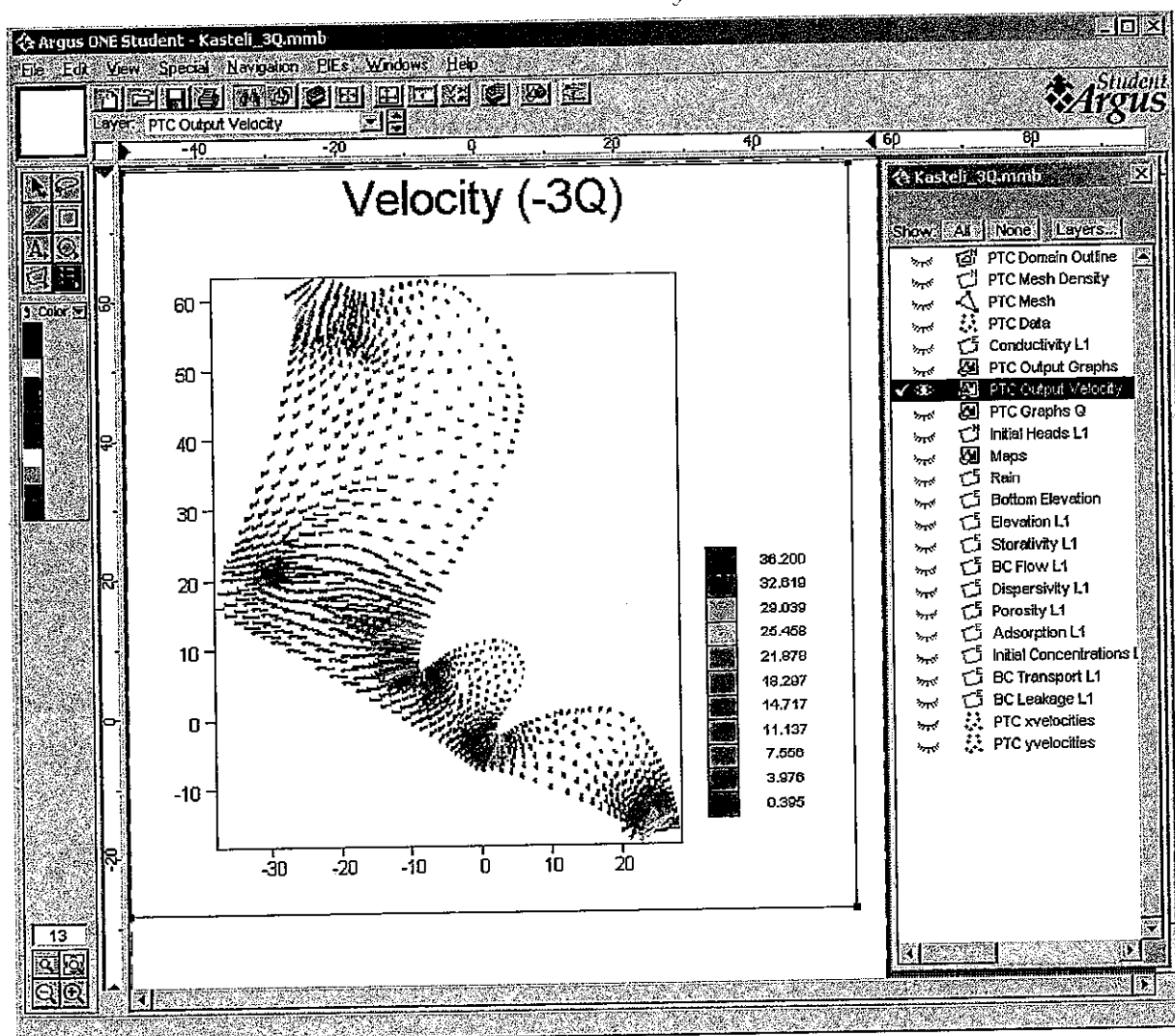
Η. Τριπλασιασμός της αντλούμενης παροχής στο σύνολο των γεωτρήσεων



Σχήμα 3.37: Τα υπολογιζόμενα υδραυλικά ύψη, μετά από τον τριπλασιασμό του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων.

Στην περίπτωση τριπλασιασμού της αντλούμενης παροχής, η συνολική παροχή είναι 41.904 m³/day. Στο σχήμα 3.37 παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα η αρχική πιεζομετρία και

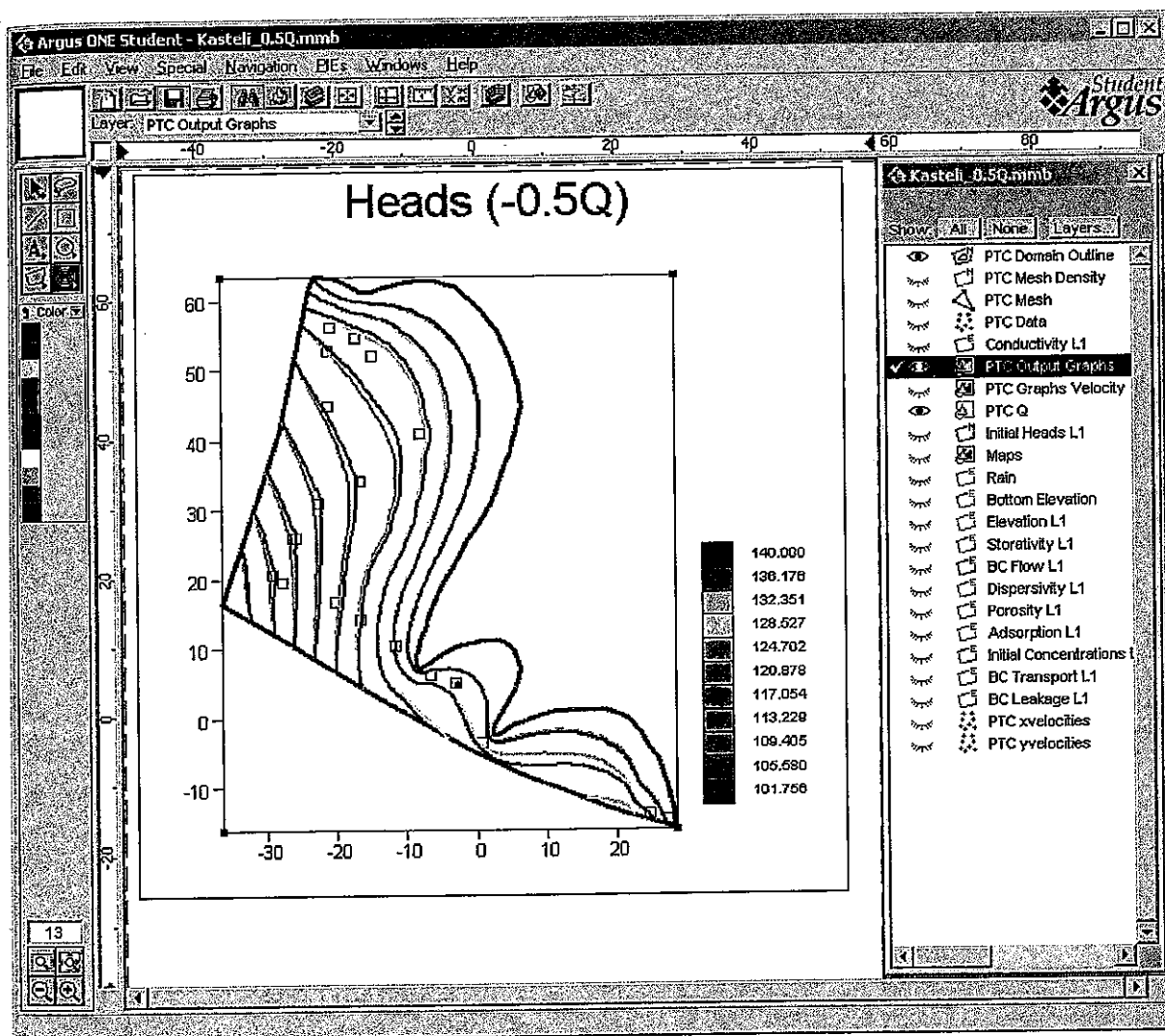
με διαβαθμισμένο χρώμα οι ισοδυναμικές γραμμές, ύστερα από τριπλασιασμό της παροχής ($-3Q$). Γενικά παρατηρείται μεγαλύτερη διαφοροποίηση των ισοδυναμικών γραμμών από ότι στην περίπτωση διπλασιασμού του ρυθμού άντλησης, εκτός από το Βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Στο κεντρικό τμήμα, οι ισοδυναμικές γραμμές είναι μετατοπισμένες προς τη γραμμή των 140 m. Η μετατόπιση αυτή πιστεύεται ότι οφείλεται στις γεωτρήσεις, οι οποίες με τον τριπλασιασμό της παροχής άντλησης, διαμορφώνουν την πιεζομετρία. Αυτός πιστεύεται ότι είναι και ο λόγος που τροποποιείται έντονα το σχήμα των γραμμών κοντά στις γεωτρήσεις. Γενικά ο τριπλασιασμός της αντλούμενης παροχής, επιφέρει πτώση στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα, από 2 m έως και 19 m, ακόμα και σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στην ισοδυναμική γραμμή των 140 m.



Σχήμα 3.38: Οι εκτιμήσεις για την οριζόντια ταχύτητα ροής του υπογείου νερού, στην περίπτωση διπλασιασμού της αντλούμενης παροχής των γεωτρήσεων

Οι οριζόντιες ταχύτητες ροής, μετά τον τριπλασιασμό της αντλούμενης παροχής, κυμαίνονται από 0,395 m/day έως 36,200 m/day (σχήμα 3.38)

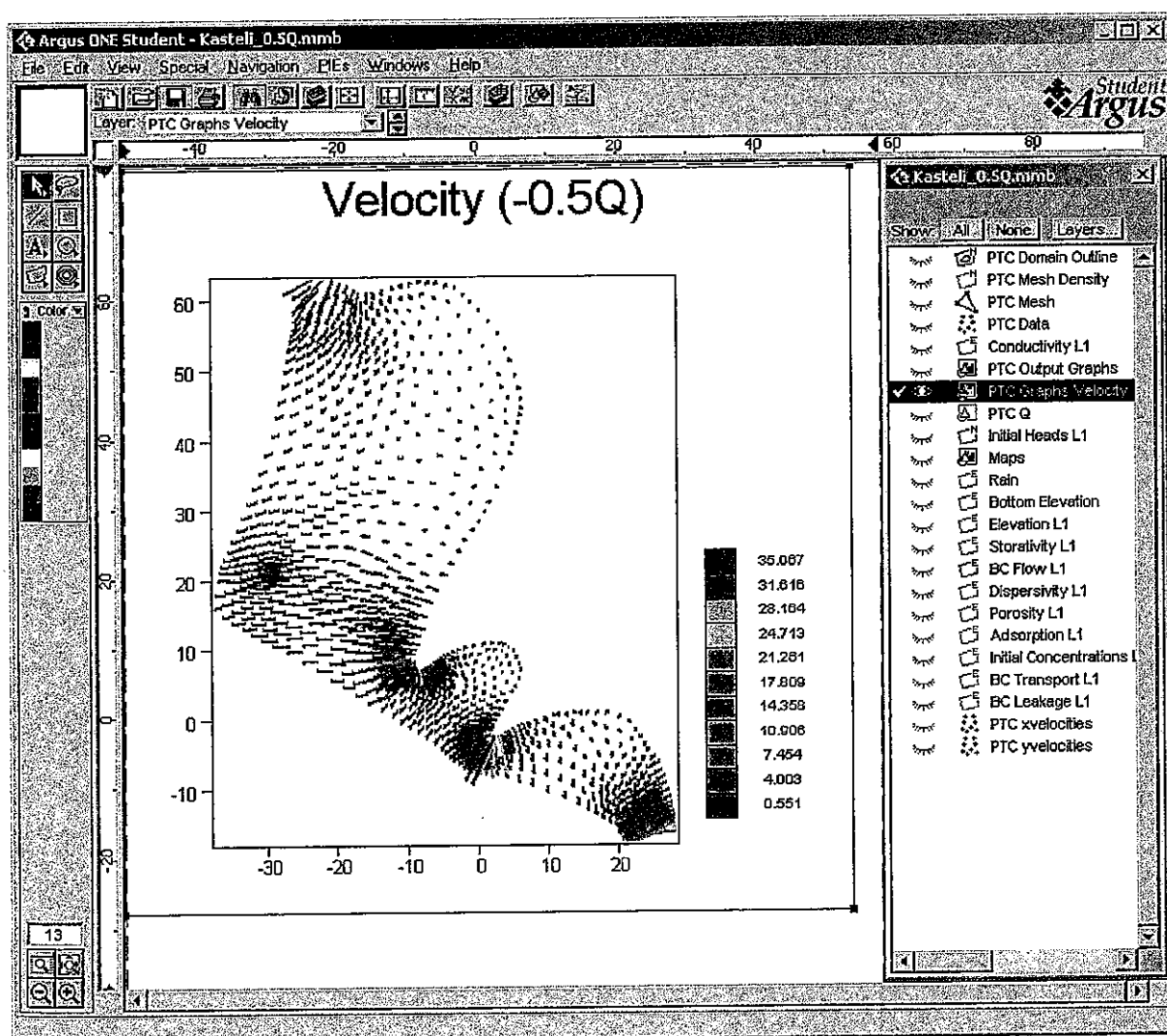
III. Υποδιπλασιασμός της αντλούμενης παροχής στο σύνολο των γεωτρήσεων



Σχήμα 3.39: Τα υπολογιζόμενα υδραυλικά ύψη, μετά από τον τριπλασιασμό του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων.

Ο υποδιπλασιασμός της αντλούμενης παροχής, μειώνει την συνολικά αντλούμενη παροχή σε 6.984 m³/day. Στο σχήμα 3.39 παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα η αρχική

πιεζομετρία και με διαβαθμισμένο χρώμα οι ισοδυναμικές γραμμές ύστερα από τη μείωση της αντλούμενης παροχής στο μισό ($-0,5Q$). Παρατηρείται σύμπτωση των ισοδυναμικών γραμμών με τις αρχικές, που συνεπάγεται παρόμοιο καθεστώς για την πιεζομετρία, στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Μικρή διαφοροποίηση εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα, όπου οι ισοδυναμικές γραμμές μετατοπίζονται ελαφρώς προς το ρήγμα. Η μετατόπιση αυτή πιστεύεται ότι οφείλεται στη μείωση του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης τους στην πιεζομετρία, έναντι του ρήγματος. Γενικά παρατηρείται μικρή άνοδος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της τάξης των 4,285 m, εκτός από το Νότιο τμήμα της περιοχής, όπου η διαφορά φτάνει και τα 6 m.



Σχήμα 3.40: Οι εκτιμήσεις για την οριζόντια ταχύτητα ροής του υπογείου νερού, στην περίπτωση διπλασιασμού της αντλούμενης παροχής των γεωτρήσεων

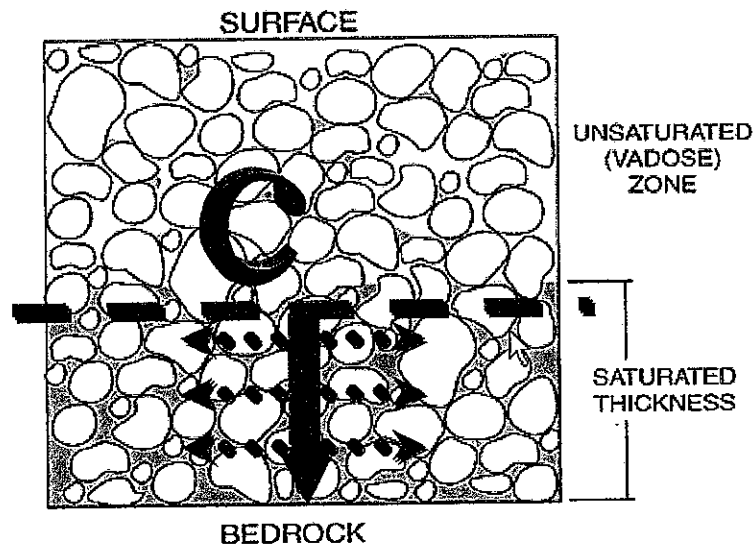
Οι οριζόντιες ταχύτητες ροής, οι οποίες κυμαίνονται από 0,551 m/day έως 35,067 m/day και παρουσιάζονται στο σχήμα 3.40

ΕΝΟΤΗΤΑ 4^η

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ P.T.C. ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ARGUS ONE.

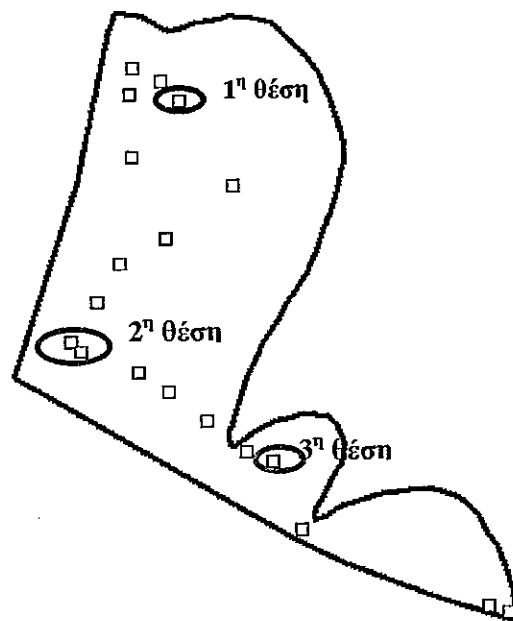
4.1 Μοντελοποίηση της μεταφοράς μάζας

Το μοντέλο P.T.C. ασχολείται με τη μεταφοράς μάζας στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα, συνεπώς η μοντελοποίηση ξεκινά από τη στιγμή που η διαλυμένη ουσία περάσει τον υδροφόρο ορίζοντα. Γραφικά, η μεταφορά μάζας για το μοντέλο P.T.C., παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Είσοδος διαλυμένης ουσίας στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα.

Προκειμένου να μελετηθεί η μεταφορά διαλυμένης ουσίας στη μάζα του υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων, εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις σημειακής φόρτισης. Στις περιπτώσεις αυτές, θεωρήθηκε ότι η φόρτιση παρουσιάζεται τοπικά, σε κάποια γεώτρηση του υδροφορέα και οι θέσεις αυτών, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2



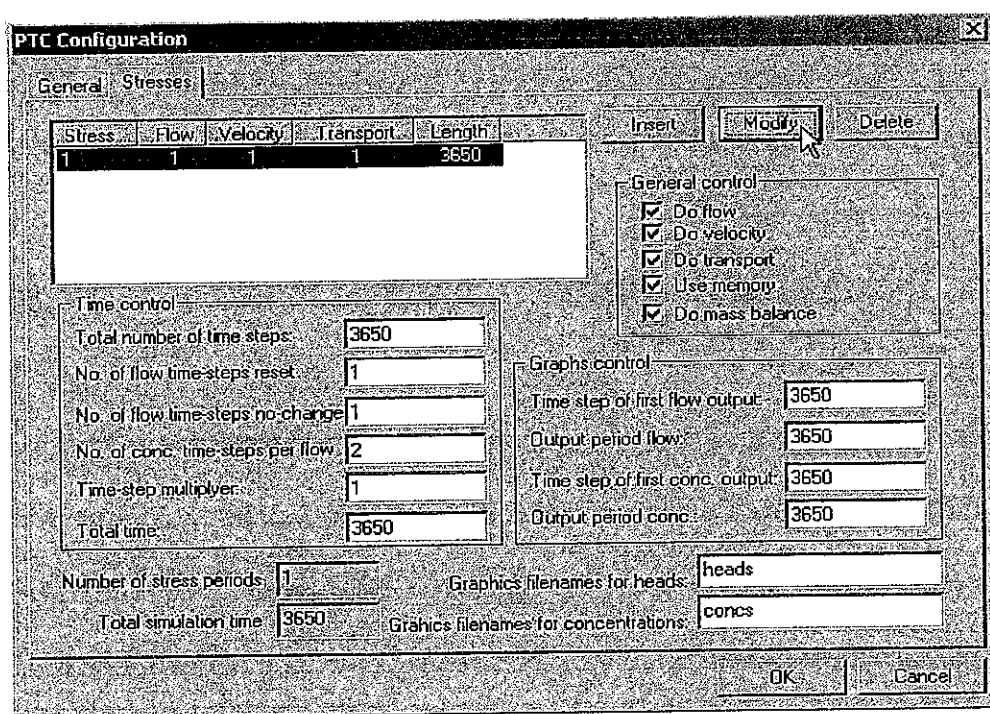
Σχήμα 4.2: Οι θέσεις των γεωτρήσεων με τη σημειακή φόρτιση.

4.2 Μεθοδολογία μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση της μεταφοράς μάζας στηρίζεται στη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής που προηγήθηκε. Έτσι στο μοντέλο που εφαρμόστηκε για την υπόγεια ροή, εισάγονται οι νέες παράμετροι, που αφορούν τη μεταφορά μάζας. Κατά τη μοντελοποίηση, η αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας θεωρήθηκε 0. Η σταθερή συγκέντρωση φόρτισης θεωρήθηκε στην κανονικοποιημένη μορφή (normalized) $C=1$. Στη συνέχεια περιγράφονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν.

I. Ορισμός αρχικών παραμέτρων

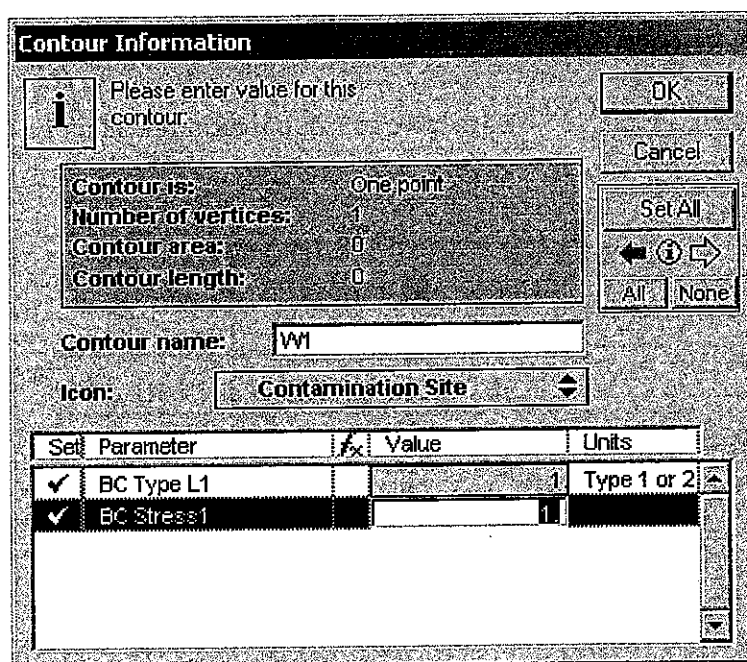
Οι νέες παράμετροι του μοντέλου P.T.C. που αφορούν τη μεταφορά μάζας εισάγονται στο παράθυρο PTC Configuration, το οποίο ενεργοποιείται από το μενού PIE's και την εντολή Edit Project Info. Στην καρτέλα Stresses επιλέγεται Do transport και οι αλλαγές προστίθενται στο αρχικό μοντέλο με το κουμπί Modify (σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Η καρτέλα Stresses του παραθύρου PTC Configuration.

II. Ορισμός των οριακών συνθηκών φόρτισης

Στην περίπτωση αυτή, όλες οι γεωτρήσεις αντιγράφηκαν από το layer PTC Domain Outline στο BC Transport L1. Οι σημειακές πηγές αποτελούν όριο καθορισμένης κανονικοποιημένης συγκέντρωσης, με $C=1$, για αυτό και στα BC Type L1 και BC Stress του παραθύρου Contour Information εισάγεται η τιμή 1 (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Οι παράμετροι του ορίου των γεωτρήσεων στο παράθυρο Contour Information

III. Ορισμός του συντελεστή δυναμικής διασποράς (Dispersivity L1)

Η τιμή του συντελεστή δυναμικής διασποράς α , εκτιμάται μέσω πειραματικών σχέσεων συναρτήσει της απόστασης μέτρησης L . Μέσω των σχέσεων αυτών υπολογίζονται τόσο ο συντελεστής επιμήκους δυναμικής διασποράς α_L όσο και ο συντελεστής εγκάρσιας δυναμικής διασποράς α_T . Για τον υπολογισμό του συντελεστή δυναμικής διασποράς α , χρησιμοποιήθηκε η σχέση (Καρατζάς, 2000):

$$\alpha_L = 0,83 * (\log L)^{2,414}$$

και

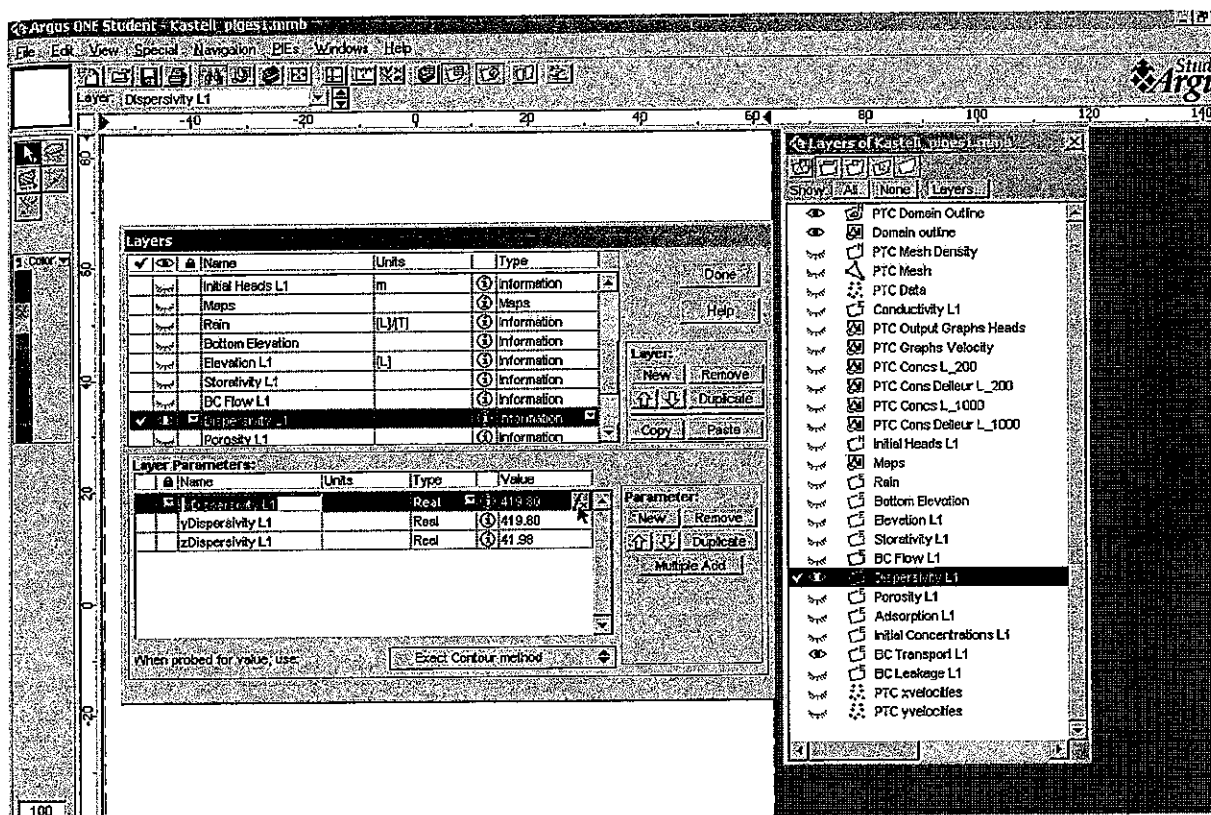
$$\alpha_T = 0,1 * \alpha_L$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών εγκάρσιας και διαμήκους δυναμικής διασποράς, έγινε με δύο τιμές απόστασης L, 200 m και 1000 m. Συνολικά στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα ζεύγη τιμών (α_L , α_T) οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

L (m)	Συντελεστής δυναμ. διασποράς	
	α_L	α_T
200	6,21	0,62
1000	11,77	1,18

Πίνακας 4: Οι τιμές του συντελεστή επιμήκους και εγκάρσιας δυναμικής διασποράς.

Οι τιμές αυτές, εισάγονται στο layer Dispersion L1, μέσω του παραθύρου διαχείρισης των layers, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Θεωρούμε ότι ο συντελεστής στους άξονες X, Y έχει την ίδια τιμή και είναι ίσος με α_L και ο συντελεστής στον άξονα Z είναι ίσος με α_T .



Σχήμα 4.5: Οι τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς.

IV. Επαναδημιουργία πλέγματος - Εκτέλεση του προγράμματος

Για να συμπεριληφθούν στο αρχικό μοντέλο τα νέα στοιχεία, πρέπει να ορισθεί εκ νέου το πλέγμα. Για την επαναδημιουργία του πλέγματος ακολουθείται η ίδια διαδικασία με τη δημιουργία του, που περιγράφηκε παραπάνω.

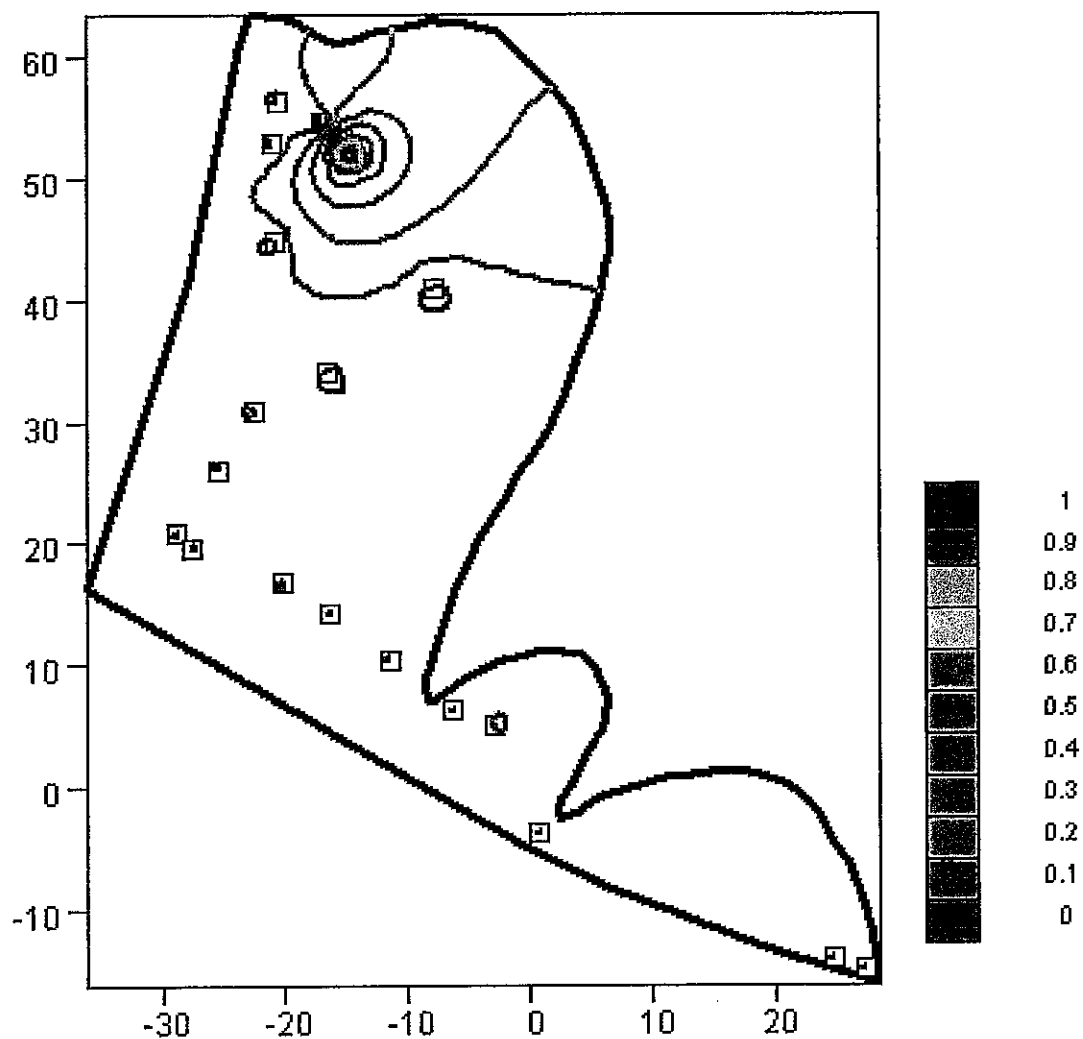
Στη συνέχεια εκτελείται το πρόγραμμα για κάθε περίπτωση χωριστά και για όλες τις τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς.

4.3 Αποτελέσματα για τη μεταφορά μάζας

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με τη μορφή γραφημάτων, μέσα στο πρόγραμμα Argus ONE. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

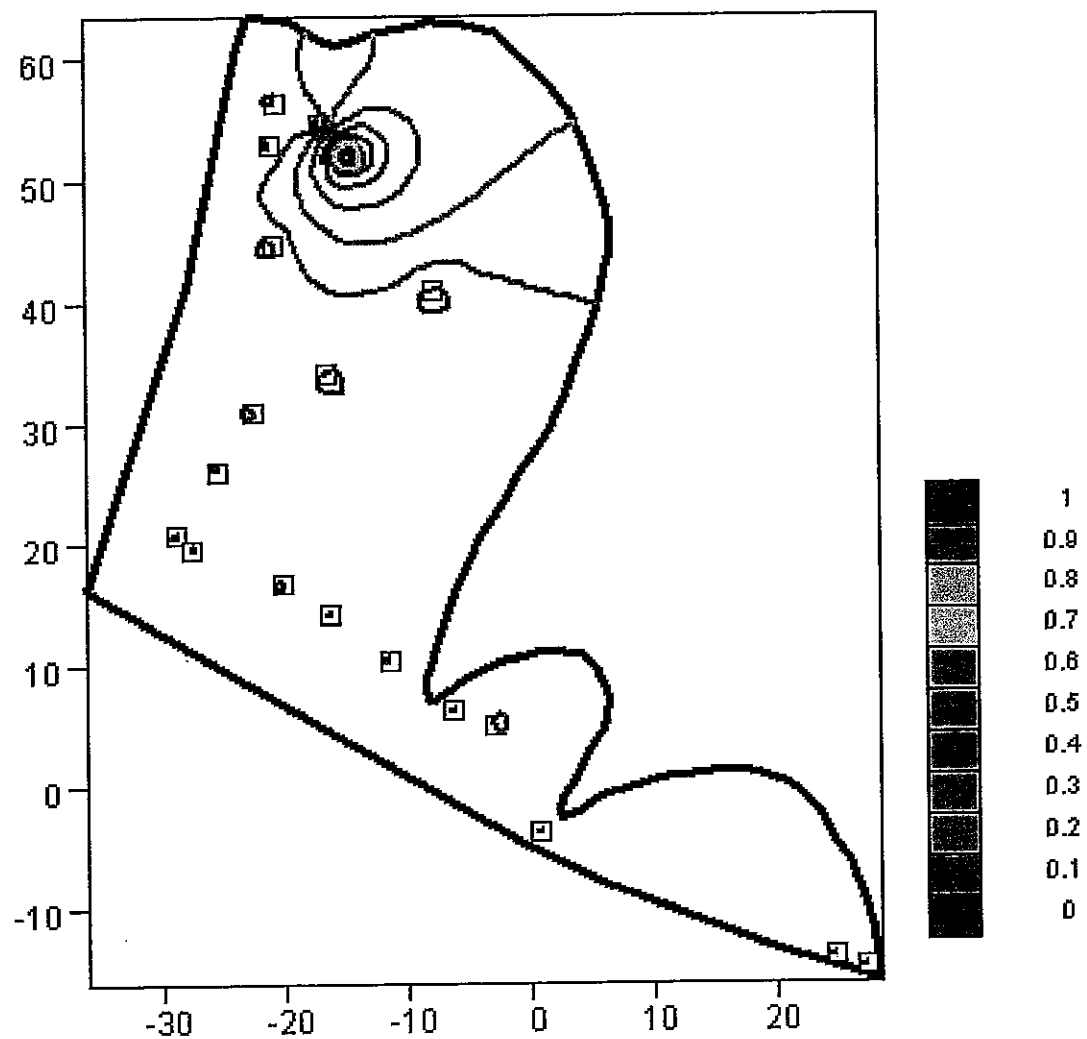
➤ Πρώτη θέση σημειακής φόρτισης

1.a)



Σχήμα 4.6: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για την πρώτη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 6,21$ & $\alpha_T = 0,62$ ($L=200$ m).

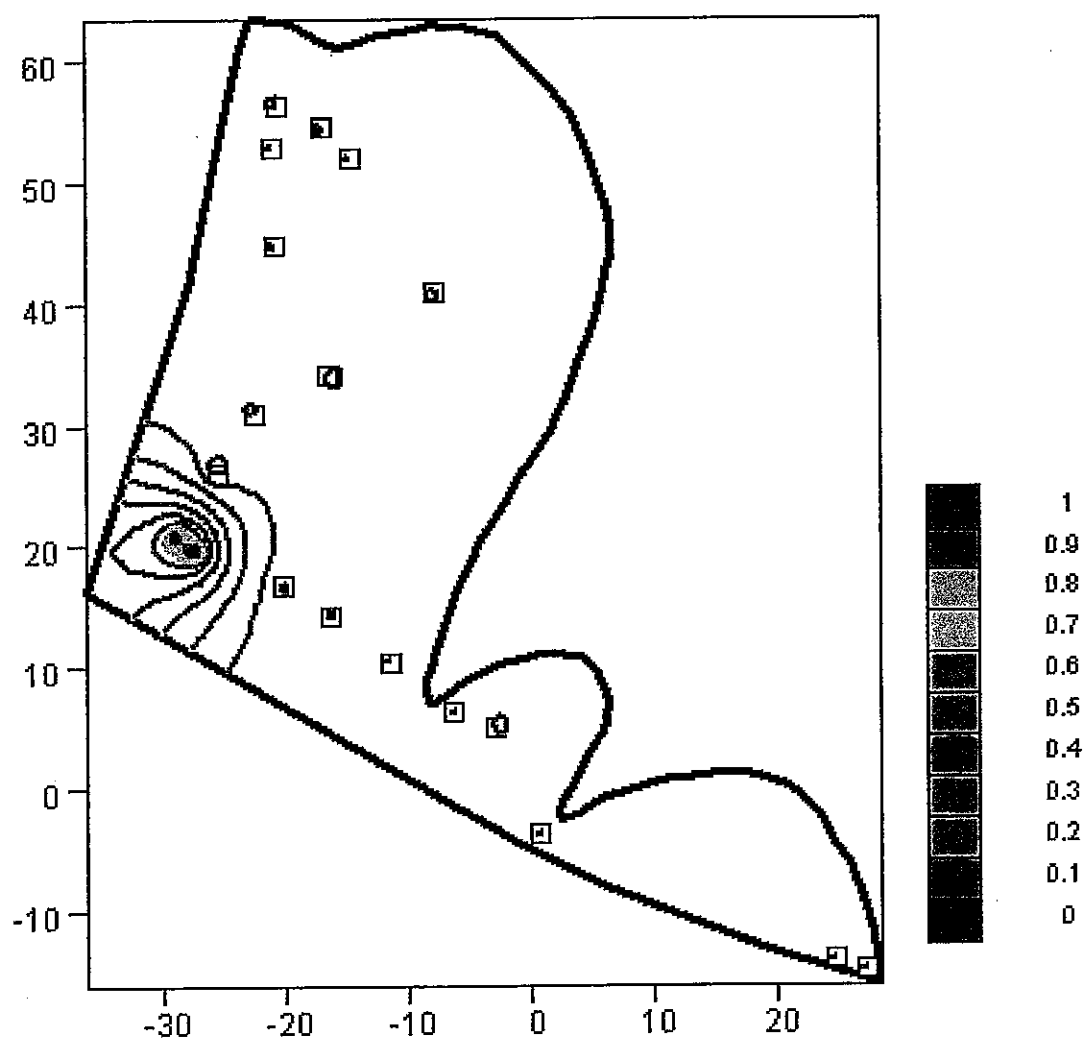
1.b)



Σχήμα 4.7: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για την πρώτη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 11,77$ & $\alpha_T = 1,18$ ($L=1000$ m).

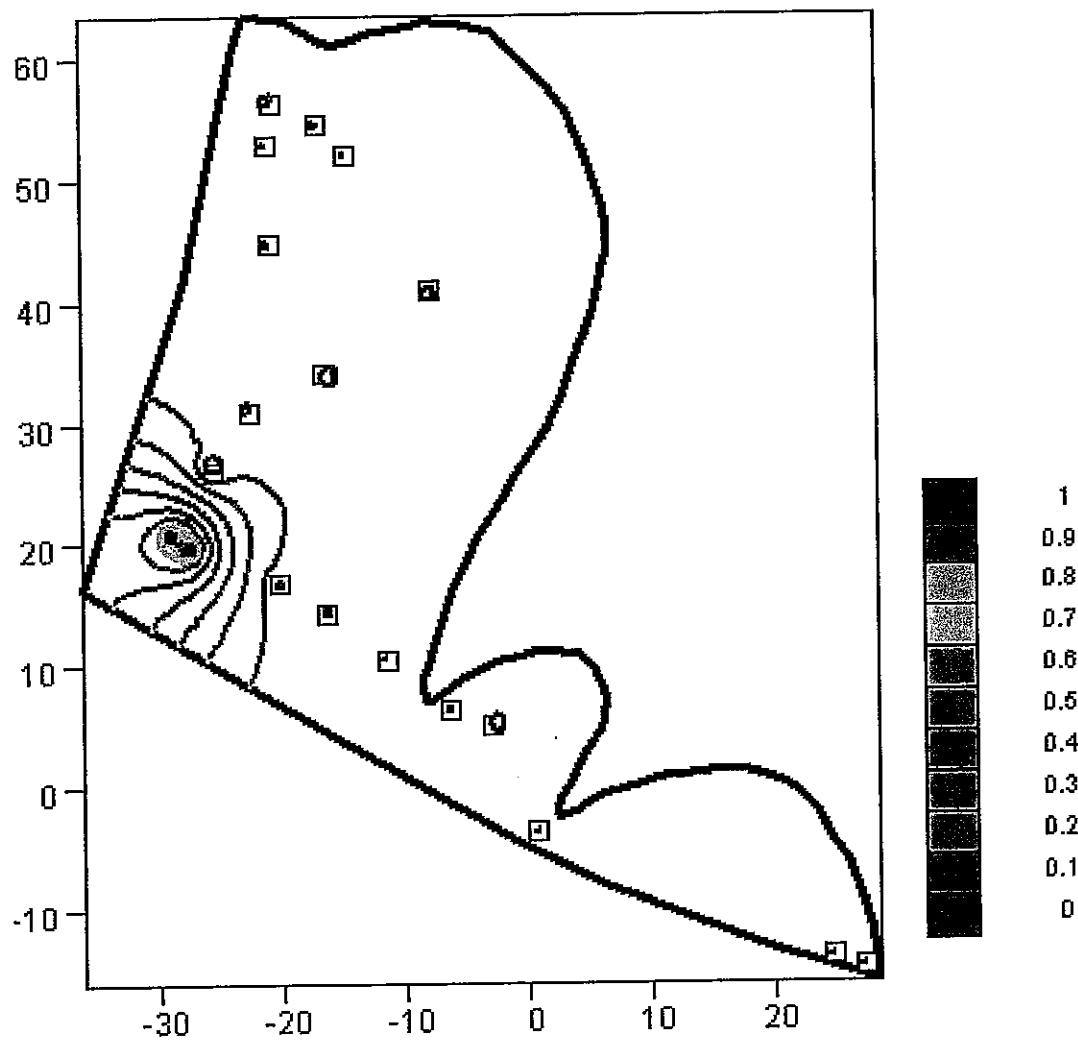
➤ Δεύτερη θέση σημειακής φόρτισης

2.a)



Σχήμα 4.8: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για τη δεύτερη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 6,21$ & $\alpha_T = 0,62$ ($L=200$ m).

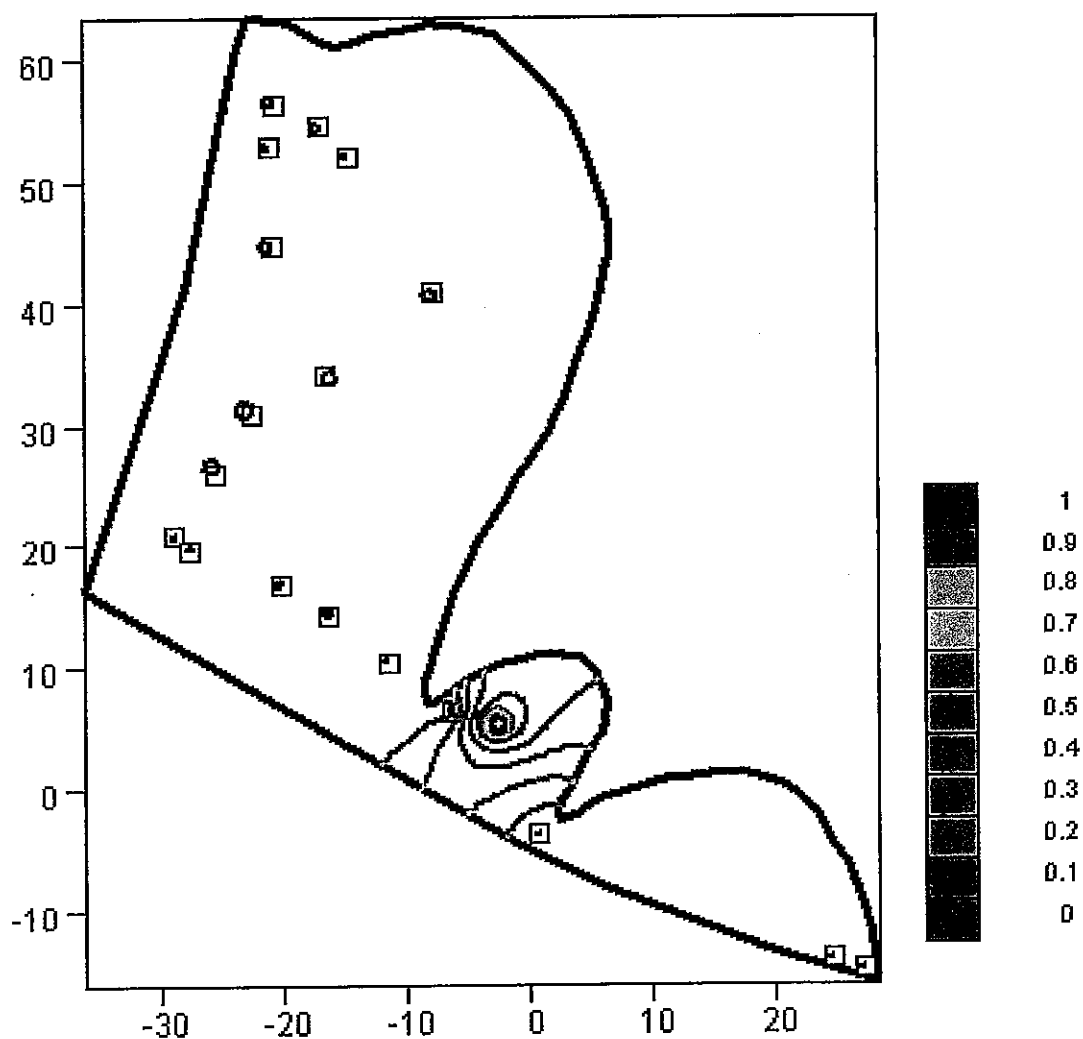
2.b)



Σχήμα 4.9: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για τη δεύτερη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 11,77$ & $\alpha_T = 1,18$ ($L=1000$ m).

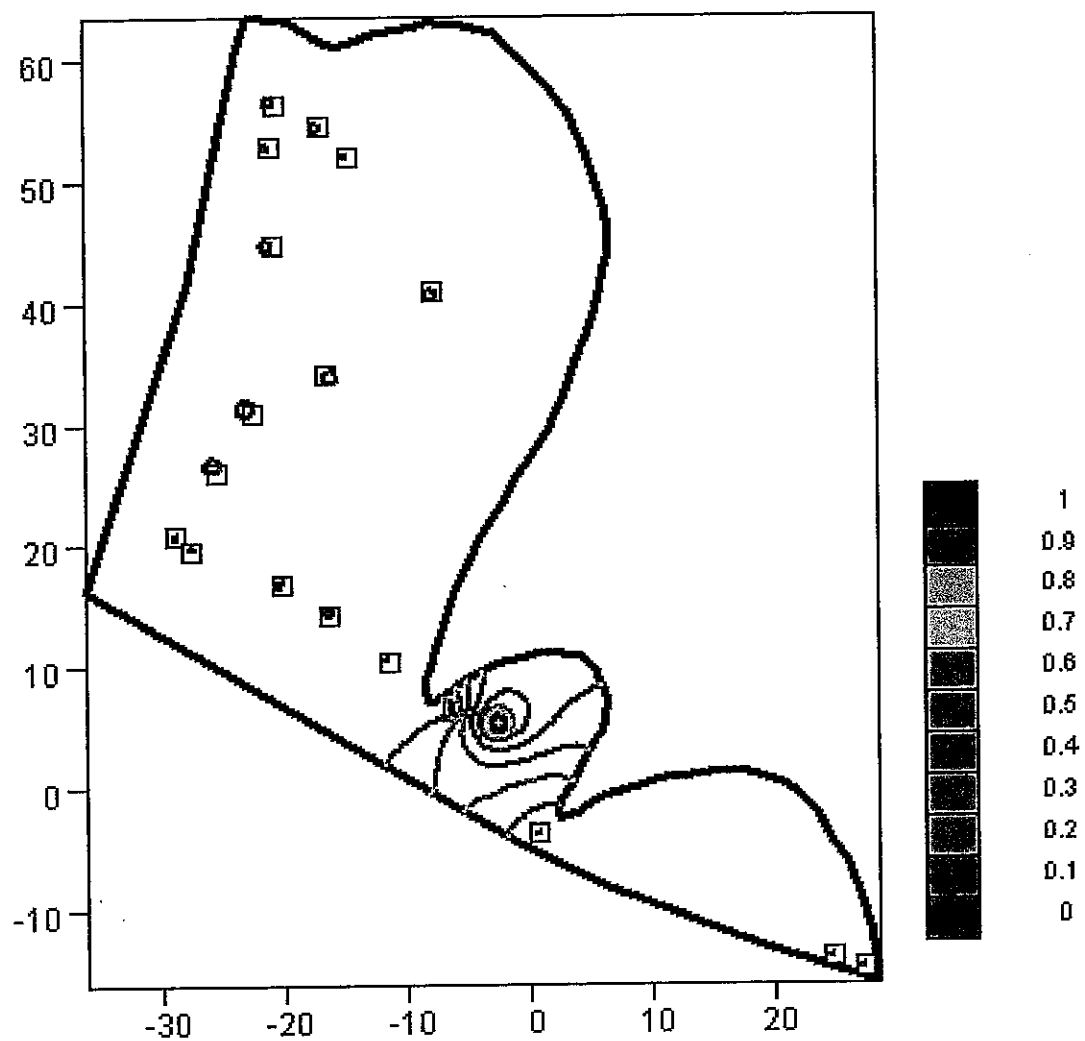
➤ Τρίτη θέση σημειακής φόρτισης

3.a)



Σχήμα 4.10: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για την τρίτη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 6,21$ & $\alpha_T = 0,62$ ($L=200$ m).

3.b)



Σχήμα 4.11: Καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για την τρίτη θέση σημειακής φόρτισης και για συντελεστές $\alpha_L = 11,77$ & $\alpha_T = 1,18$ ($L=1000$ m).

4.4 Επικινδυνότητα ρύπανσης

Με βάση τα αποτελέσματα για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας, μπορούμε να εκτιμήσουμε την επικινδυνότητα ρύπανσης στον υπό μελέτη υδροφορέα. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρείται πλήρης εξασθένηση της διαλυμένης ουσίας που εισέρχεται στον υδροφορέα, ανεξάρτητα από τη θέση και το μέγεθος ρύπανσης. Επιπλέον η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας παρουσιάζει σημαντική ελάττωση σε μικρή απόσταση από την εκάστοτε εστία ρύπανσης. Συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση 50% της αρχικής συγκέντρωσης ($c = 1$) σε απόσταση μικρότερη των 20 – 25 m. Πλήρης εξασθένηση λαμβάνει χώρα σε απόσταση μικρότερη των 70 m από τις εστίες ρύπανσης, ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση που εξετάστηκε, με δύο εστίες ρύπανσης και με μεγάλο συντελεστή διαμήκους δυναμικής διασποράς $\alpha_L = 11,77$ m (2^η περίπτωση – χάρτης 2b).

Παρατηρείται στους χάρτες με τα αποτελέσματα μεταφοράς μάζας, ότι οι καμπύλες ίσων συγκεντρώσεων, για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, παρουσιάζουν μια ομοιομορφία ως προς το σχήμα τους αλλά και ως προς την κατανομή τους στο χώρο, παρόλο το εύρος των χρησιμοποιούμενων τιμών του συντελεστή δυναμικής διασποράς ($\alpha_L = 6.21, 11.77$). Από αυτό συνεπάγεται ότι στον εν λόγω υδροφορέα επικρατεί ο μηχανισμός συµμεταφοράς (advection) κατά τη μεταφορά μάζας έναντι του μηχανισμού διάχυσης (diffusion), για αυτό και η συμπεριφορά του είναι παρόμοια για τις όλες τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς.

Από τη μελέτη της επικινδυνότητας ρύπανσης, προέκυψαν ότι στον υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων, η διαλυμένη ουσία μεταφέρεται κυρίως με τη ροή των υπογείων υδάτων και η συγκέντρωση της μηδενίζεται σε μικρή απόσταση από την εστία ρύπανσης. Με

βάση αυτά συμπεραίνεται ότι είναι μικρή η επικινδυνότητα ρύπανσης του υπό μελέτη υδροφορέα.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5^η

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΑΖΑΣ.

Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών Argus ONE και το τρισδιάστατο χωροχρονικό μοντέλο P.T.C. (Princeton Transport Code). Μέσω του μοντέλου P.T.C. αναπαράχθηκε το καθεστώς της υπόγειας ροής στον υδροφορέα των πλακωδών ασβεστόλιθων, για τα επόμενα δέκα χρόνια. Συγκεκριμένα εκτιμήθηκαν τα υδραυλικά ύψη σε όλη την έκταση του υδροφορέα και το διάνυσμα της οριζόντιας πραγματικής ταχύτητας ροής. Από τη μοντελοποίηση προέκυψε ότι τα υδραυλικά ύψη στον υπό μελέτη υδροφορέα κυμαίνονται από 97 m έως 140 m (η τιμή 140 m θεωρήθηκε σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους κατά τη μοντελοποίηση – συνθήκη Dirichlet). Ακόμη η μέγιστη απώλεια φορτίου Δh που παρατηρείται στον υπόγειο υδροφορέα είναι 43 m. Όσον αφορά την οριζόντια πραγματική ταχύτητα ροής, το εύρος των τιμών της κυμαίνονται από 0,613 m/day έως 34,103 m/day (ή από $7 \cdot 10^{-7}$ m/sec έως $4 \cdot 10^{-4}$ m/sec). Οι

μεγάλες τιμές της ταχύτητας – 34,103 m/day – συναντώνται σε δύο μόνο θέσεις, ενώ στη μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα οι τιμές κυμαίνονται από 3,952 m/day έως 10,660 m/day (ή από $4,6 \cdot 10^{-5}$ m/sec έως $1,23 \cdot 10^{-4}$ m/sec).

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και του βαθμού αξιοπιστίας του, υπολογίσθηκαν οι εξής στατιστικοί δείκτες: σχετικό σφάλμα (relative error) 2,95%, η μέση ενεργός τιμή σφάλματος (R.M.S. error) 5,22 m, μέσο σφάλμα (mean error) –0,81 m και μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error) 3,55 m. Με βάση τις στατιστικές παραμέτρους που υπολογίσθηκαν, η αξιοπιστία του μοντέλου και των αποτελεσμάτων του θεωρείται αρκετά καλή.

Μέσω της μοντελοποίησης για την υπόγεια ροή, μελετήθηκε η δυναμική του υδροφορέα, εξετάζοντας τον υποδιπλασιασμό, το διπλασιασμό και τον τριπλασιασμό της παροχής άντλησης στο σύνολο των γεωτρήσεων. Από τη μελέτη αυτή προέκυψε ότι η υδροφορία στην περιοχή μελέτης είναι ιδιαίτερα αξιόλογη. Κατά τον υποδιπλασιασμό της παροχής παρατηρείται σύμπτωση των ισοδυναμικών γραμμών με τις αρχικές, που συνεπάγεται παρόμοιο καθεστώς για την πιεζομετρία, στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Μικρή διαφοροποίηση εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα, όπου οι ισοδυναμικές γραμμές μετατοπίζονται ελαφρώς προς το ρήγμα. Γενικά παρατηρείται μικρή άνοδος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της τάξης των 4,285 m, εκτός από το Νότιο τμήμα της περιοχής, όπου η διαφορά φτάνει και τα 6 m. Η οριζόντια ταχύτητα ροής για την περίπτωση αυτή κυμαίνεται από 0,539 m/day έως 37,695 m/day.

Ο διπλασιασμός της αντλούμενης παροχής συνεπάγεται μετατόπιση των ισοδυναμικών γραμμών που βρίσκονται στις άκρες της περιοχής μελέτης προς το κέντρο του ρήγματος και

η μετατόπιση είναι μεγαλύτερη όσο απομακρυνόμαστε από την ισοδυναμική γραμμή των 140 m, που έχει χαρακτηριστεί σαν οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους. Παρατηρείται πτώση στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα, που κατά θέσεις φτάνει τα 8 m. Η οριζόντια ταχύτητα ροής για την περίπτωση αυτή κυμαίνεται από 0,539 m/day έως 37,695 m/day.

Κατά τον τριπλασιασμό της αντλούμενης παροχής παρατηρείται μεγαλύτερη διαφοροποίηση των ισοδυναμικών γραμμών από ότι προηγουμένως, εκτός από το Βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης. Στο κεντρικό τμήμα, οι ισοδυναμικές γραμμές είναι μετατοπισμένες προς τη γραμμή των 140 m. Η μετατόπιση αυτή πιστεύεται ότι οφείλεται στις γεωτρήσεις, οι οποίες με τον τριπλασιασμό της παροχής άντλησης, διαμορφώνουν την πεζομετρία.. Αυτός πιστεύεται ότι είναι και ο λόγος που τροποποιείται έντονα το σχήμα των γραμμών κοντά στις γεωτρήσεις. Επιπλέον ο τριπλασιασμός της αντλούμενης παροχής, επιφέρει πτώση στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου ορίζοντα, από 2 m έως και 19 m, ακόμα και σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στην ισοδυναμική γραμμή των 140 m. Οι οριζόντιες ταχύτητες ροής, μετά τον τριπλασιασμό της αντλούμενης παροχής, κυμαίνονται από 0,395 m/day έως 36,200 m/day.

Η μελέτη της μεταφοράς μάζας βασίστηκε στο μοντέλο που εφαρμόστηκε προηγουμένως για την υπόγεια ροή. Κατά τη μοντελοποίηση θεωρήθηκε ότι η αρχική συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι 0 και η σταθερή συγκέντρωση φόρτισης είναι $C=1$. Προκειμένου να μελετηθεί η μεταφορά διαλυμένης ουσίας εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις σημειακής φόρτισης, σε κάποιες από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε μια γεώτρηση (W3) στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, δύο γεωτρήσεις στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, κοντά στο ρήγμα (W10, W11) και μια

γεώτρηση στο νότιο τμήμα της περιοχής (W16). Για κάθε περίπτωση φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς α , οι οποίες προέκυψαν μέσω πειραματικών σχέσεων συναρτήσει της απόστασης μέτρησης L . Μέσω των σχέσεων αυτών υπολογίζονται τόσο ο συντελεστής επιμήκους δυναμικής διασποράς α_L όσο και ο συντελεστής εγκάρσιας δυναμικής διασποράς α_T . Τα ζεύγη τιμών (α_L , α_T) που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε φόρτιση είναι οι εξής: (6.21, 0.62), (11.77, 1.18). Τα αποτελέσματα κάθε περίπτωσης επιλέχθηκε να παρουσιαστούν με τη μορφή γραφημάτων καμπυλών ίσων συγκεντρώσεων.

Με βάση τα αποτελέσματα για τη μεταφορά διαλυμένης ουσίας, μπορούμε να εκτιμήσουμε την επικινδυνότητα ρύπανσης του υπό μελέτη υδροφορέα. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρείται πλήρης εξασθένηση της διαλυμένης ουσίας που εισέρχεται στον υδροφορέα, ανεξάρτητα από το συντελεστή δυναμικής διασποράς α (α_L , α_T), το μέγεθος και τη θέση ρύπανσης. Επίσης παρατηρείται σημαντική μείωση της συγκέντρωσης διαλυμένης ουσίας σε μικρή απόσταση και περιμετρικά της εστίας ρύπανσης. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρατηρείται μείωση 50% της αρχικής συγκέντρωσης ($c = 1$) σε απόσταση μικρότερη των 20 – 25 m. Πλήρης εξασθένηση συμβαίνει σε απόσταση μικρότερη των 70 m από τις εστίες ρύπανσης, ακόμη και στη δυσμενέστερη περίπτωση που εξετάστηκε, με δύο εστίες ρύπανσης και με μεγάλο συντελεστή διαμήκους δυναμικής διασποράς $\alpha_L = 11,77$ m (2^η περίπτωση – χάρτης 2b). Σύμφωνα με τους χάρτες καμπύλων ίσων συγκεντρώσεων, η συμπεριφορά του υδροφορέα ως προς τη διασπορά της διαλυμένης ουσίας είναι παρόμοια για τις όλες τιμές του συντελεστή δυναμικής διασποράς α , παρόλο το εύρος των χρησιμοποιούμενων τιμών. Αυτό συνεπάγεται ότι κατά τη μεταφορά μάζας στον υπό μελέτη υδροφορέα επικρατεί ο μηχανισμός συμμεταφοράς (advection) έναντι του μηχανισμού διάχυσης (diffusion). Με

βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η επικινδυνότητα ρύπανσης είναι μικρή για τον υπό μελέτη υδροφορέα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1: Τιμές αρχικών υδραυλικών υψών ανά κόμβο για τον υπολογισμό στατιστικών

δεικτών

id κόμβου	Υδραυλικό ύψος Hm	id κόμβου	Υδραυλικό ύψος Hm	id κόμβου	Υδραυλικό ύψος Hm	id κόμβου	Υδραυλικό ύψος Hm
1	140,0	2	140,0	3	140,0	4	140,0
5	140,0	6	140,0	7	140,0	8	140,0
9	140,0	10	140,0	11	140,0	12	139,5
13	140,0	14	140,0	15	140,0	16	140,0
17	140,0	18	140,0	19	140,0	20	140,0
21	140,0	22	140,0	23	135,0	24	140,0
25	140,0	26	140,0	27	140,0	28	140,0
29	140,0	30	140,0	31	140,0	32	135,0
33	140,0	34	135,0	35	140,0	36	140,0
37	140,0	38	140,0	39	140,0	40	140,0
41	140,0	42	140,0	43	135,0	44	135,0
45	135,0	46	140,0	47	140,0	48	140,0
49	140,0	50	140,0	51	135,0	52	135,0
53	135,0	54	135,0	55	135,0	56	135,0
57	140,0	58	140,0	59	140,0	60	140,0
61	140,0	62	135,0	63	135,0	64	122,3
65	135,0	66	135,0	67	135,0	68	135,0
69	135,0	70	140,0	71	140,0	72	140,0
73	140,0	74	135,0	75	135,0	76	135,0
77	135,0	78	135,0	79	135,0	80	135,0
81	135,0	82	135,0	83	135,0	84	140,0
85	140,0	86	140,0	87	135,0	88	135,0
89	130,0	90	135,0	91	135,0	92	135,0
93	135,0	94	135,0	95	135,0	96	135,0
97	130,0	98	140,0	99	140,0	100	140,0
101	135,0	102	135,0	103	135,0	104	130,0
105	130,0	106	135,0	107	135,0	108	135,0
109	135,0	110	135,0	111	130,0	112	140,0
113	140,0	114	140,0	115	135,0	116	135,0
117	135,0	118	130,0	119	130,0	120	130,0
121	130,0	122	135,0	123	135,0	124	130,0
125	140,0	126	140,0	127	135,0	128	135,0
129	135,0	130	135,0	131	135,0	132	135,0
133	130,0	134	130,0	135	130,0	136	130,0
137	130,0	138	140,0	139	140,0	140	140,0
141	135,0	142	135,0	143	135,0	144	135,0
145	135,0	146	130,0	147	130,0	148	130,0
149	130,0	150	130,0	151	130,0	152	140,0
153	140,0	154	135,0	155	135,0	156	135,0
157	130,0	158	130,0	159	130,0	160	130,0
161	130,0	162	130,0	163	140,0	164	140,0
165	135,0	166	135,0	167	135,0	168	130,0
169	130,0	170	130,0	171	130,0	172	130,0

173	140,0	174	140,0	175	140,0	176	135,0
177	135,0	178	130,0	179	130,0	180	130,0
181	130,0	182	130,0	183	130,0	184	140,0
185	140,0	186	135,0	187	135,0	188	135,0
189	130,0	190	130,0	191	130,0	192	130,0
193	140,0	194	135,0	195	130,0	196	135,0
197	135,0	198	130,0	199	130,0	200	130,0
201	140,0	202	140,0	203	130,0	204	130,0
205	135,0	206	135,0	207	140,0	208	135,0
209	130,0	210	130,0	211	130,0	212	135,0
213	135,0	214	135,0	215	135,0	216	140,0
217	140,0	218	130,0	219	135,0	220	135,0
221	135,0	222	140,0	223	140,0	224	135,0
225	135,0	226	135,0	227	135,0	228	135,0
229	135,0	230	135,0	231	140,0	232	140,0
233	140,0	234	135,0	235	135,0	236	135,0
237	135,0	238	135,0	239	140,0	240	140,0
241	135,0	242	135,0	243	135,0	244	135,0
245	135,0	246	140,0	247	140,0	248	140,0
249	135,0	250	135,0	251	135,0	252	140,0
253	140,0	254	140,0	255	140,0	256	140,0
257	140,0	258	140,0	259	135,0	260	135,0
261	135,0	262	140,0	263	140,0	264	140,0
265	140,0	266	140,0	267	140,0	268	135,0
269	135,0	270	140,0	271	140,0	272	140,0
273	140,0	274	140,0	275	140,0	276	140,0
277	140,0	278	135,0	279	135,0	280	140,0
281	140,0	282	140,0	283	140,0	284	140,0
285	140,0	286	135,0	287	135,0	288	135,0
289	138,0	290	135,0	291	140,0	292	140,0
293	140,0	294	140,0	295	140,0	296	135,0
297	135,0	298	135,0	299	135,0	300	140,0
301	135,0	302	140,0	303	140,0	304	140,0
305	140,0	306	140,0	307	135,0	308	135,0
309	135,0	310	135,0	311	135,0	312	135,0
313	140,0	314	140,0	315	140,0	316	135,0
317	135,0	318	135,0	319	135,0	320	135,0
321	135,0	322	135,0	323	140,0	324	140,0
325	140,0	326	135,0	327	135,0	328	135,0
329	135,0	330	130,0	331	130,0	332	130,0
333	135,0	334	140,0	335	140,0	336	135,0
337	135,0	338	135,0	339	135,0	340	130,0
341	125,0	342	130,0	343	130,0	344	140,0
345	140,0	346	135,0	347	135,0	348	135,0
349	135,0	350	125,0	351	125,0	352	125,0
353	130,0	354	130,0	355	130,0	356	140,0
357	140,0	358	135,0	359	135,0	360	130,0
361	130,0	362	125,0	363	125,0	364	125,0
365	125,0	366	130,0	367	125,0	368	125,0
369	140,0	370	135,0	371	135,0	372	130,0
373	130,0	374	130,0	375	125,0	376	125,0
377	125,0	378	125,0	379	125,0	380	130,0

381	125,0	382	125,0	383	140,0	384	135,0
385	135,0	386	130,0	387	130,0	388	130,0
389	125,0	390	125,0	391	125,0	392	125,0
393	125,0	394	125,0	395	125,0	396	127,7
397	125,0	398	125,0	399	140,0	400	140,0
401	135,0	402	135,0	403	130,0	404	130,0
405	130,0	406	125,0	407	125,0	408	125,0
409	125,0	410	125,0	411	125,0	412	125,0
413	125,0	414	125,0	415	125,0	416	130,0
417	130,0	418	130,0	419	130,0	420	125,0
421	140,0	422	140,0	423	140,0	424	135,0
425	135,0	426	135,0	427	135,0	428	130,0
429	125,0	430	130,0	431	130,0	432	130,0
433	125,0	434	130,0	435	130,0	436	125,0
437	125,0	438	125,0	439	130,0	440	130,0
441	135,0	442	135,0	443	135,0	444	135,0
445	140,0	446	140,0	447	140,0	448	140,0
449	140,0	450	135,0	451	135,0	452	130,0
453	130,0	454	135,0	455	135,0	456	135,0
457	135,0	458	130,0	459	130,0	460	135,0
461	130,0	462	130,0	463	130,0	464	125,0
465	130,0	466	135,0	467	130,0	468	140,0
469	135,0	470	140,0	471	140,0	472	140,0
473	135,0	474	140,0	475	140,0	476	140,0
477	140,0	478	140,0	479	140,0	480	140,0
481	130,0	482	130,0	483	135,0	484	135,0
485	135,0	486	135,0	487	135,0	488	135,0
489	135,0	490	130,0	491	130,0	492	135,0
493	135,0	494	130,0	495	130,0	496	130,0
497	130,0	498	135,0	499	135,0	500	140,0
501	140,0	502	140,0	503	140,0	504	140,0
505	140,0	506	130,0	507	130,0	508	130,0
509	135,0	510	135,0	511	135,0	512	135,0
513	140,0	514	135,0	515	135,0	516	140,0
517	140,0	518	130,0	519	135,0	520	135,0
521	135,0	522	135,0	523	135,0	524	142,0
525	135,0	526	140,0	527	140,0	528	125,0
529	125,0	530	130,0	531	135,0	532	135,0
533	140,0	534	135,0	535	135,0	536	135,0
537	140,0	538	135,0	539	140,0	540	140,0
541	140,0	542	140,0	543	135,0	544	140,0
545	140,0	546	135,0	547	135,0	548	135,0
549	140,0	550	140,0	551	125,0	552	125,0
553	130,0	554	130,0	555	135,0	556	135,0
557	140,0	558	140,0	559	140,0	560	135,0
561	135,0	562	140,0	563	140,0	564	140,0
565	140,0	566	140,0	567	140,0	568	140,0
569	140,0	570	140,0	571	140,0	572	140,0
573	120,0	574	115,0	575	125,0	576	130,0
577	130,0	578	135,0	579	135,0	580	135,0
581	140,0	582	140,0	583	140,0	584	135,0
585	140,0	586	140,0	587	140,0	588	140,0

589	110,0	590	110,0	591	115,0	592	120,0
593	125,0	594	130,0	595	130,0	596	130,0
597	135,0	598	135,0	599	135,0	600	135,0
601	140,0	602	140,0	603	140,0	604	135,0
605	110,0	606	110,0	607	110,0	608	115,0
609	120,0	610	120,0	611	125,0	612	135,0
613	130,0	614	134,0	615	130,0	616	135,0
617	135,0	618	135,0	619	135,0	620	140,0
621	140,0	622	140,0	623	105,0	624	105,0
625	105,0	626	110,0	627	115,0	628	110,0
629	115,2	630	120,0	631	125,0	632	135,0
633	135,0	634	130,0	635	130,0	636	135,0
637	135,0	638	140,0	639	135,0	640	140,0
641	140,0	642	105,0	643	100,0	644	105,0
645	105,0	646	110,0	647	115,0	648	115,0
649	110,0	650	120,0	651	120,0	652	125,0
653	135,0	654	130,0	655	130,0	656	125,0
657	135,0	658	135,0	659	140,0	660	135,0
661	140,0	662	100,0	663	100,0	664	100,0
665	105,0	666	105,0	667	105,0	668	115,0
669	115,0	670	110,0	671	110,0	672	120,0
673	120,0	674	120,0	675	135,0	676	135,0
677	130,0	678	130,0	679	125,0	680	135,0
681	140,0	682	140,0	683	100,0	684	100,0
685	100,0	686	100,0	687	105,0	688	105,0
689	122,0	690	115,0	691	115,0	692	115,0
693	110,0	694	110,0	695	110,0	696	120,0
697	135,0	698	135,0	699	130,0	700	130,0
701	125,0	702	120,0	703	140,0	704	140,0
705	100,0	706	100,0	707	100,0	708	100,0
709	100,0	710	100,0	711	105,0	712	105,0
713	105,0	714	105,0	715	115,0	716	115,0
717	115,0	718	115,0	719	110,0	720	110,0
721	135,0	722	135,0	723	130,0	724	130,0
725	125,0	726	120,0	727	115,0	728	140,0
729	100,0	730	100,0	731	100,0	732	100,0
733	100,0	734	100,0	735	100,0	736	105,0
737	102,4	738	105,0	739	105,0	740	105,0
741	110,0	742	115,0	743	110,0	744	113,7
745	110,0	746	110,0	747	110,0	748	110,0
749	140,0	750	135,0	751	135,0	752	130,0
753	125,0	754	120,0	755	120,0	756	115,0
757	115,0	758	100,0	759	100,0	760	100,0
761	100,0	762	100,0	763	100,0	764	105,0
765	105,0	766	105,0	767	105,0	768	105,0
769	105,0	770	110,0	771	110,0	772	110,0
773	110,0	774	110,0	775	110,0	776	110,0
777	110,0	778	140,0	779	135,0	780	130,0
781	125,0	782	125,0	783	120,0	784	115,0
785	115,0	786	110,0	787	110,0	788	100,0
789	100,0	790	100,0	791	100,0	792	100,0
793	100,0	794	105,0	795	105,0	796	105,0

797	105,0	798	110,0	799	107,7	800	105,0
801	110,0	802	110,0	803	110,0	804	110,0
805	110,0	806	105,0	807	140,0	808	135,0
809	135,0	810	130,0	811	130,0	812	125,0
813	120,0	814	120,0	815	115,0	816	115,0
817	110,0	818	110,0	819	100,0	820	100,0
821	100,0	822	100,0	823	105,0	824	105,0
825	105,0	826	105,0	827	105,0	828	105,0
829	105,0	830	105,0	831	105,0	832	105,0
833	140,0	834	140,0	835	140,0	836	135,0
837	135,0	838	130,0	839	130,0	840	125,0
841	120,0	842	115,0	843	115,0	844	112,3
845	110,0	846	100,0	847	100,0	848	100,0
849	105,0	850	105,0	851	105,0	852	105,0
853	100,0	854	100,0	855	100,0	856	100,0
857	100,0	858	100,0	859	140,0	860	135,0
861	135,0	862	135,0	863	135,0	864	130,0
865	130,0	866	124,4	867	120,0	868	115,0
869	110,0	870	115,0	871	110,0	872	100,0
873	100,0	874	100,0	875	100,0	876	100,0
877	105,0	878	100,0	879	100,0	880	100,0
881	100,0	882	100,0	883	100,0	884	140,0
885	140,0	886	140,0	887	140,0	888	140,0
889	135,0	890	135,0	891	130,0	892	130,0
893	125,0	894	120,0	895	115,0	896	110,0
897	110,0	898	110,0	899	100,0	900	100,0
901	100,0	902	100,0	903	100,0	904	105,0
905	140,0	906	140,0	907	135,0	908	135,0
909	135,0	910	130,0	911	125,0	912	120,0
913	115,0	914	110,0	915	110,0	916	105,0
917	100,0	918	100,0	919	100,0	920	97,5
921	100,0	922	140,0	923	140,0	924	140,0
925	135,0	926	135,0	927	135,0	928	130,0
929	125,0	930	120,0	931	115,0	932	110,0
933	105,0	934	105,0	935	100,0	936	100,0
937	100,0	938	100,0	939	100,0	940	140,0
941	140,0	942	140,0	943	140,0	944	140,0
945	135,0	946	140,0	947	135,0	948	130,0
949	125,0	950	125,0	951	120,0	952	115,0
953	110,0	954	110,0	955	105,0	956	115,0
957	115,0	958	115,0	959	100,0	960	100,0
961	140,0	962	140,0	963	140,0	964	140,0
965	140,0	966	140,0	967	135,0	968	140,0
969	130,0	970	125,0	971	120,0	972	120,0
973	115,0	974	115,0	975	110,0	976	105,0
977	105,0	978	105,0	979	115,0	980	115,0
981	115,0	982	115,0	983	105,0	984	140,0
985	135,0	986	130,0	987	125,0	988	125,0
989	120,0	990	120,0	991	115,0	992	110,0
993	110,0	994	105,5	995	105,0	996	115,0
997	105,0	998	105,0	999	115,0	1000	115,0
1001	115,0	1002	112,0	1003	115,0	1004	140,0

1005	140,0	1006	135,0	1007	135,0	1008	130,0
1009	130,0	1010	130,0	1011	125,0	1012	120,0
1013	115,0	1014	115,0	1015	110,0	1016	110,0
1017	110,0	1018	115,0	1019	120,0	1020	115,0
1021	120,0	1022	120,0	1023	115,0	1024	115,0
1025	115,0	1026	140,0	1027	140,0	1028	140,0
1029	135,0	1030	140,0	1031	135,0	1032	135,0
1033	135,0	1034	130,0	1035	130,0	1036	130,0
1037	125,0	1038	115,0	1039	120,0	1040	120,0
1041	115,0	1042	125,0	1043	134,0	1044	120,0
1045	120,0	1046	120,0	1047	115,0	1048	115,0
1049	140,0	1050	140,0	1051	140,0	1052	140,0
1053	140,0	1054	135,0	1055	135,0	1056	135,0
1057	135,0	1058	130,0	1059	125,0	1060	115,0
1061	120,0	1062	130,0	1063	130,0	1064	125,0
1065	125,0	1066	120,0	1067	104,5	1068	140,0
1069	140,0	1070	140,0	1071	135,0	1072	135,0
1073	135,0	1074	120,0	1075	130,0	1076	125,0
1077	125,0	1078	125,0	1079	125,0	1080	140,0
1081	140,0	1082	135,0	1083	130,0	1084	130,0
1085	130,0	1086	130,0	1087	130,0	1088	140,0
1089	135,0	1090	135,0	1091	135,0	1092	135,0
1093	135,0	1094	140,0	1095	140,0	1096	135,0
1097	140,0	1098	140,0	1099	140,0		

Πίνακας 2: Υπολογιζόμενα υδραυλικά ύψη, για τον υπολογισμό στατιστικών δεικτών

id κόμβου	Υδραυλικό υψός Hm	id κόμβου	Υδραυλικό υψός Hm	id κόμβου	Υδραυλικό υψός Hm	id κόμβου	Υδραυλικό υψός Hm
1	137,98	2	140,00	3	140,00	4	138,19
5	136,18	6	140,00	7	138,32	8	136,57
9	134,94	10	140,00	11	139,12	12	136,53
13	138,03	14	135,20	15	133,72	16	140,00
17	139,10	18	138,50	19	137,53	20	135,49
21	136,50	22	134,12	23	132,57	24	140,00
25	139,09	26	138,20	27	138,18	28	137,38
29	136,12	30	135,15	31	136,90	32	132,97
33	134,15	34	131,41	35	140,00	36	139,06
37	138,14	38	137,61	39	137,02	40	137,32
41	136,18	42	135,00	43	132,12	44	133,79
45	130,52	46	140,00	47	138,99	48	138,06
49	137,01	50	135,91	51	135,07	52	131,06
53	133,10	54	132,02	55	134,31	56	129,85
57	140,00	58	138,93	59	137,94	60	137,16
61	136,21	62	135,51	63	130,57	64	131,65
65	132,52	66	133,35	67	134,69	68	133,75
69	129,41	70	140,00	71	138,93	72	137,84
73	136,77	74	135,80	75	130,05	76	131,12
77	132,73	78	131,95	79	133,70	80	133,90
81	134,81	82	132,85	83	129,00	84	140,00
85	139,00	86	137,92	87	136,80	88	135,63
89	129,52	90	130,65	91	132,06	92	131,59
93	133,00	94	133,13	95	133,94	96	134,75
97	128,27	98	140,00	99	139,04	100	138,03
101	137,01	102	136,15	103	135,25	104	128,70
105	130,31	106	131,43	107	132,39	108	132,33
109	133,22	110	134,16	111	127,41	112	140,00
113	139,12	114	138,23	115	137,11	116	135,95
117	134,59	118	128,10	119	130,07	120	129,06
121	131,38	122	132,47	123	133,45	124	127,17
125	140,00	126	139,28	127	138,37	128	137,38
129	135,86	130	135,94	131	134,61	132	133,39
133	128,20	134	129,27	135	130,59	136	132,38
137	127,17	138	140,00	139	140,00	140	139,25
141	138,17	142	136,83	143	135,54	144	134,09
145	133,78	146	132,66	147	131,40	148	128,40
149	129,39	150	130,59	151	127,31	152	140,00
153	138,84	154	137,76	155	136,00	156	133,77
157	131,94	158	131,92	159	128,61	160	129,63
161	130,60	162	127,59	163	140,00	164	139,08
165	136,47	166	137,36	167	133,94	168	132,08
169	130,85	170	128,93	171	129,83	172	127,92
173	140,00	174	140,00	175	138,64	176	135,11
177	136,50	178	132,65	179	130,91	180	131,38
181	129,36	182	130,20	183	128,34	184	140,00

185	140,00	186	138,24	187	133,81	188	135,77
189	131,89	190	130,68	191	129,84	192	128,85
193	140,00	194	138,37	195	132,64	196	133,65
197	137,38	198	131,16	199	130,35	200	129,44
201	140,00	202	140,00	203	131,71	204	132,17
205	135,98	206	133,88	207	140,00	208	138,31
209	130,84	210	130,00	211	131,26	212	132,55
213	137,54	214	136,22	215	134,29	216	140,00
217	140,00	218	130,35	219	131,56	220	132,59
221	134,09	222	140,00	223	138,41	224	137,31
225	130,58	226	131,72	227	132,73	228	133,78
229	137,60	230	135,85	231	140,00	232	140,00
233	140,00	234	130,86	235	131,94	236	133,02
237	134,13	238	136,18	239	140,00	240	138,06
241	130,95	242	132,05	243	133,05	244	134,94
245	134,13	246	137,33	247	138,48	248	140,00
249	130,89	250	131,68	251	132,68	252	134,26
253	137,87	254	136,48	255	136,10	256	140,00
257	140,00	258	140,00	259	130,53	260	131,26
261	132,31	262	133,53	263	137,11	264	135,17
265	140,00	266	138,73	267	138,38	268	130,19
269	130,85	270	131,87	271	132,89	272	133,93
273	140,00	274	140,00	275	136,88	276	135,13
277	140,00	278	129,84	279	130,44	280	131,53
281	132,69	282	133,74	283	140,00	284	136,77
285	134,69	286	129,44	287	130,01	288	130,97
289	132,56	290	131,86	291	133,53	292	140,00
293	136,94	294	135,20	295	134,04	296	129,05
297	129,68	298	130,63	299	131,54	300	132,69
301	132,29	302	133,08	303	140,00	304	136,79
305	135,10	306	134,32	307	133,38	308	128,61
309	129,42	310	130,42	311	131,33	312	132,36
313	140,00	314	137,42	315	134,99	316	133,81
317	132,78	318	128,27	319	129,24	320	130,28
321	131,18	322	131,96	323	140,00	324	138,38
325	136,56	326	133,73	327	134,48	328	132,89
329	132,01	330	128,03	331	129,05	332	130,17
333	131,15	334	140,00	335	138,15	336	136,28
337	133,07	338	134,04	339	132,07	340	127,82
341	128,72	342	130,01	343	131,16	344	140,00
345	138,28	346	136,85	347	134,68	348	133,15
349	132,29	350	127,50	351	128,31	352	129,46
353	131,01	354	130,60	355	131,74	356	140,00
357	138,57	358	137,41	359	135,50	360	133,45
361	132,45	362	127,16	363	127,92	364	128,94
365	129,92	366	131,71	367	131,37	368	130,70
369	140,00	370	138,88	371	137,90	372	136,24
373	134,05	374	132,62	375	126,87	376	127,60
377	128,58	378	129,51	379	130,42	380	132,06
381	131,69	382	131,16	383	140,00	384	139,14
385	138,16	386	136,88	387	135,13	388	133,05
389	126,55	390	127,20	391	128,37	392	129,27

393	129,97	394	131,08	395	130,58	396	131,78
397	131,92	398	131,58	399	140,00	400	139,58
401	138,98	402	138,54	403	137,49	404	136,09
405	134,27	406	126,18	407	126,83	408	127,86
409	129,46	410	129,05	411	130,05	412	131,62
413	131,13	414	130,67	415	132,75	416	135,21
417	135,98	418	135,58	419	134,15	420	132,12
421	140,00	422	140,00	423	139,59	424	139,21
425	139,28	426	139,00	427	138,23	428	137,01
429	125,75	430	126,47	431	127,80	432	129,24
433	130,36	434	130,11	435	130,27	436	132,42
437	131,73	438	131,09	439	134,66	440	133,28
441	137,75	442	137,47	443	137,54	444	136,07
445	140,00	446	139,69	447	139,73	448	139,61
449	139,56	450	139,17	451	138,26	452	125,09
453	125,58	454	127,43	455	129,05	456	130,89
457	130,49	458	131,00	459	131,26	460	131,55
461	133,97	462	133,10	463	132,69	464	131,76
465	131,53	466	136,28	467	135,06	468	139,09
469	138,91	470	138,84	471	139,02	472	138,77
473	137,53	474	140,00	475	140,00	476	140,00
477	140,00	478	140,00	479	140,00	480	140,00
481	123,93	482	124,12	483	126,07	484	129,17
485	127,91	486	130,60	487	132,58	488	132,11
489	132,03	490	132,17	491	132,23	492	132,66
493	135,73	494	134,42	495	133,75	496	133,16
497	132,43	498	137,62	499	136,44	500	140,00
501	140,00	502	140,00	503	140,00	504	140,00
505	138,80	506	122,24	507	122,32	508	124,48
509	126,59	510	130,90	511	129,69	512	128,59
513	132,33	514	134,27	515	134,38	516	133,81
517	133,80	518	132,98	519	133,21	520	133,70
521	137,47	522	137,13	523	135,41	524	133,09
525	133,73	526	138,84	527	140,00	528	120,26
529	120,22	530	122,62	531	125,04	532	127,36
533	132,69	534	131,25	535	130,64	536	129,41
537	134,24	538	135,60	539	136,61	540	136,72
541	136,12	542	136,18	543	134,45	544	138,67
545	138,59	546	137,11	547	136,14	548	135,78
549	140,00	550	140,00	551	117,91	552	117,79
553	120,49	554	123,48	555	126,10	556	128,32
557	134,48	558	132,46	559	132,87	560	131,35
561	130,04	562	136,41	563	137,83	564	140,00
565	140,00	566	140,00	567	140,00	568	140,00
569	140,00	570	140,00	571	138,38	572	138,00
573	115,33	574	114,93	575	117,47	576	122,57
577	120,15	578	125,10	579	127,44	580	129,59
581	136,75	582	134,99	583	133,21	584	131,19
585	140,00	586	140,00	587	140,00	588	140,00
589	112,11	590	111,96	591	114,27	592	115,88
593	118,32	594	124,45	595	122,28	596	120,50
597	126,62	598	128,67	599	131,71	600	130,39

601	140,00	602	137,32	603	135,38	604	133,51
605	109,00	606	109,22	607	111,49	608	113,31
609	116,99	610	115,23	611	118,91	612	126,11
613	124,26	614	122,59	615	121,32	616	128,05
617	129,99	618	133,64	619	131,86	620	140,00
621	137,64	622	135,57	623	106,53	624	106,72
625	108,84	626	110,67	627	113,78	628	111,90
629	116,45	630	115,32	631	119,61	632	127,68
633	126,13	634	123,91	635	122,04	636	129,44
637	131,46	638	135,49	639	133,44	640	140,00
641	137,67	642	104,51	643	104,57	644	106,46
645	108,25	646	109,71	647	114,68	648	112,84
649	110,84	650	118,25	651	116,63	652	120,26
653	128,70	654	126,36	655	124,25	656	122,08
657	130,82	658	132,89	659	137,55	660	135,20
661	140,00	662	102,62	663	102,67	664	104,41
665	106,05	666	107,55	667	108,67	668	115,54
669	113,76	670	111,88	671	109,82	672	118,47
673	117,39	674	119,73	675	131,49	676	128,81
677	126,69	678	124,08	679	121,16	680	134,56
681	140,00	682	137,37	683	100,79	684	100,96
685	102,66	686	104,18	687	105,56	688	106,71
689	106,78	690	115,79	691	114,15	692	112,79
693	111,35	694	110,08	695	108,83	696	118,45
697	133,72	698	130,17	699	127,08	700	125,40
701	122,48	702	119,74	703	137,04	704	140,00
705	99,06	706	99,46	707	101,18	708	102,65
709	103,93	710	105,00	711	105,97	712	106,01
713	106,86	714	108,07	715	117,06	716	114,00
717	113,40	718	112,40	719	110,81	720	109,33
721	136,59	722	132,83	723	129,17	724	127,57
725	123,88	726	121,02	727	118,48	728	140,00
729	97,51	730	98,50	731	99,98	732	101,43
733	102,66	734	103,70	735	104,37	736	105,14
737	105,03	738	106,10	739	106,75	740	107,48
741	108,18	742	115,84	743	113,11	744	110,09
745	111,61	746	111,42	747	109,86	748	108,64
749	140,00	750	136,10	751	131,58	752	129,08
753	125,44	754	122,14	755	120,06	756	118,12
757	116,63	758	98,96	759	100,37	760	101,67
761	102,78	762	103,65	763	104,30	764	104,76
765	105,39	766	105,89	767	106,23	768	107,20
769	107,62	770	114,81	771	113,42	772	111,47
773	109,59	774	109,54	775	109,98	776	108,72
777	107,73	778	140,00	779	134,57	780	131,19
781	127,63	782	122,97	783	120,98	784	119,35
785	117,66	786	116,29	787	115,04	788	99,33
789	100,79	790	102,09	791	103,21	792	104,15
793	104,89	794	105,73	795	106,17	796	106,68
797	106,97	798	112,62	799	114,01	800	111,27
801	109,79	802	108,22	803	108,32	804	108,50
805	107,50	806	106,71	807	140,00	808	136,35

809	135,61	810	131,97	811	129,64	812	124,85
813	122,23	814	121,35	815	120,06	816	118,76
817	117,70	818	116,16	819	99,88	820	101,47
821	102,87	822	104,13	823	105,09	824	106,25
825	113,03	826	115,03	827	109,59	828	111,24
829	108,08	830	106,60	831	106,82	832	107,12
833	140,00	834	140,00	835	140,00	836	136,20
837	133,93	838	133,39	839	129,96	840	126,61
841	123,16	842	121,29	843	120,61	844	118,87
845	117,43	846	100,67	847	102,43	848	104,00
849	105,51	850	112,99	851	114,57	852	116,44
853	107,76	854	109,31	855	110,95	856	106,27
857	104,86	858	105,25	859	140,00	860	137,46
861	136,92	862	137,01	863	133,91	864	132,99
865	129,87	866	124,93	867	123,29	868	121,99
869	120,38	870	119,50	871	118,41	872	101,74
873	103,59	874	112,55	875	114,05	876	116,07
877	117,67	878	105,72	879	107,24	880	108,80
881	110,39	882	104,27	883	102,92	884	140,00
885	140,00	886	140,00	887	140,00	888	138,31
889	136,00	890	135,41	891	133,05	892	131,67
893	128,05	894	124,46	895	122,89	896	121,58
897	120,33	898	119,17	899	111,99	900	113,63
901	115,35	902	117,13	903	117,96	904	119,04
905	140,00	906	140,00	907	137,87	908	136,99
909	134,91	910	133,74	911	130,25	912	126,17
913	124,02	914	122,62	915	121,38	916	120,22
917	114,83	918	116,41	919	118,09	920	119,18
921	119,58	922	140,00	923	138,75	924	138,59
925	137,21	926	136,48	927	135,91	928	133,27
929	130,70	930	127,34	931	125,12	932	123,65
933	122,19	934	120,90	935	115,85	936	117,41
937	118,97	938	119,82	939	120,85	940	140,00
941	140,00	942	140,00	943	138,94	944	138,49
945	138,08	946	138,56	947	138,17	948	135,86
949	133,59	950	131,47	951	128,35	952	126,03
953	124,61	954	123,29	955	122,35	956	116,95
957	118,42	958	119,89	959	120,49	960	121,30
961	140,00	962	140,00	963	140,00	964	140,00
965	140,00	966	140,00	967	138,02	968	140,00
969	136,10	970	134,18	971	132,12	972	129,47
973	126,95	974	125,62	975	124,82	976	123,75
977	122,49	978	123,31	979	118,05	980	119,44
981	120,93	982	121,34	983	121,84	984	140,00
985	138,30	986	136,73	987	134,88	988	133,59
989	131,02	990	129,31	991	126,95	992	125,77
993	125,49	994	124,69	995	124,17	996	123,06
997	123,56	998	124,15	999	119,09	1.000	120,45
1.001	121,83	1.002	122,64	1.003	122,63	1.004	140,00
1.005	140,00	1.006	138,73	1.007	138,52	1.008	137,01
1.009	136,01	1.010	135,43	1.011	132,77	1.012	129,51
1.013	128,05	1.014	126,72	1.015	126,30	1.016	125,94

1.017	124,95	1.018	123,87	1.019	124,25	1.020	124,61
1.021	120,13	1.022	121,55	1.023	122,89	1.024	123,06
1.025	123,53	1.026	140,00	1.027	140,00	1.028	140,00
1.029	138,74	1.030	140,00	1.031	138,11	1.032	137,81
1.033	137,76	1.034	135,46	1.035	134,29	1.036	131,41
1.037	128,24	1.038	127,30	1.039	125,63	1.040	126,72
1.041	124,75	1.042	125,07	1.043	125,37	1.044	121,37
1.045	122,96	1.046	124,41	1.047	123,99	1.048	124,00
1.049	140,00	1.050	140,00	1.051	140,00	1.052	140,00
1.053	140,00	1.054	137,42	1.055	136,62	1.056	133,44
1.057	130,36	1.058	127,96	1.059	126,76	1.060	124,72
1.061	125,74	1.062	126,19	1.063	126,55	1.064	122,79
1.065	124,79	1.066	126,33	1.067	124,97	1.068	140,00
1.069	140,00	1.070	136,29	1.071	133,42	1.072	130,85
1.073	128,08	1.074	126,82	1.075	127,63	1.076	124,78
1.077	127,22	1.078	129,21	1.079	127,80	1.080	140,00
1.081	136,63	1.082	133,82	1.083	130,04	1.084	127,52
1.085	130,36	1.086	133,34	1.087	131,70	1.088	140,00
1.089	137,66	1.090	136,86	1.091	130,83	1.092	134,65
1.093	137,60	1.094	140,00	1.095	140,00	1.096	133,16
1.097	134,96	1.098	140,00	1.099	140,00		

Πίνακας 3: Οι αντλούμενες παροχές για την κάθε περίπτωση, κατά την εξέταση της δυναμικής του υπό μελέτη υδροφορέα.

Συμβολισμός γεώτρησης	Αρχική παροχή Q (m ³ /day)	2Q	3Q	0,5Q
W1	960	1920	2880	480
W2	1560	3120	4680	780
W3	1440	2880	4320	720
W4	-	0	0	0
W5	-	0	0	0
W6	1080	2160	3240	540
W7	864	1728	2592	432
W8	960	1920	2880	480
W9	1440	2880	4320	720
W10	1488	2976	4464	744
W11	1320	2640	3960	660
W12	2112	4224	6336	1056
W13	1200	2400	3600	600
W14	1440	2880	4320	720
W15	1680	3360	5040	840
W16	1680	3360	5040	840
W17	840	1680	2520	420
W18	1200	2400	3600	600
W19	1008	2016	3024	504

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αβραμάκη Χρ., “Ανάπτυξη συστήματος αποφάσεων για τη διαχείριση της ποιότητας των επιφανειακών νερών, με τη χρήση των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών”, Χανιά, 2002.

Anderson M., W.W. Woessner, “Applied Groundwater Modeling”, Academic Press 1992.

Babu D. K., G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, “Chemical transport by three – dimensional groundwater flows, 1997.

Bear J. and A. Verruijt, “Modeling Groundwater Flow and Pollution”, D. Reised Publishing Co, 1987.

Βουδούρης Κ., Κ. Παπαδόπουλος, Η. Μπουλουκάκης, “Κατανομή των βροχοπτώσεων και υδρολογικό ισοζύγιο στον Νομό Ηρακλείου Κρήτης”, 4^ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, 256-267, 1997.

Γιολδάσης Κ., Σ. Σφακιωτάκης, “Μοντελοποίηση μεταφοράς στραγγισμάτων από το χώρο υγειονομικής ταφής Αμαρίου Ρεθύμνης εντός του υπογείου υδροφορέα”, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά, 2002.

Delleur J.W., “The handbook of groundwater engineering”, CRC Press Springer, 1999.

Καλλέργης Γ. Α., “Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τόμοι Α, Β”,
Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., 1986.

Καρατζάς Γ. Π., Σημειώσεις μαθήματος “Ροή υπογείων υδάτων και μεταφορά ρύπων”,
Χανιά, 2000.

Κομνίτσας Κ., “Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωστατιστική”, Σημειώσεις
προπτυχιακού μαθήματος Γεωστατιστικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων,
Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.

McDonald, M.G., A.W. Harbaugh, “A modular three-dimensional finite-difference
groundwater flow model”, Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1,
USGS, 1988.

Μπουλουκάκης Η, “Υδρογεωλογική – Γεωφυσική διερεύνηση της ευρύτερης περιοχής
Γουβών – Καστελλίου Πεδιάδος (Ηράκλειο Κρήτης)”, Τμήμα Γεωλογίας,
Πανεπιστήμιο Πατρών, Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 2000

Μπουλουκάκης Η., Κ. Βουδούρης, “Αξιολόγηση αντλητικών δεδομένων στους
πλακώδεις ασβεστόλιθους στον Νομό Ηρακλείου Κρήτης”, 3^ο Υδρογεωλογικό
Συνέδριο, 324-335, 1995.

Pinder G.F., “Groundwater modeling using geographical information systems”, Notes
of Shortcourse, University of Vermont, Jan 2002.

Pritchett T.A., C.G. Lonnquist, "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation", Illinois State Water Survey, Bulletin 55, 1971.

Σούλιος Χ.Γ. "Γενική Υδρογεωλογία, Τόμοι Α,Β", University Press, 1986.

Τιμπλαλέξης Θ. "Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς νιτρικών στον παραλιακό ελεύθερο υδροφορέα της δυτικής περιαστικής ζώνης της Καλαμάτας", Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πτυχιακή εργασία, Ιούλιος 2002.

Townley L.R., "AQUIFEM-N: a Multi – Layered Finite Element Aquifer Flow Model User's manual and description", CSIRO Division of Water Resources, Perth, Western Australia, 1990.

Townley L.R., J.L Wilson, "Conditional second moment analysis of groundwater flow: the cumulative effects of transmissivity and head measurements", Proc. of International Conference on Groundwater and Man, Australian Government Publ. Service, Canberra, 1983.

Φυτρολάκη Ν, "Η γεωλογική δομή της Κρήτης", Διατριβή επί υφηγεσία, Εκδόσεις της έδρας Ορυκτολογίας – Πετρογραφίας – Γεωλογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 1980.