# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

## ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ


**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

**“ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

# “ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΤΟ ΔΕΛΤΑ ΠΗΝΕΙΟΥ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ”


## ΚΟΛΤΣΙΔΑ ΚΩΝ/ΝΑ


**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΑΡΑΤΖΑΣ (Επιβλέπων)**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ Π. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ**


**ΧΑΝΙΑ ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Δρ. Γεώργιο Π. Καρατζά, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και Διευθυντή των Μεταπτυχιακών Σπουδών για την πολύτιμη καθοδήγησή του και τη σημαντική συμβολή του στην εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης.

Ακόμη, ευχαριστώ πολύ τον κ. Δρ. Θεόδωρο Καρυώτη, Ερευνητή Β΄ του Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (Ινστιτούτο Χαρτογράφησης και Ταξινόμησης Εδαφών Λάρισας) για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος κ. Δρ. Ν. Καλογεράκη και Δρ. Ν. Νικολαΐδη για τη συμμετοχή τους στην Εξεταστική Επιτροπή.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του οικοσυστήματος μέσα στο οποίο ζει ο άνθρωπος και βασικό χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος. Η υπερβολική ζήτηση του νερού κυρίως για την άρδευση και την ύδρευση έχουν οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών συστημάτων και την υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί ο υπόγειος υδροφορέας στην περιοχή του Δέλτα Πηνειού, όπου υπάρχει έντονη αγροτική δραστηριότητα, όσων αφορά τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων και των χλωριόντων που η αυξημένη συγκέντρωσή τους μπορεί να προκαλέσει σημαντική διατάραξη του οικοσυστήματος στην περιοχή και κατ' επέκταση στην υγεία του ανθρώπου. Επιπλέον, το Δέλτα του Πηνειού αποτελεί ένα σημαντικό υγροβιότοπο στον οποίο φιλοξενείται πλήθος πουλιών και ζώων γι' αυτό και η διαχείρισή του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Για τη μελέτη του υπόγειου υδροφορέα εφαρμόστηκε το πρόγραμμα "Argus ONE", ένα πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών που σε συνδυασμό με το πρόγραμμα "PTC" έχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Το "PTC" είναι ένα πρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί σε Fortran 77 με τη βοήθεια του οποίου επιλύθηκε η ροή του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις και προσομοιώθηκε η μεταφορά των ρύπων – νιτρικών και χλωριόντων – του υπόγειου νερού.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των νιτρικών και των χλωριόντων προέκυψε ότι κατά την καλλιεργητική περίοδο εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα η στάθμη του υποχωρεί μέχρι και 5 περίπου μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το γεγονός αυτό συντελεί στην αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων πάνω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο για το πόσιμο νερό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα υφαλμύρινσης σε μεγάλο τμήμα της παράκτιας ζώνης.

Όσον αφορά τα νιτρικά ιόντα, παρά το ότι υπάρχουν μεγάλες καλλιεργήσιμες εκτάσεις στην περιοχή, η συγκέντρωσή τους βρίσκεται κάτω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο που έχει οριστεί για το πόσιμο νερό. Εξαιτίας όμως των χαλαρών εδαφών που επικρατούν, μία πιθανή αύξηση της συγκέντρωσής τους μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα σε μεγάλη έκταση της περιοχής μελέτης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το νερό, που είναι ένα από τα βασικά 'κοινωνικά αγαθά', αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του οικοσυστήματος μέσα στο οποίο ζει ο άνθρωπος αλλά και ουσιώδες χαρακτηριστικό του φυσικού περιβάλλοντος. Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και η μεγάλη βιομηχανική ανάπτυξη έχουν οδηγήσει στην υπερβολική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, με συνέπεια την εξάντλησή τους και την καταστροφή τους. Στο επίκεντρο αυτών των εντατικών εκμεταλλεύσεων, τα τελευταία χρόνια, βρίσκεται το υδατικό δυναμικό. Η υπεράντληση των υπόγειων υδατικών συστημάτων, η υποβάθμιση της ποιότητάς τους και η υπερεκμετάλλευση των επιφανειακών νερών, ιδιαίτερα για την κάλυψη της υπερβολικής ζήτησης νερού άρδευσης, κάνουν το πρόβλημα του νερού θέμα μείζονος σημασίας, τόσο σε τοπικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Η υπεράντληση νερού σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στη θάλασσα, όπως η περιοχή μελέτης που είναι το Δέλτα του Πηνειού, έχει προκαλέσει προβλήματα υφαλμύρινσης στον υπόγειο υδροφορέα με αποτέλεσμα τη δημιουργία αλατούχων εδαφών, την καταστροφή καλλιεργειών και τη διατάραξη του οικοσυστήματος που έχει αναπτυχθεί στην περιοχή.

Ακόμη, η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με την έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα στην περιοχή και κατ' επέκταση με την αυξημένη χρήση αζωτούχων λιπασμάτων είναι πιθανό να οδηγήσουν στη συσσώρευση νιτρικών στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής. Επιπλέον, τα χαλαρά εδάφη που επικρατούν στην περιοχή του Δέλτα Πηνειού και οι σημαντικές εκπλύσεις που σημειώνονται, συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών στα υπόγεια νερά. Το γεγονός αυτό είναι δυνατό να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα τόσο στο περιβάλλον (ευτροφισμός) όσο και στην υγεία των ανθρώπων και των ζώων (κυάνωση, καρκίνος) μέσω του πόσιμου νερού αλλά και των τροφών.

Το υγροτοπικό σύμπλεγμα των εκβολών του Πηνειού ποταμού αποτελεί ένα ευαίσθητο οικοσύστημα αφού εκεί φιλοξενείται πλήθος πουλιών και ζώων με αποτέλεσμα η διαχείρισή του να απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.
Η περιοχή λόγω της μεγάλης αξίας της, έχει περιληφθεί στον επιστημονικό κατάλογο των προστατευόμενων περιοχών με στόχο την τελική ένταξη στο Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000.

Οι υγροβιότοποι προσφέρουν ανυπολόγιστα φυσικά, βιολογικά, κοινωνικά, πολιτιστικά και οικονομικά οφέλη, τα βασικότερα των οποίων είναι: η στήριξη των τροφικών αλυσίδων, η δέσμευση της ηλιακής ενέργειας, η απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα και η έκλυση οξυγόνου, ο εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφορέα, ο έλεγχος των πλημμυρικών φαινομένων.

Η χρησιμότητά τους για τον άνθρωπο είναι ολοφάνερη και η αξία τους είναι πολυποίκιλη: υδρευτική, αρδευτική, αντιπλημμυρική, θηρευτική, επιστημονική – εκπαιδευτική.
Οι κίνδυνοι όμως που απειλούν τα οικοσυστήματα και κατ' επέκταση και την οικολογική ισορροπία μιας περιοχής είναι πάρα πολλοί, οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι η ελλιπής νομοθεσία, η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών για άρδευση, ύδρευση κ.λπ. καθώς επίσης και η ρύπανση από λύματα, από στερεά απόβλητα και αγροχημικά ή λιπάσματα.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με την γεωλογία, την υδρολογία, τη χρήση της γης και του νερού στην ευρύτερη περιοχή. Παράλληλα συγκεντρώθηκαν όσα στοιχεία υπήρχαν διαθέσιμα σχετικά με την πιεζομετρική επιφάνεια και την ποιότητα του υπόγειου υδροφορέα. Έτσι με βάση τα στοιχεία αυτά, αναλύθηκε η λειτουργία του υδατικού συστήματος και ιδιαίτερα του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή του Δέλτα Πηνειού.

Ακόμη, για τη μελέτη του υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα "Argus ONE", ένα GIS πρόγραμμα δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών που σε συνδυασμό με το πρόγραμμα "PTC" έχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων.
Το "PTC" είναι ένα πρόγραμμα που έχει δημιουργηθεί σε Fortran 77 και επιλύει τη ροή του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις καθώς επίσης και προσομοιώνει την μεταφορά των ρύπων του υπόγειου νερού.
Έτσι, έγινε μια εκτίμηση της σημερινής κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή, όσων αφορά τις συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων και των χλωριόντων που η αυξημένη συγκέντρωσή τους μπορεί να προκαλέσει σημαντική διατάραξη του οικοσυστήματος στην περιοχή και κατ' επέκταση στην υγεία του ανθρώπου, καθώς επίσης και μια πρόβλεψη για το άμεσο μέλλον σε περίπτωση που οι εκτιμώμενες συνθήκες συνεχίσουν να επικρατούν στην περιοχή μελέτης.

Επιπλέον μελετήθηκε η υποθετική περίπτωση σημαντικής αύξησης της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων στον υδροφορέα καθώς και η μεταβολή της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε περίπτωση μείωσης κατά το ήμισυ του ρυθμού άντλησης των πηγαδιών άρδευσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

## 2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Ο χώρος της Θεσσαλίας αποτελεί ένα εκτεταμένο ενδοορεινό βύθισμα που δεν είναι γεωμορφολογικά ενιαίο, αλλά αποτελείται από δύο μικρότερα βυθίσματα:

- το βύθισμα της Δυτικής Θεσσαλίας που θεωρείται ενιαίο και
- το βύθισμα της Ανατολικής Θεσσαλίας που περιλαμβάνει μικρότερες ταφρολεκάνες σε κλιμακωτή διάταξη. Η Ανατολική λεκάνη περιλαμβάνει την πεδινή έκταση που απαρτίζεται από τα τμήματα:

α) Το Βορειοδυτικό τμήμα, στο οποίο ανήκει η ευρύτερη περιοχή του Τυρνάβου με όριο τον Πηνειό ποταμό.

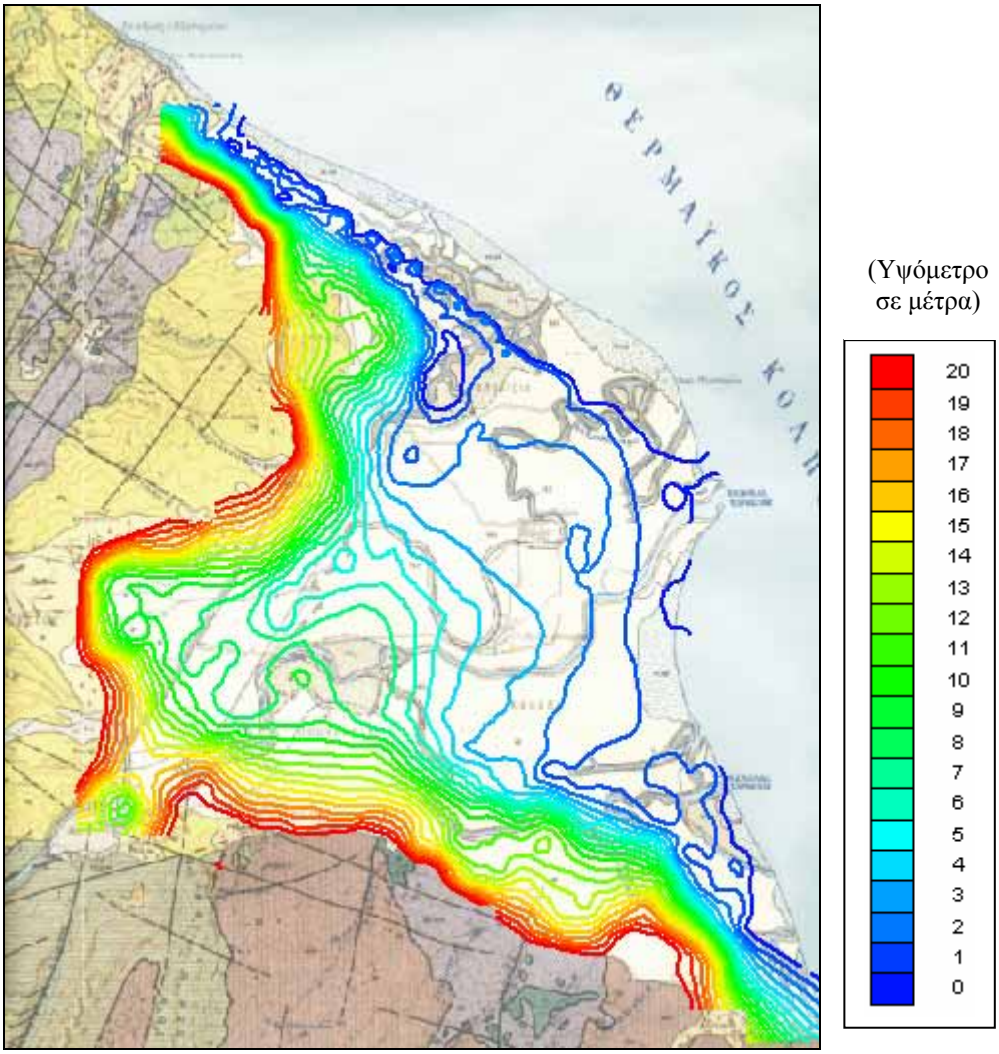
β) Το Κεντρικό τμήμα, στο οποίο ανήκει η πεδινή έκταση από τον Πηνειό ποταμό έως τη ζώνη Ομορφοχώρι – Πλατύκαμπος – Μελισσοχώρι.

γ) Το Νοτιοανατολικό τμήμα, που περιλαμβάνει την έκταση από τον Πλατύκαμπο έως τη λίμνη Κάρλα [Ευαγγελόπουλος Αθ.,1994].

Διαθέτει μία μόνο σημαντική έξοδο, την Κοιλάδα των Τεμπών, από την οποία σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους, διέφευγαν προς την θάλασσα όλα τα νερά του Θεσσαλικού κάμπου.

Η περιοχή μελέτης, χάρτης 2-1, αποτελεί το τμήμα που καταλαμβάνεται από το πεδινό τμήμα του Δέλτα του Πηνειού αμέσως μετά τα Τέμπη, βορειοδυτικά από τους ορεινούς όγκους του Κάτω Ολύμπου και νοτιοδυτικά της Όσσας. Η ευρύτερη περιοχή περιλαμβάνει τις λεκάνες απορροής των χειμάρρων του κάτω Ολύμπου και της Όσσας που εκφορτίζονται στην περιοχή του Δέλτα. Πιο αναλυτικά οριοθετείται ανατολικά και βορειοανατολικά από το Αιγαίο Πέλαγος (Θερμαϊκός κόλπος), βόρεια, βορειοδυτικά και δυτικά από τον ορεινό όγκο του Κάτω Ολύμπου (Βίγλα, Καραγιάννη, Κολυμπάρι, Ταίρος, Κλαρί, Μεταμόρφωση, Καρφιά, Παλάτζα, Χλιαρινός, Ράχη Μιτσόλακκα, Μπηγμένη Πέτρα, Κέδρος, Σολιό, Καράβια και Τσουμάκα), νοτιοδυτικά, νότια και νοτιοανατολικά από τους ορεινούς όγκους της Όσσας (Ολόφωτοι, Ράχη Λαγουδάρη, Ράχη Βαγώνη, Βασιλίτσα, Ράχη Παπάς, Γιαηλιάς, Πύργος, Τέσσερις Βρύσσες και Κάναλος).

Η συνολική έκταση της ευρύτερης περιοχής είναι 241 $km^2$ εκ των οποίων τα 62 $km^2$ αναφέρονται στο πεδινό τμήμα, με υψόμετρο 0 έως 10 m (περιοχή του Δέλτα), τα 89 $km^2$ στην περιοχή Κάτω Ολύμπου με υψόμετρο μεγαλύτερο των 10 m και τα 90 $km^2$ στην περιοχή Όσσας με υψόμετρο επίσης μεγαλύτερο των 10 m, πίνακας 2-1.




**Χάρτης 2-1. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής του Δέλτα Πηνειού [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ 2001, ΙΓΜΕ].**

Η περιοχή του Δέλτα Πηνειού αποτελείται από τις αποθέσεις του ποταμού και εμφανίζει ιδιαίτερα ήπιο μορφολογικό ανάγλυφο με πολύ μικρές κλίσεις που κυμαίνονται μεταξύ 0,1 – 0,2 %. Τα υψόμετρα του εδάφους στην περιοχή κυμαίνονται από 0 – 8 m ενώ οι στάθμες του εδάφους είναι κάτω από 1 m.

Η πρόσφατη δημιουργία του Δέλτα που οφείλεται στις αποθέσεις του Πηνειού, δικαιολογεί τη μικρή σχετικά έκταση που καταλαμβάνει. Η έκταση πάντως του Δέλτα περιορίζεται και από την δράση των θαλάσσιων ρευμάτων και του κυματισμού που απαγορεύουν την ταχύτερη επέλασή του. Επιπλέον, οι ποτάμιες αποθέσεις εκτείνονται μέσα στη θάλασσα, με αποτέλεσμα το βάθος της θάλασσας να μην υπερβαίνει τα 5 m σε απόσταση 500 m από την ακτή.

**Πίνακας 2-1. Κατανομή των εκτάσεων της ευρύτερης περιοχής του Δέλτα Πηνειού ανά υψομετρική ζώνη.**

| Υψομετρική ζώνη (m) | Πεδινή Περιοχή ($km^2$) | Περιοχή Κάτω Ολύμπου ($km^2$) | Περιοχή Όσσας ($km^2$) |
|---|---|---|---|
| 0 – 10 | 62,488 | - | - |
| 10 – 100 | | 15,308 | 8,097 |
| 100 – 200 | | 9,770 | 5,116 |
| 200 – 400 | | 14,071 | 10,639 |
| 400 – 600 | | 10,278 | 11,016 |
| 600 – 800 | | 10,285 | 17,274 |
| 800 – 1000 | | 12,094 | 19,788 |
| 1000 – 1200 | | 12,530 | 8,927 |
| 1200 – 1400 | | 3,663 | 4,304 |
| 1400 – 1600 | | 0,922 | 3,185 |
| 1600 – 1800 | | | 0,907 |
| **Σύνολο** | **62,488** | **88,921** | **89,253** |

Πηγή: Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001.

Οι σύγχρονες δελταϊκές αποθέσεις του ποταμού εμφανίζουν τυπική τοξοειδή διατομή με ακτινωτή ανάπτυξη από την έξοδο της κοιλάδας των Τεμπών προς τη θάλασσα. Εξαιτίας της πρόσφατης γεωλογικά δημιουργίας των αποθέσεων και των πολύ ήπιων τοπογραφικών κλίσεων, ο ποταμός εμφανίζει πολυσχιδή διάταξη της κοίτης του. Έτσι παρουσιάζονται πολλαπλές κοίτες με ακτινωτή διάταξη, έντονος μαιανδρισμός και αποκομμένα τμήματα κοιτών που λειτουργούν μόνο σε περίοδο πλημμυρικών φαινομένων. Οι συνεχείς ανθρωπογενείς επεμβάσεις στην περιοχή προκαλούν εμφανείς μεταβολές του πεδινού τοπογραφικού ανάγλυφου, που συχνά έχουν σαν αποτέλεσμα την εξαφάνιση παλαιών τμημάτων της κοίτης του ποταμού.

Την εικόνα των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής συμπληρώνουν ιδιαίτερες γεωμορφές, σημαντικότερες από τις οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Αμμοθίνες αιολικής προέλευσης, που εμφανίζουν διακεκομμένη αλλά μεγάλη ανάπτυξη. Η προέλευσή τους είναι τα στεγνά τμήματα της ακτής απ' όπου μεταφέρονται με τη δράση του ανέμου και αποθέτονται σε μία έως τρεις σειρές παράλληλες προς την ακτή.

- Lagoons, που χαρακτηρίζονται συχνά από σκληρό υπόβαθρο. Αποτελούν κλειστές επιφάνειες πληρωμένες με νερό που παγιδεύτηκε από τη θάλασσα, με τη βοήθεια φυσικών φραγμάτων με ανάπτυξη παράλληλη προς την ακτή. Έχουν ακανόνιστο σχήμα, ενώ η έκτασή τους σε κάποιες θέσεις είναι σημαντική. Εντοπίζονται κυρίως στις παλαιές κοίτες του ποταμού. Τα υλικά απόθεσης στους σχηματισμούς αυτούς είναι λεπτομερής άμμος, ιλύς και οργανικής προέλευσης άργιλος. Η σημαντική παρουσία οργανικού υλικού προκαλεί με την αποσύνθεσή του έντονη χαρακτηριστική οσμή. Η στάθμη του

νερού μέσα στους σχηματισμούς αυτούς επηρεάζεται έντονα από τις παλιρροιακές κινήσεις και τον κυματισμό, όταν παρατηρείται άμεση επικοινωνία με τη θάλασσα.

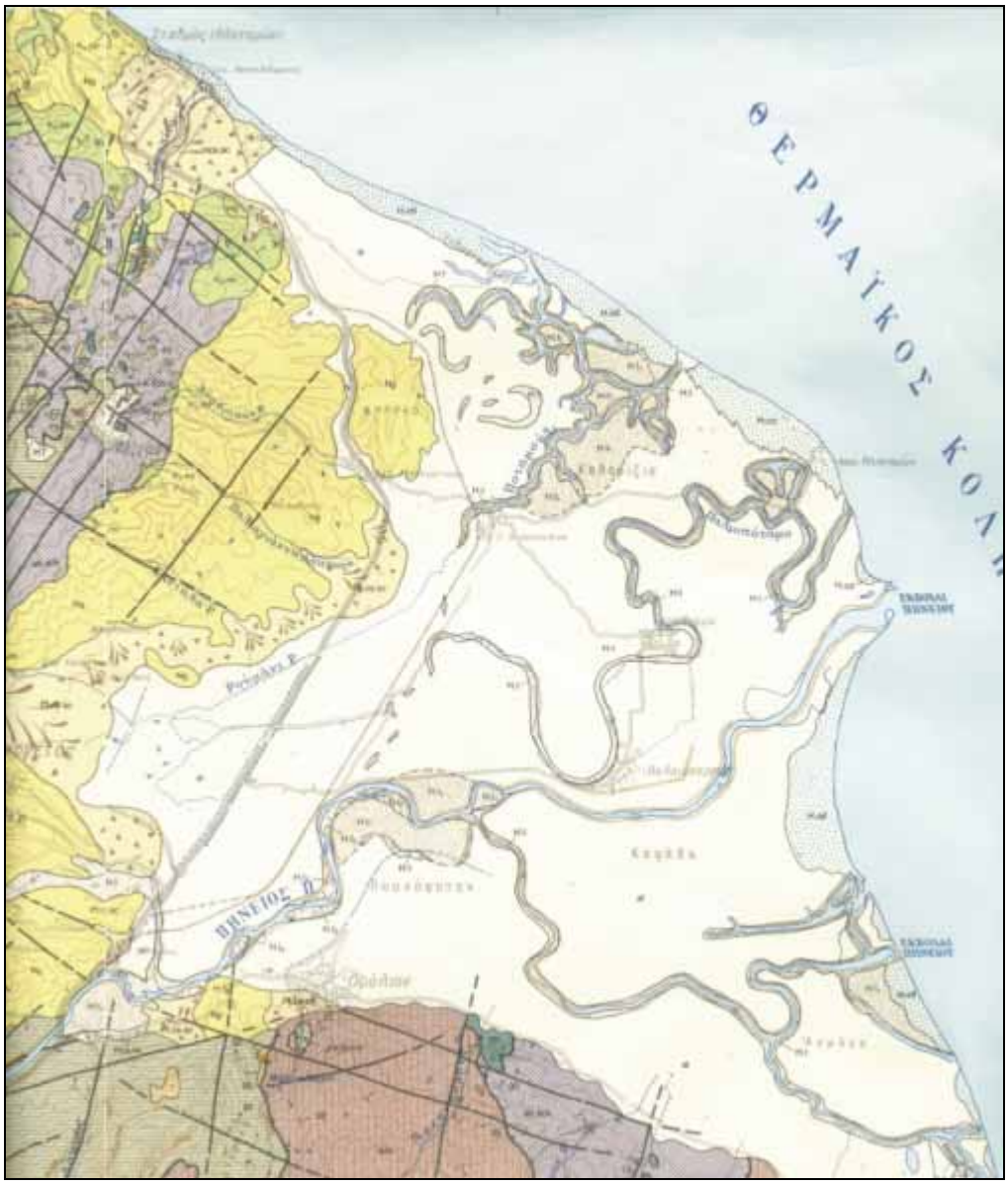
- Έλη και υγρά εδάφη, που καταλαμβάνουν έκταση που μεταβάλλεται ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες και παρατηρούνται σε διάφορες αποστάσεις από τη θάλασσα. Σχηματίζονται σαν αποτέλεσμα της αδυναμίας αποστράγγισης των εδαφών εξαιτίας των πολύ μικρών τοπογραφικών κλίσεων, των λεπτομερών υλικών που αποτελούν την εδαφική ζώνη και των φυσικών εμποδίων αποστράγγισης που υπάρχουν, προς τη θάλασσα.

Σημαντικό επίσης στοιχείο που χαρακτηρίζει τη γεωμορφολογία της περιοχής είναι η κατάληξη σε αυτή μεγάλων υδατορευμάτων χειμαρρώδους απορροής, τόσο στα νότια όσο και στα δυτικά κράσπεδα της περιοχής, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών κώνων κορημάτων και τη δημιουργία σημαντικών υποσκαφών του ανάγλυφου όπως π.χ συμβαίνει στο ρέμα Πυργετού και στο Αρχοντόρρεμα στα δυτικά και νότια κράσπεδα της περιοχής, αντίστοιχα.

Οι αποθέσεις που υπάρχουν στην πεδινή περιοχή του Δέλτα είναι οι πλειοτεταρτογενείς αποθέσεις, χάρτης 2-2, οι οποίες εμφανίζουν σημαντική ποικιλομορφία όσον αφορά τη λιθολογική τους σύσταση και τον τρόπο ιζηματογένεσής τους. Στη συνέχεια περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά των αποθέσεων αυτών, σύμφωνα με τη στρωματογραφική τους ηλικία, ξεκινώντας από τις αρχαιότερες.

Το Νεογενές στην περιοχή αυτή αντιπροσωπεύεται από μια αδιαίρετη ακολουθία σημαντικού πάχους που κατά θέσεις υπερβαίνει τα 300 m. Εκτεταμένες εμφανίσεις της ακολουθίας αυτής παρατηρούνται στην περιοχή μεταξύ Πλαταμώνα και Πυργετού, κατά μήκος των ανάντη δυτικών κρασπέδων των δελταϊκών αποθέσεων. Πρόκειται για αποθέσεις χερσαίας και λιμναίας φάσης που χαρακτηρίζονται από σημαντική λιθολογική ετερογένεια. Η νεογενής ακολουθία εκτιμάται ότι θα πρέπει να αποτελεί το υπόβαθρο των πλειστοκαινικών και ολοκαινικών ιζημάτων της δελταϊκής λεκάνης, αν και η εκτίμηση αυτή δεν επιβεβαιώνεται, αφού οι υφιστάμενες λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων είναι περιορισμένου βάθους.
Στη βάση της, η ακολουθία είναι λιμναίας φάσης και αποτελείται από μάργες εντός των οποίων απαντούν ολισθόλιθοι από ανθρακικά συνεκτικά λατυποπαγή, οφιόλιθοι και μάρμαρα ποικίλου μεγέθους που κατολίσθησαν από τα παρακείμενα πρανή και περιορίστηκαν μέσα στις μάργες. Προς τα επάνω, η φάση αυτή μεταβαίνει σε κροκαλολατυποπαγή με εμφανή στρώση στη βάση

τους και προοδευτική αύξηση του μεγέθους των κροκάλων. Η φάση αυτή με τη σειρά της αναμιγνύεται προς τους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες με κοκκινοχώματα, τα οποία τελικά και κυριαρχούν. Το πάχος των καθαρών αποθέσεων κοκκινοχώματος σε μερικές θέσεις υπερβαίνει τα 40 m, ενώ πάνω από αυτά απαντούν και πάλι μάργες στα ανώτερα τμήματα των οποίων εμφανίζονται κροκαλοπαγή σε στρώσεις. Οι κροκάλες των στρώσεων αυτών είναι μικρού μεγέθους και ποικίλης λιθολογικής σύστασης ενώ ακολουθούν εναλλαγές μάργων και άμμων με παρεμβολές κροκαλοπαγών.




**Χάρτης 2-2. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Δέλτα Πηνειού [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001, ΙΓΜΕ].**

Η περίοδος του πλειστόκαινου αντιπροσωπεύεται από τους παλαιούς κώνους κορημάτων, τα πλευρικά κορήματα και τα υλικά αναβαθμίδων χειμάρρων. Οι αποθέσεις αυτές συναντώνται

κυρίως στα κράσπεδα των αλλουβιακών πεδίων και αποτελούνται από αδρομερή υλικά με κροκαλολατυποπαγή ποικίλου μεγέθους και σύστασης συγκολλημένα με ανθρακικό υλικό. Το ύψος των αναβαθμίδων φτάνει τα 10 m.

Κατά την περίοδο του ολόκαινου διακρίνονται οι ακόλουθες αποθέσεις:

- Η αλλουβιακή ακολουθία της λεκάνης Ομολίου, που αποτελείται από άμμο και σε μικρότερο βαθμό από κροκαλολατύπες μικρού κατά κανόνα μεγέθους και αργίλους. Προς τις παρυφές της λεκάνης η συμμετοχή των κροκαλολατυπών είναι μεγαλύτερη. Η φάση ιζηματογένεσης είναι ποτάμια, αλλά και ποταμολιμναία με συχνά μεγάλη εξάπλωση. Εξαιτίας της συνεχούς αλλαγής της κοίτης του ποταμού Πηνειού, παρατηρείται ο σχηματισμός αναβαθμίδων ύψους μέχρι 5 m.

- Οι παράκτιοι σχηματισμοί που αποτελούνται από άμμο ενώ σε μερικές θέσεις παρατηρείται και αργιλικό υλικό. Στις θέσεις σημαντικής ανάπτυξης παρατηρείται ο σχηματισμός θινών. Κατά μήκος της ακτογραμμής έχει σχηματιστεί θαλάσσια αναβαθμίδα ύψους μέχρι 1,5 m σαν αποτέλεσμα του κυματισμού.

- Τα ασύνδετα σύγχρονα ιζήματα στα οποία συμπεριλαμβάνονται οι πρόσφατες αποθέσεις της κοίτης του ποταμού και των αναβαθμίδων των χειμάρρων, οι κώνοι κορημάτων και τα πλευρικά κορήματα. Αποτελούνται από άμμο, αργίλους, κοκκινοχώματα και κροκαλολατύπες ποικίλου μεγέθους και λιθολογικής σύστασης [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].

Σύμφωνα με μελέτη [ΕΘΙΑΓΕ, 1997] τα εδάφη της περιοχής αναπτύχθηκαν σε αλλουβιακές αποθέσεις της Τεταρτογενούς Περιόδου και δεν παρουσιάζουν σημαντική διαβάθμιση ηλικιών. Διακρίνονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες σύμφωνα με το τοπογραφικό ανάγλυφο που δημιούργησαν τα φερτά υλικά, τη συχνότητα πλημμύρων στην περιοχή, την απόσταση από την κύρια κοίτη του Πηνειού ποταμού και το χρόνο ηρεμίας. Γενικά είναι εδάφη μετασχηματισμένων αλλουβιακών αποθέσεων που προήλθαν από τα φερτά υλικά του Πηνειού ποταμού και σε ελάχιστες περιπτώσεις κολλουβιακών, που προήλθαν από την χημική και μηχανική αποσάθρωση των πετρωμάτων των ορεινών σχηματισμών του Κάτω Ολύμπου και της Όσσας. Τα παραπάνω υλικά στις θέσεις που αποτέθηκαν και κάτω από την επίδραση των παραγόντων εδαφογένεσης (μητρικό υλικό, κλίμα, τοπογραφία, οργανισμοί και χρόνος), έδωσαν γένεση στα εδάφη της περιοχής που περιγράφονται στη συνέχεια, χάρτης 2-3.

**Πρόσφατα αλλουβιακά εδάφη Entisols**

Είναι εδάφη χωρίς πεδογενετικούς ορίζοντες και βρίσκονται κάτω από συνεχή προσθήκη νέων υλικών, πλούσια σε ανθρακικά άλατα κυρίως του ασβεστίου σε ποσοστό μέχρι 30 % σε όλο το βάθος της εδαφοτομής.

Η εδαφοτομή είναι ποικίλης κοκκομετρικής σύστασης με συχνότερες την πηλώδη (L), την αργιλλοπηλώδη (CL), υπερβολικά έως κακά αποστραγγιζόμενα και σε περιοχές των χαμηλότερων τμημάτων του σημερινού πεδίου πλημμύρων με μόνιμη στάθμη υπόγειου νερού. Έχουν κλίσεις κυρίως από 0 – 2 % και σε ελάχιστες περιπτώσεις προς την περιφέρεια από 2 – 6 %. Από πλευράς γονιμότητας τα εδάφη χαρακτηρίζονται μέσης περιεκτικότητας σε οργανική ουσία περίπου 1,5 %, μέσης Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) περίπου 15 meq/100 gr εδάφους.

Το pH είναι αρκετά υψηλό λόγω της περιεκτικότητας σε $CaCO_3$ περίπου 8 και αυξάνεται ελάχιστα με το βάθος. Στην περιοχή του Παλαιόπυργου ξεπερνά το 9 στα βαθύτερα στρώματα εξαιτίας της επίδρασης του θαλάσσιου νερού του Παλαιοποτάμου που επιτρέπει την εισχώρησή του προς τα ενδότερα.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα δεν υπερβαίνει τα 3 mmhos/cm. Ο βαθμός αλκαλίωσης δεν ξεπερνά το 10 % στην μεγαλύτερη έκτασή του εκτός από ορισμένες περιοχές που είναι υποβαθμισμένες από αλκαλίωση όπως είναι περιοχές προς τους Νέους Πόρους και ακολουθούν οι περιοχές της Κουλούρας και του Παλαιοπύργου. Οι περιοχές αυτές, για καλλιέργειες ευαίσθητες στο $Na^+$ όπως είναι το καλαμπόκι, τα φασόλια και σε κάποιο βαθμό τα ζαχαρότευτλα, έχουν μείωση της παραγωγής τους.

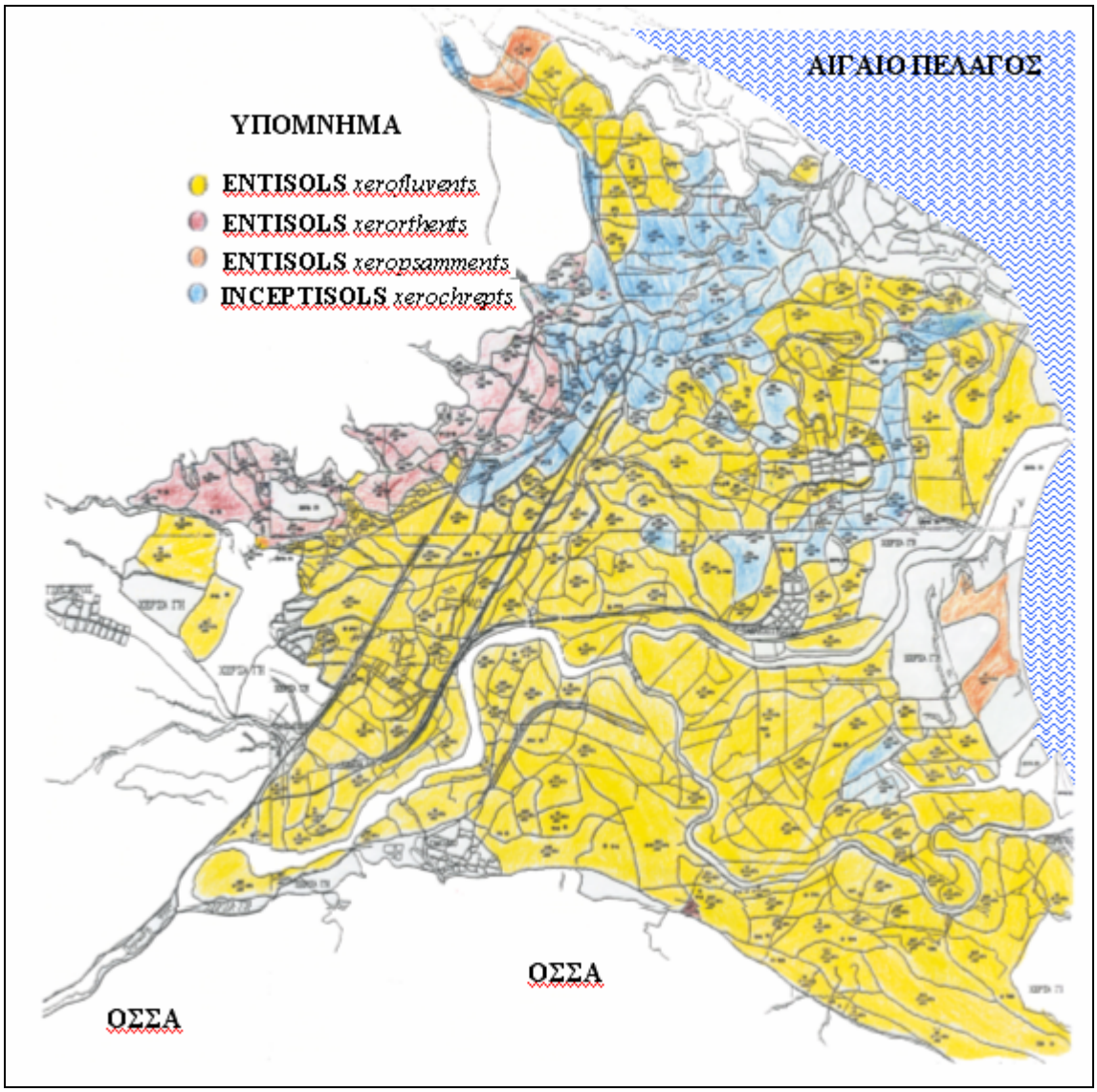
Οι φυσικές ιδιότητες των εδαφών αυτών χαρακτηρίζονται από μέτρια - μέση, ασθενή - χονδρή, γωνιώδη και υπογωνιώδη κυβική δομή η οποία γίνεται ασθενέστερη στα κατώτερα τμήματα της εδαφοτομής.

Από μετρήσεις της διηθητικότητας που έγιναν στην περιοχή βρέθηκε ότι παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση και χαρακτηρίζονται από μέτρια έως αργή με μέση τιμή 3 cm/h, εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις που βρέθηκε ταχεία έως και 8 cm/h. Μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας στους υποεπιφανειακούς ορίζοντες δεν έχουν γίνει αλλά από την κοκκομετρική τους σύσταση αναμένεται να παρουσιάζει την ίδια διακύμανση που έχουν και οι επιφανειακοί ορίζοντες.

**Αλλουβιακά εδάφη Inceptisols**

Είναι εδάφη στα οποία έχει ήδη αρχίσει κατά κάποιο τρόπο η διαφοροποίηση των οριζόντων. Καταλαμβάνουν γενικά τα υψηλότερα τμήματα του αλλουβιακού πεδίου και απέχουν από τα

σημερινά πεδία πλημμύρων. Είναι και αυτά ασβεστούχα με $CaCO_3$ κυμαινόμενο συνήθως από ίχνη στην επιφάνεια έως 18,5 %, αυξανόμενο με το βάθος. Είναι λεπτόκοκκα με επικρατέστερη κοκκομετρική σύσταση την αργιλλώδη (C) και με κακές συνθήκες στράγγισης.




**Χάρτης 2-3. Εδαφολογικός χάρτης της περιοχής του Δέλτα Πηνειού [ΕΘΙΑΓΕ, 1997].**

Από πλευράς γονιμότητας τα εδάφη χαρακτηρίζονται μέσης περιεκτικότητας σε οργανική ουσία περίπου 1,5 %, υψηλής Ικανότητας Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ) περίπου 30 meq/100 gr εδάφους στον επιφανειακό ορίζοντα και περίπου στα 25 meq/100 gr εδάφους στους κατώτερους ορίζοντες.

Το pH είναι αρκετά υψηλό λόγω της περιεκτικότητας σε $CaCO_3$ περίπου 8 και αυξάνεται ελάχιστα με το βάθος. Στην περιοχή Μεσάγγαλων ξεπερνά το 9 στα βαθύτερα στρώματα εξαιτίας της επίδρασης του θαλάσσιου νερού λόγω της γειτνίασης με τη θάλασσα. Η ηλεκτρική

αγωγιμότητα δεν ξεπερνά τα 3 mmhos/cm, εκτός από την περιοχή Μεσάγγαλων που φτάνει τα 4.5 mmhos/cm και ο βαθμός αλκαλίωσης φτάνει μέχρι 13 %.

Οι φυσικές ιδιότητες των Inceptisols χαρακτηρίζονται από μέτρια έως μεγάλη συνεκτικότητα, μέτρια - μέση, γωνιώδη ή υπογωνιώδη κυβική δομή. Σε βάθος κυμαινόμενο από 30 έως 100 cm, η δομή τους είναι ασθενής και το έδαφος είναι συμπιεσμένο. Αυτή η συμπίεση δημιουργεί σε πολλές περιπτώσεις προβλήματα στην κίνηση του νερού και στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των δένδρων.

Από μετρήσεις της διηθητικότητας που έγιναν στην περιοχή βρέθηκε ότι παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση και χαρακτηρίζονται από μέτρια έως αργή με μέση τιμή 3 cm/h. Μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας στους υποεπιφανειακούς ορίζοντες δεν έχουν γίνει αλλά από την κοκκομετρική τους σύσταση και την συμπίεση του εδάφους αναμένεται να παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές που την χαρακτηρίζουν πολύ αργή.

**Λοφώδη εδάφη Entisols**

Χαρακτηριστικό των εδαφών αυτών είναι ο σχετικά μεγάλος και συνεχής βαθμός διαβρώσεως. Τα επιφανειακά στρώματα είναι σχετικά πλούσια σε οργανική ουσία όταν δεν είναι διαβρωμένα (>3 %), που όμως μειώνεται στο 1 % όταν λείπουν οι επιφανειακοί ορίζοντες. Στα κατώτερα στρώματα περιορίζεται περίπου στο 0,5 %. Η ΙΑΚ δεν διαφοροποιείται πολύ μεταξύ των οριζόντων και κυμαίνεται μεταξύ 15 και 20 meq/100 gr εδάφους σε όλα τα βάθη. Το pH των εδαφών αυτών είναι μικρότερο του 8 στην επιφάνεια και δε διαφοροποιείται με το βάθος. Το ανθρακικό ασβέστιο είναι σχετικά περιορισμένο και δεν ξεπερνά το 2 % στην επιφάνεια και το 5 % στα κατώτερα στρώματα. Οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και του βαθμού αλκαλίωσης είναι κάτω από 3 mmhos/cm και 1,5 % και δε δημιουργούν κανένα πρόβλημα στις καλλιέργειες [ΕΘΙΑΓΕ, 1997].

## 2.2 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ

Η υδροφορία στην ευρύτερη περιοχή αναπτύσσεται σε διάφορους σχηματισμούς. Ανάλογα με τα υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού εντός του οποίου αναπτύσσεται υδροφορία, παρουσιάζει έντονη διαφοροποίηση του δυναμικού της. Σε γενικές γραμμές υδροφορία αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών ακολουθιών. Επίσης, εντός των ζωνών διακλάσεων, διάβρωσης και τεκτονικής καταπόνησης των σχιστολιθικών ακολουθιών έχουν ανορυχθεί γεωτρήσεις που εμφανίζουν αξιόλογο δυναμικό. Ακόμη, υδροφορία αναπτύσσεται εντός των Τεταρτογενών δελταϊκών αποθέσεων και των εκτεταμένων κώνων κορημάτων και

των πλευρικών κορημάτων. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής στηρίζεται στην άντληση επιφανειακών νερών από τις κοίτες του ποταμού Πηνειού και από πηγάδια και γεωτρήσεις που υδρομαστεύουν την υπόγεια υδροφορία, που αναπτύσσεται εντός των αλλουβιακών προσχώσεων και δευτερευόντως εντός των πλευρικών κορημάτων και της νεογενούς ακολουθίας.

Στην έξοδο του ποταμού Πηνειού από την κοιλάδα των Τεμπών, στο ύψος του σιδ. σταθμού της Ραψάνης, αναπτύσσονται εκτεταμένοι κώνοι κορημάτων με σημαντικό πάχος που υπερβαίνει τα 150 m και αδρόκοκκα ιζήματα με σημαντική παρουσία κροκαλοπαγών. Ανάλογων διαστάσεων και κοκκομετρικής σύστασης κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα, αναπτύσσονται κατά μήκος του δυτικού ορίου του Δέλτα στην περιοχή του Πυργετού, καθώς επίσης και νότια στην περιοχή του Ομολίου. Το πάχος της νεογενούς ακολουθίας που εκτιμάται ότι αποτελεί το υπόβαθρο των αλλουβιακών αποθέσεων της δελταϊκής λεκάνης είναι σημαντικό και υπερβαίνει τα 300 – 350 m στα δυτικά όρια της λεκάνης, ενώ προς βορρά, στην περιοχή Νέων Πόρων και Πλαταμώνα, το πάχος του μειώνεται και δεν υπερβαίνει τα 60 – 70 m.

Γενικά, η κοκκομετρία των αλλουβιακών αποθέσεων μεταβάλλεται από χονδρόκοκκη σε λεπτόκοκκη με φορά από τα ανάντη όρια της λεκάνης προς την ακτογραμμή. Έτσι προς τα κεντρικά και κατάντη τμήματα της λεκάνης, προοδευτικά αυξάνει το ποσοστό ιλυωδών και αργιλωδών υλικών με αποτέλεσμα να μειώνονται αντίστοιχα και οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφόρου συστήματος. Η κατανομή αυτή διαταράσσεται κατά μήκος των κοιτών του ποταμού (παλαιών και σύγχρονων), όπου η ύπαρξη αδρομερών υλικών είναι αποτέλεσμα της αποθετικής ικανότητας του ποταμού.

Στην κατακόρυφη κλίμακα παρατηρείται η τυπική δομή των αλλουβιακών ιζημάτων που χαρακτηρίζεται από εναλλαγές αδρομερών υλικών με λεπτομερέστερα. Έτσι υπάρχει μια αλληλουχία στρώσεων άμμων, με στρώσεις ιλύος και αργίλων. Το πάχος των στρωματιδίων αυτών είναι περιορισμένο και δεν υπερβαίνει τα 3 – 4 m ενώ η έκταση των στρωματιδίων δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη εξάπλωση σε όλη την περιοχή της λεκάνης. Η δομή αυτή συνεχίζεται μέχρι βάθους 40 – 50 m, κάτω από το οποίο υπάρχουν ενδείξεις επικράτησης σημαντικού πάχους αργιλικών οριζόντων, οι οποίοι πιθανόν αποτελούν το φυσικό υδρογεωλογικό όριο της λεκάνης.

Εντός των τεταρτογενών λοιπόν αποθέσεων αναπτύσσονται επάλληλα υδροφόρα στρώματα περιορισμένων διαστάσεων τόσο κατά την οριζόντιο όσο και κατά την κατακόρυφη κλίμακα.

Σαν αποτέλεσμα της γεωμετρίας των ιζημάτων αυτών, αναπτύσσονται επάλληλες υδροφορίες με χαρακτήρα υπό πίεση – μερικώς υπό πίεση έως ελεύθερο. Εξαιτίας των πλευρικών μεταβάσεων που παρουσιάζουν, θεωρείται ότι οι ορίζοντες αυτοί ενοποιούνται σε μια ενιαία υδροφορία που επικρατεί μερικώς υπό πίεση έως ελεύθερη υδροφορία [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].

## 2.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Οι κύριοι παράγοντες της επιφανειακής υδρολογικής κατάστασης της περιοχής είναι οι δελτοειδείς διακλαδώσεις εκφόρτισης του Πηνειού ποταμού που διαπλέκονται με τους χείμαρρους των ορεινών όγκων του Ολύμπου και της Όσσας και σχηματίζουν ένα πολύπλοκο σχήμα ακτινωτής διάταξης. Τα κυριότερα ρέματα στην περιοχή του κάτω Ολύμπου που εκφορτίζονται στην περιοχή του Δέλτα είναι τα: Αναβρικό Ρ., Παλιαγιάννη Λάκκος, Καντήλα Ρ., Ρουμάνι Ρ., Γρηάς Ρ. και Στρούτση Ρ. Για την αντιπλημμυρική προστασία της περιοχής έχουν κατασκευαστεί οι τάφροι Σμίξη και Ρουμάνι. Η τάφρος Σμίξη παροχετεύει προς τον Πηνειό τα νερά της ορεινής λεκάνης ανάντη, ενώ η τάφρος Ρουμάνι ακολουθεί την παλιά κοίτη του χειμάρρου και διοχετεύει την επιφανειακή απορροή στην κοίτη Ποταμούλι. Επίσης μέσω άλλου δικτύου στραγγιστικών τάφρων τα νερά τμήματος του Δέλτα βόρεια του Πηνειού εκφορτίζονται προς τη θάλασσα μέσω των κοιτών Καρατζούνι – Παλιοπόταμο. Από την πλευρά της Όσσας εκφορτίζονται στους νότιους δελτοειδείς σχηματισμούς του Πηνειού ποταμού οι χείμαρροι: Μέγας Λάκκος, Κρυονέρι Ρ., Αρχοντόρεμα, Σύνορον Ρ., Μεγάλο Φαράγγι – Γαυρονέρι – Αληάγα Ρ., Σαϊτάνη Ρ., Αμπελικής Ρ., Περιστεράς Ρ,. και Κακοσκάλας Ρ [Ευαγγελόπουλος Αθ., 1994].

### 2.3.1 Θερμοκρασία – Βροχοπτώσεις

Εντός της πεδινής περιοχής του Δέλτα Πηνειού δεν λειτουργεί κανένας βροχομετρικός σταθμός. Οι πλησιέστεροι σταθμοί είναι της Καρίτσας Λάρισας, με μετρήσεις θερμοκρασίας και βροχόπτωσης, σε υψόμετρο 350 m από την επιφάνεια της θάλασσας και σε απόσταση περίπου 11 km από το κέντρο της πεδινής περιοχής και του Πυργετού, με μετρήσεις βροχόπτωσης, σε υψόμετρο 31 m από την επιφάνεια της θάλασσας και σε απόσταση περίπου 6 km από το κέντρο της περιοχής. Τα στοιχεία του σταθμού της Καρίτσας είναι από το 1978 έως το 1996 (19 έτη) και τα στοιχεία του σταθμού του Πυργετού είναι από το 1960 έως το 1993 (33 έτη).

Στον πίνακα 2-2, δίνονται τα κλιματικά στοιχεία της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης ενώ στα σχήματα 2.1 και 2.2 φαίνεται η διακύμανση της μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς του Πυργετού και της Καρίτσας,

αντίστοιχα. Ακόμη, στα σχήματα 2.3 και 2.4, φαίνονται η διακύμανση της μηνιαίας θερμοκρασίας και το ομβροθερμικό διάγραμμα του βροχομετρικού σταθμού της Καρίτσας, αντίστοιχα.

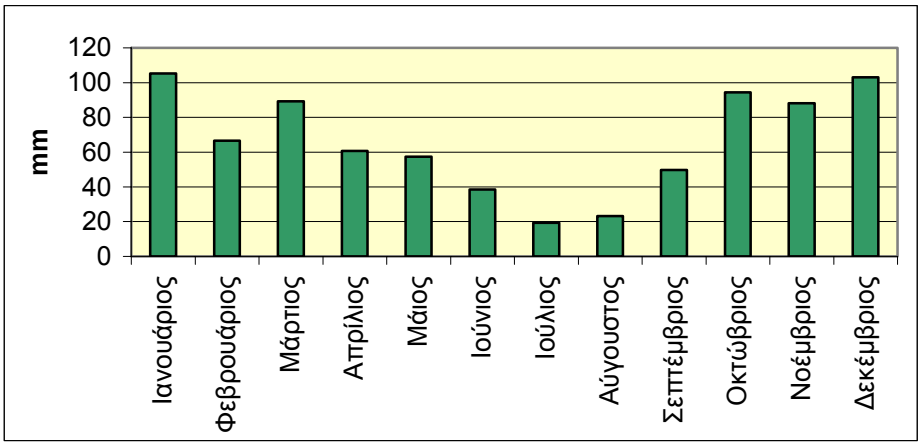
Έτσι σύμφωνα με τον πίνακα 2-2 και τα σχήματα 2.1 έως 2.4 προκύπτει ότι:

- Η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα του έτους είναι 23,5 $^{o}$C (Ιούλιος) και του ψυχρότερου μήνα είναι 4,9 $^{o}$C (Ιανουάριος).
- Κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο εμφανίζεται ξηρή περίοδος με βροχόπτωση <40 mm.
- Η μέση βροχόπτωση του υγρότερου μήνα, που είναι ο Δεκέμβριος (200,9 mm) είναι υπερτριπλάσια από αυτή του ξηρότερου μήνα, που είναι ο Ιούλιος (19,9 mm).

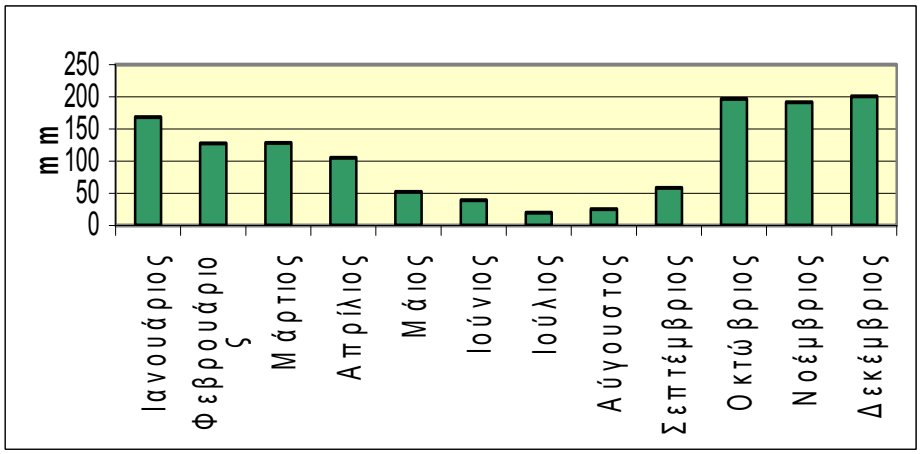
**Πίνακας 2-2. Μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης στους βροχομετρικούς σταθμούς Καρίτσας και Πυργετού.**

| | **Βροχομετρικός σταθμός Καρίτσας** | | **Βροχομετρικός σταθμός Πυργετού** |
|---|---|---|---|
| **Μήνες** | **Μέση βροχόπτωση (mm)** | **Μέση θερμοκρασία $^{o}$C** | **Μέση βροχόπτωση (mm)** |
| Ιανουάριος | 168,2 | 4,9 | 105,3 |
| Φεβρουάριος | 127,4 | 5,3 | 66,6 |
| Μάρτιος | 128,3 | 8,0 | 89,2 |
| Απρίλιος | 105,5 | 12,0 | 60,7 |
| Μάιος | 52,0 | 16,6 | 57,4 |
| Ιούνιος | 39,1 | 20,9 | 38,5 |
| Ιούλιος | 19,9 | 23,5 | 19,4 |
| Αύγουστος | 25,3 | 23,2 | 23,1 |
| Σεπτέμβριος | 58,8 | 19,6 | 49,7 |
| Οκτώβριος | 196,6 | 14,7 | 94,4 |
| Νοέμβριος | 191,4 | 9,4 | 88,2 |
| Δεκέμβριος | 200,9 | 6,8 | 103,1 |
| **Έτος** | **1.313,4** | **13,8** | **795,6** |

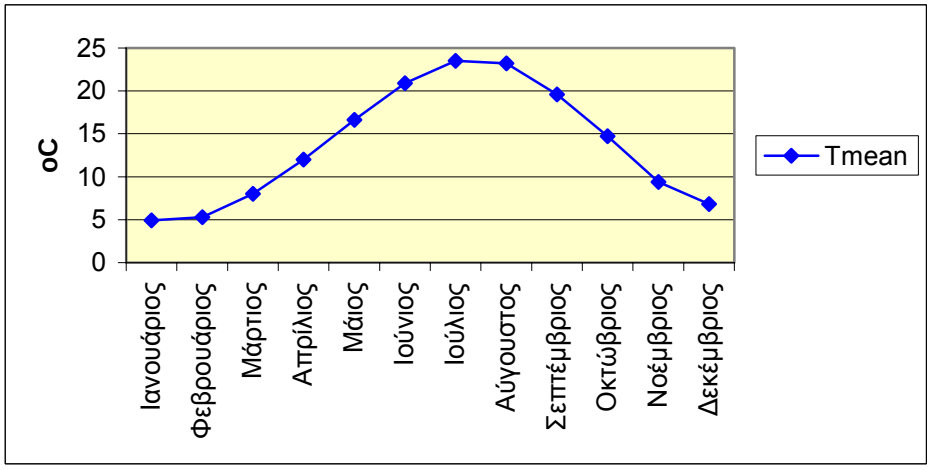
Πηγή: Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων & Τεχνολογίας Δασικών προϊόντων του ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.



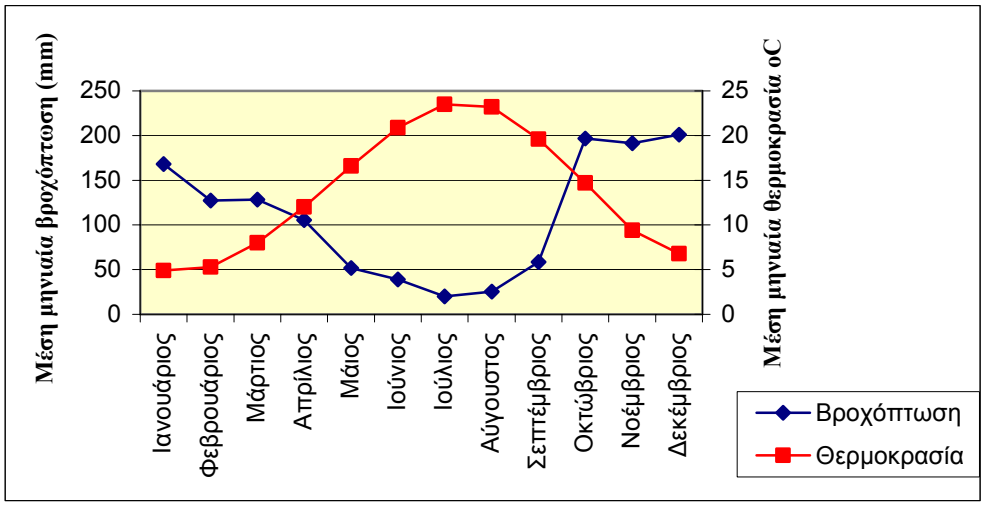

**Σχήμα 2.1. Διακύμανση των μηνιαίων βροχοπτώσεων στο βροχ. σταθμό του Πυργετού.**




**Σχήμα 2.2. Διακύμανση των μηνιαίων βροχοπτώσεων στο βροχ. σταθμό της Καρίτσας.**




**Σχήμα 2.3. Διακύμανση της μηνιαίας θερμοκρασίας στο βροχ. σταθμό της Καρίτσας.**




**Σχήμα 2.4. Ομβροθερμικό διάγραμμα στο βροχ. σταθμό της Καρίτσας.**

Τα μέσα ετήσια βροχομετρικά ύψη των σταθμών Καρίτσας και Πυργετού είναι 1.313 mm και 796 mm, αντίστοιχα. Με βάση τη θέση των σταθμών στην περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ότι το βροχομετρικό ύψος του σταθμού της Καρίτσας είναι αντιπροσωπευτικό για τις ορεινές λεκάνες απορροής της Όσσας ενώ αυτό του Πυργετού για τις ορεινές λεκάνες του Κάτω Ολύμπου και το πεδινό τμήμα (κυρίως περιοχή Δέλτα Πηνειού). Για το πεδινό τμήμα, ως μέσο βροχομετρικό ύψος θεωρείται η τιμή των 600 mm.

Με βάση τα στοιχεία της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας του σταθμού της Καρίτσας, το κλίμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως χερσαίο μεσογειακό με ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ήπιο χειμώνα του τύπου Csa της ταξινόμησης κατά Koppen [Ευαγγελόπουλος Αθ., 1994, Φλόκας, 1986].

## 2.4 ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

### 2.4.1 Επιφανειακά Ύδατα

Το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής σχετίζεται με τις βροχοπτώσεις, τις απώλειες εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής, την επιφανειακή απορροή, τη διήθηση και την υπόγεια κίνηση του νερού (τροφοδοσία υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων από τα νερά του Πηνειού, και των διηθούμενων κατακρημνισμάτων κυρίως στην περιοχή του Κάτω Ολύμπου).

Εξάτμιση και εξατμισοδιαπνοή

Τόσο η εξάτμιση του νερού από υδάτινες επιφάνειες ή και από γυμνό έδαφος όσο και η εξατμισοδιαπνοή από καλλιεργούμενο ή καλυμμένο με φυτική βλάστηση έδαφος αποτελούν φυσικές διεργασίες που εξαρτώνται από κλιματικούς (θερμοκρασία αέρα, υγρασία αέρα,

ατμοσφαιρική πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, ηλιοφάνεια, ταχύτητα ανέμου), εδαφικούς (εδαφική υγρασία, μηχανική σύσταση) και φυτικούς παράγοντες (είδος καλλιέργειας, στάδιο ανάπτυξης). Η χρήση όλων των παραπάνω παραμέτρων μπορεί να δώσει αρκετά αξιόπιστες εκτιμήσεις της εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής όπως οι τροποποιημένες εξισώσεις Penman και Penman – Monteith [Doorenbos and Pruitt, 1977, Allen, et al. 1998, Αλεξίου κ.α., 2000, Παπαζαφειρίου, 1984]. Όταν τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επαρκούν για τη χρήση των παραπάνω μεθόδων τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά απλούστερες εξισώσεις, όπως η συχνά χρησιμοποιούμενη εξίσωση των Blaney – Criddle που παριστάνεται ως :

$$ET = K \cdot \frac{32 + 1.8 \cdot T}{3.94} \cdot p$$

όπου:

ET είναι η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (ή εξάτμιση) σε mm ή $m^3$/στρέμμα

T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C

p είναι το ποσοστό των ωρών ημέρας κάθε μήνα προς τις ώρες ημέρας του έτους (πίνακας 2-3)

K είναι ο φυτικός συντελεστής της καλλιέργειας (πίνακας 2-4). Το K κανονικά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν τα φυτά βρίσκονται σε πλήρη ανάπτυξη.

**Πίνακας 2-3. Ποσοστό στα εκατό των ωρών ημέρας κάθε μήνα του έτους (p) για βόρεια πλάτη από 48° έως 24°.**

| Βόρειο πλάτος | Ι | Φ | Μ | Α | Μ | Ι | Ι | Α | Σ | Ο | Ν | Δ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **48°** | 6.13 | 6.42 | 8.22 | 9.15 | 10.50 | 10.72 | 10.83 | 9.92 | 8.45 | 7.56 | 6.24 | 5.86 |
| **46°** | 6.30 | 6.50 | 8.24 | 9.09 | 10.37 | 10.54 | 10.66 | 9.82 | 8.44 | 7.61 | 6.38 | 6.05 |
| **44°** | 6.45 | 6.59 | 8.25 | 9.04 | 10.22 | 10.38 | 10.50 | 9.73 | 8.43 | 7.67 | 6.51 | 6.23 |
| **42°** | 6.60 | 6.66 | 8.28 | 8.97 | 10.10 | 10.21 | 10.37 | 9.64 | 8.42 | 7.73 | 6.63 | 6.39 |
| **40°** | 6.73 | 6.73 | 8.30 | 8.92 | 9.99 | 10.08 | 10.34 | 9.56 | 8.41 | 7.78 | 6.73 | 6.53 |
| **38°** | 6.87 | 6.79 | 8.34 | 8.90 | 9.92 | 9.95 | 10.10 | 9.47 | 8.38 | 7.80 | 6.82 | 6.66 |
| **36°** | 6.99 | 6.86 | 8.35 | 8.85 | 9.81 | 9.83 | 9.99 | 9.40 | 8.36 | 7.85 | 6.92 | 6.79 |
| **34°** | 7.10 | 6.91 | 8.36 | 8.80 | 9.72 | 9.70 | 9.88 | 9.33 | 8.36 | 7.90 | 7.02 | 6.92 |
| **32°** | 7.20 | 6.97 | 8.37 | 8.72 | 9.63 | 9.60 | 9.77 | 9.28 | 8.34 | 7.93 | 7.11 | 7.05 |
| **30°** | 7.30 | 7.03 | 8.38 | 8.72 | 9.53 | 9.49 | 9.67 | 9.22 | 8.34 | 7.99 | 7.19 | 7.14 |
| **28°** | 7.40 | 7.07 | 8.39 | 8.68 | 9.46 | 9.38 | 9.58 | 9.16 | 8.32 | 8.02 | 7.27 | 7.27 |
| **26°** | 7.49 | 7.12 | 8.40 | 8.64 | 9.37 | 9.30 | 9.49 | 9.10 | 8.32 | 8.06 | 7.36 | 7.35 |
| **24°** | 7.58 | 7.17 | 8.41 | 8.60 | 9.30 | 9.19 | 9.41 | 9.05 | 8.31 | 8.10 | 7.43 | 7.46 |

**Πίνακας 2-4. Εποχιακοί φυτικοί συντελεστές Κ, των διαφόρων καλλιεργειών.**

| Καλλιέργεια | Φυτικός συντελεστής, Κ | |
|---|---|---|
| Καλαμπόκι | 0.30* - | 0.75** |
| Σιτηρά (σκληρό σιτάρι, κριθή) | 0.30* - | 0.70** |
| Βαμβάκι | 0.30* - | 0.70** |
| Μηδική | 0.30* - | 0.80** |
| Ζαχαρότευτλα | 0.30* - | 0.75** |
| Κηπευτικά (ντομάτες, φασολάκια κτλ) | 0.30* - | 0.70** |
| Ακτινίδια | 0.30* - | 0.80** |
| Φυλλοβόλα οπωροφόρα | 0.30* - | 0.70** |
| Ελιές | 0.30* - | 0.55** |
| Αμπέλια | 0.30* - | 0.55** |
| Γυμνό έδαφος | 0.30* | |
| Αγρανάπαυση | 0.30* | |
| Βοσκότοποι | 0.30* - | 0.50** |
| Δάση | 0.30* - | 0.70** |
| Νερά | 0.8 | |

* η εξατμισοδιαπνοή οφείλεται μόνο στην εξάτμιση από το γυμνό έδαφος (ελάχιστη ή καθόλου βλάστηση)
** πλήρης ανάπτυξη της βλάστησης (καλλιέργειας)

Επειδή στην περιοχή μελέτης η μόνη διαθέσιμη κλιματική παράμετρος για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής (ή εξάτμισης), ήταν η θερμοκρασία του αέρα (μετεωρολογικός σταθμός Καρίτσας) χρησιμοποιήθηκε η απλοποιητική μέθοδος των Blaney – Criddle για το σκοπό αυτό.

Ο σταθμός της Καρίτσας βρίσκεται σε υψόμετρο περίπου 350 m και για την κυρίως περιοχή του Δέλτα Πηνειού (υψόμετρο 0 – 10 m) οι μηνιαίες θερμοκρασίες του σταθμού τροποποιήθηκαν με βάση την αδιαβατική βαθμίδα (0.6 $^{o}$C/100m) και υπολογίστηκε η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή κάθε καλλιέργειας, πίνακας 2-5. Ομοίως για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής στις περιοχές των λεκανών απορροής Κάτω Ολύμπου και Όσσας με βάση την μέθοδο Blaney – Criddle ανά υψομετρική ζώνη, πίνακας 2-1, υπολογίστηκε η θερμοκρασία κάθε ζώνης και κατόπιν η αντίστοιχη εξατμισοδιαπνοή, πίνακες 2-6 και 2-7 [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].

**Πίνακας 2-5. Εξατμισοδιαπνοή καλλιεργειών ανά μήνα (mm/μήνα) για το πεδινό τμήμα του Δέλτα Πηνειού.**

| Μήνας | Θερμοκρασία °C | Σιτάρι Σκληρό | Σιτάρι Μαλακό + Κριθάρι | Βαμβάκι | Καλαμπόκι | Τεύτλα | Μηδική | Ακτινίδια | Ελιές | Αμπέλια | Δενδρώδεις καλλιέργειες. | Κηπευτικά | Αγρανάπαυση |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ι | 7,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 |
| Φ | 7,4 | 30,9 | 30,9 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 | 23,2 |
| Μ | 10,1 | 63,7 | 63,7 | 31,8 | 31,8 | 31,8 | 58,4 | 31,8 | 31,8 | 31,8 | 31,8 | 31,8 | 31,8 |
| Α | 14,1 | 91,2 | 91,2 | 39,1 | 39,1 | 46,9 | 104,3 | 39,1 | 52,1 | 39,1 | 52,1 | 39,1 | 39,1 |
| Μ | 18,7 | 116,9 | 116,9 | 58,4 | 75,1 | 83,5 | 133,6 | 100,2 | 83,5 | 75,1 | 116,9 | 66,8 | 50,1 |
| Ι | 22,9 | 92,3 | 92,3 | 96,0 | 129,2 | 116,3 | 147,6 | 147,6 | 101,5 | 101,5 | 147,6 | 110,7 | 55,4 |
| Ι | 25,6 | 59,4 | 59,4 | 128,6 | 148,4 | 138,5 | 158,3 | 158,3 | 108,8 | 108,8 | 158,3 | 138,5 | 59,4 |
| Α | 25,2 | 56,2 | 56,2 | 112,4 | 121,8 | 131,1 | 149,9 | 149,9 | 103,0 | 103,0 | 149,9 | 131,1 | 56,2 |
| Σ | 21,7 | 45,3 | 45,3 | 63,5 | 45,3 | 90,7 | 120,9 | 120,9 | 83,1 | 75,6 | 105,8 | 75,6 | 45,3 |
| Ο | 16,8 | 36,7 | 36,7 | 36,7 | 36,7 | 36,7 | 67,3 | 85,7 | 61,2 | 42,8 | 36,7 | 36,7 | 36,7 |
| Ν | 11,4 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 | 26,9 |
| Δ | 8,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 | 23,8 |

Πηγή: ΕΘΙΑΓΕ, 2001.

**Πίνακας 2-6. Μέση θερμοκρασία, εξατμισοδιαπνοή, βροχόπτωση, διήθηση και απορροή στην περιοχή λεκανών απορροής χειμάρρων Κάτω Ολύμπου [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].**

| Ζώνη | | 10-100 | 100-200 | 200-400 | 400-600 | 600-800 | 800-1000 | 1000-1200 | 1200-1400 | 1400-1600 | 1600-1800 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Μέσο υψόμετρο | | 55 | 150 | 300 | 500 | 700 | 900 | 1100 | 1300 | 1500 | | | | | | |
| Έκταση ($km^2$) | | 15,30 | 9,770 | 14,07 | 10,27 | 10,28 | 12,09 | 12,53 | 3,663 | 0,922 | | 88,92 $km^2$ | | | | |
| Μέσες θερμοκρασίες (oC) ανά υψομετρική ζώνη και μήνα | Ι | 6,7 | 6,1 | 5,2 | 4,0 | 2,8 | 1,6 | 0,4 | -0,8 | -2,0 | | | | | | |
| | Φ | 7,1 | 6,5 | 5,6 | 4,4 | 3,2 | 2,0 | 0,8 | -0,4 | -1,6 | | | | | | |
| | Μ | 9,8 | 9,2 | 8,3 | 7,1 | 5,9 | 4,7 | 3,5 | 2,3 | 1,1 | | | | | | |
| | Α | 13,8 | 13,2 | 12,3 | 11,1 | 9,9 | 8,7 | 7,5 | 6,3 | 5,1 | | | | | | |
| | Μ | 18,4 | 17,8 | 16,9 | 15,7 | 14,5 | 13,3 | 12,1 | 10,9 | 9,7 | | | | | | |
| | Ι | 22,6 | 22,0 | 21,1 | 19,9 | 18,7 | 17,5 | 16,3 | 15,1 | 13,9 | | | | | | |
| | Ι | 25,3 | 24,7 | 23,8 | 22,6 | 21,4 | 20,2 | 19,0 | 17,8 | 16,6 | | | | | | |
| | Α | 24,9 | 24,3 | 23,4 | 22,2 | 21,0 | 19,8 | 18,6 | 17,4 | 16,2 | | | | | | |
| | Σ | 21,4 | 20,8 | 19,9 | 18,7 | 17,5 | 16,3 | 15,1 | 13,9 | 12,7 | | | | | | |
| | Ο | 16,5 | 15,9 | 15,0 | 13,8 | 12,6 | 11,4 | 10,2 | 9,0 | 7,8 | | | | | | |
| | Ν | 11,1 | 10,5 | 9,6 | 8,4 | 7,2 | 6,0 | 4,8 | 3,6 | 2,4 | | | | | | |
| | Δ | 8,5 | 7,9 | 7,0 | 5,8 | 4,6 | 3,4 | 2,2 | 1,0 | -0,2 | | | | | | |
| Εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ) ανά υψομετρική ζώνη | | | | | | | | | | | | Συνολική ΕΤ | Συνολική βροχόπτωση (P) | | Συνολική Επιφ. Απορροή & Διήθηση (R-G) | |
| (mm/μήνα) | | | | | | | | | | | | $m^3$ | mm | $m^3$ | mm | $m^3$ |
| Τιμές παραμέτρων υδατικού ισοζυγίου ανά υψομετρική ζώνη και μήνα | Ι | 22,7 | 22,2 | 21,3 | 20,2 | 19,1 | 18,0 | 16,9 | 15,8 | 14,6 | | 1767196 | 105,3 | 9364459 | 85,4 | 7597263 |
| | Φ | 22,9 | 22,4 | 21,6 | 20,5 | 19,3 | 18,2 | 17,1 | 16,0 | 14,9 | | 1789499 | 66,6 | 5921061 | 46,5 | 4131562 |
| | Μ | 31,5 | 30,8 | 29,8 | 28,4 | 27,1 | 25,7 | 24,3 | 23,0 | 21,6 | | 2492334 | 89,2 | 7931484 | 61,2 | 5439150 |
| | Α | 51,6 | 50,7 | 49,2 | 47,3 | 45,3 | 43,4 | 41,4 | 39,4 | 37,5 | | 3114137 | 60,7 | 5399930 | 25,7 | 2285793 |
| | Μ | 82,8 | 81,5 | 79,4 | 76,7 | 73,9 | 71,2 | 68,5 | 65,7 | 63,0 | | 4048172 | 57,4 | 5108377 | 11,9 | 1060205 |
| | Ι | 93,0 | 91,7 | 89,6 | 86,8 | 84,1 | 81,3 | 78,5 | 75,8 | 73,0 | | 4588367 | 38,5 | 3426423 | 0,0 | 0 |
| | Ι | 100,6 | 99,2 | 97,1 | 94,3 | 91,5 | 88,7 | 85,9 | 83,1 | 80,3 | | 4988386 | 19,4 | 1723720 | 0,0 | 0 |
| | Α | 74,4 | 73,4 | 71,8 | 69,7 | 67,7 | 65,6 | 63,5 | 61,4 | 59,3 | | 4609972 | 23,1 | 2051381 | 0,0 | 0 |
| | Σ | 60,0 | 59,1 | 57,7 | 55,9 | 54,1 | 52,2 | 50,4 | 48,6 | 46,7 | | 3691981 | 49,7 | 4416410 | 0,0 | 0 |
| | Ο | 36,4 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,3 | 31,0 | 29,7 | 28,5 | 27,2 | | 2951615 | 94,4 | 8396298 | 0,0 | 0 |
| | Ν | 26,6 | 26,1 | 25,2 | 24,1 | 23,0 | 21,9 | 20,8 | 19,7 | 18,6 | | 2117089 | 88,2 | 7840946 | 55,2 | 4907766 |
| | Δ | 23,5 | 23,0 | 22,2 | 21,1 | 20,0 | 19,0 | 17,9 | 16,8 | 15,7 | | 1847484 | 103,1 | 9164791 | 82,3 | 7317307 |
| **Σύνολο** | | | | | | | | | | | | **38006232** | **795,6** | **70745278** | **368,2** | **32739046** |

**Πίνακας 2-7. Μέση θερμοκρασία, εξατμισοδιαπνοή, βροχόπτωση, διήθηση και απορροή στην περιοχή λεκανών απορροής χειμάρρων Όσσας [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].**

| Ζώνη | | 10-100 | 100-200 | 200-400 | 400-600 | 600-800 | 800-1000 | 1000-1200 | 1200-1400 | 1400-1600 | 1600-1800 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Μέσο Υψομ. | | 55 | 150 | 300 | 500 | 700 | 900 | 1100 | 1300 | 1500 | 1700 | | | | | |
| Έκταση ($km^2$) | | 8,097 | 5,116 | 10,63 | 11,01 | 17,27 | 19,78 | 8,927 | 4,304 | 3,185 | 0,90 | 89,25 $km^2$ | | | | |
| Μέσες θερμοκρασίες (oC) ανά υψομετρική ζώνη και μήνα | Ι | 6,7 | 6,1 | 5,2 | 4,0 | 2,8 | 1,6 | 0,4 | -0,8 | -2,0 | -3,2 | | | | | |
| | Φ | 7,1 | 6,5 | 5,6 | 4,4 | 3,2 | 2,0 | 0,8 | -0,4 | -1,6 | -2,8 | | | | | |
| | Μ | 9,8 | 9,2 | 8,3 | 7,1 | 5,9 | 4,7 | 3,5 | 2,3 | 1,1 | -0,1 | | | | | |
| | Α | 13,8 | 13,2 | 12,3 | 11,1 | 9,9 | 8,7 | 7,5 | 6,3 | 5,1 | 3,9 | | | | | |
| | Μ | 18,4 | 17,8 | 16,9 | 15,7 | 14,5 | 13,3 | 12,1 | 10,9 | 9,7 | 8,5 | | | | | |
| | Ι | 22,6 | 22,0 | 21,1 | 19,9 | 18,7 | 17,5 | 16,3 | 15,1 | 13,9 | 12,7 | | | | | |
| | Ι | 25,3 | 24,7 | 23,8 | 22,6 | 21,4 | 20,2 | 19,0 | 17,8 | 16,6 | 15,4 | | | | | |
| | Α | 24,9 | 24,3 | 23,4 | 22,2 | 21,0 | 19,8 | 18,6 | 17,4 | 16,2 | 15 | | | | | |
| | Σ | 21,4 | 20,8 | 19,9 | 18,7 | 17,5 | 16,3 | 15,1 | 13,9 | 12,7 | 11,5 | | | | | |
| | Ο | 16,5 | 15,9 | 15,0 | 13,8 | 12,6 | 11,4 | 10,2 | 9,0 | 7,8 | 6,6 | | | | | |
| | Ν | 11,1 | 10,5 | 9,6 | 8,4 | 7,2 | 6,0 | 4,8 | 3,6 | 2,4 | 1,2 | | | | | |
| | Δ | 8,5 | 7,9 | 7,0 | 5,8 | 4,6 | 3,4 | 2,2 | 1,0 | -0,2 | -1,3 | | | | | |
| Εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ) ανά υψομετρική ζώνη | | | | | | | | | | | | Συνολική ΕΤ | Συνολική βροχόπτωση (P) | | Συνολική Επιφ. Απορροή & Διήθηση (R-G) | |
| (mm/μήνα) | | | | | | | | | | | | $m^3$ | mm | $m^3$ | mm | $m^3$ |
| Τιμές παραμέτρων υδατικού ισοζυγίου ανά υψομετρική ζώνη και μήνα | Ι | 22,7 | 22,2 | 21,3 | 20,2 | 19,1 | 18,0 | 16,9 | 15,8 | 14,6 | 13,5 | 1709279 | 168,2 | 15012355 | 149,0 | 13303076 |
| | Φ | 22,9 | 22,4 | 21,6 | 20,5 | 19,3 | 18,2 | 17,1 | 16,0 | 14,9 | 13,8 | 1732046 | 127,4 | 11370832 | 108,0 | 9638786 |
| | Μ | 31,5 | 30,8 | 29,8 | 28,4 | 27,1 | 25,7 | 24,3 | 23,0 | 21,6 | 20,2 | 2422140 | 128,2 | 11442235 | 101,1 | 9020095 |
| | Α | 51,6 | 50,7 | 49,2 | 47,3 | 45,3 | 43,4 | 41,4 | 39,4 | 37,5 | 35,5 | 4053797 | 105,5 | 9416192 | 60,1 | 5362395 |
| | Μ | 82,8 | 81,5 | 79,4 | 76,7 | 73,9 | 71,2 | 68,5 | 65,7 | 63,0 | 60,2 | 6612763 | 52,0 | 4641156 | 0,0 | 0 |
| | Ι | 93,0 | 91,7 | 89,6 | 86,8 | 84,1 | 81,3 | 78,5 | 75,8 | 73,0 | 70,2 | 7515496 | 39,1 | 3489792 | 0,0 | 0 |
| | Ι | 100,6 | 99,2 | 97,1 | 94,3 | 91,5 | 88,7 | 85,9 | 83,1 | 80,3 | 77,5 | 8182457 | 19,9 | 1776135 | 0,0 | 0 |
| | Α | 74,4 | 73,4 | 71,8 | 69,7 | 67,7 | 65,6 | 63,5 | 61,4 | 59,3 | 57,2 | 6048182 | 25,3 | 2258101 | 0,0 | 0 |
| | Σ | 60,0 | 59,1 | 57,7 | 55,9 | 54,1 | 52,2 | 50,4 | 48,6 | 46,7 | 44,9 | 4834386 | 58,8 | 5248076 | 0,0 | 0 |
| | Ο | 36,4 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,3 | 31,0 | 29,7 | 28,5 | 27,2 | 25,9 | 2888671 | 196,6 | 17547140 | 0,0 | 0 |
| | Ν | 26,6 | 26,1 | 25,2 | 24,1 | 23,0 | 21,9 | 20,8 | 19,7 | 18,6 | 17,5 | 2060859 | 191,4 | 17083024 | 155,7 | 13900611 |
| | Δ | 23,5 | 23,0 | 22,2 | 21,1 | 20,0 | 19,0 | 17,9 | 16,8 | 15,7 | 14,7 | 1792157 | 200,9 | 17930928 | 180,8 | 16138771 |
| Σύνολο | | | | | | | | | | | | **49852231** | **1313,4** | **117215965** | **754,8** | **67363734** |

### 2.4.2 Υπόγεια Ύδατα

Στην τροφοδοσία των υπόγειων νερών της λεκάνης των δελταϊκών αποθέσεων συμμετέχουν οι ακόλουθες παράμετροι:

1. Τροφοδοσία από πλευρικές εισροές προερχόμενες από τους σχηματισμούς στα κράσπεδα της λεκάνης (LC)
2. Τροφοδοσία από την κατείσδυση της διάχυτης και της συγκεντρωμένης επιφανειακής απορροής που προέρχεται από τους περιβάλλοντες την λεκάνη ορεινούς όγκους (LRO)
3. Κατείσδυση από βροχόπτωση επί της λεκάνης (RCHpptn)
4. Εποχιακή διείσδυση θαλάσσιου νερού κατά μήκος της ακτογραμμής (SWI)
5. Διήθηση από τον ποταμό Πηνειό (DPR)
6. Επιστροφές αρδεύσεων (IR)

Στην εκφόρτιση των υπόγειων νερών της λεκάνης των δελταϊκών αποθέσεων συμμετέχουν οι ακόλουθες παράμετροι:

1. Αντλήσεις για κάλυψη αρδευτικών αναγκών (PI)
2. Αντλήσεις για κάλυψη υδρευτικών αναγκών (PW)
3. Αντλήσεις για κάλυψη λοιπών αναγκών (βιοτεχνίες, εργοτάξια κλπ) (PR)
4. Εποχιακή εκφόρτιση προς τη θάλασσα (SD)
5. Εποχιακή εκφόρτιση προς τον ποταμό Πηνειό (RD)

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, το ισοζύγιο των υπόγειων υδάτων της περιοχής μελέτης καταρτίζεται από την παρακάτω γενική εξίσωση:

$$\text{ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ} = \text{ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ} \pm \text{ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΠΟΘΕΜΑΤΩΝ}$$

$$\Downarrow$$

$$LC + LRO + RCHpptn + SWI + DPR + IR = (PI + PW + PR + SD + RD) \pm \Delta S$$

όπου: ΔS η μεταβολή των υδατικών αποθεμάτων του υδροφόρου συστήματος.

*Παράμετρος LC.* Όπως προκύπτει από την επεξεργασία των δεδομένων επιφανειακής υδρολογίας, το σύνολο της ποσότητας νερού που απορρέει ή κατεισδύει εντός των σχηματισμών των ορεινών περιοχών που περιβάλλουν το Δέλτα του Πηνειού και εντάσσονται στην υδρολογική του λεκάνη, ανέρχεται σε 100.104.000 $m^3$/έτος. Με βάση τη λιθολογική σύσταση των σχηματισμών που δομούν την περιοχή αυτή και την τοπογραφική κλίση που παρουσιάζει το ανάγλυφο, εκτιμήθηκε ότι ο συντελεστής κατείσδυσης είναι i = 2 %. Θεωρώντας ότι τα

υδρολογικά όρια της λεκάνης ταυτίζονται με τα υδρογεωλογικά, ο συνολικός όγκος νερού που εισέρχεται μέσω πλευρικών εισροών στη λεκάνη ανέρχεται σε 2.002.080 $m^3$/έτος. Ωστόσο, κάτι τέτοιο εκτιμάται ότι δε συμβαίνει και επομένως τμήμα του παραπάνω όγκου τροφοδοτεί με υπόγεια ροή περιοχές εκτός του υπό μελέτη αλλουβιακού πεδίου. Εάν η ποσότητα που εκρέει υπόγεια είναι της τάξεως του 50 % περίπου, η λεκάνη του Δέλτα τροφοδοτείται τελικά με ποσότητα περίπου 1.000.000 $m^3$/έτος (LC = 1.000.000 $m^3$/έτος) κατ' εκτίμηση.

*Παράμετρος LRO.* Με βάση τους προαναφερθέντες υπολογισμούς, 90 % του όγκου του νερού που αποδίδεται στην απορροή – κατείσδυση από τις ορεινές περιοχές της υδρολογικής λεκάνης του Δέλτα, διατίθεται για επιφανειακή απορροή. Ο όγκος αυτός ανέρχεται σε περίπου 90.000.000 $m^3$/έτος και καταλήγει στο πεδινό τμήμα της λεκάνης του Πηνειού, απ' όπου απορρέει επιφανειακά και εκφορτίζεται τελικά στη θάλασσα. Εκτιμάται ότι ένα ποσοστό 5 % από τον όγκο αυτό τροφοδοτεί το υδροφόρο σύστημα του Δέλτα κατά μήκος της διαδρομής του μέχρι τη θάλασσα και κυρίως στις παρυφές της δελταϊκής περιοχής. Με βάση την εκτίμηση αυτή, προκύπτει ότι LRO = 4.504.680 $m^3$/έτος.

*Παράμετρος RCHpptn*. Για τον υπολογισμό της τροφοδοσίας του υδροφόρου συστήματος από άμεση κατείσδυση της βροχόπτωσης, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων των υδρολογικών δεδομένων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, ο συνολικός όγκος νερού που τροφοδοτεί με τον τρόπο αυτό το υδροφόρο σύστημα ανέρχεται σε RCHpptn = 23.886.462 $m^3$/έτος.

*Παράμετρος SWI*. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής δεν υφίστανται επαρκή στοιχεία και η οποιαδήποτε εκτίμηση θα εμπεριείχε σημαντικό βαθμό αστοχίας. Εκτιμάται ωστόσο από τη μελέτη των πιεζομετρικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων των υδροχημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, ότι η τροφοδοσία του συστήματος με τον τρόπο αυτό δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα σημαντική και πραγματοποιείται σε περιορισμένες ζώνες μόνο κατά την αιχμή της αρδευτικής περιόδου.

*Παράμετρος DPR*. Όπως και για την προηγούμενη παράμετρο, δεν υφίστανται επαρκή δεδομένα με βάση τα οποία να καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του όγκου νερού που τροφοδοτεί με τον τρόπο αυτό το υδροφόρο σύστημα, αφού απουσιάζουν πλήρως μετρήσεις διαφορικής παροχής του ποταμού Πηνειού. Με βάση παρατηρήσεις επί της πιεζομετρίας και των υδροχημικών δεδομένων ωστόσο μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά η ύπαρξη υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ του

υδροφόρου συστήματος και του ποταμού, η οποία είναι αμφίδρομη, μεταβάλλεται εποχιακά και εξαρτάται από τη σχετική θέση μεταξύ της πιεζομετρικής επιφάνειας και της στάθμης του ποταμού.

*Παράμετρος IR*. Δεν υφίστανται επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό της παραμέτρου αυτής. Ωστόσο βασιζόμενοι στην γενική αρδευτική πρακτική που ακολουθείται στη χώρα εκτιμάται ότι οι επιστροφές λόγω υπερ-άρδευσης ανέρχονται στο 5 % της συνολικής ποσότητας που χρησιμοποιείται για κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Με βάση παλαιότερες μελέτες και με την παραδοχή ότι η χρήση γης από την οποία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η κατανάλωση νερού για αρδευτικές ανάγκες, δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά, ο συνολικός όγκος νερού για άρδευση εκτιμάται ότι είναι περίπου 15.000.000 $m^3$/έτος. Στον όγκο αυτό περιλαμβάνονται οι απολήψεις από υπόγεια και επιφανειακά νερά. Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω IR = 750.000 $m^3$/έτος.

*Παράμετρος PI*. Ο όγκος νερού που αντλείται για κάλυψη των αρδευτικών αναγκών ανέρχεται με βάση παλαιότερα δεδομένα και υπολογισμούς, σε 10.000.000 $m^3$/έτος. Επομένως PI = 10.000.000 $m^3$/έτος.

*Παράμετρος PW*. Με βάση την απογραφή του 1991, ο μόνιμος πληθυσμός της περιοχής μελέτης ανέρχεται σε 7.500 άτομα. Θεωρώντας αύξηση κατά 10 %, ο σημερινός μόνιμος πληθυσμός ανέρχεται σε 8.250 άτομα. Με την παραδοχή ότι αυτός ανέρχεται σε 10.000 άτομα, συμπεριλαμβάνοντας τον εποχιακό πληθυσμό κατά τους θερινούς μήνες και λαμβάνοντας μέση ημερήσια κατά κεφαλή κατανάλωση 250 lt, οι ετήσιες αντλήσεις για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών ανέρχονται σε PW = 1.095.000 $m^3$/έτος.

*Παράμετρος PR*. Ως εκτίμηση θεωρείται ότι οι υδατικές ανάγκες για κάλυψη των βιοτεχνικών και εργοταξιακών δραστηριοτήτων στην περιοχή έρευνας δεν είναι υψηλές και δεν υπερβαίνουν την υδρευτική χρήση, έτσι PR = 1.000.000 $m^3$/έτος.

*Παράμετροι SD και RD*. Δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τον ποσοτικό υπολογισμό των παραμέτρων αυτών. Εκτιμάται ωστόσο με βάση παρατηρήσεις επί της πιεζομετρίας και των υδροχημικών δεδομένων ότι υφίσταται εποχιακή εκφόρτιση προς τη θάλασσα και προς την κοίτη του Πηνειού.

Από την ανάλυση των παραμέτρων που συμμετέχουν στη διαμόρφωση του υδατικού ισοζυγίου προκύπτει ότι είναι έντονη η ανάγκη πραγματοποίησης πρόσθετων εργασιών προκειμένου να

καταστεί δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του υδατικού ισοζυγίου. Ωστόσο προκύπτει ότι σε ετήσια βάση το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής είναι πλεονασματικό και μόνο κατά τη θερινή περίοδο παρατηρούνται σημαντικές κατά θέσεις ελλείψεις νερού. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η υδροχωρητική ικανότητα του συστήματος είναι περιορισμένη, άποψη η οποία ενισχύεται και από τη μελέτη των υφισταμένων λιθολογικών τομών γεωτρήσεων [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].

## 2.5 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

### 2.5.1 Δημογραφική κατάσταση και κατανομή πληθυσμού

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των απογραφών που έγιναν στη χώρα μας από το 1940 μέχρι σήμερα ο πραγματικός πληθυσμός στο σύνολο των Κοινοτικών Διαμερισμάτων Πυργετού, Αιγάνης, Κρανέας-Κουλούρας, Ραψάνης, Παλαιοπύργου, Ομολίου, Στομίου, Καρίτσας και Ν. Πόρων εξελίχθηκε σύμφωνα με τον πίνακα 2-8.

**Πίνακας 2-8. Διακύμανση του πληθυσμού.**

| Έτος | Πληθυσμός | Μεταβολές | |
|---|---|---|---|
| | | Άτομα | Ποσοστά % |
| 1940 | 9.567 | | |
| 1951 | 8.475 | -1.092 | -11,4 |
| 1961 | 8.989 | +514 | +6,0 |
| 1971 | 7.481 | -1.508 | -16,8 |
| 1981 | 6.777 | -704 | -9,4 |
| 1991 | 7.294 | +517 | +7,6 |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Η ραγδαία μείωση του πληθυσμού κατά την περίοδο 1971 – 1981 οφείλεται στο γενικότερο ρεύμα εσωτερικής και εξωτερικής μετανάστευσης που αποδυνάμωσε την ελληνική επαρχία. Η θετική μεταβολή που εμφανίζεται κατά την περίοδο 1981 – 1991 η οποία ενδεχομένως κατά την τελευταία δεκαετία να έχει γίνει μεγαλύτερη, οφείλεται στην αύξηση της μετακίνησης κατά την απογραφή στους παραλιακούς οικισμούς όπου υπάρχουν πολλές εξοχικές κατοικίες (Νέα Μεσάγγαλα, Λουτρό, Καστρί).

### 2.5.2 Οικονομικές δραστηριότητες

Η οικονομία στο σύνολο της ευρύτερης περιοχής εμφανίζεται κατ' εξοχήν αγροτική με πιο σημαντική την γεωργία και στη συνέχεια την κτηνοτροφία και την αλιεία. Η συμμετοχή των δασών είναι εντελώς ασήμαντη. Οι υπάρχουσες μεταποιητικές μονάδες και οι διάφορες μορφές

τουριστικών δραστηριοτήτων λειτουργούν κατά κύριο λόγο ως ευκαιρίες συμπληρωματικής απασχόλησης για την ενίσχυση των γεωργικών κυρίως, οικογενειακών εισοδημάτων.

### 2.5.3 Γεωργία – Κτηνοτροφία

Η κύρια πηγή εισοδημάτων στην περιοχή μελέτης προέρχεται από τη γεωργία και την κτηνοτροφία.

Διάρθρωση Γεωργικών Χρήσεων

Στο σύνολο της ευρύτερης περιοχής η γεωργική γη καλύπτει το 27 % της έκτασης που κατανέμεται ως εξής, πίνακας 2-9:

**Πίνακας 2-9. Κατανομή της γεωργικής γης.**

| Γεωργική γη | Έκταση (στρ.) | Ποσοστό % |
|---|---|---|
| Καλλιεργούμενες εκτάσεις | 53.426 | 87 |
| Αγρανάπαυση | 7.980 | 13 |
| Συνολική γεωργική γη | 61.406 | 100 |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Στην 5ετία 1988 – 1992 σημειώθηκε αύξηση των εκτάσεων αγρανάπαυσης κατά 4.000 στρ., περίπου ενώ η συνολική γεωργική γη μειώθηκε κατά 1.700 στρ.

Σε σύγκριση με το 1981 η μείωση της γεωργικής γης φθάνει στα 4.200 στρ., περίπου (6,4 %) και προήλθε από τις παρακάτω αυξομειώσεις σε 6 από τα 8 Κ.Δ. της περιοχής, πίνακας 2-10:

**Πίνακας 2-10. Μεταβολή γεωργικών εκτάσεων.**

| Μείωση γεωργικών εκτάσεων | | Αύξηση γεωργικών εκτάσεων | |
|---|---|---|---|
| Πυργετός | -2300 στρ. | Παλαιόπυργος | +100 στρ. |
| Αιγάνη | -1500 στρ. | Ραψάνη | +100 στρ. |
| Στόμιο | - 400 στρ. | | |
| Πόροι | - 200 στρ. | | |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Το μεγαλύτερο ποσοστό της γεωργικής γης εμφανίζεται στον Παλαιόπυργο (75,6 %) και ακολουθούν ο Πυργετός (42,7 %) και η Αιγάνη (40,5%). Η κατανομή των εκτάσεων που καλλιεργήθηκαν το 1992 κατά βασικές κατηγορίες καλλιεργειών φαίνεται στον πίνακα 2-11.

Παρατηρείται ότι τόσο στο σύνολο της ευρύτερης περιοχής όσο και σε κάθε Κοινοτικό Διαμέρισμα χωριστά επικρατούν οι αροτριαίες καλλιέργειες.

**Πίνακας 2-11. Κατανομή καλλιεργούμενων εκτάσεων κατά το έτος 1992.**

| Κατηγορία | Εκτάσεις (στρ.) | Ποσοστό % |
|---|---|---|
| Αροτριαίες | 40.095 | 75,0 |
| Κηπευτικά | 1.606 | 3,0 |
| Δένδρα | 8.657 | 16,2 |
| Αμπέλια | 3.068 | 5,8 |
| **Σύνολο** | **53.426** | **100,0** |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Το μεγαλύτερο τμήμα, περίπου 40.000 στρ., της παραπάνω γεωργικής γης βρίσκεται μέσα στα όρια της περιοχής μελέτης. Για παράδειγμα στην περιοχή του Κ.Δ. Παλαιοπύργου οι αροτριαίες καλλιέργειες καταλαμβάνουν τη συντριπτική πλειοψηφία της καλλιεργούμενης γεωργικής γης με ποσοστό 98 % το οποίο σε αναλογία πάνω από το 1/3 αφορά ξηρικές καλλιέργειες (σιτάρι και κριθάρι). Ανάλογη εικόνα παρουσιάζεται και στο τμήμα Κρανέας που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης (Κουλούρα).

Φυτική Παραγωγή

Κατά την περίοδο 1988 – 1992, σημειώθηκαν οι ακόλουθες εξελίξεις:

- Μείωση της συνολικής έκτασης των αροτριαίων καλλιεργειών που προέρχεται από την αύξηση της αγρανάπαυσης. Επίσης παρατηρείται μείωση των εκτάσεων σε 3 είδη εντατικών καλλιεργειών (καλαμπόκι, μηδική και φασόλια). Αντίθετα οι εκτάσεις των ξηρικών καλλιεργειών (σιτάρι και κριθάρι), αυξήθηκαν από 18,2 % σε 29,4 % της συνολικής έκτασης αυτής της κατηγορίας.
- Ετήσια διακύμανση των εκτάσεων με κηπευτικά από 1.294 στρ., το ελάχιστο μέχρι 1.776 στρ., το μέγιστο.
- Αύξηση των εκτάσεων με δενδρώδεις καλλιέργειες κατά 1.080 στρ.
- Μείωση των αμπελώνων κατά 400 στρ.

Με βάση τις χρησιμοποιούμενες εκτάσεις και το γεωργικό εισόδημα οι κυριότεροι κλάδοι φυτικής παραγωγής κατά κατηγορία καλλιεργειών είναι:

- Από τις αροτριαίες καλλιέργειες, το σιτάρι μαλακό και σκληρό, το καλαμπόκι, τα τεύτλα και η μηδική.
- Από τα λαχανικά, η ντομάτα.
- Από τα δένδρα, οι αμυγδαλιές, οι ελιές και οι ακτινιδιές.
- Τα αμπέλια.

Η εκμετάλλευση της γεωργικής γης βρίσκεται ακόμα σε ήπιες μορφές ενώ ο βαθμός εκμηχάνισης της γεωργίας παρουσιάζεται δυσανάλογα υψηλός για τη συγκεκριμένη διάρθρωση των καλλιεργειών, καθώς προκύπτει μια αναλογία 100 στρ. ανά γεωργικό ελκυστήρα. Αυτό

οφείλεται στο μικρό μέσο μέγεθος των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και στην αυτάρκεια που θέλει να έχει κάθε γεωργός. Η πλειοψηφία των γεωργικών εκμεταλλεύσεων κυμαίνεται στα 30 – 50 στρ.

Ζωική παραγωγή

Το σύνολο του ζωικού πληθυσμού της ευρύτερης περιοχής υπολογίζεται για το έτος 1992 σε 2.300 ζωικές μονάδες, μειωμένες κατά 40% περίπου σε σύγκριση με το 1988. Οι αποδόσεις της κτηνοτροφίας, ως δεύτερου παραγωγικού κλάδου για την περιοχή βρίσκονται γενικά σε επίπεδα ανάλογα με αυτά του μέσου όρου της χώρας.

### 2.5.4 Άλλες δραστηριότητες

Αλιεία

Το μεγαλύτερο αλιευτικό ενδιαφέρον αφορά την θαλάσσια αλιεία κατά μήκος της παράκτιας θαλάσσιας περιοχής από τον Πλαταμώνα μέχρι το Στόμιο όπου λειτουργούν αλιευτικά καταφύγια. Η αλιεία ασκείται από κατοίκους της περιοχής (Στόμιο, Παλαιόπυργος, Κουλούρα) αλλά και από επαγγελματίες ή ερασιτέχνες αλιείς άλλων περιοχών.

Δάση

Το σύνολο των δασικών εκτάσεων στην ευρύτερη περιοχή καλύπτει 71.500 στρ. Από αυτά πραγματικά δάση με πλούσια ψηλή και χαμηλή βλάστηση και μεγάλη ποικιλία δασικών ειδών περιλαμβάνει το τμήμα των δημοσίων δασών Όσσας με ετήσια παραγωγή 1.400 $m^3$ ξύλου δρυός που ανήκουν στα Κ.Δ. Στομίου και Ομολίου.

Τουρισμός

Η επικρατούσα μορφή τουρισμού είναι ο παραθερισμός, ως εποχικό φαινόμενο μαζικών μετακινήσεων από τον ευρύτερο γεωγραφικό χώρο με αποτέλεσμα την πληθυσμιακή φόρτιση της περιοχής. Εκτιμάται ότι τα οικονομικά αποτελέσματα από την λειτουργία τουριστικών καταλυμάτων δεν είναι αξιόλογα.

### 2.5.5 Χρήση γης

Από τη γενική εικόνα της ευρύτερης περιοχής παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου το 1/3 της συνολικής έκτασης είναι δασικές εκτάσεις ενώ ακολουθούν η γεωργική γη (καλλιεργούμενη και αγρανάπαυση) και οι βοσκότοποι, όπως αναλύεται στον πίνακα 2-12.

Το μεγαλύτερο ποσοστό της γεωργικής γης (62,4 %), κατανέμεται με ιεραρχική σειρά στα 4 Κ.Δ. Πυργετού, Αιγάνης, Παλαιοπύργου και Ομολίου.

**Πίνακας 2-12. Κατηγορίες χρήσεων γης.**

| Κατηγορίες χρήσεων γης | Εκτάσεις (χιλ. στρ.) | Ποσοστό % |
|---|---|---|
| Γεωργική γη | 64,7 | 26,41 |
| Βοσκότοποι | 58,9 | 24,05 |
| Δασικές εκτάσεις | 90,1 | 36,78 |
| Εκτάσεις με νερά | 5,9 | 2,40 |
| Δρόμοι και οικισμοί | 10,2 | 4,16 |
| Λοιπές εκτάσεις | 15,2 | 6,20 |
| **Σύνολο ευρύτερης περιοχής** | **245** | **100** |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Η πλειοψηφία των δασικών εκτάσεων (62,2 %) βρίσκεται στα ακραία Κ.Δ. Στομίου (Όσσα) και Πόρων (κάτω Όλυμπος). Αντίθετα ο Πυργετός είναι το μόνο Κ.Δ. με μηδενική απογραφική καταγραφή. Το μεγαλύτερο ποσοστό των βοσκοτόπων (87 %) κατανέμεται κατά σειρά μεταξύ των τριών Κ.Δ. Ραψάνης, Κρανέας και Πυργετού. Εκτάσεις καλυμμένες με νερά υπάρχουν σε όλα τα Κ.Δ. και κυμαίνονται από 200 στρ. (Παλαιοπύργου) μέχρι 1.300 στρ. (Πόρων).

Οι εκτάσεις που αφορούν οικιστικές χρήσεις και δρόμους υπερκαλύπτουν κατά 73 % τις εκτάσεις που είναι καλυμμένες με νερά και κυμαίνονται από 500 στρ. (Κρανέα) μέχρι 3.000 στρ. (Αιγάνης).

**Πίνακας 2-13. Κατανομή εκτάσεων (χιλ. στρ.) κατά βασικές κατηγορίες χρήσεων γης 1981.**

| α/α | Κοινοτικό Διαμέρισμα | Σύνολο εκτάσεων | Καλλιεργούμενες εκτάσεις | Βοσκότοποι | | Δασικές εκτάσεις | Εκτάσεις με νερά | Δρόμοι-Οικισμοί | Λοιπές εκτάσεις |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Δημ. | Ιδιωτ. | | | | |
| 1 | Πυργετός | 31,3 | 15,7 | 12,8 | 0,7 | 0 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| 2 | Αιγάνη | 21,0 | 10,0 | 0 | 1,4 | 6,1 | 0,5 | 3,0 | - |
| 3 | Κρανέα | 31,5 | 5,0 | 15,4 | - | 8,3 | 0,9 | 0,5 | 1,5 |
| 4 | Ραψάνη | 44,6 | 9,5 | 16,0 | 1,7 | 2,2 | 1,0 | 2,2 | 12,0 |
| 5 | Παλαιόπυργος | 11,5 | 8,6 | 0,5 | - | 0,6 | 0,2 | 0,7 | 1,0 |
| 6 | Ομόλιο | 22,4 | 6,7 | 4,3 | - | 9,7 | 0,5 | 1,2 | - |
| 7 | Στόμιο | 38,0 | 6,8 | 2,9 | - | 26,2 | 0,8 | 1,30 | - |
| 8 | Ν. Πόροι | 26,9 | 3,4 | 0 | 3,2 | 18,4 | 1,3 | 0,60 | - |
| | **ΣΥΝΟΛΟ** | **227,2** | **65,7** | **51,9** | **7,0** | **71,5** | **5,9** | **10,2** | **15,2** |

Πηγή: ΕΣΥΕ

Η παραπάνω διάρθρωση των χρήσεων γης για το 1981, πίνακας 2-13, ισχύει σε γενικές γραμμές και σήμερα. Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις κατά καλλιέργεια και Κοινοτικό Διαμέρισμα για το έτος 2000 φαίνονται στο πίνακα 2-14. Οι αρδευόμενες εκτάσεις ανέρχονται σε 38.213 στρέμματα ή ποσοστό 50 % της συνολικά καλλιεργούμενης έκτασης για το έτος 2000.

### 2.5.6 Χρήση νερού

Οι κύριες ανάγκες σε νερό της περιοχής (>80 %) προέρχονται από τον αγροτικό τομέα και στοχεύουν στην κάλυψη των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών. Δευτερευόντως από πλευράς ποσότητας, πρέπει να καλυφθούν οι ανάγκες ύδρευσης των οικισμών που είναι αυξημένες κατά τους θερινούς μήνες λόγω της τουριστικής κίνησης στην περιοχή. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών της πεδινής ζώνης γίνεται με άντληση του υδροφόρου συστήματος μέσω γεωτρήσεων, πηγαδιών και τάφρων. Παράλληλα, γίνεται χρήση των επιφανειακών νερών του ποταμού Πηνειού με την κατασκευή αναχωμάτων και εκτροπή σε δίκτυο αρδευτικών καναλιών. Η κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της περιοχής γίνεται με άντληση του υπόγειου υδατικού δυναμικού από γεωτρήσεις στις παρυφές της λεκάνης και σε ελάχιστες περιπτώσεις στο κεντρικό τμήμα αυτής. Ο περιορισμός αυτός προκύπτει από τα υποβαθμισμένα και ασταθή ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών εντός της λεκάνης και κυρίως στα παράκτια τμήματά της.

**Πίνακας 2-14. Καλλιεργούμενες εκτάσεις (στρ.) ανά Κοινοτικό Διαμέρισμα και καλλιέργεια.**

| Κοινοτικό Διαμέρισμα | Σιτάρι Σκληρό | Σιτάρι Μαλακό+ Κριθάρι | Βαμβάκι | Καλαμπόκι | Τεύτλα | Μηδική | Ακτινίδια | Ελιές | Αμπέλια | Κάστανα+Διάφ. | Κηπευτικά | Αγρ/ση | Σύνολο |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Πυργετός | 2.539,5 | 355,5 | 0 | 2.096 | 2.000 | 2.500 | 500 | 2.230 | 500 | 220 | 109 | 700 | 13.750 |
| Αιγάνη | 1.758 | 238,8 | 674 | 222 | 1.128 | 2.000 | 750 | 1.100 | 150 | 0 | 179 | 1.800 | 9.999,8 |
| Κρανέα | 1.232 | 95 | 695 | 278 | 850 | 1.442 | 7 | 101 | 400 | 0 | 0 | 0 | 5.100 |
| Ραψάνη | 93 | 168,5 | 0 | 29 | 449 | 1.000 | 10 | 1.466 | 2.800 | 0 | 0 | 3.484 | 9.499,5 |
| Παλαιόπυργος | 1.006 | 65 | 509 | 3.757 | 838 | 1.338 | 17 | 100 | 0 | 200 | 360 | 500 | 8.690 |
| Ομόλιο | 2.668 | 52,2 | 750 | 2.668,8 | 100 | 166 | 70 | 100 | 8 | 0 | 100 | 0 | 6.683 |
| Στόμιο | 703,5 | 25 | 746 | 950 | 135 | 749 | 20 | 400 | 0 | 2.280 | 300 | 0 | 6.308,5 |
| Καρίτσα | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.000 | 0 | 3.500 | 116 | 0 | 4.616 |
| **Σύνολο** | **10.000** | **1.000** | **3.374** | **10.000,8** | **5.500** | **9.195** | **1.374** | **6.497** | **3.858** | **6.200** | **1.164** | **6.484** | **64.646,8** |

Πηγή: ΕΣΥΕ

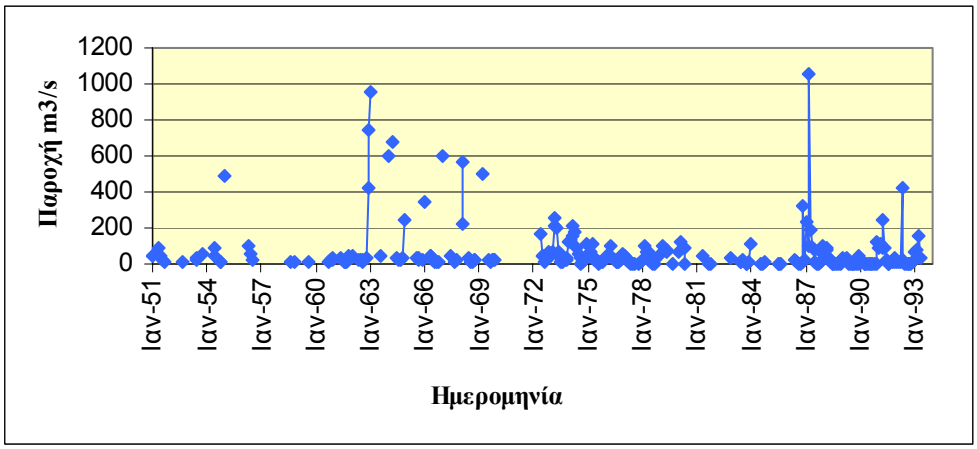
### 2.5.7 Δίαιτα υδατορευμάτων

**Πηνειός ποταμός**

Ο Πηνειός αποτελεί την κεντρική κοίτη παροχέτευσης στον Θερμαϊκό Κόλπο των νερών ολόκληρου του Θεσσαλικού βυθίσματος. Η συνολική λεκάνη απορροής του μέχρι τα Τέμπη είναι 10.580 $km^2$ από τα οποία τα 3.400 $km^2$ ανήκουν σε πεδινές περιοχές υψομέτρου 60 – 100 m, και 7.180 $km^2$ σε ορεινές περιοχές υψομέτρου 100 – 2.197 m (Όλυμπος). Το συνολικό μήκος του ποταμού Πηνειού, από τις πηγές έως τις εκβολές του είναι 200 km. Στη κοιλάδα των Τεμπών ο Πηνειός εμπλουτίζεται από τα νερά πηγών, κυρίως της Αγ. Παρασκευής, που φθάνουν ως την περιοχή του Δέλτα και αποτελούν σημαντικό μέρος της παροχής του, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες οπότε και η ανάντη των Τεμπών παροχή κατακρατείται για άρδευση γεωργικών εκτάσεων του Θεσσαλικού κάμπου.

Μετρήσεις παροχής στο ποταμό Πηνειό έχουν γίνει σε διάφορες θέσεις (Γόννοι, Πυργετός, και Αγία Παρασκευή Τεμπών). Στον πίνακα 2-15 και στο σχήμα 2.5, παρουσιάζονται οι τιμές των παροχών στη γέφυρα των Γόννων πριν από την είσοδο στην κοιλάδα των Τεμπών. Από τα στοιχεία αυτά παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής μεταξύ χειμώνα και θέρους αλλά και μεταξύ διαφορετικών ετών. Η παροχή του Πηνειού ενισχύεται σημαντικά μετά τα Τέμπη λόγω της τροφοδοσίας με τα νερά των πηγών της Αγ. Παρασκευής, πίνακας 2-16 και σχήμα 2.6.

Από τα δεδομένα των μετρήσεων φαίνεται ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μείωση μέχρι μηδενισμού των θερινών παροχών του Πηνειού στην είσοδο της κοιλάδας των Τεμπών, καθώς και μείωση των θερινών παροχών των πηγών. Αντίθετα οι χειμερινές παροχές δεν παρουσιάζουν τάση μείωσης, αν και τα στατιστικά στοιχεία το χειμώνα είναι μειωμένης ακρίβειας, λόγω των συχνών πλημμύρων που επηρεάζουν τη γενική εικόνα.




**Σχήμα 2.5. Διακύμανση της παροχής του Πηνειού ποταμού ($m^3/s$) στους Γόννους.**

**Πίνακας 2-15. Μετρήσεις παροχής του Πηνειού ($m^3/s$), στους Γόννους.**

| Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαϊ | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Οκτ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49,1 | | | | 83,6 | 39,8 | 18,9 | 14,9 | | |
| | | | | | | | | 9,4 | |
| | | | | 26,1 | 36,6 | | | 51,6 | |
| | | | | 84,7 | 46,3 | | | 12,7 | 13,5 |
| | | | | | | | | | |
| | | | 104,3 | 60,2 | 22,2 | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 6 | | 13,1 |
| | | | | | | | 9,9 | | |
| | | | | | | | | 13,9 | 22,4 |
| | | | | 34,7 | 27,3 | 13,2 | 8,4 | 15 | 39,1 |
| 40,1 | | | | 23,6 | 17,6 | 17,3 | 8,5 | | 28,6 |
| 960,2 | | | | | | 43,8 | | | |
| | | 674,5 | | | 34 | 26,1 | 19 | | 32,5 |
| | | | | | | 29 | 31,3 | 17,7 | |
| 340,6 | | | 49,5 | 44,4 | 23,7 | 6,1 | | 9,6 | 13,4 |
| | | | | 43,9 | | | 8,9 | | 18,4 |
| 568 | 227,6 | | | | 34,8 | 10,3 | 5,7 | 20,5 | 20,4 |
| | | 505,5 | | | | 19,8 | 5,8 | 24,5 | 17,5 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | 172 | 42,4 | 41 | 11,3 | 29,3 | 63,7 |
| 67,9 | 213,4 | 257,6 | 198 | 68 | 31 | 10,4 | 8,5 | 19,1 | 25 |
| 136,4 | 209,5 | 156,9 | 179 | 86,7 | 52 | 34,4 | 4,1 | 5,9 | 19 |
| 50,1 | 70,8 | 107,6 | 33,6 | 20,9 | 24,2 | 5,7 | 2,5 | 5,6 | 8,4 |
| 43,1 | | | 96 | 38,6 | 25,2 | 7,5 | 7,4 | 6,1 | 19 |
| 42,8 | 26,2 | 21,7 | 16,5 | 3,2 | 0,4 | 0,1 | | | 4,9 |
| | 96,6 | 62,9 | 61,2 | 18,3 | 8,8 | 0,4 | 0,2 | 20,3 | |
| | 104 | 75,4 | 81 | 64,9 | | | | 5,4 | |
| | 118 | | 1,6 | 91,6 | | | | | |
| | | | | 40,7 | | | 4,3 | 5,4 | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | 11,7 | 9,6 | 20,5 | | 3,2 | 4,9 |
| | | | | | | 3 | 0,9 | 10,2 | |
| | | | | | 4,1 | 2,5 | 0,4 | | |
| | | | | 26,1 | | 7,6 | 1,2 | 3,9 | 5,7 |

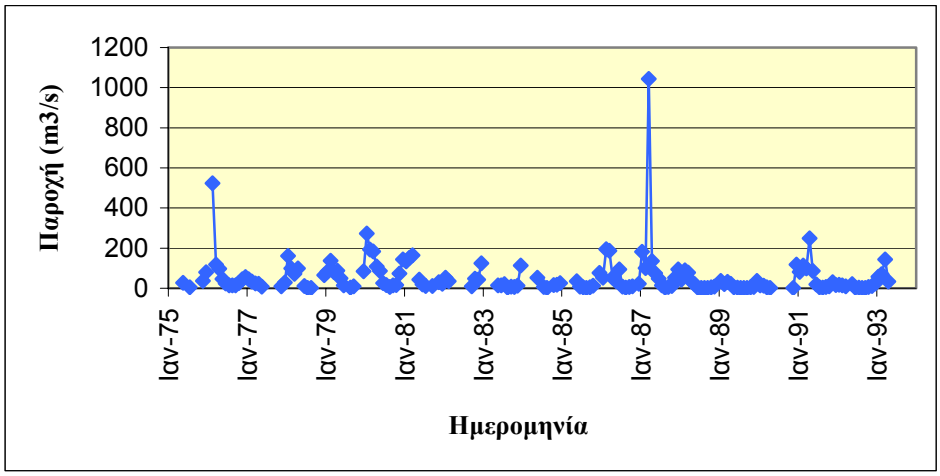
| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 228,4 | 98,9 | 1052 | 185,2 | 87,7 | 79,4 | 12,5 | 2,6 | 4,3 | 9,9 | |
| 37,3 | 84,6 | 78,3 | 34,6 | 21,3 | 2,1 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 3,1 | |
| 36,5 | 22,6 | 36,6 | 26,2 | 3 | 1,3 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 4,5 | |
| 13,6 | 10,6 | 3,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 88,2 | 109,2 | 86 | 250 | 86 | 18,8 | 2,9 | 0,7 | | 7,5 | |
| 16 | 12,3 | 7,9 | 422,1 | 20,8 | 2 | 2 | 0,1 | 0,1 | 5,4 | |
| 62,9 | 75,9 | 154 | 28,9 | | | | | | | |

Πηγή: Αναθεώρηση Μελέτης Εγγειοβελτιωτικών Έργων Πεδιάδος Τσάγιεζι (Σ. Δάλλας) - Δ.Ε.Β.

**Πίνακας 2-16. Μετρήσεις παροχής του Πηνειού ($m^3/s$), στην Αγ. Παρασκευή Τεμπών.**

| ς | Ιαν | Φεβ | Μαρ | Απρ | Μαϊ | Ιουν | Ιουλ | Αυγ | Σεπ | Οκτ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 26,9 | | 4 | | | | |
| | | 523,3 | 118,4 | 96,8 | 46,2 | 24,3 | 14,4 | 13,8 | 14 | 25,1 | |
| | 44,1 | 34 | 24,2 | 22 | 8,4 | | | | | | |
| | 161,8 | 98,2 | 71,7 | 99,3 | | 11,9 | 1,6 | 1,2 | | | |
| | 82,8 | 136,6 | 81,7 | 88,2 | 48,8 | 14,8 | | 3,1 | 9 | | |
| | 273 | 192,5 | 184 | 108,6 | 86,7 | 25,9 | 16,3 | 6,9 | 14,7 | 16,4 | |
| | 134,3 | 151,6 | 164,7 | | 42,9 | 19,6 | 11,9 | | 11,3 | | |
| | 53,2 | 35,2 | | | | | | | 10 | 47,4 | |
| | | | | | 14,6 | 14,4 | 21 | 3,7 | 7,5 | 5,7 | |
| | | | | | 51,9 | | 5,8 | 2,2 | | 15,5 | |
| | | | | | 35,2 | 8 | 4,3 | 1,2 | 4,3 | 12,6 | |
| | 52,9 | 194,1 | 186,7 | 53,3 | 34,9 | 94,7 | 8,3 | 3 | 6,9 | 9,1 | |
| | 181,7 | 101,3 | 1044 | 136,3 | 74,4 | 47,7 | 14,5 | 3,6 | 6,8 | 11,7 | |
| | 43,8 | 88,6 | 78,3 | 34,6 | 21,3 | 2,1 | 1,9 | 1,6 | 1,3 | 4,7 | |
| | 37 | 20,9 | 32,4 | 22,2 | 5 | 2,8 | 1,5 | 1 | 1,4 | 4,9 | |
| | 14,3 | 12,5 | 4,5 | 1,5 | | | | | | | |
| | 81,4 | 113,6 | 99,4 | 249 | 85,8 | 19,9 | 4,6 | 2,8 | 6,6 | 9,8 | |
| | 17,2 | 14,3 | 10,2 | | 21,2 | 3,5 | 3,6 | 0,9 | 1,2 | 6,6 | |
| | 57,3 | 70,5 | 142,9 | 32,8 | | | | | | | |

Πηγή: Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων




**Σχήμα 2.6. Διακύμανση της παροχής του Πηνειού ποταμού ($m^3/s$) στην Αγ. Παρασκευή.**

### 2.5.8 Χείμαρροι ευρύτερης περιοχής

**Χείμαρροι κάτω Ολύμπου**

Κύριοι αποδέκτες της περιοχής βόρεια του Πηνειού είναι οι χείμαρροι Ρουμάνι – Παπαπούλι (ή Ποταμούλι) και Καρατζούνι – Παλιοπόταμο. Τροφοδοτούνται από ορεινές κυρίως λεκάνες απορροής συνολικής έκτασης περίπου 89 $km^2$, πίνακας 2-1.

Η λεκάνη απορροής που καταλήγει στο Παπαπούλι έχει εμβαδόν 15 $km^2$ και παρουσιάζει σημαντικές πλημμυρικές παροχές. Γι' αυτό το λόγο ο χείμαρρος έχει διαμορφωθεί σε αντιπλημμυρική τάφρο με πρόχειρη διευθέτηση. Η θερινή του παροχή είναι αμελητέα γιατί δεν υπάρχουν αξιόλογες πηγές νερού μέσα στην λεκάνη απορροής του ενώ γίνεται και άντληση των υδάτων του για άρδευση παρακείμενων εκτάσεων.

Ο χείμαρρος Παλιοπόταμος διασχίζει με έντονους μαιανδρισμούς το κέντρο της περιοχής και παροχέτευε στο παρελθόν τα νερά σημαντικής λεκάνης απορροής, με εμβαδόν 75 $km^2$, τα οποία όμως αποκόπηκαν με το ανάχωμα της τάφρου Σμίξη και οδηγούνται το χειμώνα στην κοίτη του Πηνειού. Έτσι τόσο η θερινή όσο και η χειμερινή άμεση παροχή του είναι αμελητέες, πράγμα που έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αύξηση της αλατότητας των υπόγειων νερών. Το ελεγχόμενο στόμιο υδροδότησης που έχει κατασκευαστεί στο ανάχωμα για άρδευση πρέπει να παραμένει ανοικτό καθ' όλο το έτος, για τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων.

**Χείμαρροι Όσσας**

Η νότια περιοχή δέχεται σημαντικές απορροές από τις ορεινές λεκάνες της Όσσας συνολικού εμβαδού 90 $km^2$, πίνακας 2-1.

Όλοι οι χείμαρροι εκβάλλουν στην παλαιά κοίτη του Πηνειού και κυρίως στο δεξιό της κλάδο που εκβάλλει κοντά στο Στόμιο (Τσάγιεζι). Ο σημαντικότερος χείμαρρος (Σαϊτάνη Ρέμα)

παροχετεύει τα νερά λεκάνης απορροής 19,80 $km^2$ ενώ και άλλοι χείμαρροι έχουν αξιόλογες λεκάνες απορροής (9 – 12 $km^2$).

Οι θερινές παροχές είναι ασήμαντες ή μηδενικές λόγω της έλλειψης πηγαίων νερών. Για τις ανάγκες της άρδευσης η παλαιά κοίτη του Πηνειού εμπλουτίζεται από την εκτροπή ενός μέρους των νερών της κύριας κοίτης με πρόχειρο χωμάτινο φράγμα ανάντη του Παλαιόπυργου.

Τέλος, όλοι οι χείμαρροι της νότιας περιοχής σχηματίζουν κώνους απόθεσης, αφού οι πλαγιές της Όσσας είναι απότομες και έτσι, οι ταχύτητες του νερού στα ορεινά τμήματα είναι αυξημένες [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ – ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές παράκτιες ζώνες και ειδικά κοντά σε δέλτα ποταμών, φιλοξενούν μεγάλο πληθυσμό. Περίπου το 50 % του παγκόσμιου πληθυσμού, κατοικεί σε περιοχές μέχρι 60 km από την ακτογραμμή. Αυτές οι περιοχές πάντα, προσέλκυαν αρκετό πληθυσμό λόγω της αφθονίας σε τροφή (π.χ. ψάρεμα, γεωργία κ.λπ) και των οικονομικών δραστηριοτήτων που αναπτύσσονταν στην περιοχή (π.χ. εμπόριο, λιμάνι κ.λπ.). Έτσι, εξαιτίας της συγκέντρωσης των εγκαταστάσεων, της γεωργικής ανάπτυξης και των οικονομικών δραστηριοτήτων, η έλλειψη του υπόγειου νερού για οικιακή, γεωργική και βιομηχανική χρήση στις παράκτιες ζώνες, έγινε πλέον εμφανής.
Συγκρίνοντας το υπόγειο με το επιφανειακό νερό, τα πλεονεκτήματα του υπόγειου είναι η πολύ καλή ποιότητά του, οι σπάνιες επιρροές λόγω εποχής (σταθερή θερμοκρασία), το χαμηλό αποθηκευτικό κόστος και οι μεγάλες διαθέσιμες ποσότητες. Παρόλα αυτά, το γλυκό νερό είναι μάλλον δυσεύρετο αφού όπως φαίνεται και στον πίνακα 3-1, σε αναλογία με το συνολικό νερό στη γη, βρίσκεται σε ποσοστό μόνο 2,5 % [Shiklomanov IA, 1990].

**Πίνακας 3-1. α) Παγκόσμια κατανομή του νερού στη γη, β) παγκόσμια κατανομή γλυκού νερού.**

| Κατηγορία | Όγκος ($10^6$ $km^3$) | Ποσοστό % |
|---|---|---|
| *α) Παγκόσμια κατανομή νερού στη γη* | | |
| Ωκεανοί και θάλασσες | 1351,0 | 97,5 |
| Γλυκό νερό | 35,0 | 2,5 |
| Ολική ποσότητα νερού | 1386,0 | 100,0 |
| | | |
| *β) Παγκόσμια κατανομή γλυκού νερού* | | |
| Πάγοι | 24,4 | 69,7 |
| Επιφανειακό νερό | 0,1 | 0,3 |
| Υπόγειο νερό | 10,5 | 30,0 |
| Ολική ποσότητα γλυκού νερού | 35,0 | 100,0 |

Πηγή: Shiklomanov IA, 1990.

Επιπλέον, το υπόγειο νερό αποτελεί το 1/3 του γλυκού νερού που χρησιμοποιείται. Το κλάσμα αυτό μεγαλώνει καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις σε υπόγειο νερό εξαιτίας:

- της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και της οικονομικής ανάπτυξης

- της απώλειας επιφανειακού νερού λόγω ρύπανσης
- της διαθεσιμότητας μεγάλων ποσοτήτων
- της υψηλής ποιότητας, σε σχέση με το επιφανειακό νερό.

Τα μειονεκτήματα του υπόγειου νερού είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα, η πιθανή καθίζηση γης, το υψηλό κόστος άντλησης καθώς και η απειλή θαλάσσιας διείσδυσης που αποτελεί σημαντικό πρόβλημα τόσο για την οικιακή και βιομηχανική χρήση όσο και για τη γεωργία. Παρόλο που χρησιμοποιούνται τεχνολογίες αφαλάτωσης του αλμυρού και του υφάλμυρου νερού, το κόστος τους είναι ακόμα υψηλό.

Υφάλμυρο και αλμυρό υπόγειο νερό συναντάται τόσο σε παράκτιους υδροφορείς όσο και σε πιο εγχώριες περιοχές μακριά από τη θάλασσα. Οι διεργασίες που επηρεάζουν τους παράκτιους υδροφορείς συνοψίζονται στο σχήμα 3.1. Σε πάρα πολλούς παράκτιους υδροφορείς στον κόσμο και κυρίως στους πιο ρηχούς, το φαινόμενο της υφαλμύρινσης είναι ιδιαίτερα έντονο εξαιτίας, φυσικών αιτιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

**Σχήμα 3.1. Διεργασίες που επηρεάζουν τους παράκτιους υδροφορείς.**

Οι ανθρώπινες παρεμβάσεις, όπως η εξόρυξη από φυσικές πηγές (νερό, άμμος, πετρέλαιο και αέριο) καθώς και η διαμόρφωση του εδάφους, με εγγειοβελτιωτικά έργα (προκαλώντας καθίζηση), απειλούν τις παράκτιες περιοχές. Συνεπώς, η αλατότητα του επιφανειακού νερού αυξάνεται, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η ποιότητα των εδαφών. Έτσι, καλλιέργειες που δεν είναι ανθεκτικές σε υψηλή αλατότητα δεν είναι δυνατό να αναπτυχθούν και απαιτείται η αντικατάστασή τους από άλλες πιο ανθεκτικές.

Επίσης, οι παράκτιοι υδροφορείς εντός της ζώνης επιρροής της μέσης στάθμης της θάλασσας απειλούνται από μία αύξηση της στάθμης αυτής, που με τις καλύτερες εκτιμήσεις υπολογίζεται για τον επόμενο αιώνα, σε 50 cm. Το γεγονός αυτό, θα τους επιβαρύνει πολύ περισσότερο απ' ότι είναι σήμερα και θα προκαλέσει σημαντική μείωση του γλυκού νερού [Oude Essink, 2001].

## 3.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

Οι μεταβολές της πυκνότητας του υπόγειου νερού οφείλονται στη διακύμανση της αλατότητας και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη ροή του υπόγειου νερού.

Η ροή του υπόγειου νερού σ' ένα πορώδες μέσο πραγματοποιείται μέσω ενός πολύπλοκου δικτύου συνδεδεμένων πόρων ή ανοιγμάτων. Η εξίσωση της υπόγειας ροής βασίζεται στην εξίσωση της συνέχειας καθώς επίσης και στην εξίσωση της κίνησης.

Οι διαλυμένες ουσίες που υπάρχουν σε μεγάλη συγκέντρωση στο νερό μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πυκνότητά του. Η ροή του υπόγειου νερού εξαρτάται από την πυκνότητα και γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η μεταφορά των ουσιών στο υπόγειο νερό περιγράφεται από τη διδιάστατη εξίσωση συμμεταφοράς – διασποράς. Έτσι, η μεταφορά μιας συντηρητικής ουσίας όπως είναι το ιόν $Cl^-$, δίνεται ως εξής:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(CV_i\right) + \frac{(C - C')W}{n_e D} \qquad (3\text{-}1)$$

όπου:

C είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών ($M/L^3$)

$D_{ij}$ είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής διασποράς ($L^2/T$)

$V_i = q_i/n_e$ είναι η μέση γραμμική ταχύτητα του υπόγειου νερού κατά τη διεύθυνση του $x_i$ (L/T)

C΄ είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών σε μια πηγή ($M/L^3$)

W είναι ο γενικός όρος για πηγές και καταβόθρες (L/T)

D είναι το πάχος του κορεσμένου υδροφορέα (L).

Ο πρώτος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης αντιπροσωπεύει την αλλαγή στη συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών εξαιτίας της υδροδυναμικής διασποράς. Ο δεύτερος όρος περιγράφει τη συμμεταφορά, που είναι η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών εξαιτίας της κίνησης του υπόγειου νερού. Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά και μετακίνηση των διαλυμένων ουσιών εξαιτίας των ρευστών πηγών. Η υδροδυναμική διασπορά ορίζεται ως ο συνδυασμός επίδρασης δύο διαδικασιών:

- της μηχανικής διασποράς, που οφείλεται στη μεταβολή της ταχύτητας, σε μικροσκοπική κλίμακα. Η διασπορά εξαρτάται τόσο από τη ροή του ρευστού όσο και από τα χαρακτηριστικά του συστήματος των πόρων μέσα από τους οποίους πραγματοποιείται η ροή.
- της μοριακής διάχυσης, που οφείλεται στην τυχαία κίνηση των μορίων σε ένα ρευστό και εξαρτάται από τη συγκέντρωση, τα χαρακτηριστικά του ρευστού και το έδαφος.

Σε κανονικές συνθήκες ροής του υπόγειου νερού, η μοριακή διάχυση είναι μικρότερης σημασίας σε σχέση με τη μηχανική διασπορά [Oude Essink, 2001].

## 3.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η πυκνότητα του νερού συχνά, σχετίζεται μόνο με τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων σωματιδίων TDS στο νερό. Συχνά, στους παράκτιους υπόγειους υδροφορείς το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην κατανομή των ιόντων χλωρίου. Ανάλογα με τη συγκέντρωση των χλωριόντων διακρίνονται τρεις τύποι υπόγειων νερών:

1. Το γλυκό νερό όταν: $C_{Cl^-} \leq 300$ mg/l
2. Το υφάλμυρο νερό όταν: $300 < C_{Cl^-} < 10.000$ mg/l
3. Το αλμυρό νερό όταν: $C_{Cl^-} \geq 10.000$ mg/l

Το όριο των χλωριόντων που έχει θεσπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για το πόσιμο νερό είναι 150 mg $Cl^-$/l ενώ σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας φτάνει τα 200 mg $Cl^-$/l.

Σημειώνεται ότι μία συγκέντρωση χλωριόντων ίση με 100 mg $Cl^-$/l είναι το όριο της γεύσης στον άνθρωπο ενώ η συγκέντρωση χλωριόντων στους ωκεανούς φτάνει τα 19.000 mg $Cl^-$/l [Oude Essink, 2001].

## 3.4 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΛΥΚΟΥ – ΑΛΜΥΡΟΥ ΝΕΡΟΥ

Παρόλο που οι διαφορές της πυκνότητας των παράκτιων υδροφορέων είναι μικρές, μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην ροή του υπόγειου νερού. Η προσέγγιση της διεπιφάνειας βασίζεται στην αρχή Badon Ghyben – Herzberg που λαμβάνει υπόψη της την πυκνότητα της ροής με έναν απλό τρόπο.

### 3.4.1 Η αρχή Badon Ghyben – Herzberg

Η αρχή Badon Ghyben – Herzberg περιγράφει τη θέση της διεπιφάνειας μεταξύ του γλυκού και του αλμυρού νερού, σχήμα 3.2, και δίνεται από την εξίσωση 3-2.

$$h = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} H \Leftrightarrow h = \alpha H \qquad (3\text{-}2)$$

όπου:

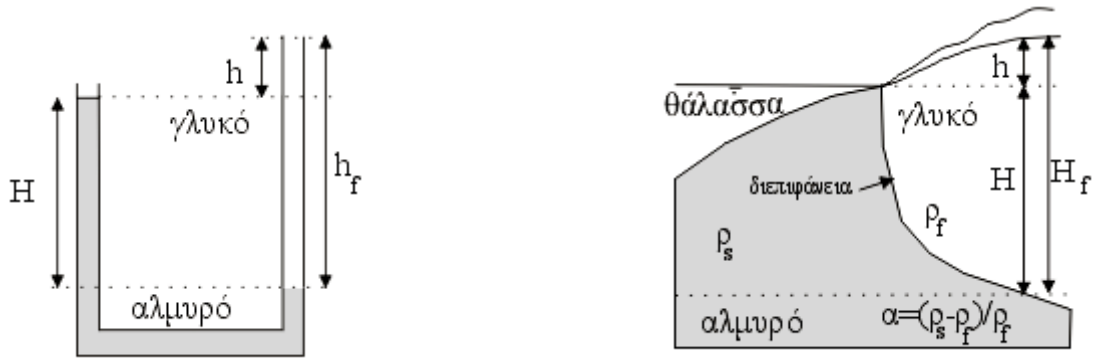
h είναι η πιεζομετρική στάθμη σε σχέση με τη μέση στάθμη της θάλασσας (L)

H είναι το βάθος της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (L)

$\rho_f$ είναι η πυκνότητα αναφοράς, συνήθως η πυκνότητα του γλυκού νερού χωρίς τα διαλυμένα σωματίδια ($M/L^3$)

$\rho_s$ είναι η πυκνότητα του αλμυρού νερού ($M/L^3$)

$\alpha = (\rho_s - \rho_f)/\rho_f$ είναι η σχετική διαφορά πυκνότητας.




**Σχήμα 3.2. Η αρχή Badon Ghyben – Herzberg: διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε ελεύθερο υδροφορέα.**

Για $\rho_s$ = 1025 kg/m$^3$ (τυπική τιμή για ωκεανούς) και $\rho_f$ = 1000 kg/m$^3$, η σχετική διαφορά πυκνότητας α είναι 0,025. Η αρχή Badon Ghyben – Herzberg εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου η ζώνη μετάβασης μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό του πάχους του κορεσμένου τμήματος γλυκού νερού. Οι συνθήκες αυτές που παρατηρούνται σπάνια, εντοπίζονται σε περιοχές αμμολόφων ή νησιά όπου μικρές ποσότητες γλυκού νερού αναπτύσσονται με φυσική φόρτιση υπόγειου νερού. Αναλυτικοί τύποι για τη διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού είναι διαθέσιμοι για περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς.

### 3.4.2 Ελεύθερος υδροφορέας

Φακοί γλυκού νερού αναπτύσσονται σε ελεύθερους υδροφορείς εξαιτίας της φυσικής φόρτισης του υπόγειου υδροφορέα, σχήμα 3.3α. Έτσι, προκύπτει ο τύπος:

$$H = \sqrt{\frac{-fx^2 - 2C_1x - 2C_2}{k(1+\alpha)\alpha}}, \quad h = \alpha H, \quad q = fx + C_1 \qquad (3\text{-}3)$$

όπου:

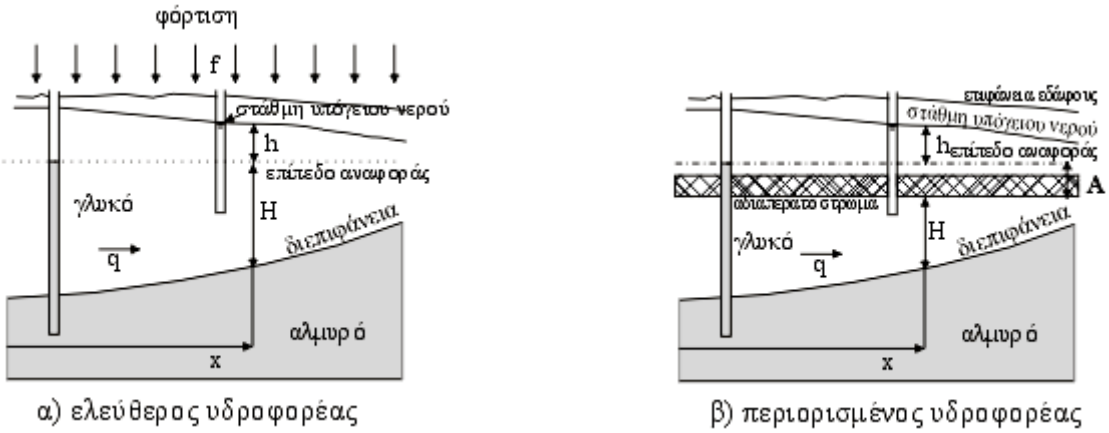
q είναι η ροή του υπόγειου νερού ανά μονάδα μήκους ακτής ($L^2/T$)

k είναι η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

f είναι η φυσική φόρτιση του υπόγειου νερού (L/T)

x είναι η οριζόντια απόσταση από τον άξονα συμμετρίας (L)

$C_1$, $C_2$ είναι σταθερές που προσδιορίζονται με βάση τις οριακές συνθήκες του συστήματος.




**Σχήμα 3.3. Η διεπιφάνεια αλμυρού – γλυκού σε δύο διαφορετικούς τύπους υδροφορέων: α) ελεύθερος και β) περιορισμένος υδροφορέας.**

### 3.4.3 Περιορισμένος υδροφορέας

Ένας περιορισμένος υδροφορέας είναι ένας υδροφορέας εγκλωβισμένος μεταξύ δύο αδιαπέρατων στρωμάτων. Οι βασικές εξισώσεις είναι, σχήμα 3.3β:

$$H = \sqrt{\frac{2q_o x}{k\alpha} + C}\,, \quad h = \alpha(H+A), \quad q = q_o \qquad (3\text{-}4)$$

όπου:

$q_o$ είναι η ροή του γλυκού υπόγειου νερού από τη φόρτιση στις ορεινότερες περιοχές ανά μονάδα μήκους ακτής ($L^2/T$)

A είναι το ύψος της στάθμης της θάλασσας σε σχέση με τον ανώτερο υδροφορέα

C είναι μια σταθερά που προσδιορίζεται με βάση τις οριακές συνθήκες του συστήματος [Oude Essink, 2001].

## 3.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΖΩΝΕΣ

### 3.5.1 Εισαγωγή

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η υπερβολική άντληση υπόγειου νερού από παράκτιους υδροφορείς είναι η σημαντικότερη αιτία για το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Πολλές φορές η υπερεκμετάλλευση μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα ξηρασίας ή και για την κάλυψη σημαντικών αναγκών για

οικιακή, βιομηχανική και γεωργική χρήση. Όσο αυξάνεται όμως, ο ρυθμός άντλησης του υπόγειου νερού και μειώνεται η πιεζομετρική στάθμη, αυξάνονται και οι πιθανότητες να εμφανιστούν φαινόμενα καθίζησης. Τέτοιου είδους παραδείγματα έχουν παρατηρηθεί σε πολλά μέρη του κόσμου όπου σε κάποιες περιπτώσεις η καθίζηση έφτασε τα 9 m, πίνακας 3-2.

**Πίνακας 3-2. Περιοχές στις οποίες έχει παρατηρηθεί καθίζηση εδάφους.**

| Περιοχή | Μέγιστη καθίζηση (m) | Ημερομηνία |
|---|---|---|
| Shanghai | 2,8 | 1921 |
| Tokyo | 5,0 | 1930s |
| Osaka | 2,8 | 1935 |
| Bangkok | 1,6 | 1950s |
| Tianjin | 2,6 | 1959 |
| Jakarta | 0,9 | 1978 |
| Manila | 0,4 | 1960 |
| Los Angeles | 9,0 | 1930s |

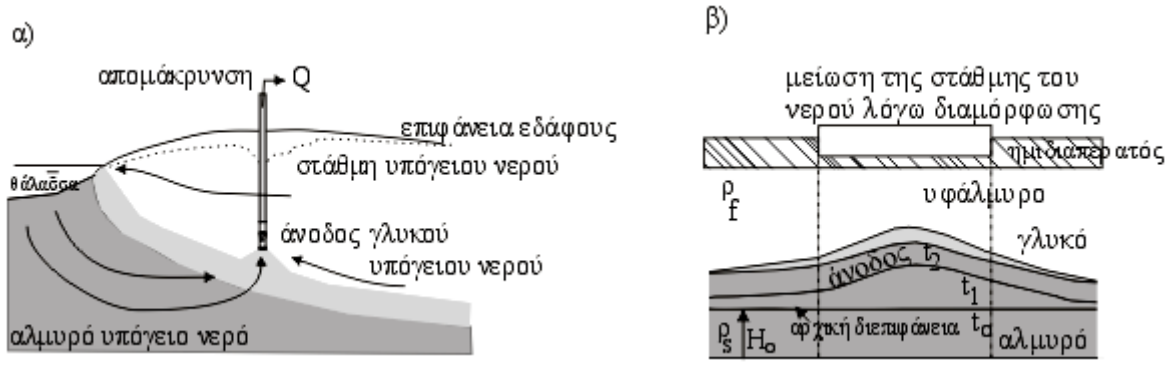
Πηγή: Yeung, 1999.

Μια άλλη αιτία που μπορεί να οδηγήσει στη διείσδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς είναι η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Το φαινόμενο όμως αυτό έχει ελάχιστες αρνητικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω του εντατικού ρυθμού άντλησης που παρατηρείται. Πάντως μια αλλαγή στη μέση στάθμη της θάλασσας, θα επηρεάσει άμεσα το παράκτιο σύστημα επιφανειακού νερού, τους ποταμούς και τις όχθες.

### 3.5.2 Άνοδος (σε σχήμα κώνου) του αλμυρού υπόγειου νερού

Σε περιοχές όπου το αλμυρό νερό βρίσκεται κάτω από το γλυκό υπόγειο νερό, η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο, μπορεί να ανυψωθεί όταν η πιεζομετρική στάθμη μειώνεται, λόγω άντλησης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται άνοδος της διεπιφάνειας, σχήμα 3.4. Ειδικά σε περιοχές με σημαντική υπεράντληση π.χ. στην ημίξηρη ζώνη της Λωρίδας της Γάζας η άνοδος του αλμυρού νερού απειλεί το νερό για οικιακή χρήση. Λύσεις σε τέτοιες περιοχές είναι δύσκολο να ανεβρεθούν αφού το νερό είναι ελάχιστο και οι παράνομες αντλήσεις δύσκολο να εκλείψουν. Στην περίπτωση συνεχούς άντλησης γλυκού νερού, η διεπιφάνεια θα ανυψωθεί μέχρι να φτάσει το πηγάδι άντλησης. Από το σημείο αυτό η ποιότητα του αντλούμενου υπόγειου νερού υποβαθμίζεται και η άντληση θα πρέπει να σταματήσει. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού

ορίζεται ένα ασφαλές όριο πτώσης της πιεζομετρικής στάθμης. Μετά τη μείωση του ρυθμού άντλησης, η διεπιφάνεια μπορεί να κατέβει με πολύ αργό ρυθμό σε χαμηλότερη θέση. Μια άλλη λύση είναι να μετακινηθεί το πηγάδι άντλησης σε μια θέση όπου το αλμυρό υπόγειο νερό είναι σε μεγαλύτερο βάθος από το πηγάδι.



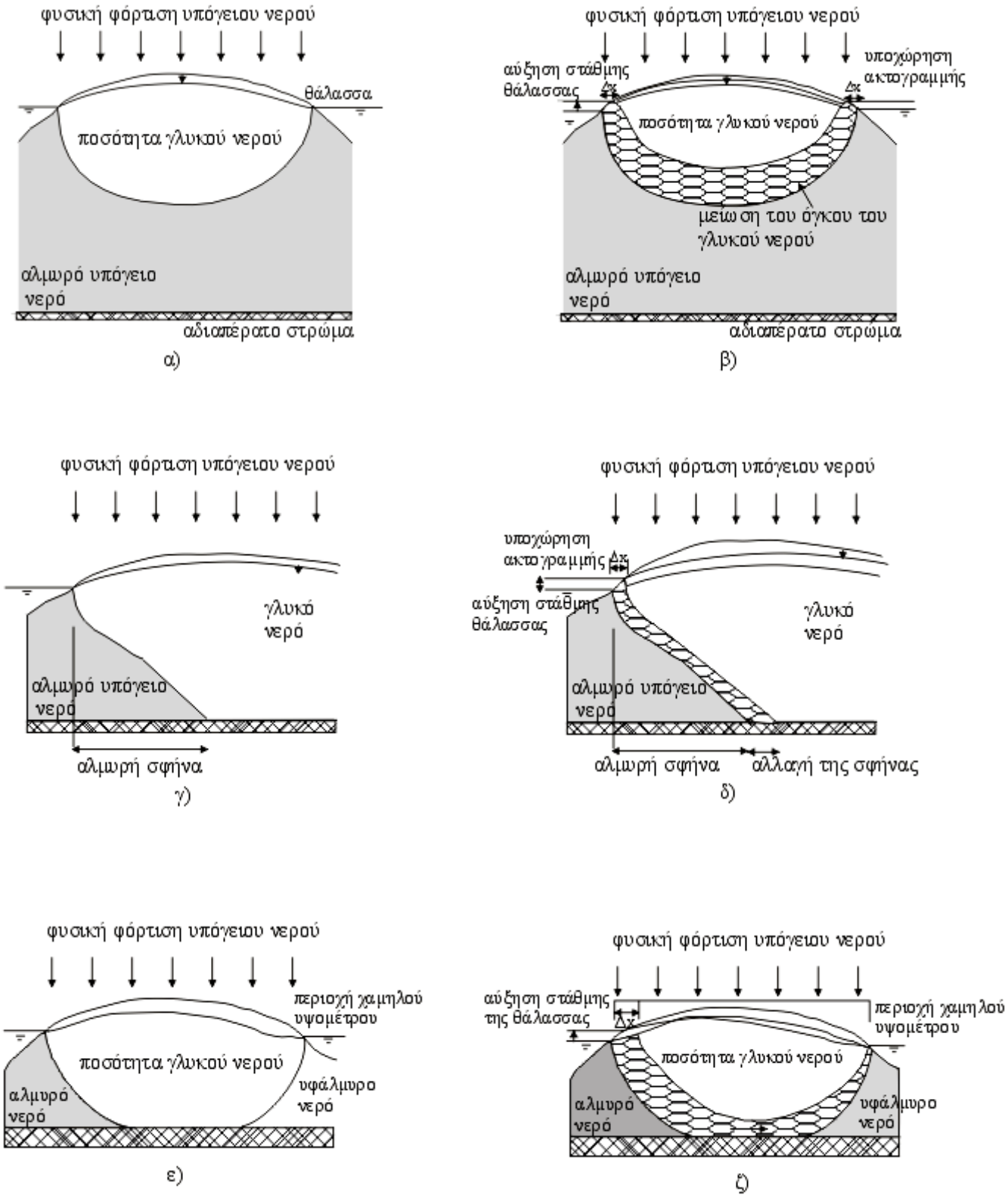

**Σχήμα 3.4. Άνοδος (σε σχήμα κώνου) του αλμυρού υπόγειου νερού:α) κάτω από πηγάδι άντλησης β) κάτω από μία περιοχή χαμηλού υψομέτρου.**

### 3.5.3 Επιδράσεις από μια σχετική αύξηση της στάθμης της θάλασσας

Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να προκαλέσει πλημμύρες, θυελλώδη κύματα και παράκτια διάβρωση. Η υποχώρηση της ακτογραμμής μπορεί να επηρεάσει τους παράκτιους υδροφορείς, σχήμα 3.5, π.χ με μείωση του πλάτους των αμμόλοφων κατά μήκος της ακτογραμμής όπου υπάρχει γλυκό υπόγειο νερό, και μειώνοντας το μήκος πάνω από το οποίο γίνεται η φυσική φόρτιση του υπόγειου νερού.

Ακόμη, θα αυξηθεί σημαντικά η διείσδυση θαλασσινού νερού στα ποτάμια και τις όχθες αν το επίπεδό τους είναι χαμηλότερο από αυτό της θάλασσας. Επίσης, η μικτή ζώνη μεταξύ γλυκού και αλμυρού υπόγειου νερού θα μετακινηθεί προς το εσωτερικό της περιοχής και πηγάδια άντλησης είναι πιθανό να αρχίσουν να αντλούν υφάλμυρο ή αλμυρό νερό. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μία από τις πιο σοβαρές επιπτώσεις, της ανύψωσης της μέσης στάθμης της θάλασσας, για κάθε παράκτιο υδροφορέα που το υπόγειο νερό υπερεκμεταλλεύεται.

Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας σχετίζεται άμεσα με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Έτσι, είναι πολύ πιθανό στο μέλλον, η σημαντική αύξηση της αλατότητας να μην οφείλεται στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας αλλά στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας πραγματοποιείται σταδιακά και μπορεί να χρειαστούν δεκάδες χρόνια. Από την άλλη πλευρά, οι ανθρώπινες δραστηριότητες όπως τα έργα άντλησης υπόγειου νερού, πραγματοποιούνται σε λίγα μόλις χρόνια [Oude Essink, 2001].




**Σχήμα 3.5. Επιπτώσεις από την αύξηση της στάθμης της θάλασσας στους παράκτιους υδροφορείς.**

## 3.6 ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

### 3.6.1 Εισαγωγή

Κατά τη διαδικασία της υφαλμύρινσης τεράστιοι όγκοι γλυκού νερού αντικαθίστανται από αλμυρό υπόγειο νερό. Γι' αυτό είναι σημαντικό να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για την όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιβράδυνση της διαδικασίας αυτής.

### 3.6.2 Λήψη μέτρων για τον έλεγχο της θαλάσσιας διείσδυσης

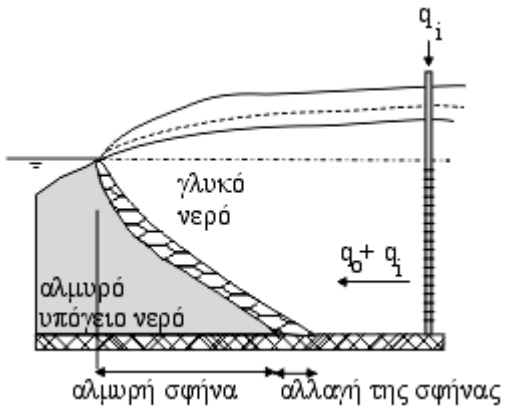
Για την παρακολούθηση και την καθυστέρηση του μετώπου υφαλμύρινσης είναι αναγκαία η λήψη δραστικών μέτρων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Έτσι, μπορεί να γίνει εισαγωγή γλυκού νερού μέσω πηγαδιού κοντά στην ακτογραμμή, σχήμα 3.6α, όπως έχει ήδη εφαρμοστεί στο Ισραήλ και στο Los Angeles. Ακόμη, γίνεται άντληση του αλμυρού και του υφάλμυρου υπόγειου νερού, σχήμα 3.6β, που όμως επιφέρει κινδύνους, όπως την ανεπιθύμητη μείωση της πιεζομετρικής στάθμης, ειδικά σε ρηχούς παράκτιους υδροφορείς. Επιπλέον, η διάθεση του αντλούμενου αλμυρού νερού συναντά αρκετά προβλήματα. Ένα άλλο μέτρο που μπορεί να εφαρμοστεί είναι η τροποποίηση του τρόπου άντλησης μέσω της μείωσης των αντλούμενων ποσοτήτων, σχήμα 3.6γ. Έτσι, η επιθυμητή άντληση γίνεται από ρηχά πηγάδια αποτρέποντας την υπερβολική άνοδο αλμυρού νερού. Επίσης, μπορεί να γίνει διαμόρφωση του εδάφους, σχήμα 3.6δ, δημιουργώντας ένα νέο έδαφος, όπου αναπτύσσεται ο υδροφορέας γλυκού νερού έτσι ώστε να καθυστερήσει την εισροή αλμυρού νερού. Ακόμη, η αύξηση τεχνητής φόρτισης, σχήμα 3.6ε, θα συντελέσει στην αύξηση της εισερχόμενης ροής στο γλυκό νερό και κατ' επέκταση στη μείωση του μήκους της αλμυρής σφήνας.

Τέλος, λύση μπορεί να αποτελέσει η δημιουργία φυσικών εμποδίων, όπως λεπτά στρώματα, αργιλική τάφρος και εισαγωγή χημικών, σχήμα 3.6ζ, που εφαρμόζεται μόνο σε ρηχούς υδροφορείς αλλά έχει υψηλό κόστος. Ένα μικρό φυσικό εμπόδιο με εισαγωγή τσιμέντου εφαρμόστηκε στο νησί Okinawa-Jima στην Ιαπωνία.

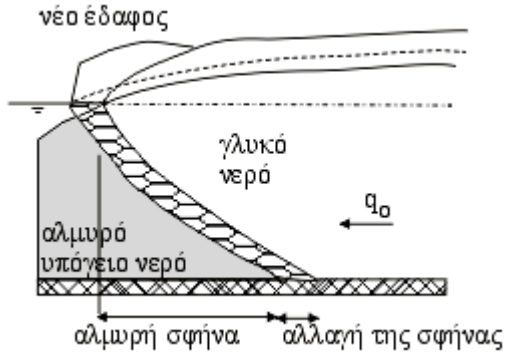
Εκτός όμως από τα τεχνικά μέτρα είναι σημαντική και η συνεργασία ανάμεσα στις δημόσιες αρχές και τους καταναλωτές. Με την κατάλληλη εκπαίδευση, την πληροφόρηση και τη συμμετοχή των καταναλωτών σε διάφορες αποφάσεις είναι δυνατό να μειωθεί η αλόγιστη κατανάλωση του νερού.

Ο έλεγχος της ποιότητας του υπόγειου νερού σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι σημαντικός ειδικά σε παράκτιες περιοχές όπου αναμένεται διείσδυση θαλασσινού νερού. Ένας από τους πιο

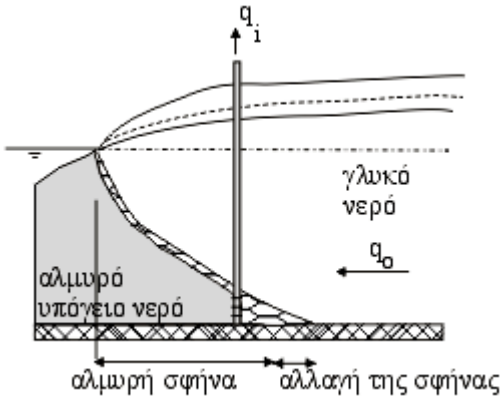
συνηθισμένους τρόπους είναι να αναλύονται δείγματα νερού και να μετράται η πιεζομετρική στάθμη.



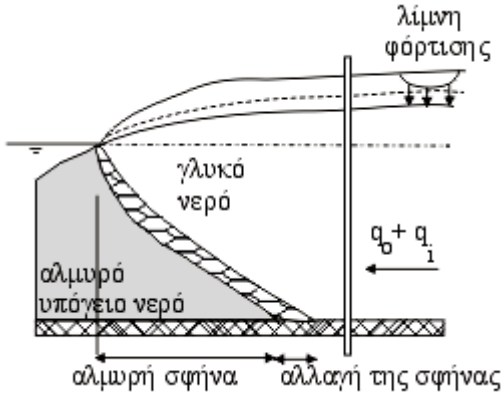

(α) Εισαγωγή γλυκού νερού μέσω πηγαδιού



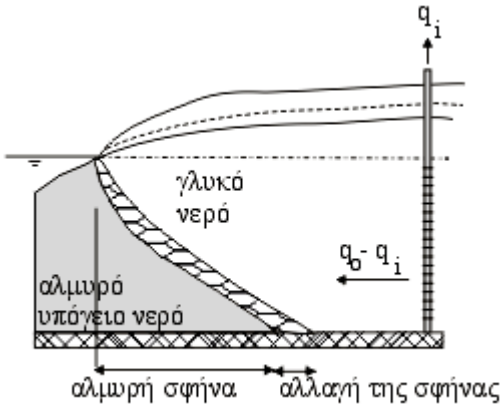

(δ) Διαμόρφωση γης (εγγειοβελτιωτικά έργα)



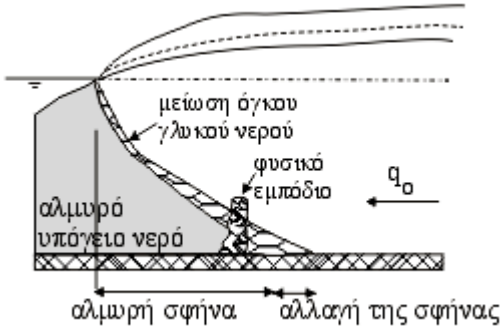

(β) Άντληση αλμυρού νερού




ε) Αύξηση τεχνητής φόρτισης




(γ) Μείωση του ρυθμού άντλησης




ζ) Δημιουργία φυσικών εμποδίων

**Σχήμα 3.6. Μέτρα για τον έλεγχο της υφαλμύρινσης.**

Ένας άλλος τρόπος παρακολούθησης της κίνησης του μετώπου υφαλμύρινσης είναι η εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου το οποίο θα μπορεί να προβλέψει τη μεταφορά των χλωριόντων στα υπόγεια νερά [Oude Essink, 2001].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC (Prinston Transport Code)

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και αρκετά χρόνια, έχει εξελιχθεί σημαντικά η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς ρυπαντών αποτελώντας έτσι, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία σχεδιασμού και ανάλυσης.

Ενώ στην αρχή, η μοντελοποίηση του υπόγειου νερού επικεντρώθηκε στην ποσοτική εκτίμησή του, πρόσφατες εφαρμογές επεκτάθηκαν στην ποιότητά του. Ένα μοντέλο υπόγειας ροής αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός μοντέλου μεταφοράς. Η ταχύτητα του υπόγειου νερού που είναι απαραίτητη στο μοντέλο μεταφοράς, προκύπτει από το μοντέλο ροής.

Αρχικά τα μοντέλα υπόγειας ροής βασίστηκαν στην προσέγγιση των βασικών εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που ήταν μαθηματικά πιο συνοπτική και πιο δύσκολη να κωδικοποιηθεί. Επίσης, είχε ένα σημαντικό πλεονέκτημα, το ότι μπορούσε να περιγράψει ακανόνιστους γεωμετρικά υδροφορείς με καλύτερη ακρίβεια. Αντίθετα με τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών που βασίζονταν σε ορθογωνικά πλέγματα, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μπορούσαν να προσαρμόσουν τριγωνικά πλέγματα και να αλλάξουν τη μορφή των ορθογωνικών πλεγμάτων. Σήμερα, χρησιμοποιούνται και τα δύο μοντέλα, των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών στην υδρολογία του υπόγειου νερού και των ρυπαντών του, για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του.

Η δημιουργία ενός μοντέλου είτε πεπερασμένων στοιχείων είτε πεπερασμένων διαφορών προϋποθέτει μια σειρά από βήματα που έχουν ως εξής:

1. Καθορισμός της ελάχιστης περιοχής που θα περιγραφεί από το μοντέλο
2. Προσδιορισμός των υδρολογικών χαρακτηριστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως όρια στο μοντέλο
3. Σύνταξη των γεωλογικών πληροφοριών
4. Σύνταξη των υδρολογικών πληροφοριών
5. Προσδιορισμός του αριθμού των φυσικών διαστάσεων που είναι αναγκαίες για το μοντέλο
6. Ορισμός του μεγέθους του μοντέλου
7. Ορισμός του μοντέλου διακριτοποίησης
8. Εισαγωγή των οριακών συνθηκών του μοντέλου

9. Εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου
10. Εισαγωγή των φορτίσεων του μοντέλου
11. Τρέξιμο του μοντέλου
12. Απόδοση των υπολογισμένων υδραυλικών υψών
13. Βαθμονόμηση του μοντέλου
14. Επανέλεγχος του μοντέλου [Pinder, 2001]

## 4.2 Η ΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η έκταση της περιοχής του μοντέλου πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Να περιλαμβάνει όλες τις τοποθεσίες που τα ύψη αναμένεται να μεταβληθούν σύμφωνα με τις τάσεις που επιβάλλονται στο μοντέλο. Για παράδειγμα, όταν αντλεί κανείς από ένα ή περισσότερα πηγάδια και δημιουργεί ένα κώνο υποπίεσης, το μοντέλο θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να περιλαμβάνει όλες τις περιοχές στις οποίες η αναμενόμενη πτώση στάθμης του νερού είναι σημαντική. Λέγοντας σημαντική, εννοούμε πτώση που είναι πιθανό να επηρεάσει τη συνολική κίνηση του υπόγειου νερού καθώς και τη μεταφορά στην περιοχή μελέτης. Τέτοιες αλλαγές στο επίπεδο του νερού προσδιορίζονται από τα εξαγόμενα του μοντέλου κι έτσι, μια τέτοια περιοχή μπορεί να οριστεί μόνο κατά προσέγγιση.
2. Να περιλαμβάνει την περιοχή ενδιαφέροντός μας έτσι ώστε, κάποιος που ενδιαφέρεται για την εξέλιξη της στάθμης του νερού ή την κατεύθυνση της ροής μιας περιοχής μεγαλύτερης από αυτή που αναμένεται αλλαγή στο επίπεδο του νερού, να μπορεί να έχει τις πληροφορίες αυτές.
3. Να καταλήγει σε ένα μοντέλο που να είναι σύμφωνο με τις διαθέσιμες υπολογιστικές δυνατότητες και το μέγεθός του να είναι αποδεκτό από τον υπολογιστή. Πολλές φορές, οι περιορισμοί που επιβάλλονται από τις δυνατότητες του διαθέσιμου υπολογιστή μπορεί να περιορίσουν το μέγεθος του μοντέλου. Το σύνολο των υπολογισμών που απαιτούνται για την προσομοίωση ενός προβλήματος ροής υπόγειου νερού αυξάνεται όπως το τετράγωνο του αριθμού των κόμβων στο μοντέλο. Ο αριθμός αυτός, με τη σειρά του, εξαρτάται άμεσα από το επίπεδο διακριτοποίησης και το μέγεθος της περιοχής του μοντέλου.
4. Να συμπίπτει όσο είναι δυνατό με μια περιοχή η οποία καθορίζεται από διακριτές και σαφείς υδρολογικές οριακές συνθήκες. Μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμες κατάλληλες υδρογεωλογικές οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, είναι αναγκαίο να

χρησιμοποιηθούν άλλοι τύποι οριακών συνθηκών όπως, τιμές υδραυλικού ύψους καθορισμένες κατά μήκος μιας συγκεκριμένης γραμμής που ορίζεται από τη στάθμη του νερού στα πηγάδια (συνθήκη Dirichlet) ή χάρτες υδραυλικών υψών ή η συνθήκη Robbins. Η βάση και η κορυφή του μοντέλου καθορίζονται από ένα σχετικά αδιαπέρατο γεωλογικό ορίζοντα [Pinder, 2001].

## 4.3 ΣΥΝΤΑΞΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Για τη σύνταξη των υδρολογικών στοιχείων είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι υδρογεωλογικές παράμετροι, οι οριακές συνθήκες και οι υδρολογικές φορτίσεις. Η βασική εξίσωση της υπόγειας ροής είναι η εξής:

$$\nabla \cdot q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} - Q \tag{4.1}$$

$$q = -K \cdot \nabla h \tag{4.2}$$

$$\nabla \cdot K \cdot \nabla h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q \tag{4.3}$$

όπου:

K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα

h είναι το υδραυλικό ύψος

$S_s$ είναι ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας

Q είναι ο όρος της καταβόθρας / πηγής.

Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να περιγραφεί με μορφή πίνακα ως εξής:

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Όταν τα τρία διαγώνια στοιχεία του πίνακα είναι όμοια, ο υδροφορέας ονομάζεται ισότροπος ενώ όταν κάποιο από αυτά είναι διαφορετικό από τα άλλα, ο υδροφορέας ονομάζεται ανισότροπος.

Επίσης, όταν όλα τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα είναι σταθερά με τη μεταβολή του χώρου, δηλαδή οι τιμές τους δε μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο στον υδροφορέα, ο υδροφορέας ονομάζεται ομοιογενής. Όταν οι τιμές μεταβάλλονται συναρτήσει του χώρου, ο υδροφορέας ονομάζεται ανομοιογενής.

Περιγράφοντας το νόμο του Darcy με τη μορφή πινάκων έχουμε:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

Η ροή στην κατεύθυνση x με βάση την παραπάνω εξίσωση μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$q_x = -(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}) + (K_{xy}\frac{\partial h}{\partial y}) + (K_{xz}\frac{\partial h}{\partial z}) \tag{4.6}$$

Έτσι, προκύπτει ότι η ροή στην κατεύθυνση x εξαρτάται από τα τρία στοιχεία του ανάδελτα του ύψους στην περίπτωση του ανισότροπου υδροφορέα. Η ανισότροπη μορφή της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιείται πιο συχνά σε ένα μοντέλο κάθετης διατομής, όπου συναντώνται διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί. Στην περίπτωση αυτή, η οριζόντια συνιστώσα της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι περίπου δεκαπλάσια της κάθετης.

### 4.3.1 Υδρογεωλογικές παράμετροι

Οι πιο σημαντικές παράμετροι ενός μοντέλου ροής υπόγειου νερού είναι:

1. Η υδραυλική αγωγιμότητα K.
2. Ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας $S_s$ (μέτρο της ελαστικότητας των πόρων του μέσου).
3. Το πάχος των στρωματογραφικών επιπέδων σ' ένα πραγματικό μοντέλο δύο διαστάσεων.

Οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να προσδιοριστούν για κάθε σημείο του υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Έτσι, θα πρέπει να οριστεί μία τιμή για κάθε κομβική θέση του μοντέλου. Στην περίπτωση διδιάστατων μοντέλων, η υδραυλική αγωγιμότητα και το πάχος του υδροφορέα αντικαθίστανται από τη μεταβιβασιμότητα, T:

$$T(x) = l(x)\, K(x), \qquad x \in \Omega \tag{4.7}$$

όπου:

Ω είναι ο σχηματισμός του υδροφορέα

$l(x)$ είναι το πάχος του υδροφορέα.

### 4.3.2 Οριακές συνθήκες

Σε όλα τα σημεία της περιμέτρου της περιοχής μελέτης πρέπει να καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες διακρίνονται σε τρεις τύπους που είναι: η συνθήκη Dirichlet

(σταθερού ύψους), η συνθήκη Neumann (σταθερής ροής) και η συνθήκη του Robbins (διαρροής). Μαθηματικά οι οριακές συνθήκες ορίζονται ως εξής:

$$h(x) = h_o(x), \qquad x \in \partial\Omega_1 \qquad \text{Dirichlet} \tag{4.8}$$

όπου:

$h_o$ είναι το καθορισμένο ύψος κατά μήκος του οριακού τμήματος $\partial\Omega_1$ της υπό μελέτη περιοχής $\Omega$.

$$\frac{\partial h(x)}{\partial n} = \left.\frac{\partial h(x)}{\partial n}\right|_o, \qquad x \in \partial\Omega_2 \qquad \text{Neumann} \tag{4.9}$$

όπου:

$\left.\frac{\partial h(x)}{\partial n}\right|_o$ είναι το σταθερό εξωτερικό κανονικό διαφορικό του οριακού τμήματος $\partial\Omega_2$.

$$\alpha h(x) + \beta \frac{\partial h(x)}{\partial n} = C_o, \qquad x \in \partial\Omega_3 \qquad \text{Robbins} \tag{4.10}$$

όπου:

$C_o$ είναι μια σταθερή τιμή της συνάρτησης κατά μήκος του οριακού τμήματος $\partial\Omega_3$

α και β είναι σταθερές συναρτήσεις.

Αφού πρέπει να οριστεί ολόκληρη η περίμετρος της περιοχής μελέτης από μια οριακή συνθήκη, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\partial\Omega = \partial\Omega_1 + \partial\Omega_2 + \partial\Omega_3 \tag{4.11}$$

Η εξίσωση της συνθήκης Dirichlet χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ύψους κατά μήκος του ορίου της περιοχής μελέτης και μπορεί να περιγραφεί ως συνάρτηση του χρόνου αν η συμπεριφορά της ως προς το χρόνο είναι γνωστή (π.χ. η παλιρροιακή συμπεριφορά της επιφάνειας του νερού σε μία εκβολή).

Η εξίσωση του Neumann σε συνδυασμό με την υδραυλική αγωγιμότητα ή στην περίπτωση διδιάστατου μοντέλου με τη μεταβιβασιμότητα, περιγράφει τη ροή.

Έτσι,

$$q_n(x) = -K \frac{\partial h(x)}{\partial n} \tag{4.12}$$

όπου:

$q_n$ είναι η σταθερή ροή κάθετα του ορίου $\partial\Omega_2$.

Ο τρίτος τύπος οριακής συνθήκης (Robbins) που ορίζεται στην παραπάνω εξίσωση, περιγράφει τη συνθήκη διαρροής που χρησιμοποιείται σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Η συνθήκη αυτή μπορεί επίσης, να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει ένα φυσικό όριο σε μια αρκετά μεγάλη απόσταση από ένα όριο του μοντέλου, στην περίπτωση διδιάστατου ή τρισδιάστατου μοντέλου. Ο τύπος που χρησιμοποιείται και για τις δύο αυτές καταστάσεις είναι:

$$K \cdot \frac{\partial h(x)}{\partial n} = \kappa\,[h_o(x) - h(x)] \tag{4.13}$$

όπου:

$h_o$ είναι το ύψος εξωτερικά του μοντέλου και η διαφορά ύψους λαμβάνεται στην κατεύθυνση n.

Για παράδειγμα στην περίπτωση μιας διαρροής, το $h_o$ μπορεί να είναι το ύψος του νερού μιας λίμνης που βρίσκεται πάνω από την κορυφή του μοντέλου. Σ' αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής κ έχει την έννοια της αντίστασης στη ροή κάθετα του ορίου που χωρίζει το υδάτινο σώμα απ' τον υδροφορέα. Επίσης, το $h_o$ θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ύψος στον υδροφορέα σε κάποια απόσταση από το όριο. Ο συντελεστής κ είναι:

$$\kappa = \frac{K}{L} \tag{4.14}$$

όπου:

L είναι η απόσταση από το όριο του μοντέλου στο πραγματικό όριο που παρατηρείται το υδραυλικό ύψος $h_o$.

### 4.3.3 Φορτίσεις του μοντέλου

Οι φορτίσεις σε ένα μοντέλο ροής του υπόγειου νερού γενικά, περιλαμβάνουν τη διήθηση λόγω βροχόπτωσης και την άντληση. Η εξίσωση ροής 4.3 μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να αποδώσει τις δύο αυτές διαφορετικές συνθήκες φόρτισης ως εξής:

$$Q = I + \delta(x - x_i)W \tag{4.15}$$

όπου:

I είναι η πραγματική διήθηση λόγω βροχόπτωσης ή από άλλες πηγές, όπως η διαρροή υπονόμων

W είναι η άντληση ή ο εμπλουτισμός μέσω πηγαδιού τοποθετημένου στη θέση $x_i$

$\delta(x - x_i)$ είναι η συνάρτηση Dirac δέλτα, που χρησιμοποιείται στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό της άντλησης $W_i$ στο σημείο $x_i$.

Η πραγματική διήθηση γενικά, προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο τύπων της φυσικής του εδάφους. Η εφαρμογή των τύπων αυτών απαιτεί τη γνώση διαφόρων παραμέτρων όπως, την

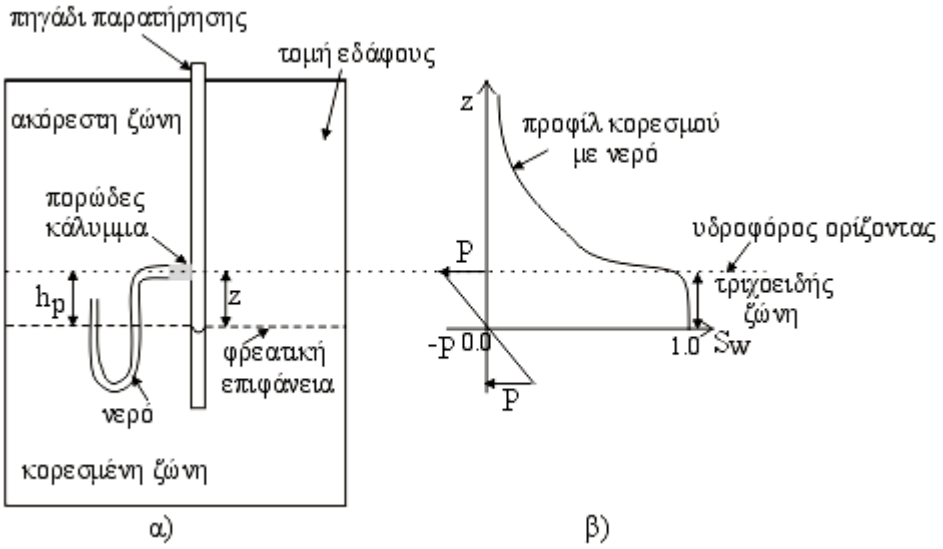
ταχύτητα του ανέμου, την ανάπτυξη των φυτών, τη θερμοκρασία του αέρα, τις βροχοπτώσεις και τα χαρακτηριστικά του εδάφους [Pinder, 2001].

## 4.4 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

### 4.4.1 Η επιφανειακή ζώνη του υδροφορέα

Ο υδροφόρος ορίζοντας περιγράφεται είτε ως μία έντονη διεπιφάνεια είτε ως μία ζώνη μεταβλητού κορεσμού, στην οποία συνυπάρχουν ο αέρας και το νερό.

Η έννοια του υδροφόρου ορίζοντα είναι κάπως διφορούμενη. Στο παρακάτω σχήμα 4.1α φαίνεται μία κάθετη τομή τμήματος εδάφους. Ο υδροφόρος ορίζοντας διαιρεί την τομή αυτή σε δύο τμήματα. Κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα βρίσκεται η κορεσμένη ζώνη στην οποία όλοι οι πόροι είναι κορεσμένοι με νερό. Πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα είναι η ακόρεστη ζώνη, στην οποία συνυπάρχουν ο αέρας και το νερό. Ανάμεσα στον υδροφόρο ορίζοντα και τη φρεατική επιφάνεια (επιφάνεια με μηδενική υδροστατική πίεση) υπάρχει η ζώνη τριχοειδών φαινομένων. Στη ζώνη αυτή οι πόροι είναι γεμάτοι με νερό που παραμένει εκεί λόγω των τριχοειδών δυνάμεων.




**Σχήμα 4.1. Ορισμός των συστατικών του περιβάλλοντος ενός ρηχού υδροφορέα.**

Στο σχήμα 4.1β, στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται ο κορεσμός σε νερό των εδαφικών πόρων, όπου για κορεσμό $S_w = 1$, όλοι οι πόροι είναι κορεσμένοι σε νερό και ο αέρας που υπάρχει, είναι μόνο σε διαλυτή μορφή. Ο κάθετος άξονας, που η αρχή του είναι στο επίπεδο της φρεατικής επιφάνειας, απεικονίζει το υψόμετρο.

Έτσι, η μεταβολή του κορεσμού των πόρων σε νερό σε σχέση με το υψόμετρο δίνει το προφίλ του κορεσμού των πόρων σε νερό. Ο κορεσμός ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του νερού προς τον όγκο των κενών πόρων σε ένα αναφερόμενο όγκο εδάφους. Στη φρεατική επιφάνεια, που ο κορεσμός είναι 1, όλα τα κενά των πόρων είναι γεμάτα με νερό. Στην τριχοειδή ζώνη, ο κορεσμός είναι σταθερός και ίσος με 1. Από εκεί και πέρα όσο αυξάνεται το υψόμετρο, μειώνεται ο βαθμός κορεσμού ασυμπτωτικά μέχρι να σταθεροποιηθεί σε μια ελάχιστη τιμή (irreducible saturation). Τιμές κορεσμού κάτω από αυτή την τιμή (irreducible), μπορούν να επιτευχθούν μόνο με εξάτμιση του νερού.

Το νερό που βρίσκεται πάνω από τη φρεατική επιφάνεια, λόγω του ότι παραμένει στους πόρους εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων, έχει μια τάση. Η υδροστατική πίεση του νερού στην τριχοειδή ζώνη είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής και αν λάβουμε ως μηδενική την ατμοσφαιρική πίεση, τότε στην τριχοειδή ζώνη η πίεση είναι αρνητική. Σε ένα στατικό σύστημα, η υδροστατική πίεση μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο πάνω από τη φρεατική επιφάνεια. Κάτω από τη φρεατική επιφάνεια, η υδροστατική πίεση είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και γι' αυτό θεωρείται θετική. Υπό σταθερές συνθήκες, η υδροστατική πίεση κάτω από τη φρεατική επιφάνεια αυξάνεται γραμμικά με το βάθος. Πιο αναλυτικά, το υδραυλικό ύψος εκφράζεται συναρτήσει της πίεσης ως εξής:

$$h(x,t) = \frac{P(x,t)}{\rho g} + z \tag{4.16}$$

όπου:

h είναι το υδραυλικό ύψος

P είναι η πίεση του νερού

ρ είναι η πυκνότητα του νερού

g είναι η σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας

z είναι το υψόμετρο.

Όταν το υδραυλικό ύψος h είναι σταθερό, τότε για κάθε αύξηση του υψομέτρου z μειώνεται ανάλογα ο όρος $\frac{P(x,t)}{\rho g}$. Το z ονομάζεται ύψος λόγω θέσης και συμβολίζεται με $h_e$ ενώ ο όρος $\frac{P(x,t)}{\rho g}$ ονομάζεται ύψος πίεσης (pressure head) και συμβολίζεται με $h_p$. Θεωρώντας ότι το ύψος λόγω θέσης z είναι μηδέν στην φρεατική επιφάνεια, το ύψος πίεσης μειώνεται γραμμικά πάνω από την επιφάνεια αυτή και αυξάνεται γραμμικά κάτω από αυτή.

Το πορώδες κάλυμμα σχεδιάζεται ειδικά για να μετράει αρνητική υδροστατική πίεση. Το μέγεθος των πόρων αυτού του καλύμματος και τα υλικά από τα οποία κατασκευάζεται είναι τέτοια ώστε, το νερό να έρχεται σε επαφή με τον αέρα μέσα από αυτό. Αν ο σωλήνας που συνδέεται με το κάλυμμα αρχικά είναι γεμάτος με νερό, η στάθμη του νερού θα μειωθεί στην ανοιχτή πλευρά του σωλήνα μέχρι η διαφορά υψομέτρου μεταξύ της στάθμης του νερού στην ανοιχτή πλευρά του σωλήνα και στην πλευρά του καλύμματος γίνει ίση με το αρνητικό ύψος λόγω πίεσης που υπάρχει στην πλευρά του καλύμματος. Το αρνητικό ύψος λόγω πίεσης, θα πρέπει να είναι ίσο με το θετικό ύψος λόγω θέσης σ' εκείνο το σημείο αφού στο επίπεδο αναφοράς (φρεατική επιφάνεια) το υψόμετρο και η πίεση είναι μηδέν. Έτσι, στο σχήμα 4.1 φαίνεται ότι η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού στη συσκευή μέτρησης της πίεσης και το ύψος του πορώδους καλύμματος πάνω από τη φρεατική επιφάνεια αναφοράς είναι το ίδιο.

### 4.4.2 Ο υδροφόρος ορίζοντας μεταβλητού κορεσμού

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του νερού στη ζώνη μεταβλητού κορεσμού (ονομάζεται και ακόρεστη ζώνη), είναι όμοιες με εκείνες που περιγράφουν τη ροή στην κορεσμένη ζώνη. Η εξίσωση διατήρησης του όγκου, που είναι ανάλογη με την εξίσωση 4.1 έχει ως εξής:

$$\nabla \cdot q = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \varepsilon(1 - S_r)\frac{dS_w}{dh}\frac{\partial h}{\partial t} - Q \qquad (4.17)$$

όπου:

$\frac{dS_w}{dh}$ είναι η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού

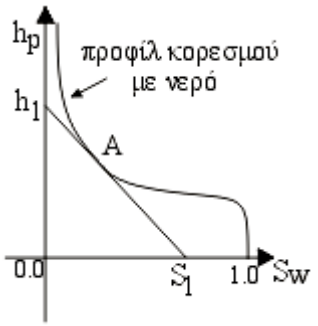
$(1 - S_r)$ είναι ένας όρος που λαμβάνεται υπόψη όταν έδαφος με κορεσμό μεγαλύτερο του υπολειμματικού κορεσμού $S_r$ είναι ευκίνητο και μπορεί να αποστραγγιστεί.

Η πίεση κατά μήκος της τεταγμένης, σχήμα 4.2, αυξάνεται αρνητικά. Η κλίση της καμπύλης στο σημείο Α είναι $\frac{h_1 - 0}{S_1 - 0}$ ή $\frac{\Delta h_p}{\Delta S_w}$. Το αντίστροφο του λόγου αυτού δίνει τον επιθυμητό συντελεστή, αφού το ολικό ύψος θα αλλάξει σαν συνάρτηση του ύψους λόγω πίεσης, δεδομένου ότι το υψόμετρο z δεν είναι συναρτήσει του χρόνου.

Η φυσική ερμηνεία του συντελεστή $\frac{dS_w}{dh}$ φαίνεται στη σχέση $\frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{dS_w}{dh}\frac{\partial h}{\partial t}$. Ο πρόσθετος όρος στην εξίσωση 4.17 είναι ο ρυθμός μεταβολής του όγκου του νερού στον όγκο του εδάφους εξαιτίας της αποστράγγισης. Η κλίση της ευθείας που παριστάνει τον όρο $\frac{dS_w}{dh}$ θα αλλάξει αν

μεταβληθεί η τιμή του ύψους λόγω πίεσης. Έτσι, ο συντελεστής $\frac{dS_w}{dh}$ είναι συνάρτηση του υδραυλικού ύψους ενώ ο όρος $\frac{dS_w}{dh}\frac{\partial h}{\partial t}$ είναι μη γραμμικός. Όσο προσεγγίζεται ο πλήρης κορεσμός η κλίση της καμπύλης κορεσμού λόγω πίεσης τείνει στο άπειρο ($\frac{dS_w}{dh}$ τείνει στο μηδέν).

Ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας $S_s$ είναι η κυριότερη φυσική παράμετρος παροχής αποθηκευμένου νερού.




**Σχήμα 4.2. Καμπύλη πίεσης – κορεσμού για πορώδες μέσο μεταβλητού κορεσμού.**

Η ροή q, σύμφωνα με το νόμο Darcy, που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.17 δίνεται σε τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης 4.2 ως εξής:

$$q = - K_r(h) \cdot \nabla h \qquad (4.18)$$

όπου:

$K_r$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβλητού κορεσμού και είναι συναρτήσει του υδραυλικού ύψους.

Στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η καμπύλη σχετικής διαπερατότητας. Στον άξονα x είναι ο βαθμός κορεσμού και στον άξονα y είναι η σχετική διαπερατότητα $K_r$, που κυμαίνεται από 0 έως 1.

Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται με την υδραυλική αγωγιμότητα μέσω της σχέσης:

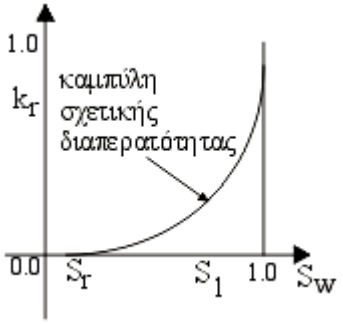
$$K_r(h) = Kk_r(h) \qquad (4.19)$$

όπου:

K είναι η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Ο ρόλος της σχετικής διαπερατότητας είναι συνεπώς, να διαβαθμίσει την υδραυλική αγωγιμότητα ώστε να εμπεριέχει τα κενά των πόρων που καταλαμβάνονται από αέρα.

Ο αέρας έχει την τάση να εμποδίζει τη ροή του νερού. Η καμπύλη σχετικής διαπερατότητας εκμηδενίζεται για βαθμό κορεσμού $S_r$. Η παράμετρος $S_r$ είναι η τιμή υπολειμματικού κορεσμού, σύμφωνα με την οποία το νερό δεν επικοινωνεί μεταξύ των διάφορων πόρων. Κάτω από αυτές τις συνθήκες κορεσμού, η υδατική φάση παραμένει ακίνητη.




**Σχήμα 4.3. Καμπύλη σχετικής διαπερατότητας. Η παράμετρος $k_r$ είναι η σχετική διαπερατότητα και $S_r$ είναι ο βαθμός υπολειμματικού κορεσμού.**

Από το συνδυασμό των εξισώσεων 4.17 και 4.18 προκύπτει η παρακάτω εξίσωση 4.20 που περιγράφει τη ροή του νερού τόσο σε κορεσμένη όσο και σε μερικώς κορεσμένη ζώνη ενός υδροφορέα [Pinder, 2001]:

$$\nabla \cdot K_r(h) \cdot \nabla h = \left[ S_s + \varepsilon(1 - S_r)\frac{dS}{dh} \right] \frac{\partial h}{\partial t} + Q \qquad (4.20)$$

## 4.5 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 4.5.1 Προσεγγίσεις πεπερασμένων διαφορών

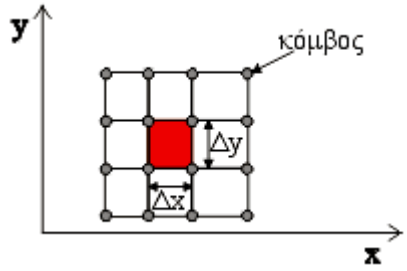
Κατά τη μετάβαση από ένα μοντέλο βασισμένο σε μερικές διαφορικές εξισώσεις σ' ένα μοντέλο βασισμένο σε διακριτές εξισώσεις, παράγεται ένα αριθμητικό σφάλμα.

Στην περίπτωση του μοντέλου πεπερασμένων διαφορών, το σφάλμα εξακριβώνεται με την προσέγγιση σειρών Taylor σε μια παράγωγο. Για παράδειγμα όταν f = f(x):

$$f(x_o + \Delta x) = f(x_o) + \left.\frac{df}{dx}\right|_{x_o} \cdot \Delta x + \frac{1}{2!}\left.\frac{d^2 f}{dx^2}\right|_{x_o} \cdot (\Delta x)^2 + \ldots.. \qquad (4.21)$$

όπου:

Δx είναι μια απειροστή αύξηση στην ανεξάρτητη μεταβλητή x (π.χ. η διδιάστατη διακριτοποίηση στο σχήμα 4.4).




**Σχήμα 4.4. Διδιάστατη διακριτοποίηση.**

Από την εξίσωση 4.21 είναι φανερό ότι η πρώτη παράγωγος του x στο $x_o$ είναι:

$$\left.\frac{df}{dx}\right|_{x_o} = \frac{f(x_o + \Delta x) - f(x_o)}{\Delta x} - \frac{1}{2!}\left.\frac{d^2 f}{dx^2}\right|_{x_o} \cdot (\Delta x) - O\,(\Delta x)^2 \qquad (4.22)$$

Έτσι, η παράγωγος $\frac{df}{dx}$ που υπολογίζεται στη θέση $x_o$ μπορεί να προσεγγιστεί από τον όρο $\frac{f(x_o + \Delta x) - f(x_o)}{\Delta x}$ με ένα σφάλμα του οποίου ο πρώτος όρος είναι $\left.\frac{d^2 f}{dx^2}\right|_{x_o} \cdot (\Delta x)$. Συνεπώς, όσο πιο μεγάλη είναι η δεύτερη παράγωγος της f ή όσο πιο μεγάλο είναι το Δx τόσο μεγαλύτερο είναι και το σφάλμα στην προσέγγιση του $\left.\frac{df}{dx}\right|_{x_o}$, που αποδίδεται στον πρώτο παραλειπόμενο όρο στην προσέγγιση των σειρών Taylor. Όταν λοιπόν, το $\left.\frac{d^2 f}{dx^2}\right|_{x_o}$ είναι μεγάλο, πρέπει η τιμή του Δx να είναι πολύ μικρή ώστε το λάθος στην προσέγγιση της παραγώγου να είναι μικρό. Παρόμοια προσέγγιση μπορεί να γίνει και για τη δεύτερη παράγωγο που εμφανίζεται στην εξίσωση ροής όπου εδώ το σφάλμα είναι ανάλογο του $(\Delta x)^2$. Η ακρίβεια άρα, της αριθμητικής προσέγγισης εξαρτάται τόσο από το μέγεθος των απειροστών αυξήσεων κατά τη διακριτοποίηση όσο και από τη συμπεριφορά της συνάρτησης, στην περίπτωση αυτή της f(x), και των παραγώγων της.

Όταν κατά την κίνηση του υπόγειου νερού παρατηρείται κλίση που μεταβάλλεται γρήγορα, οι χωρικές απειροστές αυξήσεις πρέπει να είναι πάρα πολύ μικρές. Τέτοιες συνθήκες εμφανίζονται γύρω από πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού, σε περιοχές με σημαντικές φορτίσεις και σε περιοχές όπου η υδραυλική αγωγιμότητα αλλάζει απότομα.

### 4.5.2 Προσεγγίσεις πεπερασμένων στοιχείων

Στην προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων, ο τύπος είναι πολύ διαφορετικός αλλά η βασική ιδέα παραμένει ίδια. Στην περίπτωση αυτή, η άγνωστη συνάρτηση h(x), προσεγγίζεται σε μία διάσταση του χώρου χρησιμοποιώντας πεπερασμένες σειρές:

$$h(x) \cong \hat{h}(x) = \sum_{i=1}^{I} h_i \varphi(x)_i \qquad (4.23)$$

όπου:

$h_i$ με i = 1,2,…..I είναι σταθερές και ουσιαστικά είναι οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων.

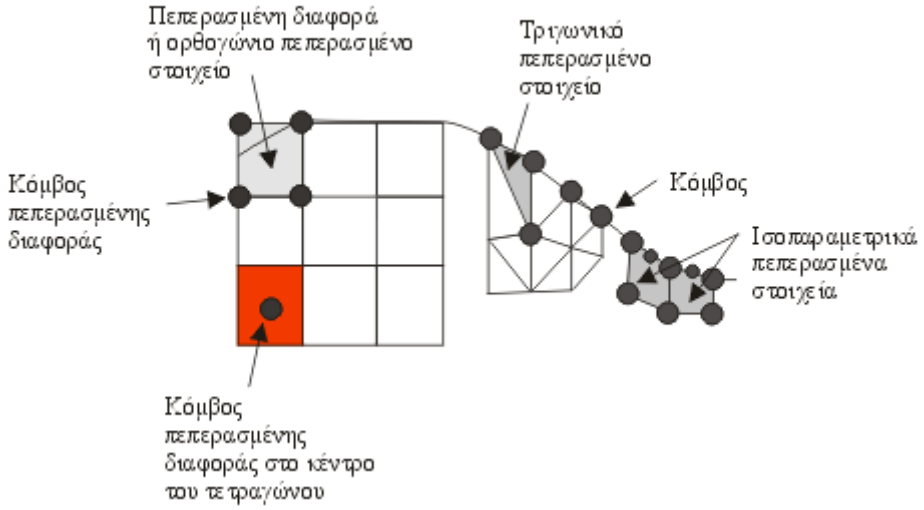
Οι συναρτήσεις βάσης $\varphi(x)_i$ επιλέγονται να είναι πολυωνυμικές μικρότερες του τετάρτου βαθμού. Όσο μικρότερος είναι ο βαθμός της συνάρτησης τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα αποκοπής κατά την προσέγγιση. Όταν χρησιμοποιούνται γραμμικές εξισώσεις βάσης (εξισώσεις 4.55, 4.56 και σχήμα 4.9), το σφάλμα αποκοπής είναι γενικά της ίδιας τάξης με αυτό που συναντάται στην περίπτωση των πεπερασμένων διαφορών. Όπως και στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, όταν η άγνωστη συνάρτηση, στην περίπτωση αυτή το υδραυλικό ύψος, μεταβάλλεται γρήγορα, είναι απαραίτητη η πολύ μικρή διακριτοποίηση.

### 4.5.3 Προσεγγίσεις σε δύο διαστάσεις του χώρου

Όταν στο ίδιο πλέγμα χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είτε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρητικά, έχουν την ίδια ακρίβεια για την εξίσωση ροής του υπόγειου νερού. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται μόνο για ορθογώνια πλέγματα ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για τρίγωνα πλέγματα ή ορθογώνια με τροποποιημένη μορφή έχοντας καμπύλες πλευρές (ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία).

Η σημασία των μη ορθογωνικών στοιχείων έγκειται στην ικανότητά τους να απεικονίζουν ακανόνιστα όρια, ακανόνιστες περιοχές διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας ή πυκνότερα πλέγματα στοιχείων στην περιοχή υψηλών φορτίσεων όπως, γύρω από πηγάδια.

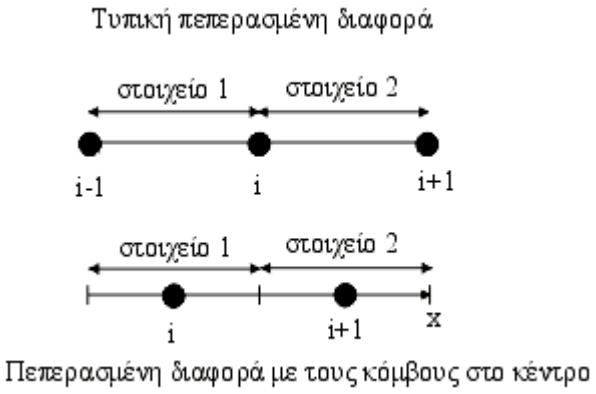
Στο σχήμα 4.5 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών, των πεπερασμένων στοιχείων και των ισοπαραμετρικών πεπερασμένων στοιχείων για την απεικόνιση ενός ακανόνιστου ορίου. Η καλύτερη απεικόνιση του καμπυλωτού ορίου πραγματοποιείται από τα πεπερασμένα στοιχεία.




**Σχήμα 4.5. Απεικόνιση ενός ακανόνιστου ορίου με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων, στο κέντρο του στοιχείου και ισοπαραμετρικών πεπερασμένων στοιχείων.**

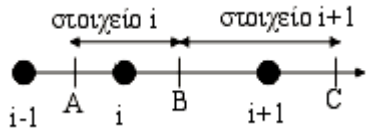
Ακόμη, στο σχήμα 4.5 απεικονίζονται δύο τύποι πεπερασμένων διαφορών. Στον ένα οι κόμβοι είναι στις γωνίες του στοιχείου και στον άλλο στο κέντρο. Ο κόμβος είναι το σημείο στο οποίο υπολογίζεται η παράγωγος των πεπερασμένων διαφορών.

Θεωρούμε το παράδειγμα, σε μία διάσταση, του σχήματος 4.6. Η προσέγγιση των δεύτερων παραγώγων όπως αυτές στις εξισώσεις ροής, θα είναι η ίδια τόσο για τυπικό πλέγμα όσο και για πλέγμα με τους κόμβους στο κέντρο των στοιχείων.




**Σχήμα 4.6. Μονοδιάστατη διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών.**

Όταν οι κόμβοι στο κέντρο των στοιχείων ενός πλέγματος που χρησιμοποιείται, έχουν μεταβλητή απόσταση μεταξύ τους, $\Delta x_i \neq \Delta x_{i+1}$, τότε υπάρχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην προσέγγιση με τον τρόπο αυτό, σχήμα 4.7.




**Σχήμα 4.7. Μονοδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών με διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στους κόμβους.**

Σύμφωνα με το σχήμα 4.7, το στοιχείο του κόμβου i έχει τον κόμβο στο κέντρο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί κανείς να θεωρήσει τη διδιάστατη μορφή του πλέγματος με τους κόμβους στα κέντρα των στοιχείων, σαν ορθογώνια με τους κόμβους στα κέντρα. Έτσι, μπορεί να εφαρμοστεί ένα ισοζύγιο μάζας στις άκρες των ορθογωνίων. Σύμφωνα με αυτό, η μάζα που εξέρχεται από όλες τις πλευρές πρέπει να ισούται με τη μάζα που χάνεται εξαιτίας της αποθηκευτικότητας και τη μάζα που παρέχεται από τις πηγές.

Οι ροές στις πλευρές του ορθογωνίου περιγράφονται από το νόμο του Darcy κι έτσι, προσεγγίζοντας τις ροές με το νόμο του Darcy, δημιουργούμε την εξίσωση ισοζυγίου μάζας για τη ροή του υπόγειου νερού.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι κόμβοι τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις, στις γωνίες των στοιχείων. Ακόμη, υπάρχει και μια άλλη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, που ονομάζεται μέθοδος πεπερασμένων όγκων και μοιάζει αρκετά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών όπου οι κόμβοι είναι στο κέντρο των στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και οι άλλες τεχνικές για μη ορθογωνικό πλέγμα, παρέχουν αυξημένη ευελιξία στη χρήση των στοιχείων αλλά απαιτούν μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων όταν είναι ίδιος ο αριθμός των κόμβων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι, οι πίνακες που παράγονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δεν έχουν τόσο καλή δομή όσο οι πίνακες που παράγονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Έτσι, πολλοί επιλύτες αλγεβρικών εξισώσεων που μπορούν να εφαρμοστούν σε πίνακες πεπερασμένων διαφορών δεν είναι αποτελεσματικοί για πίνακες πεπερασμένων στοιχείων [Pinder, 2001].

## 4.6 Η ΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PTC

Το Princeton Transport Code (PTC) χρησιμοποιεί ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να ερμηνεύσει την υπόγεια ροή, που περιγράφεται:

- από το υδραυλικό ύψος h:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-S\frac{\partial h}{\partial t}+Q=0 \tag{4.24}$$

- τις συνιστώσες της ταχύτητας του υπόγειου νερού:

$$V_x=-K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x} \tag{4.25}$$

$$V_y=-K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y} \tag{4.26}$$

$$V_z=-K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z} \tag{4.27}$$

- τη μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση c:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}\right)+$$
$$\frac{\partial}{\partial z}\left(D_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}\right)-\left(V_x\frac{\partial c}{\partial x}+V_y\frac{\partial c}{\partial y}+V_z\frac{\partial c}{\partial z}\right)+Q(c^w-c)-\theta\left[1+E(c)\right]\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)=0 \tag{4.28}$$

όπου:

$K_{xx}$, $K_{yy}$, $K_{zz}$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατεύθυνση x, y, z αντίστοιχα ($LT^{-1}$)

h είναι το υδραυλικό ύψος (L)

S είναι ο ειδικός συντελεστής αποθηκευτικότητας ($L^{-1}$)

Q είναι η ισχύς άντλησης (πηγάδι / πηγή) (1/T) $Q \equiv Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)$

$Q_i$ είναι ο όρος της εκροής / κατείσδυσης στην περιοχή i ($L^3T^{-1}$) στο σημείο ($x_i$,$y_i$,$z_i$)

$V_x$, $V_y$, $V_z$ είναι η ταχύτητα της ροής κατά τη διεύθυνση x, y, z αντίστοιχα ($LT^{-1}$)

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

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

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

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

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

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

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

$\alpha_L$ είναι η διαμήκης διασπορά (L)

$\alpha_T$ είναι η κατά πλάτος διασπορά (L)

$\alpha_V$ είναι η κατακόρυφη εγκάρσια διασπορά (L)

V είναι το μέγεθος του διανύσματος της ταχύτητας (L/T) ($V \equiv \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ )

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

θ είναι το πορώδες του υδροφορέα

E(c) είναι ο όρος που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης

$c^w$ είναι η συγκέντρωση του αντλούμενου νερού στο σημείο ($x_i$,$y_i$,$z_i$)

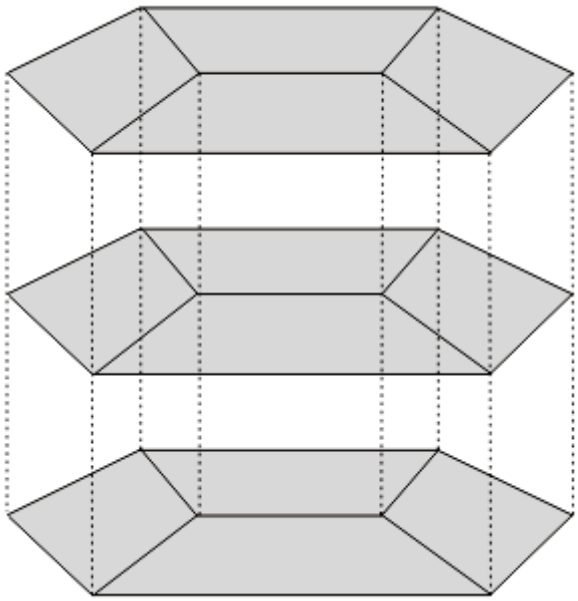
δ είναι η Dirac δέλτα συνάρτηση.

Οι παραπάνω εξισώσεις βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και στο νόμο του Darcy. Αρχικά επιλύεται η πρώτη εξίσωση που περιγράφει το υδραυλικό ύψος h, μετά οι ταχύτητες του Darcy $V_x$, $V_y$, $V_z$ από τη δεύτερη εξίσωση και τέλος, επιλύεται η τρίτη εξίσωση για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης c του ρύπου.

Η επίλυση του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων σε πολύπλοκα φυσικά συστήματα, απαιτεί αφ' ενός την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων και αφ' ετέρου ένα πλήθος υπολογισμών. Το PTC χρησιμοποιώντας ένα μοναδικό αλγόριθμο (splitting algorithm) για την επίλυση των εξισώσεων, μειώνει σημαντικά το πλήθος των υπολογισμών.

Με τον αλγόριθμο αυτό πετυχαίνεται η διακριτοποίηση της περιοχής σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο γίνεται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέποντας την ακριβή περιγραφή περιοχών με ακανόνιστο σχήμα.

Τα επίπεδα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Ο συνδυασμός αυτός, των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών, δίνει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί η διαδικασία splitting. Κατά τη διάρκεια μιας χρονικής επανάληψης, όλοι οι υπολογισμοί διακρίνονται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται, ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Στο δεύτερο στάδιο, επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα επίπεδα [Babu et.al, 1997].



**Σχήμα 4.8. Διάγραμμα οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο δημιουργώντας τρισδιάστατη διακριτοποίηση [Babu et.al, 1997].**

## 4.7 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Πριν την εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων, των οριακών συνθηκών και των φορτίσεων για την εφαρμογή του μοντέλου, είναι απαραίτητο να αποφασιστεί η αριθμητική διαδικασία που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί και τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η εξίσωση της ροής όπως έχει προαναφερθεί είναι η εξής:

$$\nabla \cdot K \cdot \nabla h = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + Q \qquad (4.29)$$

Η εξίσωση αυτή είναι δευτέρας τάξεως στο χώρο και πρώτης τάξεως στο χρόνο. Έτσι, είναι απαραίτητη η προσέγγιση των παραγώγων πρώτης και δευτέρας τάξεως. Επιπλέον, αν η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται στο χώρο K = K(x), οι συνθήκες γίνονται πιο πολύπλοκες.

Στην πιο γενική περίπτωση, θεωρούμε ότι μόνο τα διαγώνια στοιχεία του τανυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας K, είναι μη μηδενικά κι έτσι, καταργούνται οι διατμητικές παράγωγοι που διαφορετικά θα εμφανίζονταν στην εξίσωση της ροής.

Θεωρούμε ξανά το σχήμα μίας διάστασης 4.7 και εφαρμόζουμε την εξίσωση ροής στα σημεία A και B:

$$q_A = \left[ -K_{xx} \frac{dh}{dx} \right]_A \cong -K_{xx}\big|_A \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x_A} \tag{4.30}$$

$$q_B = \left[ -K_{xx} \frac{dh}{dx} \right]_B \cong -K_{xx}\big|_B \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x_B} \tag{4.31}$$

Προσεγγίζουμε την ταχύτητα:

$$\left.\frac{dq}{dx}\right|_i \cong \frac{q_B - q_A}{\Delta x_i} \tag{4.32}$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 4.30 και 4.31 στην 4.32 παίρνουμε:

$$\left.\frac{dq}{dx}\right|_i \cong \frac{-K_{xx}\big|_B \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x_B} + K_{xx}\big|_A \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x_A}}{\Delta x_i} \tag{4.33}$$

που είναι η προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών στο αριστερό τμήμα της εξίσωσης 4.1. Ο ορισμός των όρων $K_{xx}\big|_A, K_{xx}\big|_B, \Delta x_A, \Delta x_B$ της παραπάνω εξίσωσης ακολουθεί παρακάτω.

Εφαρμόζουμε το νόμο του Darcy και για τις δύο πλευρές του Β και έχουμε:

$$q\big|_{B-} = -\frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}}(h_B - h_i) \tag{4.34}$$

$$q\big|_{B+} = -\frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}}(h_{i+1} - h_B) \tag{4.35}$$

στη συνέχεια πολλαπλασιάζουμε και τις δύο εξισώσεις με ένα συντελεστή:

$$\frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}} q\big|_{B-} = -\frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}} \frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}}(h_B - h_i) \tag{4.36}$$

$$\frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} q\big|_{B+} = -\frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} \frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}}(h_{i+1} - h_B) \tag{4.37}$$

και τις προσθέτουμε:

$$\frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}} q\big|_{B-} + \frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} q\big|_{B+} = -\frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}} \frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}}(h_B - h_i) - \frac{K_i}{\frac{\Delta x_i}{2}} \frac{K_{i+1}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2}}(h_{i+1} - h_B) \tag{4.38}$$

Δεδομένου ότι η ροή στο σημείο Β πρέπει να είναι ίδια και από τις δύο κατευθύνσεις του Β, το $q\big|_{B-}$ και το $q\big|_{B+}$ πρέπει να είναι ίσα. Έτσι, η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι:

$$q_B = \frac{-\dfrac{K_{i+1}}{\dfrac{\Delta x_{i+1}}{2}}\dfrac{K_i}{\dfrac{\Delta x_i}{2}}}{\dfrac{K_{i+1}}{\dfrac{\Delta x_{i+1}}{2}}+\dfrac{K_i}{\dfrac{\Delta x_i}{2}}}(h_{i+1}-h_i) \tag{4.39}$$

που απεικονίζει ότι, η σωστή εκτίμηση των συντελεστών στους κόμβους i και i + 1, που εξαρτώνται από το διάστημα μεταξύ των δύο κόμβων, είναι ο αρμονικός μέσος που καθορίζεται ως εξής:

$$\frac{K_B}{\Delta x\big|_B} = \frac{\dfrac{K_{i+1}}{\dfrac{\Delta x_{i+1}}{2}}\dfrac{K_i}{\dfrac{\Delta x_i}{2}}}{\dfrac{K_{i+1}}{\dfrac{\Delta x_{i+1}}{2}}+\dfrac{K_i}{\dfrac{\Delta x_i}{2}}} \tag{4.40}$$

Για την περιγραφή της εξίσωσης της ροής σε μία διάσταση, χρειάζεται προηγουμένως η προσέγγιση της παραγώγου του χρόνου που εμφανίζεται στην εξίσωση 4.1. Έτσι, έχουμε $h(x_i,t_n) \equiv h_{i,n}$ και από την εξίσωση 4.22 έχουμε:

$$\left.\frac{\partial h}{\partial t}\right|_{x_i t_{n+1}} = \frac{h_{i,n+1}-h_{i,n}}{\Delta t} + O(\Delta t) \tag{4.41}$$

Από το συνδυασμό των εξισώσεων 4.32, 4.40, 4.41 και με βάση το σχήμα 4.7, καταλήγουμε στη μονοδιάστατη προσέγγιση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση της ροής:

$$\frac{-K\big|_B \dfrac{h_{i+1,n+1}-h_{i,n+1}}{\Delta x_B} + K\big|_A \dfrac{h_{i,n+1}-h_{i-1,n+1}}{\Delta x_A}}{\Delta x_i} = S_s \frac{h_{i,n+1}-h_{i,n}}{\Delta t} \tag{4.42}$$

### 4.7.1 Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου

**Δεύτερος τύπος οριακών συνθηκών**

Αν μια οριακή συνθήκη ροής είναι τοποθετημένη στη θέση i, τότε δύο κόμβοι βρίσκονται στις θέσεις i – 1 και i + 1 και έχουμε:

$$\left.\frac{dh}{dx}\right|_i = \frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2 \tag{4.43}$$

όπου:

Δx είναι το μήκος του στοιχείου των πεπερασμένων διαφορών στην κατεύθυνση x.

Θεωρούμε την περίπτωση των πεπερασμένων διαφορών με τον κόμβο στο κέντρο. Αν το όριο είναι τοποθετημένο στη θέση i, τότε μία προσέγγιση θα ήταν:

$$\left.\frac{dh}{dx}\right|_i \cong \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \tag{4.44}$$

που επειδή είναι πρώτης τάξεως προσέγγιση, είναι λιγότερο ακριβής από αυτή της εξίσωσης 4.43. Πάντως, η προσέγγιση της παραγώγου στην επιφάνεια μεταξύ δύο στοιχείων με τους κόμβους στο κέντρο, σχήμα 4.6, είναι:

$$\left.\frac{dh}{dx}\right|_{i+\frac{1}{2}} \cong \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x} + O(\Delta x)^2 \tag{4.45}$$

που είναι ακρίβειας δευτέρας τάξεως αφού η παράγωγος προσεγγίζεται στη θέση μεταξύ των κόμβων i και i + 1.

Παρόμοια εφαρμογή μπορεί να γίνει και για τη διαρροή που χρησιμοποιείται ο τρίτος τύπος οριακών συνθηκών (Robbins).

**Πρώτος τύπος οριακών συνθηκών**

Οι οριακές συνθήκες πρώτου τύπου (Dirichlet) προσαρμόζονται, αντικαθιστώντας την άγνωστη τιμή του υδραυλικού ύψους, στις αλγεβρικές εξισώσεις, με μία γνωστή τιμή. Όταν οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι στα όρια, αυτό δε προκαλεί κάποιο πρόσθετο σφάλμα στην προσέγγιση. Όταν όμως το όριο είναι στη θέση $i + \frac{1}{2}$ τότε σημειώνεται ένα σφάλμα της τάξης του Δx αν χρησιμοποιηθεί είτε η τιμή του κόμβου i είτε η $i + \frac{1}{2}$. Μία προσέγγιση της τάξεως του $(\Delta x)^2$ μπορεί να γίνει λαμβάνοντας τον αριθμητικό μέσο των δύο τιμών $h_i$ και $h_{i+1}$ και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με την καθορισμένη τιμή στη θέση $i + \frac{1}{2}$. Η πιο σημαντική δυσκολία όμως είναι ότι ο αριθμός των αγνώστων τιμών του h, δε μειώνεται.

### 4.7.2 Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου

Σε ένα πρόβλημα που εξελίσσεται με το χρόνο, όπως η απόκριση ενός συστήματος υπόγειου νερού σε νέες φορτίσεις, είναι αναγκαία η εισαγωγή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του συστήματος τη στιγμή που ξεκινά η προσομοίωση. Η ανάγκη για τις πληροφορίες αυτές είναι εμφανής στον τύπο της εξίσωσης του υπόγειου νερού. Η ύπαρξη της πρώτης παραγώγου σε σχέση με το χρόνο δείχνει ότι μία κατάσταση αρχικού υδραυλικού ύψους είναι αναγκαία για την παροχή μιας μοναδικής λύσης του μοντέλου. Έτσι, κατά μήκος των οριακών συνθηκών είναι

απαραίτητη η τιμή του υδραυλικού ύψους, ενδεικτικό της αρχικής κατάστασης του συστήματος, σε κάθε κόμβο στο εσωτερικό του μοντέλου.

Οι αρχικές συνθήκες που σχετίζονται με τα οριακά σημεία έχουν ήδη προσαρμοστεί από τις οριακές συνθήκες.

Το σύστημα ροής του υπόγειου νερού αποκρίνεται γρήγορα στις νέες οριακές συνθήκες ή στις νέες φορτίσεις με αποτέλεσμα οι αρχικές συνθήκες να μην είναι τόσο μεγάλης σημασίας στα περισσότερα προβλήματα υπόγειου νερού. Εξαίρεση αυτού του κανόνα παρατηρείται όταν το σύστημα υπόγειου νερού περιέχει στρώματα χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας ή όταν το σύστημα είναι πολύ μεγάλο.

Ακόμη, εξαίρεση στην υπόθεση ότι οι αρχικές συνθήκες είναι ελάχιστης σημασίας, αποτελεί η περίπτωση των πολλαπλών περιόδων άντλησης. Όταν ο ρυθμός άντλησης στο μοντέλο αλλάζει, ο νέος ρυθμός άντλησης εισάγεται ως νέο σημείο οριακών συνθηκών και το μοντέλο ξανατρέχει για την περίοδο του χρόνου κατά την οποία εφαρμόζονται οι νέες συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή, η αρχική κατάσταση του συστήματος για το νέο ρυθμό άντλησης αποτελεί, την τελική κατάσταση του συστήματος για τον προηγούμενο ρυθμό άντλησης. Τέλος, οι τελικές τιμές του υδραυλικού ύψους του συστήματος που προέκυψαν από τις προηγούμενες συνθήκες άντλησης εισάγονται τώρα ως αρχικές συνθήκες για το νέο ρυθμό άντλησης [Pinder, 2000].

## 4.8 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων στην εξίσωση της ροής διαμορφώνεται πιο εύκολα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Galerkin of weighted residuals.

Το αρχικό σημείο είναι η προσέγγιση πεπερασμένων σειρών για την άγνωστη παράμετρο h(x,t) όπως αναφέρθηκε προηγουμένως:

$$h(x,t) = \hat{h}(x,t) = \sum_{i=1}^{I} h(t)_i \, \varphi(x)_i \tag{4.46}$$

όπου:

ο συντελεστής $h_i$ είναι σε συνάρτηση με το χρόνο και η συνάρτηση βάσης φ(x) είναι γραμμική ή μέχρι τετάρτου βαθμού.

Στη συνέχεια αντικαθιστούμε τη συνάρτηση $\hat{h}(x,t)$ στην εξίσωση της ροής:

$$\nabla \cdot K \cdot \nabla \hat{h} - S_s \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - Q = R(x,t) \tag{4.47}$$

όπου το υπόλοιπο R(x,t) είναι γενικά διάφορο του μηδενός επειδή η προσεγγιστική συνάρτηση h(x,t), δεν ικανοποιεί με ακρίβεια τη βασική εξίσωση. Ακολουθεί η ολοκλήρωση του υπολοίπου R(x,t) όπου το αποτέλεσμα είναι ίσο με μηδέν:

$$\int_{\Omega} R(x,t)\,\varphi(x)_i\,d\Omega = 0 \quad i = 1,2,\ldots I \tag{4.48}$$

Η παραπάνω σχέση δεν εγγυάται ότι το υπόλοιπο είναι μηδέν σε κάθε σημείο της περιοχής αλλά, ότι το ολοκλήρωμα για όλη την περιοχή είναι μηδέν. Αντικαθιστώντας την 4.47 στην 4.48 έχουμε:

$$\int_{\Omega}\left(\nabla\cdot K\cdot\nabla\hat{h} - S_s\frac{\partial\hat{h}}{\partial t} - Q\right)\varphi(x)_i\,d\Omega = 0 \quad i = 1,2,\ldots I \tag{4.49}$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Green (ολοκλήρωση κατά τμήματα σε πολλαπλές διευθύνσεις) στην εξίσωση 4.49 προκύπτει:

$$\int_{\Omega}\left[(-K\cdot\nabla\hat{h})\nabla\varphi(x)_i - (S_s\frac{\partial\hat{h}}{\partial t} + Q)\cdot\varphi(x)_i\right]d\Omega + \int_{\partial\Omega} K\cdot\frac{\partial h}{\partial n}\varphi(x)_i\,dl = 0 \quad i = 1,..I \tag{4.50}$$

Στην εξίσωση 4.50, ο τελευταίος όρος στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης προήλθε από τη θεωρία του Green και λέγεται επιφανειακό ολοκλήρωμα (ή γραμμικό ολοκλήρωμα για ένα διδιάστατο πρόβλημα). Ο όρος αυτός έχει τη διάταξη ενός όρου ροής και μπορεί να υπολογιστεί μέσω του δεύτερου τύπου (Neumann) των οριακών συνθηκών.

Η αντικατάσταση της εξίσωσης $h(x,t) = \hat{h}(x,t) = \sum_{i=1}^{I} h(t)_i\,\varphi(x)_i$ στην 4.50 έχει ως εξής:

$$\int_{\Omega}\left[\left(-K\cdot\nabla\sum_{j=1}^{J} h(t)_j\varphi(x)_j\right)\cdot\nabla\varphi(x)_i - \left(S_s\frac{\partial\sum_{j=1}^{J} h(t)_j}{\partial t}\varphi(x)_j + Q\right)\cdot\varphi(x)_i\right]d\Omega + \int_{\partial\Omega} K\cdot\frac{\partial h}{\partial n}\varphi(x)_i\,dl = 0$$

$$i = 1,2,\ldots I \tag{4.51}$$

Η εξίσωση 4.51 αντιπροσωπεύει I διαφορικές εξισώσεις. Η παράγωγος του χρόνου $\frac{\partial h(x,t)}{\partial t}$ γράφεται ως εξής:

$$\left.\frac{\partial h(t_{n+1})}{\partial t}\right|_{x_i} = \left.\frac{h_{n+1} - h_n}{\Delta t}\right|_{x_i} + O(\Delta t) \tag{4.52}$$

και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.51 παίρνουμε:

$$\int_{\Omega}\left[\left(-K\cdot\nabla\sum_{j=1}^{J} h_{n+1,j}\varphi(x)_j\right)\cdot\nabla\varphi(x)_i - \left(S_s\sum_{j=1}^{J}\frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t}\varphi(x)_j + Q\right)\cdot\varphi(x)_i\right]d\Omega + \int_{\partial\Omega} K\cdot\frac{\partial h}{\partial n}\varphi(x)_i\,dl = 0$$

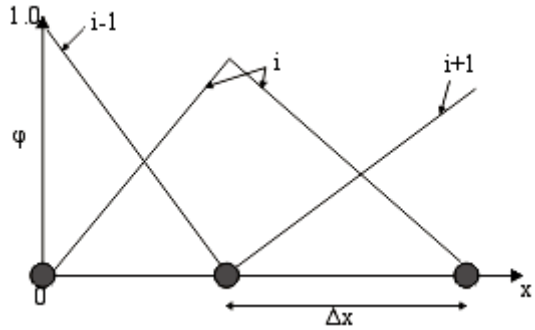
$$i = 1,2,\ldots I \tag{4.53}$$

Έτσι, προκύπτουν I αλγεβρικές εξισώσεις με J αγνώστους και αν I = J όπως στην περίπτωση αυτή, λύνεται η εξίσωση 4.53 για τις J άγνωστες τιμές των $h_{n+1,j}$ σε κάθε χρονικό βήμα.

Μειώνοντας το πρόβλημα σε μία διάσταση η εξίσωση 4.53 γίνεται:

$$\int\left[\left(-K\frac{d}{dx}\sum_{j=1}^{J}h_{n+1,j}\varphi(x)_j\right)\frac{d}{dx}\varphi(x)_i-\left(S_s\sum_{j=1}^{J}\frac{h_{n+1,j}-h_{n,j}}{\Delta t}\varphi(x)_j+Q\right)\varphi(x)_i\right]dx+K\frac{\partial h}{\partial n}\varphi(x)_i\Big|_{x_o}^{x_i}=0 \tag{4.54}$$

Θεωρώντας μια ιδιαίτερη μορφή της συνάρτησης βάσης $\varphi(x)_j$ στο παρακάτω σχήμα 4.9, απεικονίζονται οι γραμμικές συναρτήσεις βάσης. Οι συναρτήσεις αυτές ονομάζονται και συναρτήσεις 'καπέλο' εξαιτίας του σχήματός τους που μοιάζει με καπέλο.




**Σχήμα 4.9. Γραμμικές συναρτήσεις βάσης chapeau.**

Οι τύποι των συναρτήσεων αυτών είναι:

$$\varphi(x)_i=\frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}},\qquad x_i\le x\le x_{i+1} \tag{4.55}$$

$$\varphi(x)_i=\frac{x-x_{i-1}}{x_i-x_{i-1}},\qquad x_{i-1}\le x\le x_i \tag{4.56}$$

Με βάση αυτή τη μορφή, το ολοκλήρωμα της εξίσωσης 4.54 διαιρείται σε E ξεχωριστά ολοκληρώματα:

$$\sum_{e=1}^{E}\int_e\left[\left(-K\frac{d}{dx}\sum_{j=1}^{J}h_{n+1,j}\varphi(x)_j\right)\frac{d}{dx}\varphi(x)_i-\left(S_s\sum_{j=1}^{J}\frac{h_{n+1,j}-h_{n,j}}{\Delta t}\varphi(x)_j+Q\right)\varphi(x)_i\right]dx+K\frac{\partial h}{\partial n}\varphi(x)_i\Big|_{x_o}^{x_i}=0$$

$$i = 1,2\ldots.I \tag{4.57}$$

Το τυπικό ολοκλήρωμα είναι της μορφής:

$$-K_e\cdot\int_e\left(\frac{d}{dx}\left(\sum_{j=1}^{J}h_{n+1,j}\varphi(x)_j\right)\frac{d}{dx}\varphi(x)_i\right)dx-S_{S_e}\int_e\left(\sum_{j=1}^{J}\frac{h_{n+1,j}-h_{n,j}}{\Delta t}\varphi(x)_j+Q\right)\varphi(x)_i\,dx$$

$$i = 1,2\ldots.I \tag{4.58}$$

όπου:

οι παράμετροι K και $S_s$ υποθέτουμε ότι είναι σταθερές για κάθε στοιχείο e.

### 4.8.1 Οριακές συνθήκες

**Δεύτερου τύπου**

Ο τελευταίος όρος στην εξίσωση 4.57 περιέχει οριακές συνθήκες δευτέρου τύπου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνάρτηση βάσης στα άκρα της περιοχής είναι ή μηδέν ή ένα, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 4.57 είναι:

$$K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \quad \text{για } x = l \tag{4.59}$$

$$- K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \quad \text{για } x = 0 \tag{4.60}$$

Η εξίσωση 4.59 περιγράφει τη ροή στον υδροφορέα για τη θέση $l$. Έτσι, αντικαθιστώντας αυτό τον όρο με την κατάλληλη τιμή των οριακών συνθηκών, ενσωματώνεται αυτή η οριακή συνθήκη σαν ένα τμήμα του ολοκληρώματος της βασικής εξίσωσης.

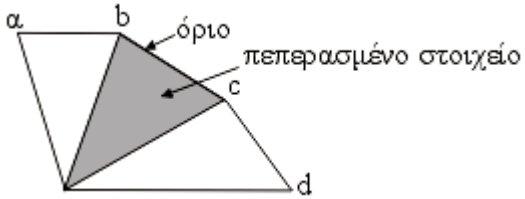
Στη συνέχεια περιγράφεται η επέκταση της έννοιας αυτής σε δύο διαστάσεις του χώρου. Στο σχήμα 4.10 απεικονίζεται το όριο, γραμμή abcd, ενός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων και τρία τρίγωνά του. Το ολοκλήρωμα που αποτελεί την οριακή συνθήκη είναι $\int_{\partial\Omega} K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \varphi(x)_i \, dl$ που είναι ο τελευταίος όρος της εξίσωσης 4.53. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα το ολοκλήρωμα είναι:

$$\int_{e=1}^{3} K \cdot \frac{\partial h}{\partial n} \varphi(x)_i \, dl, \quad i = \alpha, b, c, d \tag{4.61}$$

όπου:

οι συναρτήσεις $\varphi(x)_i$ δίνονται από τις εξισώσεις 4.55 και 4.56 και απεικονίζονται στο σχήμα 4.9.

Αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι ο υποδιπλασιασμός της ροής και του μήκους των στοιχείων με την τιμή που προκύπτει να αποδίδεται σε κάθε κόμβο των στοιχείων.




**Σχήμα 4.10. Καθορισμός των ορίων μιας περιοχής χρησιμοποιώντας τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία.**

Για παράδειγμα, αν η ροή κατά μήκος της πλευράς α-b του ορίου, στο σχήμα 4.10, είναι 5 $ft^2$/day/ft, η τιμή της κατανεμημένης ροής στον κόμβο α εξαιτίας της ύπαρξης αυτού του στοιχείου, θα είναι $\frac{5}{2}$ (b – α), όπου (b – α) είναι το μήκος της ευθείας. Στην περίπτωση που i = b, θα υπήρχε συνεισφορά και από τα δύο στοιχεία που έχουν κοινό κόμβο το b.

**Οριακές συνθήκες τρίτου τύπου**

Στην περίπτωση αυτή, γίνεται αντικατάσταση του ολοκληρώματος στην εξίσωση 4.61 από μια έκφραση του τύπου $\kappa(h - h_o)$, όπου $h_o$ είναι μια καθορισμένη συνάρτηση. Στην περίπτωση αυτή, ο άγνωστος h εμφανίζεται στην οριακή συνθήκη. Αυτός ο όρος, προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση βάσης των πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στην εξίσωση 4.46. Οι άγνωστες παράμετροι που προκύπτουν προσδιορίζονται με τις υπόλοιπες άγνωστες παραμέτρους $h_j(x,t)$.

**Οριακές συνθήκες πρώτου τύπου**

Στην περίπτωση αυτή επανεξετάζεται η εξίσωση 4.46. Όταν ένα σημείο $x_i$ είναι η θέση ενός κόμβου, η συνάρτηση βάσης $\varphi(x)_i$ έχει την τιμή 1 και κάθε άλλη συνάρτηση βάσης την τιμή μηδέν. Έτσι, σ' ένα κόμβο i η εξίσωση γίνεται:

$$h(x_i,t) = \hat{h}(x_i, t) = h(t)_i \qquad (4.62)$$

και δίνοντας στην παράμετρο $h(t)_i$ μια ορισμένη τιμή, όπως για παράδειγμα $h(t)_o$, ικανοποιείται η οριακή συνθήκη πρώτου τύπου.

### 4.8.2 Αρχικές συνθήκες

Η τιμή του αρχικού υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο του συστήματος είναι ενδεικτική της αρχικής κατάστασης του συστήματος. Αν οι τιμές του υδραυλικού ύψους που έχουν παρατηρηθεί χρησιμοποιούνται σαν αρχικές συνθήκες, μάλλον δεν αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια τη λύση των εξισώσεων ροής του υπόγειου νερού. Έτσι, όταν αρχίσουν οι υπολογισμοί του μοντέλου, οι αρχικές συνθήκες θα αλλάξουν με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιηθούν οι βασικές εξισώσεις. Το σύστημα μπορεί να παρουσιάσει μια απροσδόκητη συμπεριφορά εξαιτίας της προσπάθειάς του να συμφωνήσει με τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο.

### 4.8.3 Παράμετροι

Η εξίσωση της ροής περιέχει δύο πεδία παραμέτρων: την υδραυλική αγωγιμότητα K και την ειδική αποθηκευτικότητα $S_s$. Όταν ο προσομοιωτής είναι δύο διαστάσεων, η υδραυλική

αγωγιμότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα αντικαθίστανται από τη μεταβιβασιμότητα T και τον ειδικό συντελεστή αποθηκευτικότητας S. Επίσης, σ' ένα πρόβλημα υδροφόρου ορίζοντα παίζει σημαντικό ρόλο και το πορώδες.

Στην προσέγγιση της εξίσωσης της ροής με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, σε κάθε κόμβο πρέπει να δίνεται τιμή για κάθε μία από τις προηγούμενες παραμέτρους. Έτσι, όταν υπάρχουν N κόμβοι σ' ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών εισάγονται N τιμές κάθε παραμέτρου, μία σε κάθε κόμβο.

Γενικά, πληροφορίες πεδίου δεν είναι διαθέσιμες σε κάθε κόμβο. Γι' αυτό είναι σημαντικό να παρεμβάλλονται γνωστές πληροφορίες, ώστε να σχηματιστεί μια επιφάνεια με τις απαιτούμενες παραμέτρους και να εισαχθεί μία τιμή σε κάθε κόμβο.

Στην περίπτωση ενός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί κανείς είτε να καθορίσει τις τιμές των παραμέτρων σε κάθε κόμβο είτε να αποδώσει μια σταθερή τιμή σε κάθε στοιχείο. Αποτέλεσμα αυτού είναι να εξέλθει η σταθερή παράμετρος από το ολοκλήρωμα και να απλοποιηθεί η ολοκλήρωση.

Η απεικόνιση των καθορισμένων τιμών των παραμέτρων σε κάθε κόμβο γίνεται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση βάσης, που περιγράφει τη συνάρτηση της άγνωστης κατάστασης:

$$K(x) = \sum_{k=1}^{2} K_k \cdot \varphi(x)_k \tag{4.63}$$

Η προσέγγιση αυτή για δεδομένο πεπερασμένο στοιχείο γίνεται:

$$-\int_e \left( \sum_{k=1}^{2} K_k \cdot \varphi(x)_k \frac{d}{dx} \sum_{j=1}^{J} h_{n+1,j} \varphi(x)_j \frac{d}{dx} \varphi(x)_i \right) d\Omega_e - \int_e \left( \sum_{i=1}^{2} S_k \varphi(x)_k \sum_{j=1}^{J} \frac{h_{n+1,j} - h_{n,j}}{\Delta t} \varphi(x)_j + Q \right) \varphi(x)_i \, d\Omega_e \tag{4.64}$$

Έτσι, ο προσδιορισμός των παραμέτρων στους κόμβους, εφαρμόζεται όταν χρησιμοποιούνται μη γραμμικοί συντελεστές όπως το πάχος $l(h)$. Στην περίπτωση αυτή, η άγνωστη τιμή του υδραυλικού ύψους προσδιορίζεται στους κόμβους συντελώντας έτσι, στην απόκτηση των μη γραμμικών συντελεστών στους κόμβους. Όταν είναι διαθέσιμες οι τιμές των μη γραμμικών συντελεστών στους κόμβους, προσαρμόζονται εύκολα χρησιμοποιώντας τη μορφή της εξίσωσης 4.64 [Pinder, 2001].

## 4.9 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ

Η μεταφορά στο υπόγειο νερό γενικά, περιγράφει το φαινόμενο της κίνησης και εξέλιξης διαλυμένων ρυπαντών λόγω της κίνησης του υπόγειου νερού καθώς επίσης και διάφορες φυσικοχημικές διαδικασίες που συμβαίνουν στην υποεπιφάνεια.

Το κυριότερο πρόβλημα εντοπίζεται στην κίνηση ρύπων που προκύπτουν από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και από τη φυσική ύπαρξη ρυπαντών όπως είναι το αλμυρό νερό στους παράκτιους υδροφορείς ή άλλα ανόργανα διαλυμένα σωματίδια.

Όπως η μοντελοποίηση ροής του υπόγειου νερού έτσι και η μεταφορά ρύπων περιλαμβάνει μία σειρά από βήματα απαραίτητα για την ανάπτυξη και την εκτέλεση του μοντέλου:

- Σύνταξη πληροφοριών για την ποιότητα του νερού
- Προσδιορισμός του αριθμού των φυσικών διαστάσεων
- Καθορισμός του μεγέθους του μοντέλου
- Εισαγωγή των οριακών συνθηκών του μοντέλου
- Εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου
- Εισαγωγή των φορτίσεων του μοντέλου
- Καθορισμός της διακριτοποίησης του μοντέλου
- Τρέξιμο του μοντέλου
- Εξαγωγή των συγκεντρώσεων
- Βαθμονόμηση του μοντέλου
- Τρέξιμο του μοντέλου ξανά [Pinder, 2001]

### 4.9.1 Εξίσωση μεταφοράς των ρύπων

Η εξίσωση διατήρησης των ουσιών για τη ροή μέσω ενός πορώδους μέσου είναι:

$$\left(\varepsilon + E(c)\right)\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{q} + Qc_o = 0 \qquad (4.65)$$

όπου:

ε είναι το πορώδες

E(c) είναι η χημική προσρόφηση συναρτήσει του c

$\tilde{q}$ είναι η ροή της μάζας των μεταφερόμενων ουσιών

Q είναι η άντληση νερού από το μοντέλο

$c_o$ είναι η συγκέντρωση των μεταφερόμενων σωματιδίων στην άντληση Q.

### 4.9.2 Ισόθερμες προσρόφησης

Η γενική εξίσωση των ισοθέρμων είναι η εξής:

$$E(c) = \frac{\rho_b \alpha c^{\beta}}{(1+\gamma c)^2} \tag{4.66}$$

όπου:

$\rho_b$ είναι η πυκνότητα του εδάφους

c είναι η αρχική συγκέντρωση της ουσίας που εισάγεται σ' ένα πλήρως κορεσμένο σύστημα

α είναι ο συντελεστής κατανομής και ορίζεται επίσης ως $K_d$.

- Όταν $\beta = \gamma = 0$ τότε απεικονίζεται η γραμμική ισόθερμη
- Όταν $\gamma = 0$ προκύπτει η ισόθερμη Freundlich
- Όταν $\beta = 0$ προκύπτει η ισόθερμη Langmuir

Αν θεωρήσουμε μια γραμμική ισόθερμο τότε, ο πρώτος όρος της εξίσωσης 4.65 γίνεται:

$$\left(\varepsilon + E(c)\right)\frac{\partial c}{\partial t} = \varepsilon\left(1 + \frac{\rho_b \alpha}{\varepsilon}\right)\frac{\partial c}{\partial t} \tag{4.67}$$

Ο όρος $1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon}$ ορίζεται ως συντελεστής επιβράδυνσης $R_f$:

$$R_f \equiv 1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \tag{4.68}$$

Και αντικαθιστώντας τον στην εξίσωση 4.65 προκύπτει:

$$\varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{q} + Qc_o = 0 \tag{4.69}$$

### 4.9.3 Η ροή μάζας

Η ροή μάζας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\tilde{q} = qc - D \cdot \nabla c \tag{4.70}$$

όπου:

q είναι η ταχύτητα Darcy

D είναι ο συντελεστής διασποράς.

Ο όρος qc περιγράφει τη συμμεταφορά μάζας, που είναι η κίνηση των διαλυμένων ουσιών λόγω της ροής του υπόγειου νερού.

Ο όρος $D \cdot \nabla c$ περιγράφει τη ροή λόγω διασποράς. Ο όρος αυτός, ακολουθεί το νόμο του Fick για τη διασπορά. Ο συντελεστής διασποράς D είναι ένας τανυστής με τον παρακάτω τύπο:

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \tag{4.71}$$

όπου:

$D_{\alpha\beta} = \alpha_T \, |q| \, \delta_{\alpha\beta} + (\alpha_L - \alpha_T) q_\alpha \, q_\beta / |q| + D_M \delta_{\alpha\beta}$

$\alpha_T$ είναι ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς

$\alpha_L$ είναι ο συντελεστής διαμήκους διασποράς, θεωρείται ότι το πορώδες είναι ισοτροπικό σε σχέση με τη διασπορά

$|q| = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}$ είναι η ταχύτητα Darcy ή μέση πορώδης ταχύτητα

$D_M$ είναι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης

$\delta_{\alpha\beta}$ είναι το Kronecker δέλτα που είναι ίσο με μηδέν εκτός αν α = β που τότε είναι ίσο με ένα.

Από την αντικατάσταση της εξίσωσης 4.70 στην 4.69 προκύπτει:

$$\varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (qc) - \nabla \cdot (D \cdot \nabla c) + Qc_o = 0 \tag{4.72}$$

όπου:

$$\nabla \cdot (qc) = q \cdot \nabla c + c \nabla \cdot q \tag{4.73}$$

και αγνοώντας τη μεταβλητή συμπεριφορά της πίεσης στην εξίσωση της ροής του υπόγειου νερού προκύπτει ότι:

$$\nabla \cdot q = -Q \tag{4.74}$$

και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 4.74 και 4.73 στην 4.72 παίρνουμε:

$$\varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + q \cdot \nabla c - \nabla \cdot (D \cdot \nabla c) - Q(c - c_o) = 0 \tag{4.75}$$

Έτσι, στην εξίσωση 4.75 ο όρος της καταβόθρας $[Q(c - c_o)]$, αντιπροσωπεύει τη διαφορά συγκέντρωσης μεταξύ του νερού που απομακρύνεται από τον υδροφορέα και του νερού που παραμένει στον υδροφορέα. Στην περίπτωση της άντλησης οι δύο αυτές συγκεντρώσεις είναι ίσες και αυτός ο όρος απαλείφεται. Κατά τον εμπλουτισμό οι δύο συγκεντρώσεις διαφέρουν πολύ αφού η τιμή του $c_o$ είτε θα είναι πολύ μικρή (κατά τη βροχόπτωση) είτε θα είναι πολύ μεγάλη (ύπαρξη τοξικών κηλίδων). Έτσι, μπορεί να προκληθεί αύξηση ή μείωση της συγκέντρωσης του νερού που παραμένει στον υδροφορέα και όταν η συγκέντρωση αυτή γίνει ίση με τη συγκέντρωση του νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα ο όρος αυτός απαλείφεται.

Αν διαιρέσουμε την εξίσωση 4.75 με $\varepsilon R_f$, παίρνουμε:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{q}{\varepsilon R_f}\nabla c - \nabla(\frac{D}{\varepsilon R_f}\nabla c) - \frac{Q}{\varepsilon R_f}(c - c_o) = 0 \qquad (4.76)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση 4.76, η ενεργή ταχύτητα συμμεταφοράς δεν είναι η q αλλά είναι η $\frac{q}{\varepsilon R_f}$. Αφού ο συντελεστής επιβράδυνσης $R_f$ είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα και $v = \frac{q}{\varepsilon}$ είναι η ταχύτητα διήθησης, είναι εμφανές ότι η επιβράδυνση έχει την τάση να καθυστερεί την κίνηση των ρύπων.

### 4.9.4 Οριακές συνθήκες του μοντέλου

Αν επιλέξουμε οι ρύποι να κινούνται στα όρια της περιοχής μέσω της συμμεταφοράς, η κατάλληλη οριακή συνθήκη είναι μία σταθερή ροή ίση με μηδέν. Έτσι, κατά μήκος του ορίου θα ισχύει $\frac{\partial c}{\partial n} = 0$ και η ροή στο όριο θα έχει τη μορφή:

$$\tilde{q} = qc \qquad (4.77)$$

Οι διαλυμένες ουσίες συνεχίζουν να κινούνται επί του ορίου αλλά μόνο μέσω της συμμεταφοράς. Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη οριακή συνθήκη σε ένα μοντέλο μεταφοράς ρυπαντών.

Σε περίπτωση που δεν επιλέξουμε ροή στην περίμετρο του ορίου και κατ' επέκταση ούτε συμμεταφορά ούτε διασπορά τότε ισχύει:

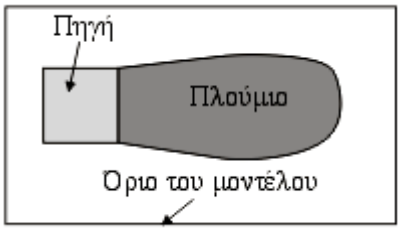
$$qc - D \cdot \nabla c = 0 \qquad (4.78)$$

Αυτή η μορφή είναι ο τρίτος τύπος των οριακών συνθηκών (Robbins) που όμως σπάνια χρησιμοποιείται αφού αν η ροή επί του ορίου είναι μηδέν, η συνολική ροή $q_n$ θα είναι μηδέν και καταργείτε αυτόματα η ροή συμμεταφοράς. Έτσι, προκύπτει ο δεύτερος τύπος οριακών συνθηκών:

$$D \cdot \nabla c = 0 \qquad (4.79)$$

Η τοποθέτηση μιας σειράς κόμβων σταθερής συγκέντρωσης στο εσωτερικό του μοντέλου είναι κατάλληλη στην περίπτωση του μοντέλου μεταφοράς υπόγειου νερού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11, το εξωτερικό ορθογώνιο απεικονίζει τη συγκέντρωση οριακών συνθηκών στην περίμετρο του μοντέλου. Το εσωτερικό σκιασμένο ορθογώνιο περιγράφει τη συγκέντρωση οριακών συνθηκών που είναι εσωτερικά της περιμέτρου του μοντέλου. Αυτό το είδος της εσωτερικής οριακής συνθήκης απεικονίζει την πηγή ρύπανσης.




**Σχήμα 4.11. Διαγραμματική αναπαράσταση της εσωτερικής συγκέντρωσης οριακών συνθηκών.**

Η εσωτερική οριακή συνθήκη είτε είναι σταθερής συγκέντρωσης (πρώτου τύπου ή Dirichlet) είτε είναι σταθερής ροής (δεύτερου τύπου ή Neumann).

Γενικά, προτιμώνται οι οριακές συνθήκες σταθερής συγκέντρωσης απ' ότι σταθερής ροής αφού κατά τον καθορισμό της σταθερής ροής, πρέπει να διατηρηθεί το ισοζύγιο μάζας, έτσι ώστε το μοντέλο να εφαρμόζεται σε κάθε ροή μάζας που εισέρχεται [Pinder, 2001].

## 4.10 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων στην εξίσωση μεταφοράς, αρχικά θεωρούμε την εξίσωση 4.75:

$$\varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + q \cdot \nabla c - \nabla \cdot (D \cdot \nabla c) - Q(c - c_o) = 0 \tag{4.80}$$

και δίνεται μία έκφραση της προσέγγισης για c(x,t) που είναι:

$$c(x,t) \cong \hat{c}(x,t) = \sum_{j}^{J} c(z,t)_j \varphi(x,y)_j \tag{4.81}$$

ακολουθεί η προσέγγιση Galerkin στην εξίσωση μεταφοράς:

$$\int_{\Omega_{xy}} \left( \varepsilon R_f \frac{\partial \hat{c}}{\partial t} + q \cdot \nabla \hat{c} - \nabla \cdot (D \cdot \nabla \hat{c}) - Q(\hat{c} - c_o) \right) \varphi(x,y)_i \, d\Omega = 0 \quad i = 1,2\ldots I \tag{4.82}$$

όπου:

$\Omega_{xy}$ είναι η περιοχή του μοντέλου σχεδιαζόμενη σε σύστημα συντεταγμένων (x,y)

I είναι ο αριθμός των κόμβων στο μοντέλο.

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Green έχουμε:

$$\int_{\Omega_{xy}} \left( \varepsilon R_f \frac{\partial \hat{c}}{\partial t} + q \cdot \nabla \hat{c} - Q(\hat{c} - c_o) \right) \varphi(x,y)_i \, d\Omega + \int_{\Omega_{xy}} (D \cdot \nabla_{xy} \hat{c}) \cdot \nabla_{xy} \varphi(x,y)_i \, d\Omega$$
$$- \int_{\Omega_{xy}} D_{zz} \frac{\partial^2 \hat{c}}{\partial z^2} \varphi(x,y)_i \, d\Omega - \int_{\partial\Omega} D \cdot \nabla_{xy} \hat{c} \, \varphi(x,y)_i \cdot n da = 0 \tag{4.83}$$

όπου:

$\nabla_{xy}(\cdot)$ είναι το ανάδελτα στο διδιάστατο ή στο οριζόντιο επίπεδο.

Το θεώρημα Green όπως φαίνεται και στην εξίσωση δεν εφαρμόστηκε για την κατεύθυνση z.
Με την αντικατάσταση της σχέσης 4.81 στην 4.83 έχουμε:

$$\sum_j^J \frac{\partial c(z,t)_j}{\partial t} \int_{\Omega_{xy}} \varepsilon R_f \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega + \sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} q_{xy} \cdot \nabla_{xy} \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega$$
$$+ q_z \frac{\partial}{\partial z} \sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega - \int_{\Omega_{xy}} Q \left( \sum_j^J c(z,t)_j \varphi(x,y)_j - c_o \right) \varphi(x,y)_i \, d\Omega$$
$$+ \sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} \left( D \cdot \nabla_{xy} \varphi(x,y)_j \right) \cdot \nabla_{xy} \varphi(x,y)_i \, d\Omega - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} D_{zz} \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega$$
$$- \int_{\partial\Omega} D \cdot \nabla_{xy} \hat{c} \varphi(x,y)_i \cdot n d\alpha = 0$$
$$i = 1,2 \ldots I \tag{4.84}$$

Ο όρος της συμμεταφοράς είναι:

$$\sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} q_{xy} \cdot \nabla_{xy} \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega + q_z \frac{\partial}{\partial z} \sum_j^J c(z,t)_j \int_{\Omega_{xy}} \varphi(x,y)_j \varphi(x,y)_i \, d\Omega \tag{4.85}$$

Στον όρο αυτό εμφανίζεται η παράγωγος z για την οποία απαιτείται μια προσέγγιση πεπερασμένων διαφορών:

$$q_z \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_i = q_{zB} \beta \frac{c_{i+1,n+1} - c_{i,n+1}}{\Delta z_B} + q_{zA} (1-\beta) \frac{c_{i,n+1} - c_{i-1,n+1}}{\Delta z_A} \tag{4.86}$$

όπου:

τα σημεία Α και Β φαίνονται στο σχήμα 4.7 και το β είναι ένας συντελεστής βάρους και ισχύει $\beta \geq 0{,}5$.

Η προσέγγιση της παραγώγου στον όρο της συμμεταφοράς δημιουργεί αρκετά προβλήματα όταν είναι μεγάλη σε σχέση με τον όρο της διασποράς στην εξίσωση 4.84.
Θεωρούμε την απλοποιημένη μονοδιάστατη εξίσωση 4.80:

$$\varepsilon R_f \frac{\partial c}{\partial t} + q\frac{\partial c}{\partial x} - D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \tag{4.87}$$

όπου:

q και D είναι βαθμωτές ποσότητες.

Μία σταθερά αναλογικότητας που είναι ενδεικτική της σημασίας της συμμεταφοράς συγκρινόμενη με τη διασπορά είναι ο αριθμός Peclet:

$$P_e = \frac{q\Delta x}{D} \tag{4.88}$$

Ο αριθμός Peclet πρέπει να είναι μικρότερος από 2, $P_e < 2$, ώστε το μοντέλο να αποδίδει ένα προφίλ συγκεντρώσεων χωρίς περιοδικές μεταβολές κι έτσι, δημιουργείται ένα ανώτατο όριο για το διάστημα Δx. Το φαινόμενο των διακυμάνσεων στη συμπεριφορά των συγκεντρώσεων εξασθενεί όσο ο αριθμός Peclet μειώνεται.

Ο συντελεστής διασποράς έχει τη μορφή:

$$D_{\alpha\beta} = \alpha_T \, |q| \, \delta_{\alpha\beta} + (\alpha_L - \alpha_T) q_\alpha \, q_\beta \, / \, |q| + D_m \delta_{\alpha\beta} \tag{4.89}$$

Αν υποθέσουμε ότι ο συντελεστής μοριακής διάχυσης $D_m$ και ο συντελεστής εγκάρσιας διασποράς $\alpha_T$ είναι αμελητέες ποσότητες και ότι $q_\alpha = q_\beta = q$, ο αριθμός $P_e$ γίνεται:

$$P_e = \frac{q\Delta x}{\alpha_L |q|} = \frac{\Delta x}{\alpha_L} \tag{4.90}$$

και όπως φαίνεται είναι ανεξάρτητος του q.

Για να λυθούν τα προβλήματα με τους μεγάλους αριθμούς $P_e$, πρέπει είτε να αυξηθεί η ακρίβεια του αριθμητικού σχήματος που χρησιμοποιείται είτε να μειωθεί ο αριθμός $P_e$ με την εισαγωγή στην εξίσωση κάποιας μορφής διάχυσης ή διασποράς. Εισάγοντας την αριθμητική διάχυση αυξάνεται η ποσότητα του όρου του σφάλματος των σειρών Taylor δεύτερης τάξης στην προσέγγιση της παραγώγου πρώτης τάξεως της συγκέντρωσης. Οι σειρές Taylor για τη συγκέντρωση, με το χρόνο σταθερό, δίνονται από τον τύπο:

$$c_{i+1,n+1} = c_{i,n+1} + \left.\frac{\partial c}{\partial x}\right|_{i,n+1} \Delta x + \frac{1}{2!}\left.\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right|_{i,n+1} (\Delta x)^2 + O(\Delta x)^3 \tag{4.91}$$

Περιγράφοντας με παρόμοιο τρόπο τη συγκέντρωση $c_{i-1,n+1}$ και αφαιρώντας τις δύο εξισώσεις, παίρνουμε μια σχέση του όρου συμμεταφοράς στο $x_i$ χωρίς να υπάρχει όρος δεύτερης τάξεως. Πάντως, για κάθε σημείο, εκτός του $x_i$, που χρησιμοποιηθεί ως θέση αναφοράς για την εκτίμηση της πρώτης παραγώγου, ο όρος της δεύτερης παραγώγου δε μηδενίζεται. Αν αγνοηθεί η

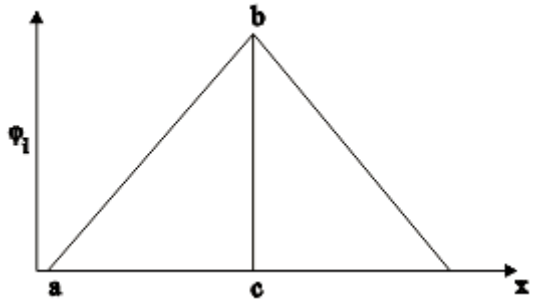
συνεισφορά δεύτερης τάξης, προστίθεται στο αριθμητικό μοντέλο τεχνητή διάχυση ή διασπορά η οποία εξομαλύνει τις απότομες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης.

Στην προσέγγιση του όρου της συμμεταφοράς, εξίσωση 4.91, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής βάρους:

$$\left.\frac{\partial c}{\partial x}\right|_{i,n+1} = \frac{1}{\Delta x}\left( c_{i+1,n+1} - c_{i,n+1} - \frac{1}{2!}\left.\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right|_{i,n+1} (\Delta x)^2 + O(\Delta x)^3 \right) \tag{4.92}$$

Είναι εμφανές ότι, στην απεικόνιση της πρώτης παραγώγου της συγκέντρωσης υπάρχει ο όρος της δεύτερης παραγώγου. Αγνοώντας αυτό τον όρο, προστίθεται στην εξίσωση αριθμητική διάχυση (διασπορά).

Μια τέτοια ανάλυση, αλλά πιο πολύπλοκη, μπορεί να γίνει για τις εξισώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, για την περιγραφή του συντελεστή βάρους χρησιμοποιείται η μισή τυπική συνάρτηση chapeau.




**Σχήμα 4.12. Διαγραμματική περιγραφή του συντελεστή βάρους χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις βάσης chapeau.**

Σ' αυτό το σχήμα μόνο το τμήμα a-b-c χρησιμοποιείται ως συνάρτηση βάρους (weighting function) για τον όρο της πρώτης παραγώγου.

Στην προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων είναι δυνατόν να υπάρξει κάποια τροποποίηση που θα επιτρέπει τη χρήση μεταβλητού συντελεστή βάρους.

### 4.10.1 Οριακές συνθήκες

**Πρώτος τύπος οριακών συνθηκών**

Στην περίπτωση οριακών συνθηκών σταθερής συγκέντρωσης, η τιμή της συγκέντρωσης στους κόμβους που είναι στο όριο, είναι ίση με τη γνωστή τιμή $c_{i,n} = c_{io}$.

**Δεύτερος τύπος οριακών συνθηκών**

Η εξίσωση των οριακών συνθηκών σταθερής διάχυτης ροής μάζας, δίνεται ως εξής:

$$q_{Dx}\big|_{i,n+1} = \zeta D\big|_B \frac{c_{i+1,n+1} - c_{i,n+1}}{\Delta z_B} + (1-\zeta) D\big|_A \frac{c_{i,n+1} - c_{i-1,n+1}}{\Delta z_A} = q_{io} \tag{4.93}$$

όπου το ζ έχει το ρόλο του β στην εξίσωση 4.86 και επιβαρύνει τα ανάντη και κατάντη στοιχεία των παραγώγων που βρίσκονται γύρω από τον κόμβο i.

**Τρίτος τύπος οριακών συνθηκών**

Οι οριακές συνθήκες αυτού του τύπου παρουσιάζουν μια διαφοροποίηση σε σχέση με τις αντίστοιχες της εξίσωσης ροής. Η συνθήκη ολικής ροής για μια μονοδιάστατη περίπτωση είναι:

$$\tilde{q}_{zi} = q_{zi} c - D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \tag{4.94}$$

που δεν υπάρχει αντίστοιχη στην εξίσωση της ροής. Η συνθήκη αυτή περιγράφει τον τρίτο τύπο οριακών συνθηκών (Robbins) που δίνεται και με τη μορφή:

$$\tilde{q}_{zi} = q_{zi} c_{i,n+1} - \left[ \zeta D\big|_B \frac{c_{i+1,n+1} - c_{i,n+1}}{\Delta z_B} + (1-\zeta) D\big|_A \frac{c_{i,n+1} - c_{i-1,n+1}}{\Delta z_A} \right] = \tilde{q}_{zio} \tag{4.95}$$

όπου ζ είναι η παράγωγος στο χώρο του συντελεστή βάρους.

### 4.10.2 Παράμετροι του μοντέλου

Ο συντελεστής διασποράς D, έχει σημαντικό ρόλο στην εξίσωση μεταφοράς παρόμοιο, με αυτό της υδραυλικής αγωγιμότητας K στην εξίσωση της ροής του υπόγειου νερού και εξαρτάται από την ταχύτητα του υπόγειου νερού.

Η ταχύτητα μεταβάλλεται στο χώρο και έτσι, όλα τα στοιχεία του τανυστή του συντελεστή διασποράς εκτός των διαγωνίων είναι διάφορα του μηδενός. Το διάνυσμα της ροής λόγω της διασποράς είναι:

$$q_D = - D \cdot \nabla c \tag{4.96}$$

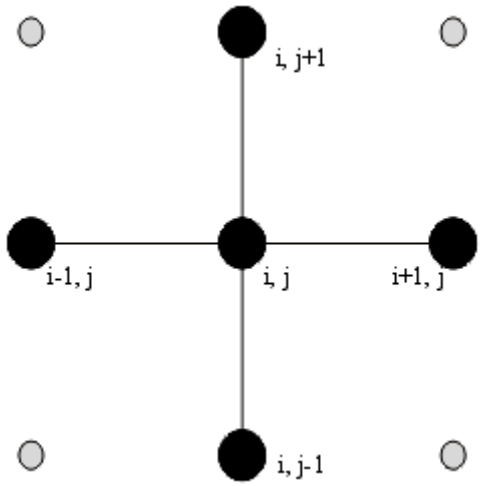
και στην πλήρη μορφή του είναι:

$$\begin{Bmatrix} q_{Dx} \\ q_{Dy} \\ q_{Dz} \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial c}{\partial x} \\ \frac{\partial c}{\partial y} \\ \frac{\partial c}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{4.97}$$

Επιπλέον,

$$\frac{\partial q_{Dx}}{\partial x} = -\left[ D_{xx} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_{xy} \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + D_{xz} \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial z} \right] \tag{4.98}$$

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών δεν εφαρμόζεται με επιτυχία για την προσέγγιση παραγώγων ως προς δύο μεταβλητές. Στο σχήμα 4.13 η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιεί ένα διάγραμμα πέντε σημείων.




**Σχήμα 4.13. Διάγραμμα πεπερασμένων διαφορών που απεικονίζει τη διάταξη των πέντε και των εννιά κομβικών σημείων.**

Στο διάγραμμα των πέντε σημείων οι κόμβοι συνδέονται με ευθείες γραμμές και αναπαριστούν τις παραγώγους δευτέρας τάξεως εκτός από αυτές που είναι ως προς δύο μεταβλητές. Η απεικόνιση των παραγώγων ως προς δύο μεταβλητές γίνεται με τους εννιά κόμβους, τα πέντε σημεία και άλλα τέσσερα στις γωνίες, που δε συνδέονται μεταξύ τους με ευθείες γραμμές. Το διάγραμμα με τα εννιά σημεία χρησιμοποιείται πολύ σπάνια γιατί ο πίνακας που δημιουργείται είναι μεγάλος και είναι δύσκολος ο υπολογισμός των αλγεβρικών εξισώσεων.

Τα ορθογώνια πεπερασμένα στοιχεία σχηματίζουν ένα διάγραμμα εννέα σημείων ενώ τα τριγωνικά στοιχεία σχηματίζουν ένα ακανόνιστο διάγραμμα, που ο αριθμός των κόμβων εξαρτάται από τη διάταξη των πεπερασμένων στοιχείων.

Γενικά, οι παράγωγοι ως προς δύο μεταβλητές στην εξίσωση μεταφοράς, απεικονίζονται καλύτερα με τις εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων απ' ότι με τις εξισώσεις των πεπερασμένων διαφορών. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών, οι πληροφορίες στους γωνιακούς κόμβους καθυστερούν ένα βήμα γεγονός, που ακινητοποιεί τον αλγόριθμο.

Ο συντελεστής διασποράς στην εξίσωση μεταφοράς πρέπει να καθορίζεται σε κάθε κόμβο, όπως και στην περίπτωση της υδραυλικής αγωγιμότητας στην εξίσωση της ροής. Έτσι, οι παράμετροι που πρέπει να οριστούν είναι η διαμήκης και η εγκάρσια διασπορά. Η ταχύτητα του υπόγειου

νερού που προκύπτει από τη λύση της εξίσωσης της ροής, στη συνέχεια, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διασποράς σε κάθε κόμβο.

Ο όρος της συμμεταφοράς στις εξισώσεις μεταφοράς απαιτεί τον καθορισμό της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού σε κάθε στοιχείο. Η ταχύτητα προκύπτει μέσω του νόμου Darcy, από τα υδραυλικά ύψη (ή το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα) που υπολογίζονται από την εξίσωση της ροής.

Τα τριγωνικά στοιχεία περιλαμβάνουν σε κάθε ένα από τους τρεις κόμβους τους και μία τιμή υδραυλικού ύψους, ορίζοντας έτσι, το επίπεδο σε κάθε στοιχείο. Η κλίση αυτού του επιπέδου, του υδραυλικού ύψους στην περίπτωση αυτή, είναι σταθερή και κατ' επέκταση η ταχύτητα είναι επίσης σταθερή.

Στα ορθογώνια στοιχεία η ταχύτητα προσδιορίζεται από τέσσερις κόμβους και είναι δυνατόν να μεταβάλλεται γραμμικά επί των στοιχείων.

Η ασυμμετρία, που σχετίζεται με τις προσεγγίσεις των προαναφερόμενων μεθόδων των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, απαιτεί, οι ανάντη ταχύτητες να χρησιμοποιηθούν σαν συντελεστές για τις πρώτες παραγώγους στη συγκέντρωση.

Επιπλέον, πρέπει να οριστούν για ολόκληρο το μοντέλο, το πορώδες και ο συντελεστής καθυστέρησης είτε σε κάθε κόμβο είτε σε κάθε στοιχείο.

### 4.10.3 Φορτίσεις του μοντέλου

Όπως στην εξίσωση της ροής, έτσι και στην εξίσωση μεταφοράς, οι φορτίσεις είναι η βροχόπτωση, η άντληση και ο εμπλουτισμός. Ο εμπλουτισμός περιγράφεται ως $Q(c-c_o)$ όπου το Q είναι ο ρυθμός εμπλουτισμού ή άντλησης και $c_o$ είναι η συγκέντρωση του νερού που σχετίζεται με το Q. Με βάση αυτά τα στοιχεία το μοντέλο καθορίζει και εκτελεί την εισαγωγή του όρου της ροής της μάζας.

Αν η συγκέντρωση $c_o$ του υδροφορέα γίνει ίση με τη συγκέντρωση του εισερχόμενου νερού $c_o$, ο όρος $Q(c-c_o)$ απαλείφεται. Κατά την άντληση του νερού, η συγκέντρωση του εναπομένοντος νερού c είναι ίση με τη συγκέντρωση του νερού που αντλείται $c_o$ κι έτσι, ο όρος $Q(c-c_o)$ εκμηδενίζεται. Έτσι, φαινομενικά η άντληση δεν επηρεάζει την εξίσωση μεταφοράς, παρ' όλα αυτά όμως, τα πηγάδια άντλησης επηρεάζουν την ταχύτητα που εμφανίζεται στην εξίσωση μεταφοράς στον όρο της συμμεταφοράς $(q \cdot \nabla c)$ [Pinder, 2001].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

## 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ "Argus ONE"

Το Argus ONE είναι ένα ανεξάρτητο μοντέλο συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών που χρησιμοποιείται για την αριθμητική μοντελοποίηση. Χρησιμοποιώντας μια εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου, σε συνδυασμό με τη δυνατότητά του δημιουργίας γραφικών, το Argus ONE έχει τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης διεπιφανειών σε αριθμητικά μοντέλα.

Το GIS - Argus ONE παρέχει ένα περιβάλλον όπου διάφορες πληροφορίες συντίθενται με εύκολο τρόπο ώστε να εισαχθούν στα αριθμητικά μοντέλα. Όπως και στα άλλα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών, οι διάφοροι τύποι πληροφοριών αποθηκεύονται σε "layers" (επίπεδα), τα οποία ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί.

Με τη βοήθεια του προγράμματος αυτού δημιουργούνται πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών. Οι πληροφορίες δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μαθηματικές και ορθολογικές συναρτήσεις καθώς και συναρτήσεις του χώρου καθορίζοντας έτσι, τις σχέσεις μεταξύ των επιπέδων.

Το Argus ONE έχει τη δυνατότητα να συνθέτει αυτόματα νέες πληροφορίες ή αλλαγές στα πλέγματα σύμφωνα με τις σχέσεις και τους κανόνες του εννοιολογικού μοντέλου διαβεβαιώνοντας έτσι ότι τα στοιχεία είναι έτοιμα να εξαχθούν στο μοντέλο.

Η τεχνολογία Argus' *Plug-in Extension (PIE)* καθιστά ικανή την επικοινωνία μεταξύ εξωτερικών προγραμμάτων και του Argus ONE. Τέτοια εξωτερικά προγράμματα μπορεί να είναι αριθμητικά μοντέλα και αλγόριθμοι.

Η χρήση του Argus ONE βασίζεται στα διάφορα "layers" που προαναφέρθηκαν τα οποία ουσιαστικά είναι διαφανή φύλλα εργασίας και το κάθε ένα περιέχει κάποιες πληροφορίες.

Μέσα από το "Information layer" μπορεί κανείς να εισάγει, να ψηφιοποιήσει και να μεταβάλλει κάθε είδους πληροφορία σχετικά με το χώρο ή τους κόμβους όπως οι οριακές συνθήκες, οι σημειακές πηγές και δεξαμενές, η τοπογραφία και οι φυσικές παράμετροι. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες μπορεί να καθοριστεί το περίγραμμα της περιοχής μελέτης καθώς και η επιθυμητή πυκνότητα του πλέγματος ενώ στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν άλλες παράμετροι όπως το πάχος του σχηματισμού κ.λπ.

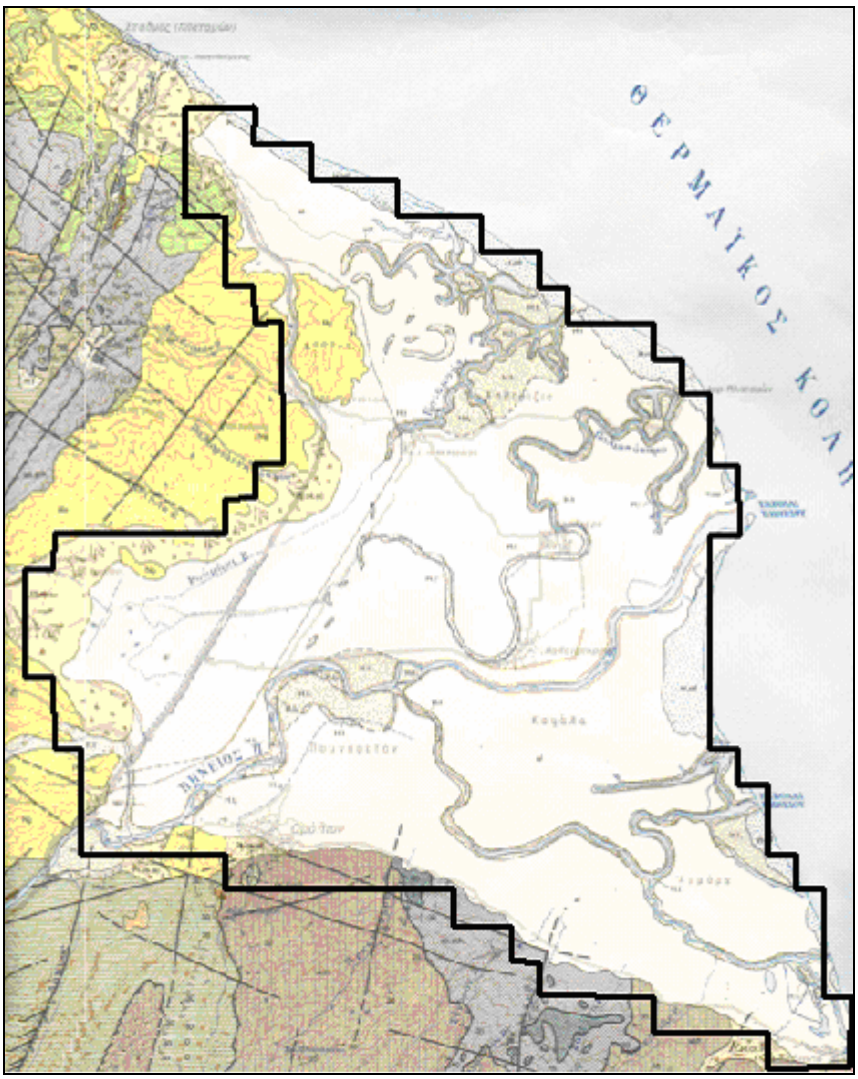
Ακόμη, από το "Data layer", είναι δυνατή η εισαγωγή και ανάγνωση διαφόρων στοιχείων, στοιχείων σχετικά με τα πλέγματα, δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί από άλλα προγράμματα

– το PTC στην περίπτωση αυτή – όπου στη συνέχεια μπορεί να γίνει η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Επίσης, από το "Map layer" γίνεται η εισαγωγή ψηφιοποιημένου χάρτη της περιοχής μελέτης για τον καλύτερο προσανατολισμό στην περιοχή [Olivares, 2002, ArgusONE User's Guide].

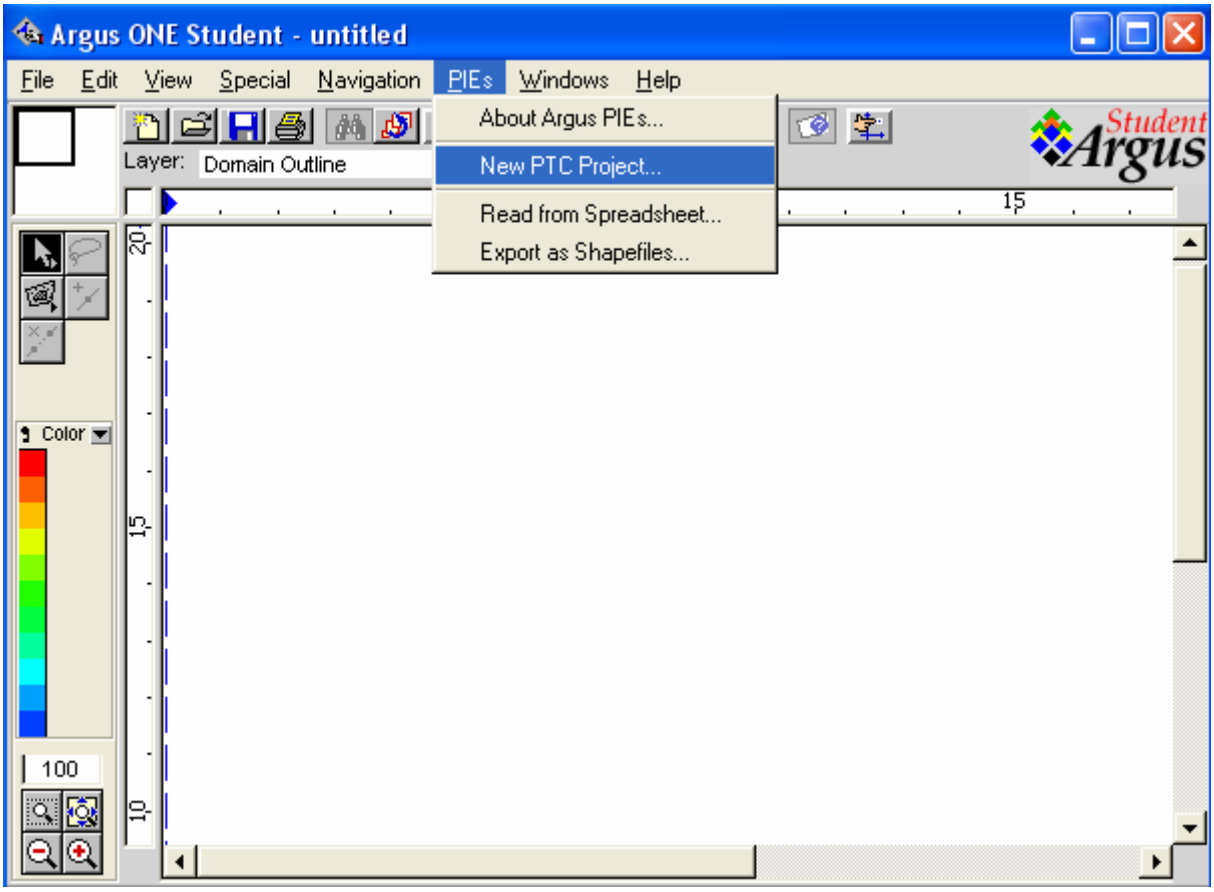
## 5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Στο χάρτη 5-1 απεικονίζεται η περιοχή του Δέλτα Πηνειού στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί το πρόγραμμα Argus ONE.




**Χάρτης 5-1. Η περιοχή του Δέλτα Πηνειού στην οποία πρόκειται να εφαρμοστεί το μοντέλο Argus ONE.**

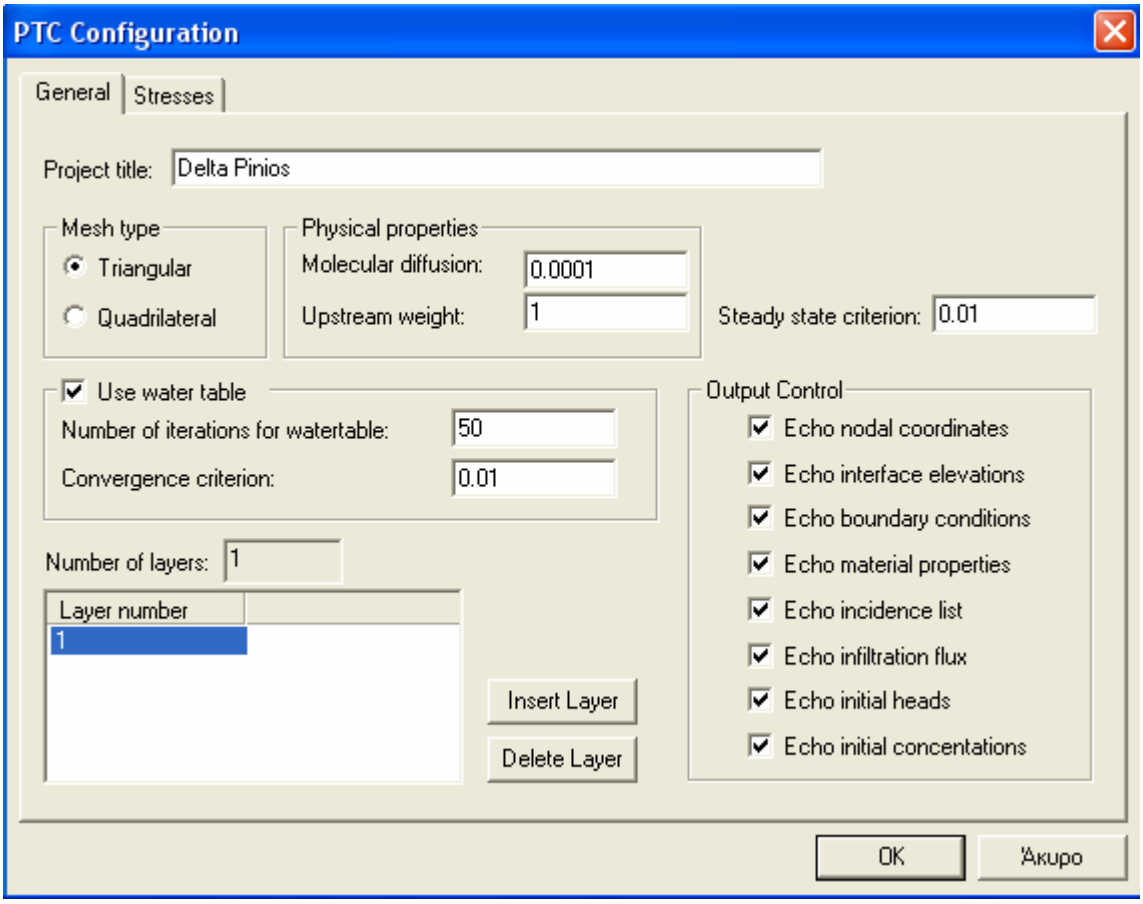
Αρχικά, μετά την έναρξη του προγράμματος Argus ONE επιλέγουμε από το φάκελο "PIEs" το "New PTC project", όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.




**Σχήμα 5.1. Η επιλογή "New PTC project" από το φάκελο "PIEs".**

Έτσι, εμφανίζεται το παράθυρο PTC Configuration του σχήματος 5.2 στο οποίο γίνεται η εισαγωγή κάποιων γενικών στοιχείων όπως:

1. το θέμα της εργασίας, που είναι το Δέλτα του Πηνειού ποταμού
2. ο τύπος του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί και ο οποίος θα είναι τριγωνικός αφού είναι πιο αξιόπιστο
3. ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, ίσος με 0,0001
4. ο συντελεστής βάρους, ίσος με 1
5. το κριτήριο επίτευξης συνθήκης σταθερής ροής σύμφωνα με το οποίο, η διαφορά των διαδοχικών χρονικών βημάτων ροής να είναι μικρότερη ή ίση με 0,01.




**Σχήμα 5.2. Εισαγωγή γενικών στοιχείων.**

Ακόμη επιλέγεται η χρήση του "water table" αφού στην περιοχή μελέτης ο υδροφορέας θεωρούμε ότι είναι ελεύθερος και εισάγεται:

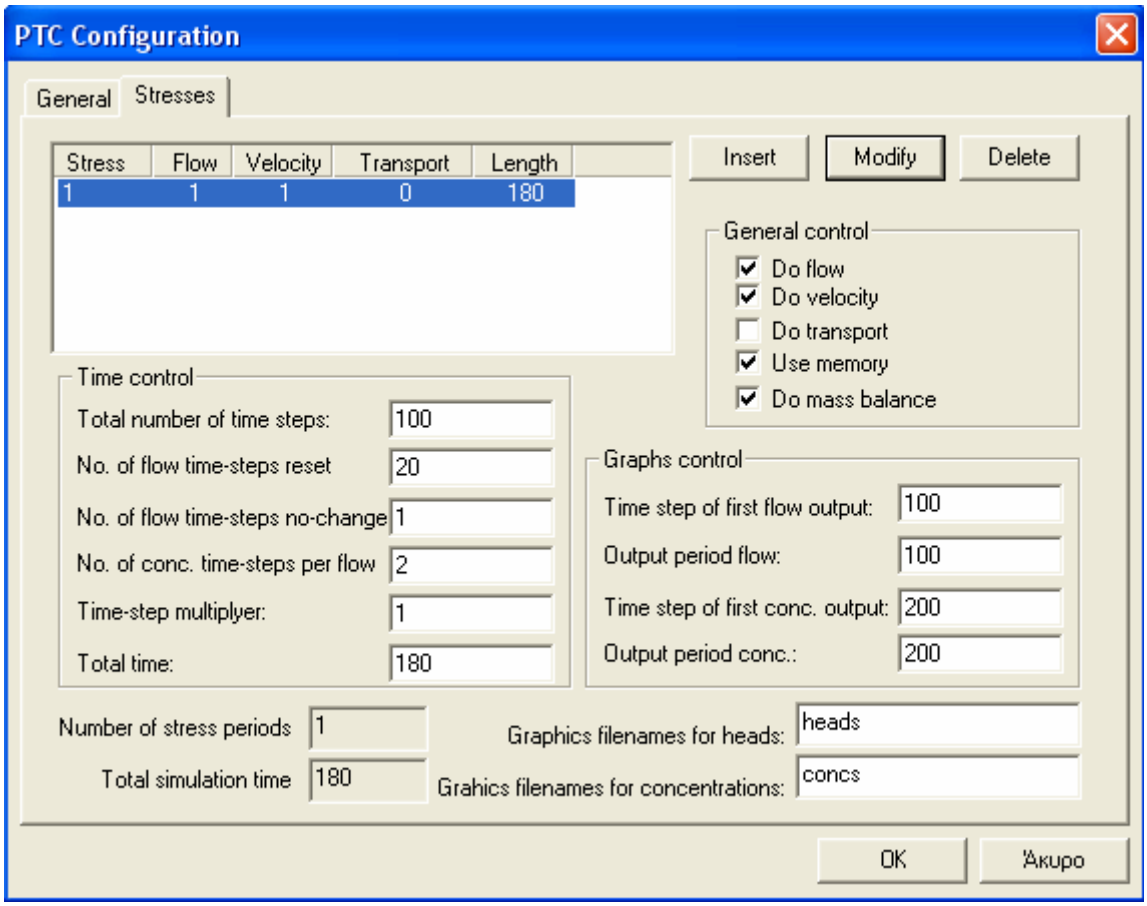
1. ο αριθμός των επαναλήψεων για τον υδροφόρο ορίζοντα, ίσος με 50
2. το κριτήριο σύγκλισης για αυτές τις επαναλήψεις, ίσο με 0,01

Επίσης, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ο αριθμός των εδαφικών στρωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο κι έτσι, επιλέγεται ένα στρώμα, αφού το μοντέλο πρόκειται να προσομοιώσει τον ανώτερο υδροφορέα. Το σύνολο Output Control περιλαμβάνει οκτώ επιλογές οι οποίες ελέγχουν τον τύπο των εξαγόμενων του PTC. Σκοπός της μορφής "echo" είναι, να δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιβεβαιώνει τις πληροφορίες που εισάγονται στο PTC (π.χ αν δημιουργηθεί κάποιο πρόβλημα κατά την εκτέλεση του μοντέλου).

Ανοίγοντας το φάκελο "Stresses" καθορίζεται ο αριθμός και οι τιμές των παραμέτρων που μεταβάλλονται με τη φόρτιση, σχήμα 5.3. Στο σύνολο "General control" υποδεικνύεται αν το μοντέλο πρόκειται να προσομοιώσει μόνο τη ροή, επιλέγοντας το "Do flow" ή τη ροή και τη μεταφορά, σημειώνοντας και το "Do transport". Επιπλέον, αν απαιτούνται και υπολογισμοί της

ταχύτητας σημειώνεται και το “Do velocity”. Η επιλογή “Use memory” θα πρέπει πάντα να είναι επιλεγμένη ενώ προαιρετικό είναι το ισοζύγιο μάζας και μπορεί να ενεργοποιηθεί σημειώνοντας το “Do mass balance”. Πάντως επειδή η παρούσα έκδοση του PTC συμπεριλαμβάνει τη σύνταξη ενός ισοζυγίου μάζας γι’ αυτό, θα πρέπει να επιλέγεται.

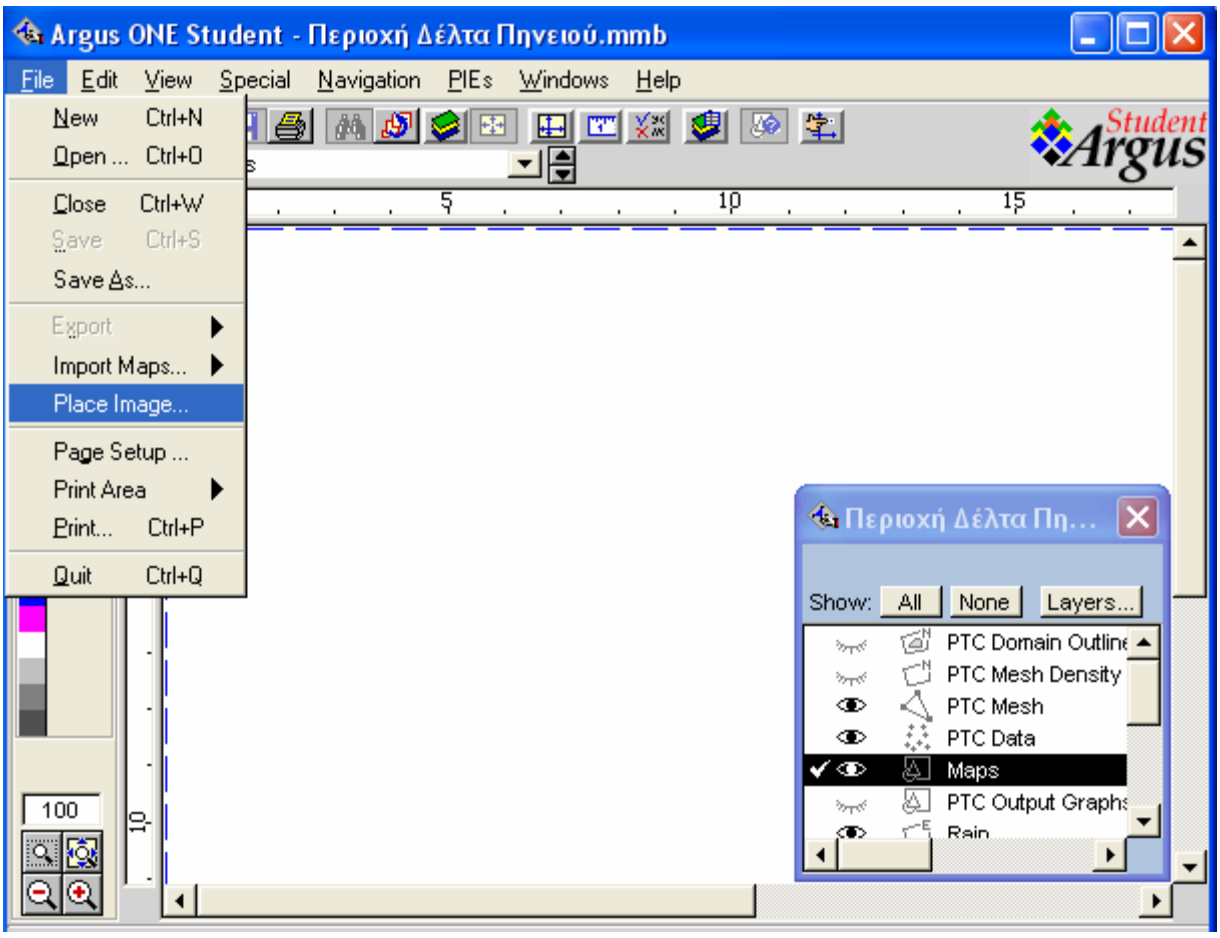
Στην πρώτη φάση εφαρμογής του μοντέλου ελέγχεται η ροή (“Do flow”), η ταχύτητα ροής (“Do velocity”), το ισοζύγιο μάζας (“Do mass balance”) και η χρήση μνήμης (“Use memory”).




**Σχήμα 5.3. Εισαγωγή στοιχείων φόρτισης.**

Στο σύνολο “Time control” καθορίζεται ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων, ίσος με 100 (“Total number of time steps”), ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής πέρα από τον οποίο γίνεται επαναρίθμηση του μοντέλου, ίσος με 20 (“No. of flow time-steps reset”), ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής πέρα από τον οποίο δεν υπάρχει αλλαγή – λόγω του πολλαπλασιαστή = 1 – (“No. of flow time-steps no-change”). Ακόμη, προσδιορίζεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων συγκέντρωσης μέσα σε ένα χρονικό βήμα ροής, ίσος με 2 (“No. of conc. time-steps per flow”), ο πολλαπλασιαστής για κάθε χρονικό βήμα, ίσος με 1 (“Time-step multiplyer”) και τέλος το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης που θα είναι 180 μέρες (“Total time”). Το διάστημα

αυτό αντιπροσωπεύει την καλλιεργητική περίοδο που διαρκεί από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο και για την οποία θα γίνει η μοντελοποίηση της ροής του υπόγειου υδροφορέα. Στο σύνολο "Graphs control" καθορίζεται το χρονικό βήμα για το οποίο εξάγονται τα πρώτα αποτελέσματα για τη ροή, το οποίο θα είναι 100 ("Time steps of first flow output") καθώς και η περίοδος για την οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τη ροή, που θα είναι επίσης 100 ("Output period flow"). Ακόμη, προσδιορίζεται το χρονικό βήμα για το οποίο εξάγονται τα πρώτα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση, ίσο με 200 ("Time step of first conc. output") όπως επίσης και η περίοδος για την οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση ίση με 200 ("Output period conc").



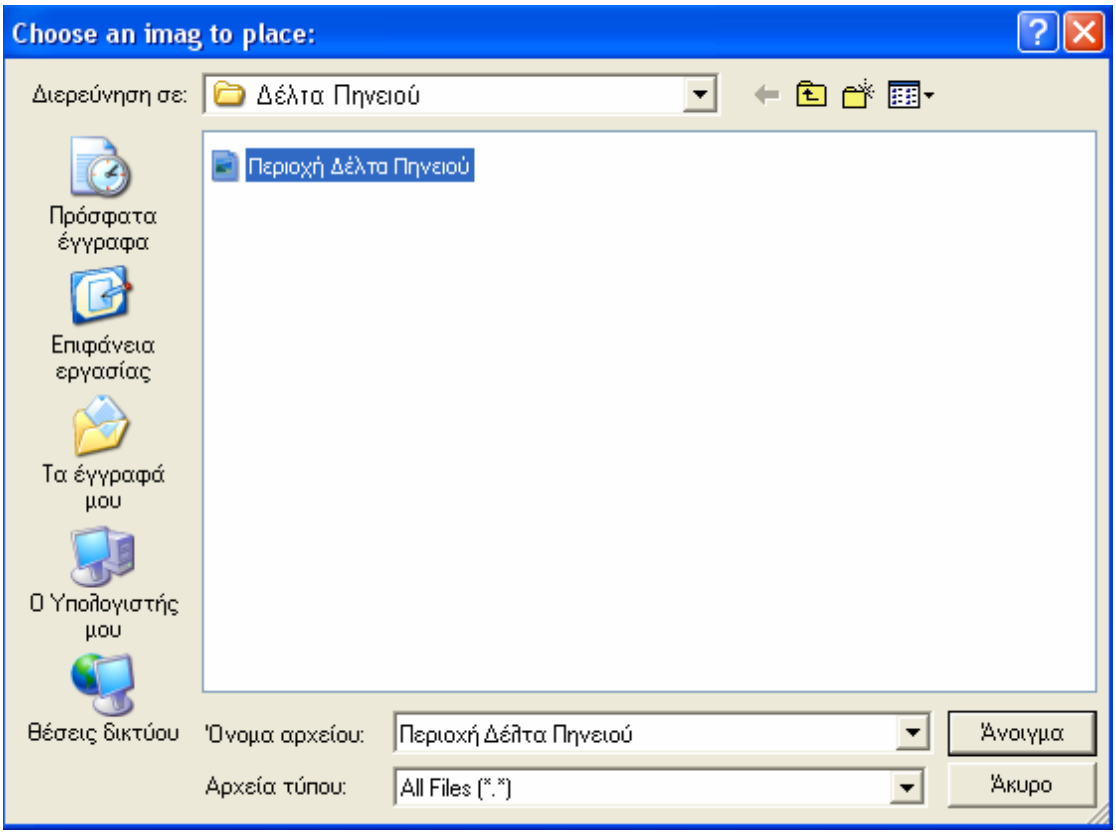

**Σχήμα 5.4. Εισαγωγή του χάρτη της περιοχής του Δέλτα Πηνειού.**

Η γραφική απεικόνιση των υδραυλικών υψών θα έχει τίτλο "heads" ενώ των συγκεντρώσεων "concs".

Μετά την εισαγωγή όλων των δεδομένων στο φάκελο αυτό επιλέγεται το "Modify" και στη συνέχεια το "OK" για να αποθηκευτούν τα στοιχεία.

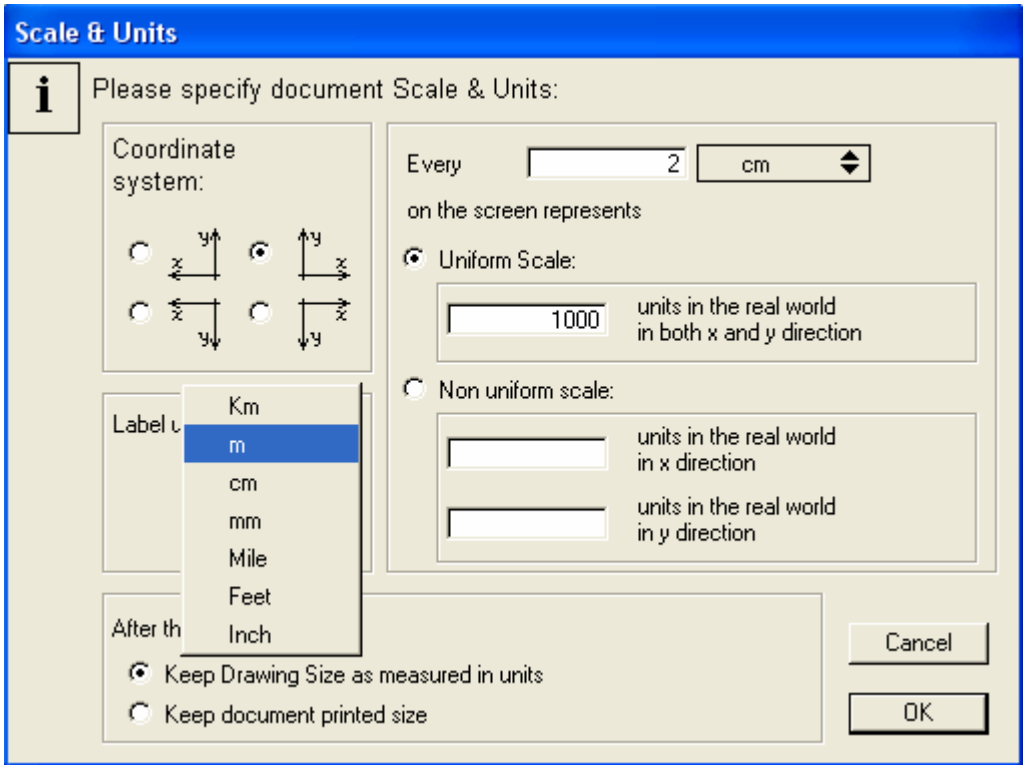
Κατόπιν, έγινε εισαγωγή του χάρτη της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001, ΙΓΜΕ], με τη μορφή .TIFF(*.TIF;*.TIFF). Πιο αναλυτικά, από τα "Layers" επιλέχτηκε το

“Maps”, ακολούθως από το φάκελο “File” επιλέχτηκε το “Place Image” και μετά ο χάρτης της περιοχής στη μορφή .TIFF(*.TIF;*.TIFF), όπως φαίνεται στα σχήματα 5.4 και 5.5.

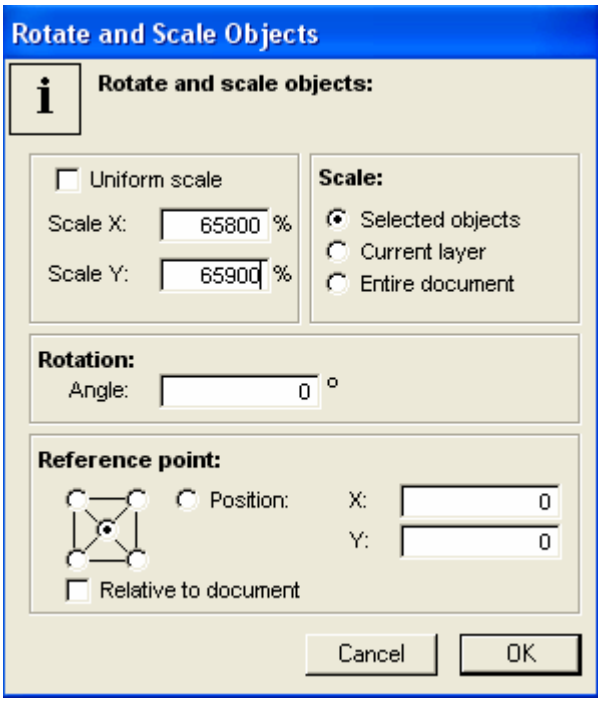



**Σχήμα 5.5. Εισαγωγή του χάρτη του Δέλτα με τη μορφή .TIFF(*.TIF;*.TIFF).**

Μετά την εισαγωγή του χάρτη στο πρόγραμμα, έπρεπε να ρυθμιστεί η κλίμακά του ώστε ο χάρτης να έχει την ίδια κλίμακα με το μοντέλο. Αρχικά επιλέχθηκε από το φάκελο “Special” το “Scale & Units..” ώστε να αλλάξουν οι μονάδες του χάρτη και να είναι σε μέτρα, σχήμα 5.6. Για να είναι ο χάρτης στη σωστή κλίμακα, επιλέχθηκε επίσης από το φάκελο “Special”, το “Rotate and Scale..” όπου εμφανίστηκε η εικόνα του σχήματος 5.7 και έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις για τη μετατροπή της κλίμακας στους άξονες x και y.




**Σχήμα 5.6. Αλλαγή στις μονάδες του χάρτη.**

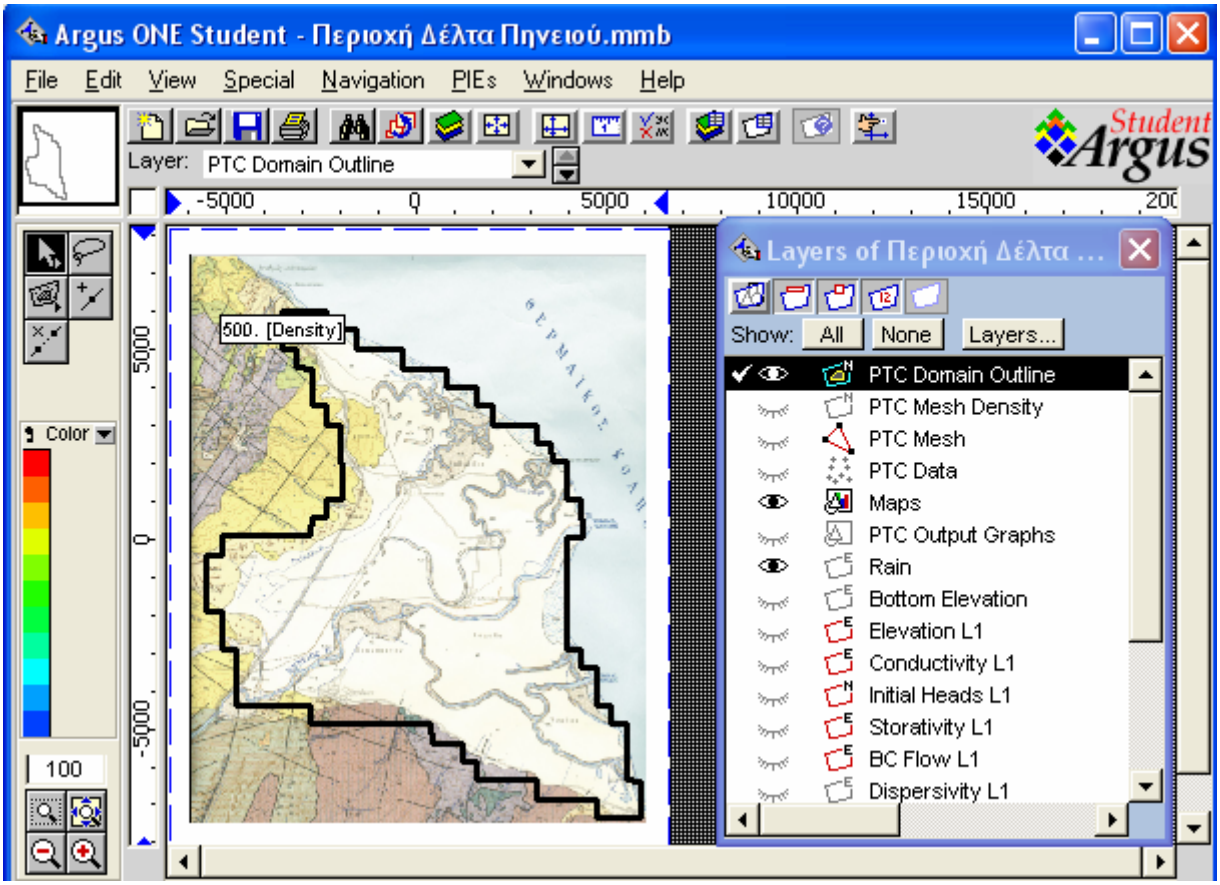



**Σχήμα 5.7. Ρύθμιση της κλίμακας του χάρτη.**

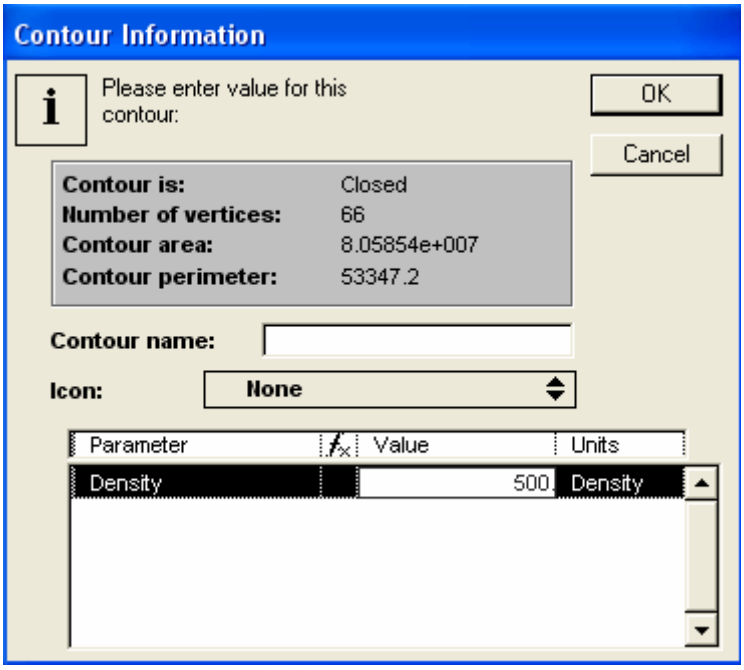
Στο πρόγραμμα του "Argus ONE" δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των μονάδων των διαφόρων μεγεθών με κάποια εντολή, έτσι γίνεται μια "συμφωνία" όπου θα χρησιμοποιούνται οι ίδιες μονάδες σε όλη τη διάρκεια του προγράμματος – το μήκος θα δίνεται σε μέτρα (m) και ο χρόνος σε μέρες (d) –. Στη συνέχεια, αφού επιλέχθηκε από τα "Layers" το "PTC Domain

Outline" σχεδιάζεται η περίμετρος της περιοχής μελέτης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8. Αμέσως μετά εμφανίζεται η εικόνα του σχήματος 5.9 ζητώντας να καθοριστεί η πυκνότητα των στοιχείων του πλέγματος, η οποία επιλέγεται να είναι 500. Όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του πλέγματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των στοιχείων που δημιουργούνται. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος μέχρι 2000 στοιχεία.

Η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος γίνεται μέσω των πλευρικών υπόγειων εισροών από τη ζώνη ανάπτυξης των κώνων κορημάτων και των πλευρικών κορημάτων στα δυτικά όρια του ομοιώματος, στην έξοδο της κοιλάδας του ποταμού Πηνειού προς τη λεκάνη του Δέλτα.
Επιπλέον, η τροφοδοσία γίνεται και από την απευθείας κατείσδυση της βροχόπτωσης που δέχεται η ζώνη των δελταϊκών αποθέσεων.
Η υδραυλική σχέση μεταξύ του Πηνειού ποταμού και του υδροφόρου συστήματος είναι αμφίδρομη και παρουσιάζει σημαντική χωρική και χρονική μεταβολή. Κατά το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, εκτιμάται ότι ο Πηνειός συμμετέχει στην τροφοδοσία του συστήματος.




**Σχήμα 5.8. Σχεδίαση της περιμέτρου της περιοχής μελέτης.**




**Σχήμα 5.9. Καθορισμός της πυκνότητας των στοιχείων του πλέγματος.**

Οι κύριοι μηχανισμοί εκφόρτισης του συστήματος εντοπίζονται στην εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων με άντληση από πηγάδια και τάφρους, για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Η κυριότερη χρήση του υπόγειου νερού είναι η άρδευση, ενώ άλλες χρήσεις όπως η ύδρευση, η κτηνοτροφία, η βιοτεχνία, τα εργοτάξια, καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό των υδατικών αναγκών. Επίσης, εκτιμάται ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του υδροφόρου συστήματος και του ποταμού Πηνειού.

Στη συνέχεια, περιγράφονται οι οριακές συνθήκες ροής της περιοχής μελέτης. Η επιλογή των κατάλληλων οριακών συνθηκών του ομοιώματος αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την επιτυχή προσομοίωση του υπό μελέτη συστήματος. Οι συνθήκες αυτές περιγράφουν την υδραυλική επικοινωνία του υπό μελέτη συστήματος με τον περιβάλλοντα υδρογεωλογικό χώρο. Έτσι, ορίστηκαν οι ακόλουθες:

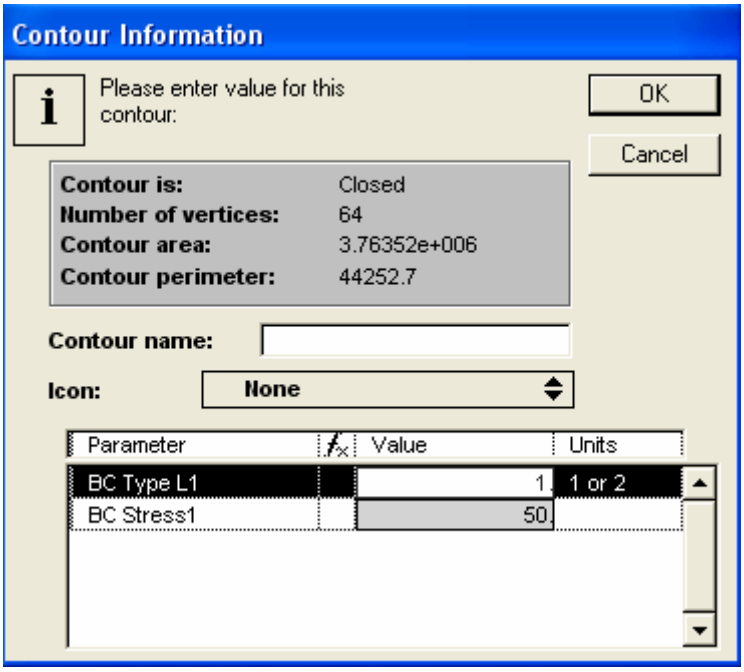
1. Συνθήκες σταθερού υδραυλικού φορτίου ($1^{ου}$ είδους)

Η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού φορτίου προϋποθέτει την ύπαρξη απεριόριστης ποσότητας νερού. Τέτοιες συνθήκες στην περιοχή μελέτης συναντώνται μόνο στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, που βρέχεται από τη θάλασσα, κατά μήκος της ακτογραμμής. Λαμβάνοντας ως στάθμη αναφοράς τον πυθμένα του υδροφόρου ορίζοντα, που βρίσκεται 50 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, το υδραυλικό φορτίο που έχει οριστεί είναι 50 m ώστε να ταυτίζεται με τη μέση ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Για την εισαγωγή των τιμών των οριακών συνθηκών στο μοντέλο απαιτείται να είμαστε στο “Layer” “BC Flow”. Μόλις σχηματιστεί η περιοχή στην οποία πρόκειται να οριστεί οριακή συνθήκη πρώτου είδους

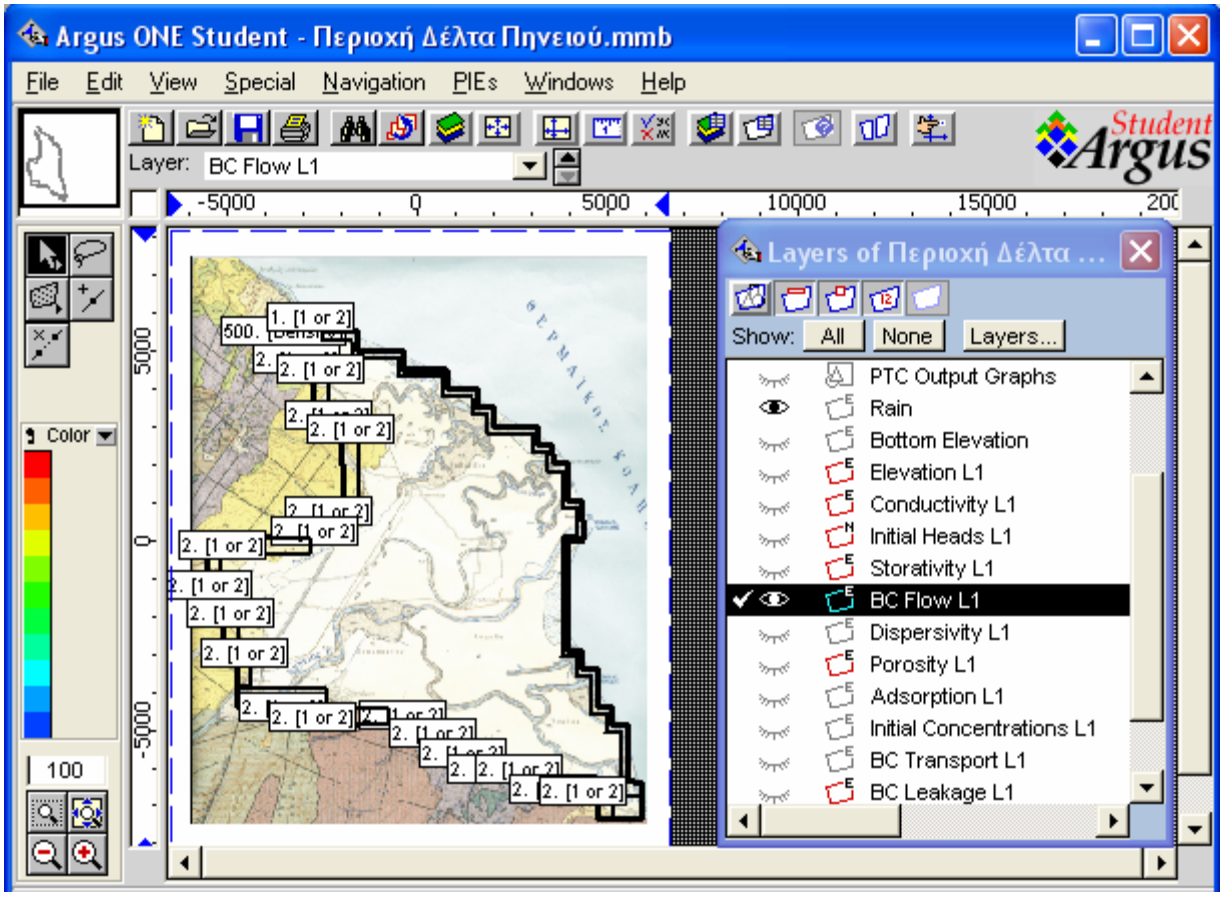
εμφανίζεται η εικόνα του σχήματος 5.10. Εκεί ζητείται να οριστεί ο τύπος της οριακής συνθήκης καθώς και η τιμή φόρτισης.

2. Συνθήκες σταθερής ροής ($2^{ου}$ είδους)

Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων συνθηκών αφού δεν προκαλεί αλλοιώσεις στο σύστημα υπόγειας ροής που προσομοιώνεται. Στο μοντέλο αυτό η οριακή συνθήκη σταθερής ροής εφαρμόζεται στο δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης για την προσομοίωση των πλευρικών εισροών στο υδροφόρο σύστημα από τους παρακείμενους γεωλογικούς σχηματισμούς του αλπικού υποβάθρου. Με τον ίδιο τρόπο που καθορίστηκαν οι τιμές οριακών συνθηκών του πρώτου είδους, ορίζονται και οι τιμές του δεύτερου είδους που είναι 200 $m^3/d$ στα σημεία εισόδου του Πηνειού ποταμού στην περιοχή μελέτης, 60 $m^3/d$ στο νοτιοδυτικό τμήμα και μηδέν στο υπόλοιπο τμήμα προκύπτοντας τελικά η εικόνα του σχήματος 5.11.




**Σχήμα 5.10. Εισαγωγή των τιμών των οριακών συνθηκών ροής του υπόγειου νερού.**

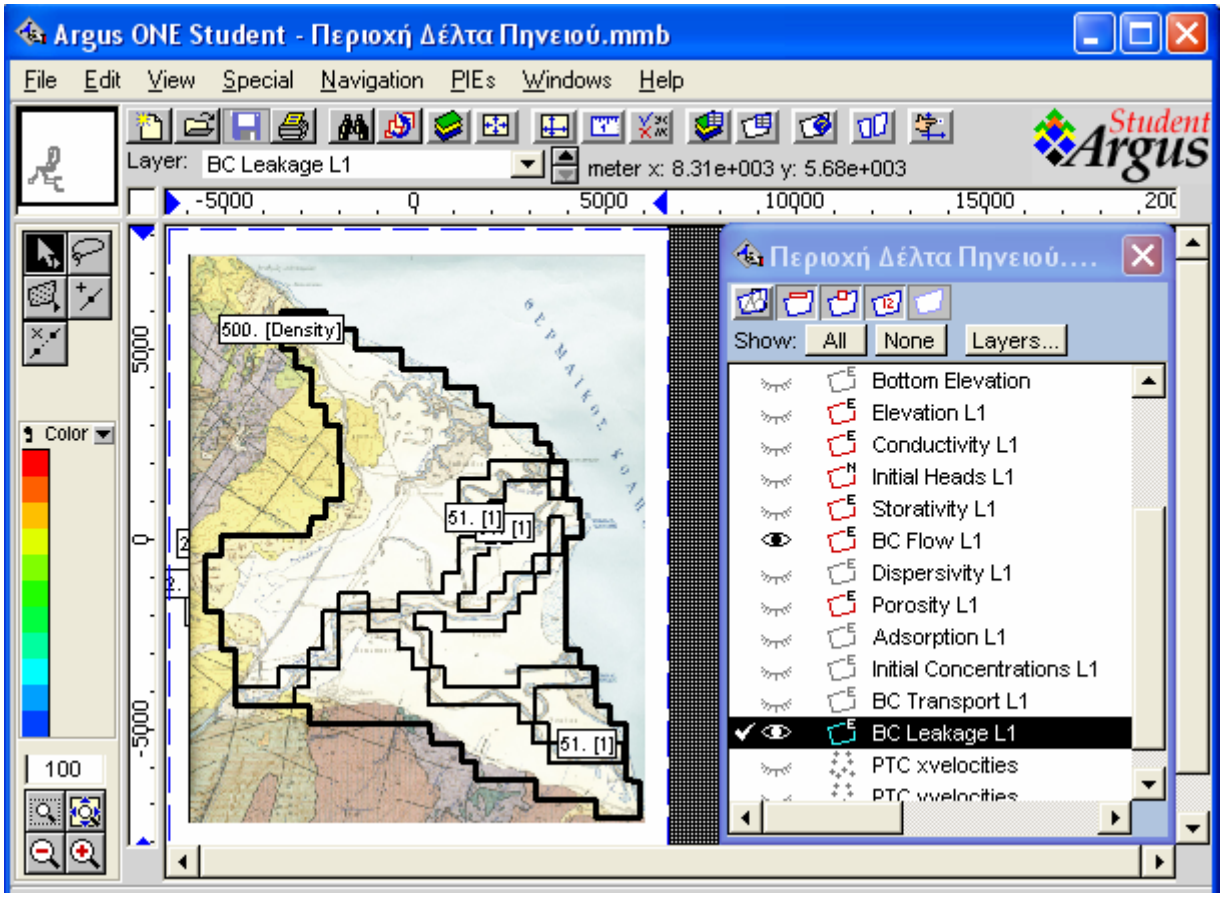



**Σχήμα 5.11. Οι οριακές συνθήκες 1ου και 2ου είδους ροής του υπόγειου νερού.**

3. Συνθήκες ροής μεταβαλλόμενης σε συνάρτηση με το υδραυλικό φορτίο (3ου είδους)

Με αυτή την οριακή συνθήκη επιτυγχάνεται η προσομοίωση της υδραυλικής επικοινωνίας που παρατηρείται εξαιτίας της υπόγειας πλευρικής μετάγγισης από ή προς παρακείμενους υδρογεωλογικούς σχηματισμούς καθώς επίσης και λόγω της τροφοδοσίας ή εκφόρτισης του υδροφόρου συστήματος από και προς τα επιφανειακά υδατορεύματα.

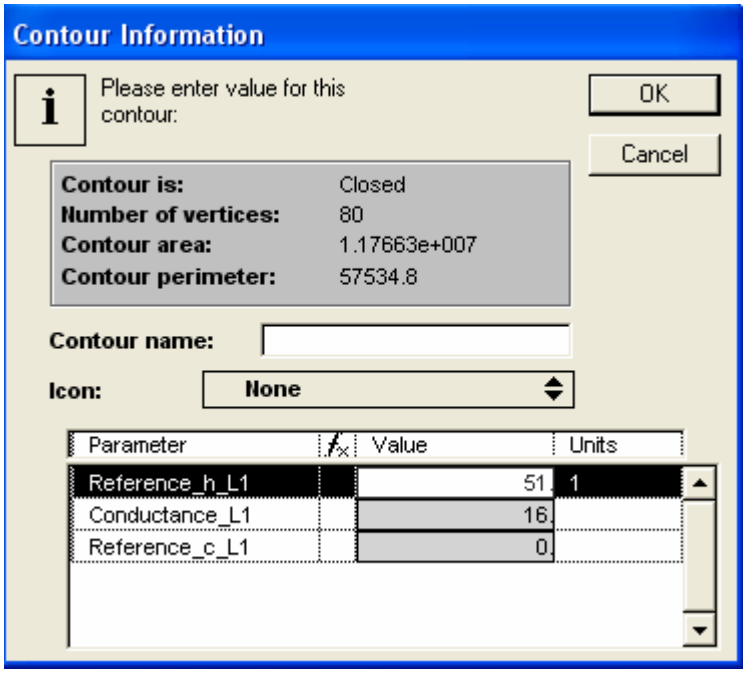
Για τις ανάγκες του μοντέλου επιλέχθηκε αυτός ο τύπος ομοιώματος προκειμένου να προσομοιωθεί η αμφίδρομη υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του υδροφόρου συστήματος και του ποταμού Πηνειού. Οι συνθήκες αυτές έχουν οριστεί τόσο κατά μήκος της κύριας κοίτης του Πηνειού, όσο και κατά μήκος των δευτερευουσών, ώστε να είναι δυνατή η αποτελεσματική προσομοίωση και διερεύνηση της πιθανής υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των επιφανειακών και των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης. Ο καθορισμός των τιμών της οριακής συνθήκης τρίτου είδους έγινε με παρόμοιο τρόπο όπως και για τις άλλες οριακές συνθήκες αφού προηγουμένως επιλεχθεί το “Layer” “BC Leakage” όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12.




**Σχήμα 5.12. Η οριακή συνθήκη 3ου είδους ροής του υπόγειου νερού.**

Για την περιγραφή της οριακής συνθήκης τρίτου είδους είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων δεδομένων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.13. Η παράμετρος Reference head εκφράζει το άθροισμα του υδραυλικού ύψους του υδροφόρου συστήματος, που είναι 50 m και του ύψους της στάθμης του νερού του ποταμού, που είναι 1 m, προκύπτοντας έτσι, η τιμή του Reference_h_L1 51 m. Η παράμετρος Conductance εκφράζει την υδραυλική αγωγιμότητα ανά μονάδα βάθους και ορίζεται ως το πηλίκο της υδραυλικής αγωγιμότητας, που είναι 8 m/d, προς το πάχος της ζώνης δια μέσω της οποίας λαμβάνει χώρα η διαρροή, που θεωρείται 0,5 m, προκύπτοντας έτσι η τιμή της Conductance_L1 16 m. Η παράμετρος Reference concentration εκφράζει τη συγκέντρωση αναφοράς στη θέση από την οποία θεωρείται ότι αρχίζει η διαρροή του ρύπου και η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι μηδενική.

Εξαιτίας της απουσίας λεπτομερών δεδομένων με βάση τα οποία θα μπορούσαν να οριστούν με ακρίβεια οι τιμές των παραμέτρων αυτών, αυτές έχουν οριστεί με τρόπο ώστε με το συνδυασμό τους να επιτυγχάνεται επαρκώς η προσομοίωση των μηχανισμών υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ της υπόγειας υδροφορίας και του ποταμού.

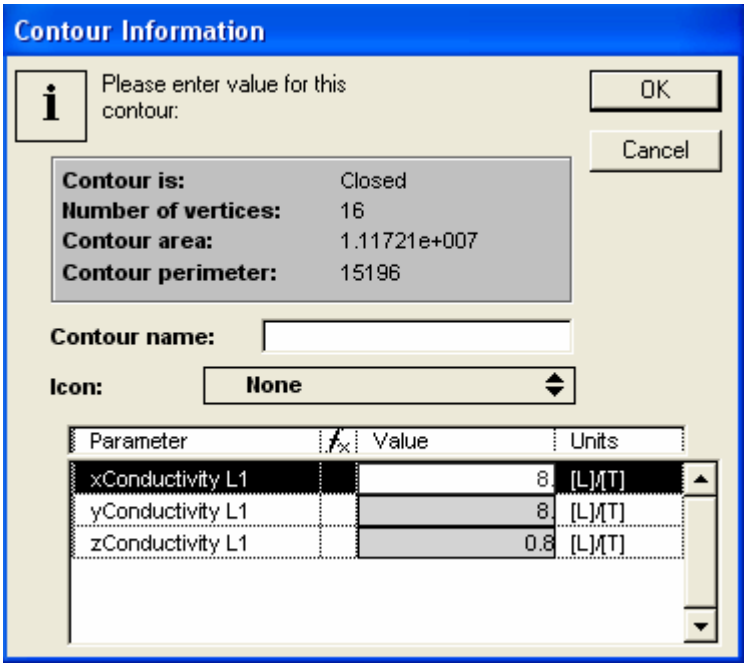



**Σχήμα 5.13. Καθορισμός των παραμέτρων στο "Layer" "BC Leakage".**

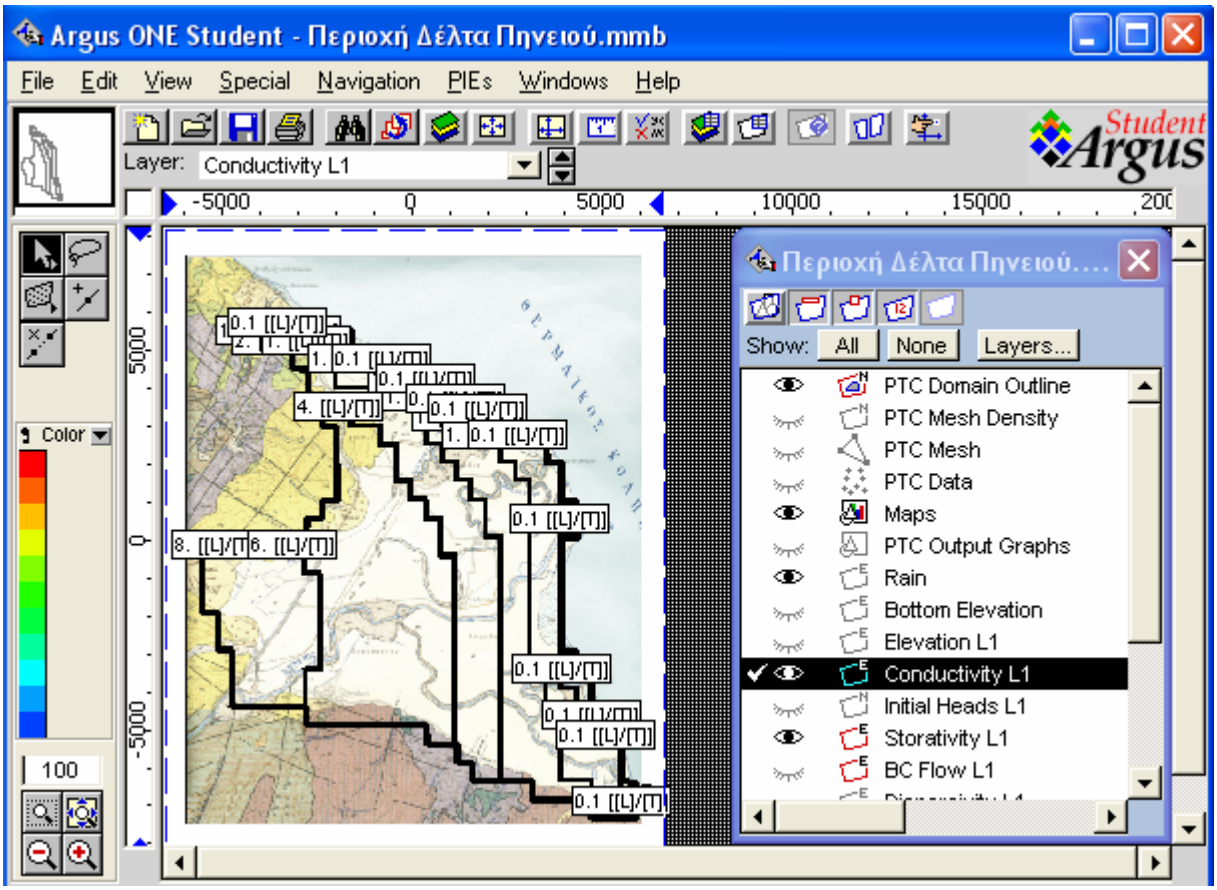
Για την επίλυση του ομοιώματος υπόγειας ροής απαιτείται ο ορισμός της κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας K. Αρχικά επιλέγεται το "Layer" "Conductivity" και σχηματίζουμε τις ζώνες της υδραυλικής αγωγιμότητας. Μόλις δημιουργηθεί μία ζώνη εμφανίζεται η εικόνα του σχήματος 5.14, όπου ζητείται να καθοριστεί η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Οι υψηλότερες τιμές έχουν κατανεμηθεί στις ανάντη περιοχές του συστήματος και προοδευτικά μειώνονται προς την παράκτια ζώνη. Τελικά, η περιοχή διαιρείται σε 6 ζώνες όπου η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται από 0,1 – 8 m/d, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.15.

Με παρόμοιο τρόπο εισάγεται στο μοντέλο και η υδροχωρητικότητα S στο "Layer" "Storativity". Στις έξι ζώνες που έχουν σχηματιστεί, εισάγεται και η αντίστοιχη τιμή της υδροχωρητικότητας S προκύπτοντας τελικά το σχήμα 5.16.

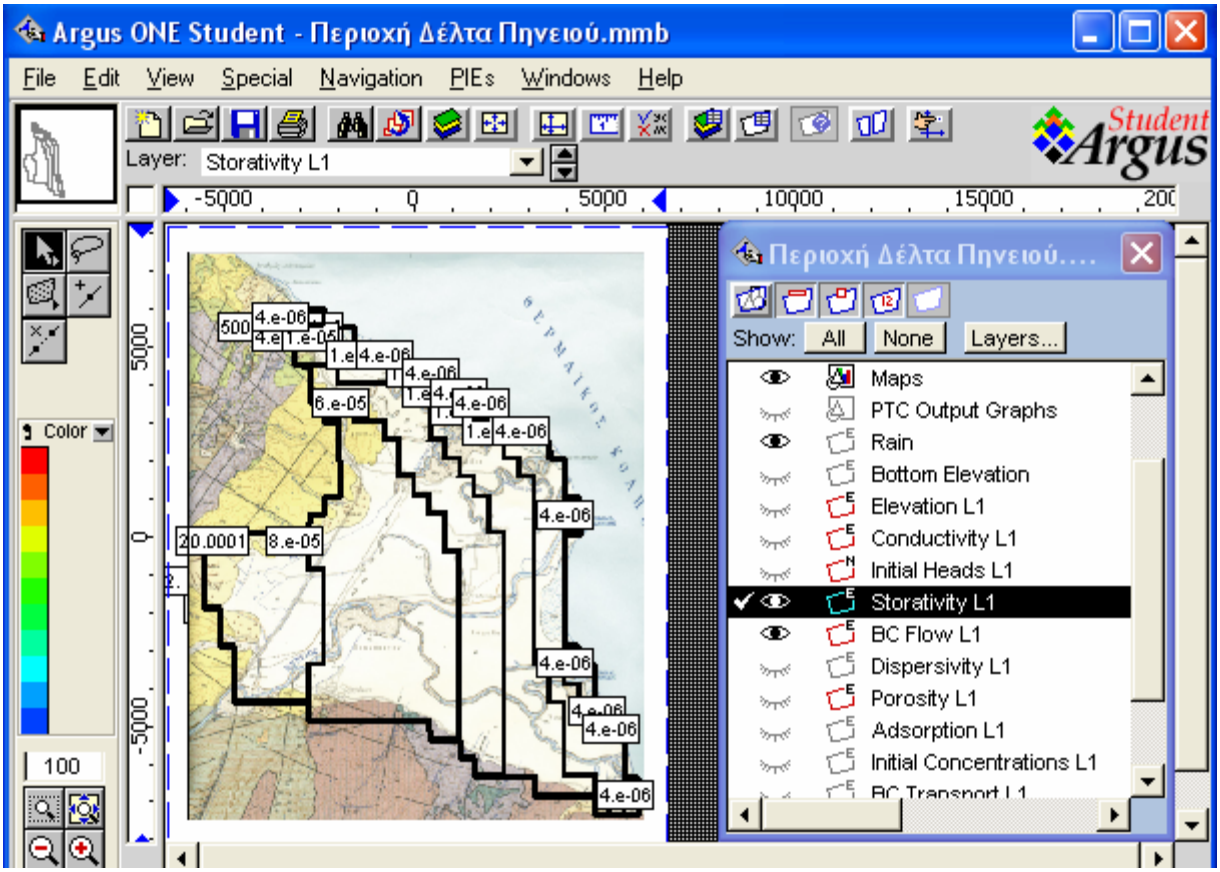
Ακόμη, για τη λειτουργία του ομοιώματος διασποράς ρύπων είναι απαραίτητη η κατανομή της παραμέτρου του ενεργού πορώδους του υλικού που δομεί το υδροφόρο σύστημα. Επιλέγεται λοιπόν, το "Layer" "Porosity" και σε κάθε ζώνη διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας και υδροχωρητικότητας καθορίζεται το αντίστοιχο πορώδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.17.



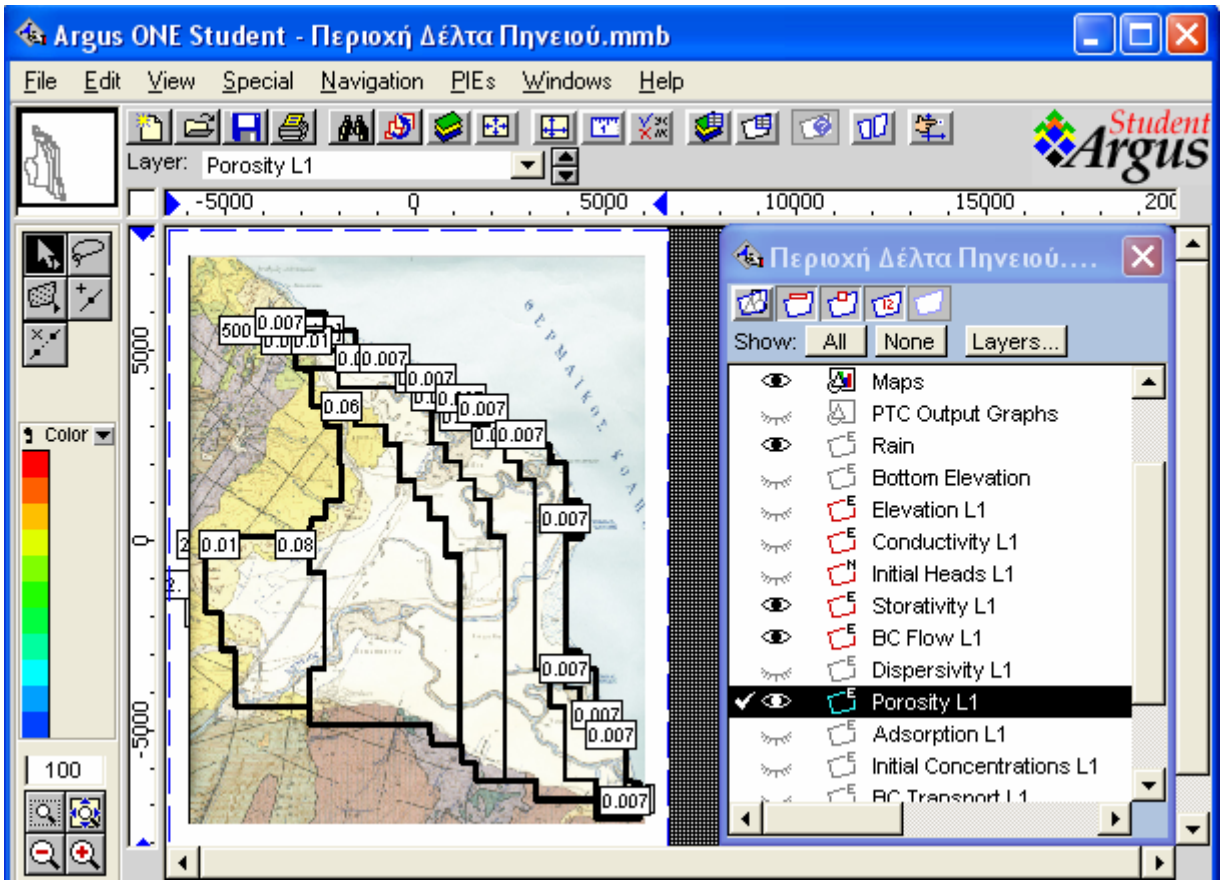

**Σχήμα 5.14. Εισαγωγή των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στην περιοχή μελέτης.**




**Σχήμα 5.15. Σχηματισμός των ζωνών υδραυλικής αγωγιμότητας.**




**Σχήμα 5.16. Εισαγωγή των τιμών της υδροχωρητικότητας στις ζώνες της περιοχής μελέτης.**




**Σχήμα 5.17. Εισαγωγή των τιμών του πορώδους στην περιοχή μελέτης.**

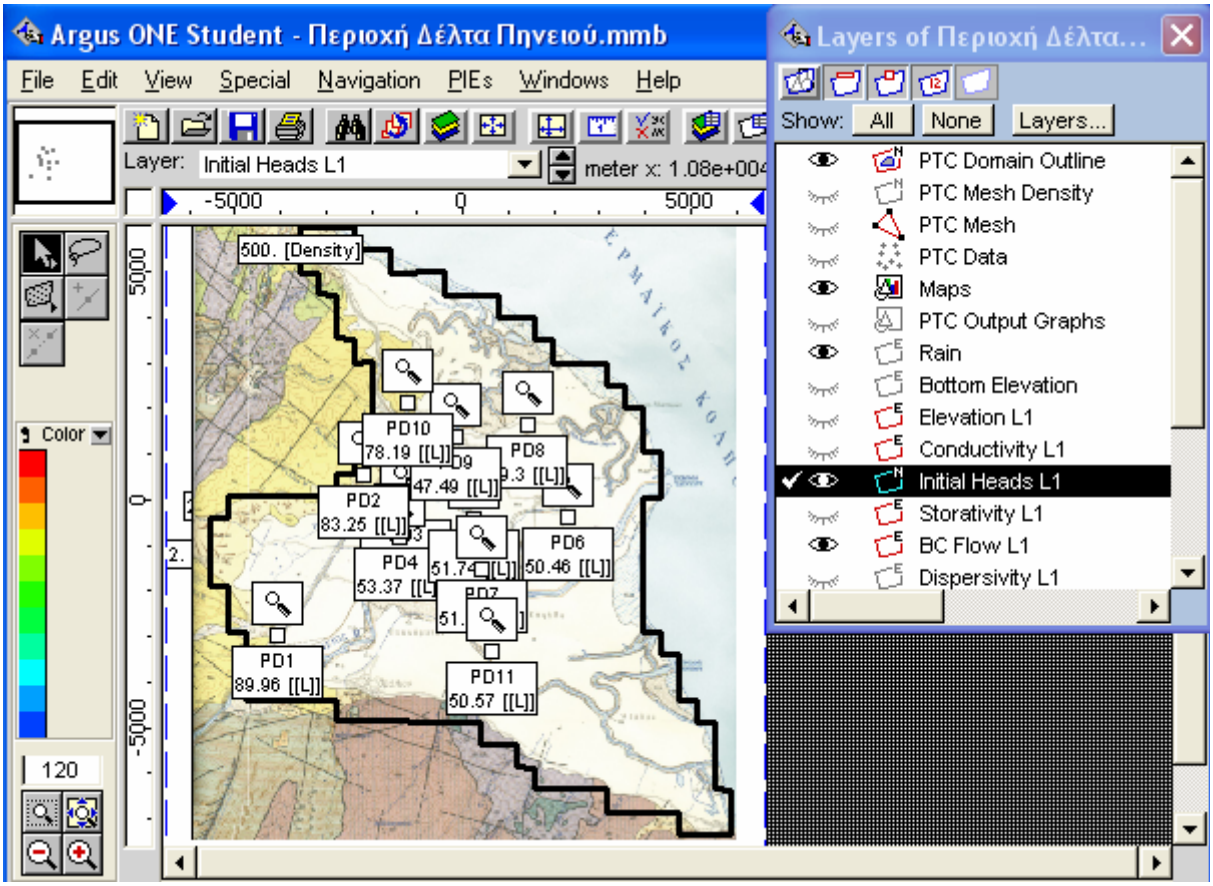
Στη συνέχεια, εισάγονται στο μοντέλο οι τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών που προέρχονται από μετρήσεις που διεξήχθησαν από το ΕΘΙΑΓΕ [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001] κατά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου του 2000.

**Πίνακας 5-1. Αρχικά υδραυλικά ύψη τον Απρίλιο του 2000.**

| Ημερ/νία | PD 1 | PD 2 | PD 3 | PD 4 | PD 5 | PD 6 | PD 7 | PD 8 | PD 9 | PD 10 | PD 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Απρίλιος 2000 | 9.96 | 3.25 | 2.76 | 3.37 | 1.74 | 0.46 | 1.42 | -0.7 | -2.51 | -1.81 | 0.57 |

* Σημείο αναφοράς η επιφάνεια της θάλασσας

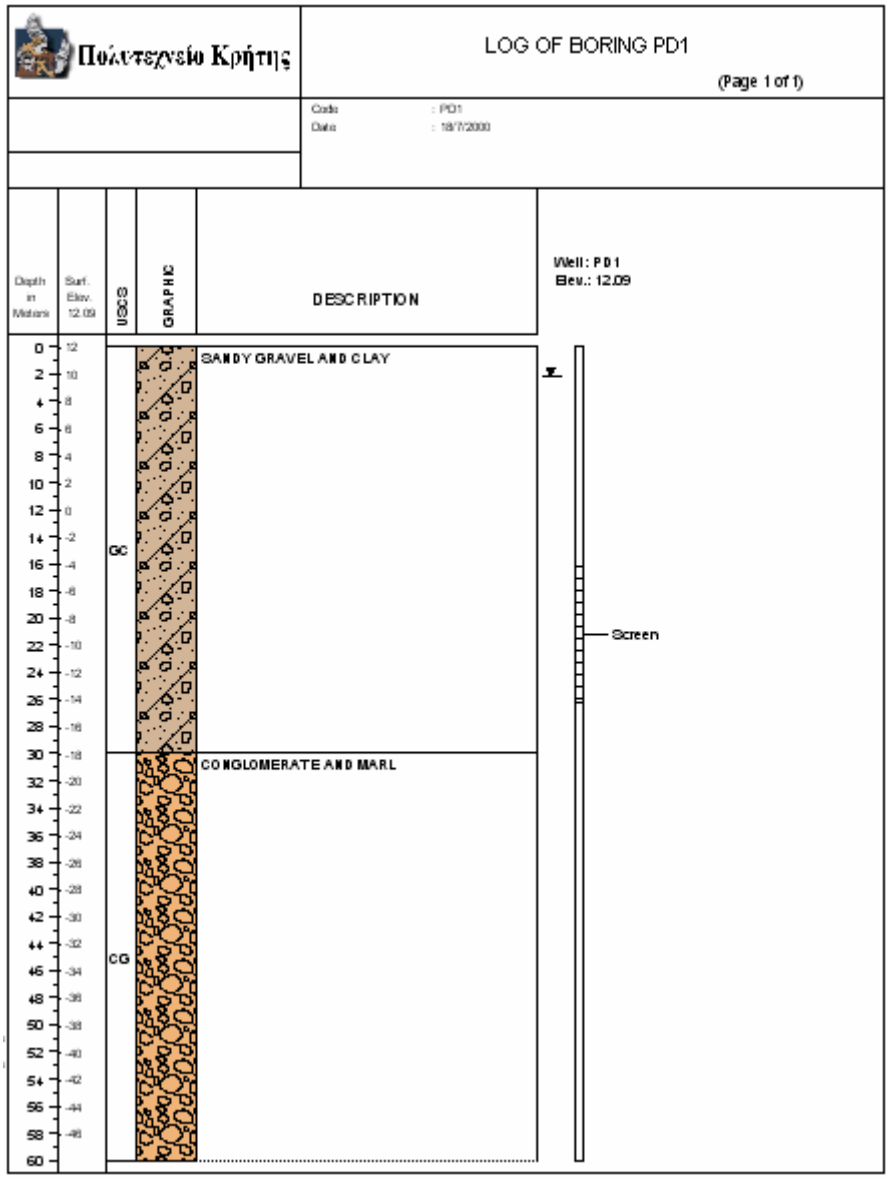
Ακόμη, θεωρήθηκε ότι το πάχος του υδροφόρου συστήματος είναι 80 m στην πιο ορεινή περιοχή, στις θέσεις των σημείων PD1, PD2 και PD10 ενώ στις υπόλοιπες θέσεις θεωρήθηκε ότι είναι 50 m. Έτσι, αφού εφαρμόστηκε γραμμική παρεμβολή (624 Interpolation) και λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του ενεργού υδροφορέα, προέκυψαν τελικά τα αρχικά υδραυλικά ύψη με σημείο αναφοράς τη βάση του υδροφόρου συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.18.




**Σχήμα 5.18. Εισαγωγή των αρχικών υδραυλικών υψών.**

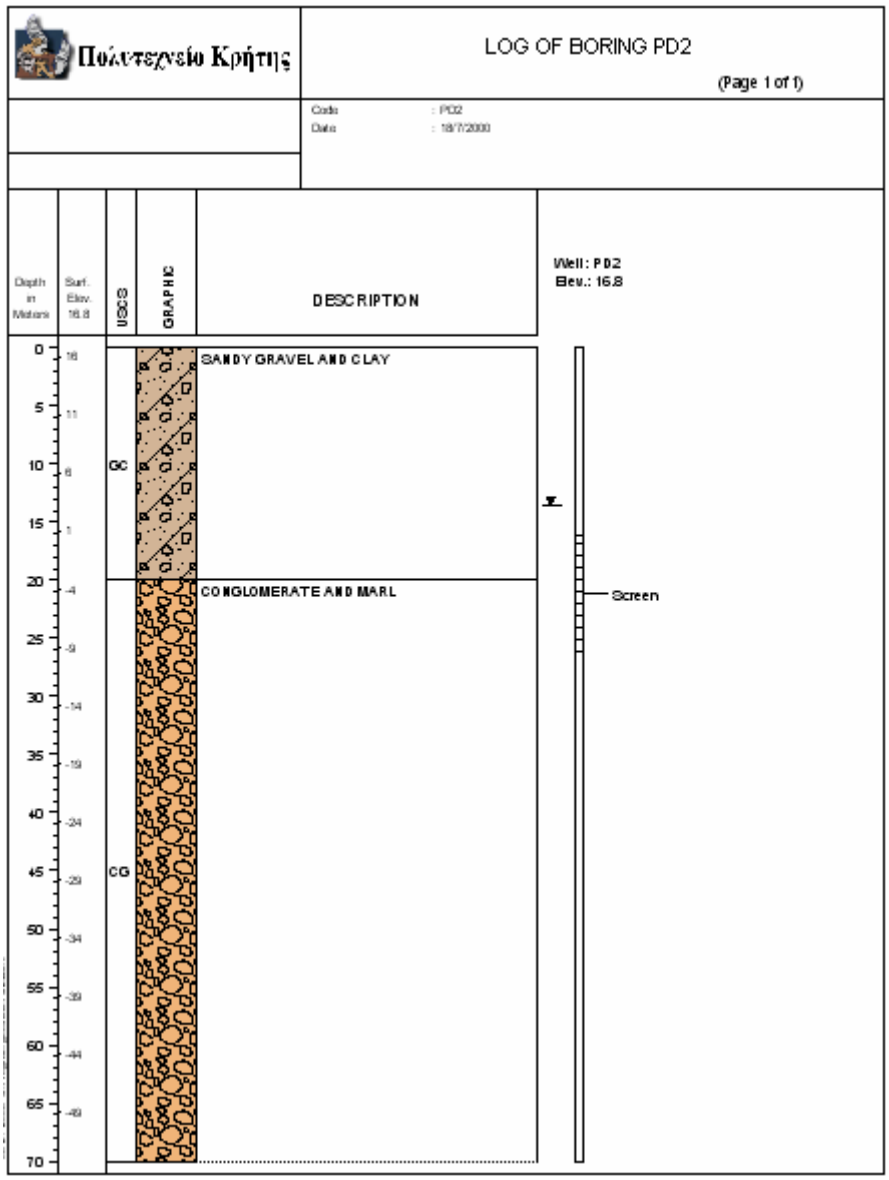
Με βάση τα στοιχεία που συλλέχθηκαν σχετικά με τη σύσταση των πετρωμάτων στην περιοχή αυτή, σχεδιάστηκαν οι λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων PD1, PD2, PD10 καθώς και των

υπολοίπων οι οποίες λόγω της ομοιομορφίας του υπεδάφους στην περιοχή ήταν όμοιες. Ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων βασίστηκε στο πρόγραμμα “Geotechnical Groundwater Graphics”. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο “Quick Log” μέσω του οποίου απεικονίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής σε χαρακτηριστικές θέσεις, το υψόμετρο της κάθε θέσης, το βάθος του υδροφορέα αλλά και το υδραυλικό ύψος. Έτσι, προέκυψαν τα σχήματα 5.19, 5.20 και 5.21 στα οποία απεικονίζονται οι τομές των γεωτρήσεων PD1, PD2 και PD10, αντίστοιχα.

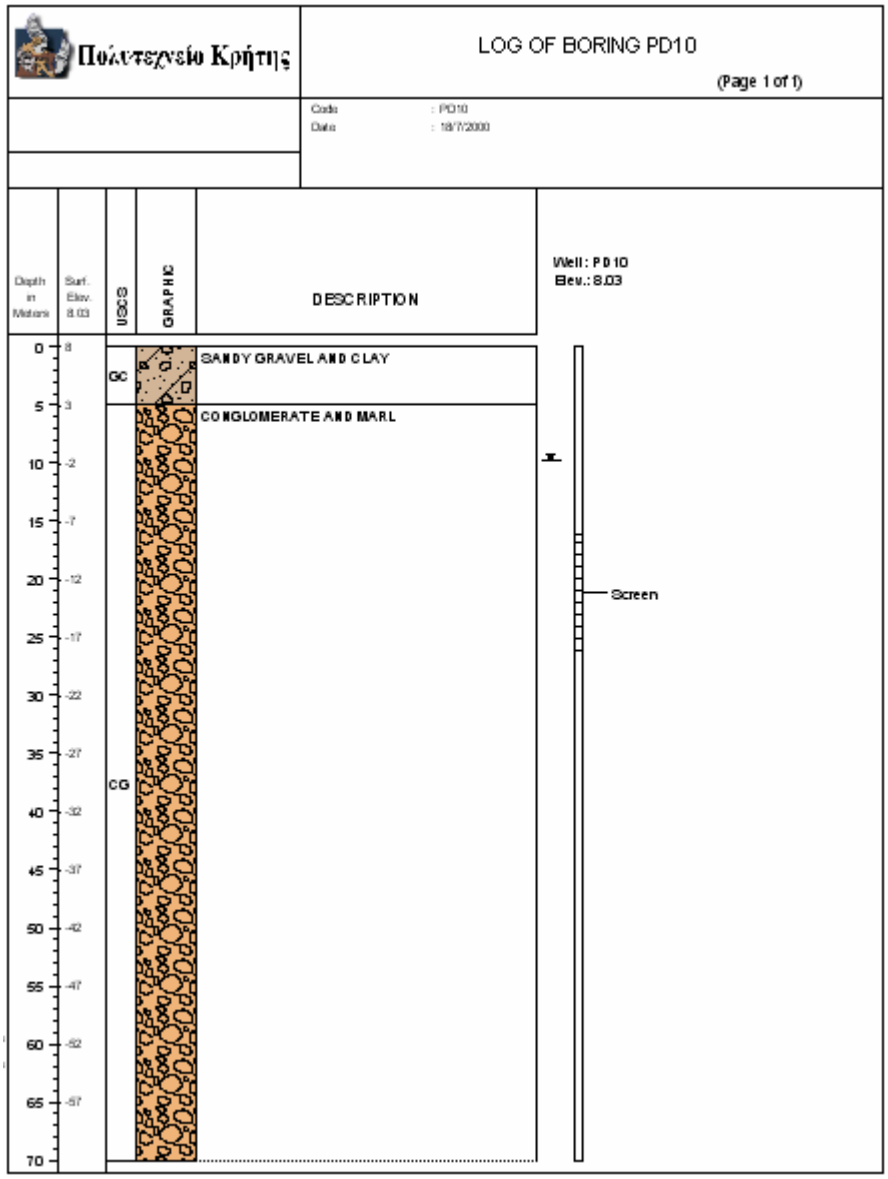



**Σχήμα 5.19. Λιθολογική τομή της γεώτρησης PD1.**

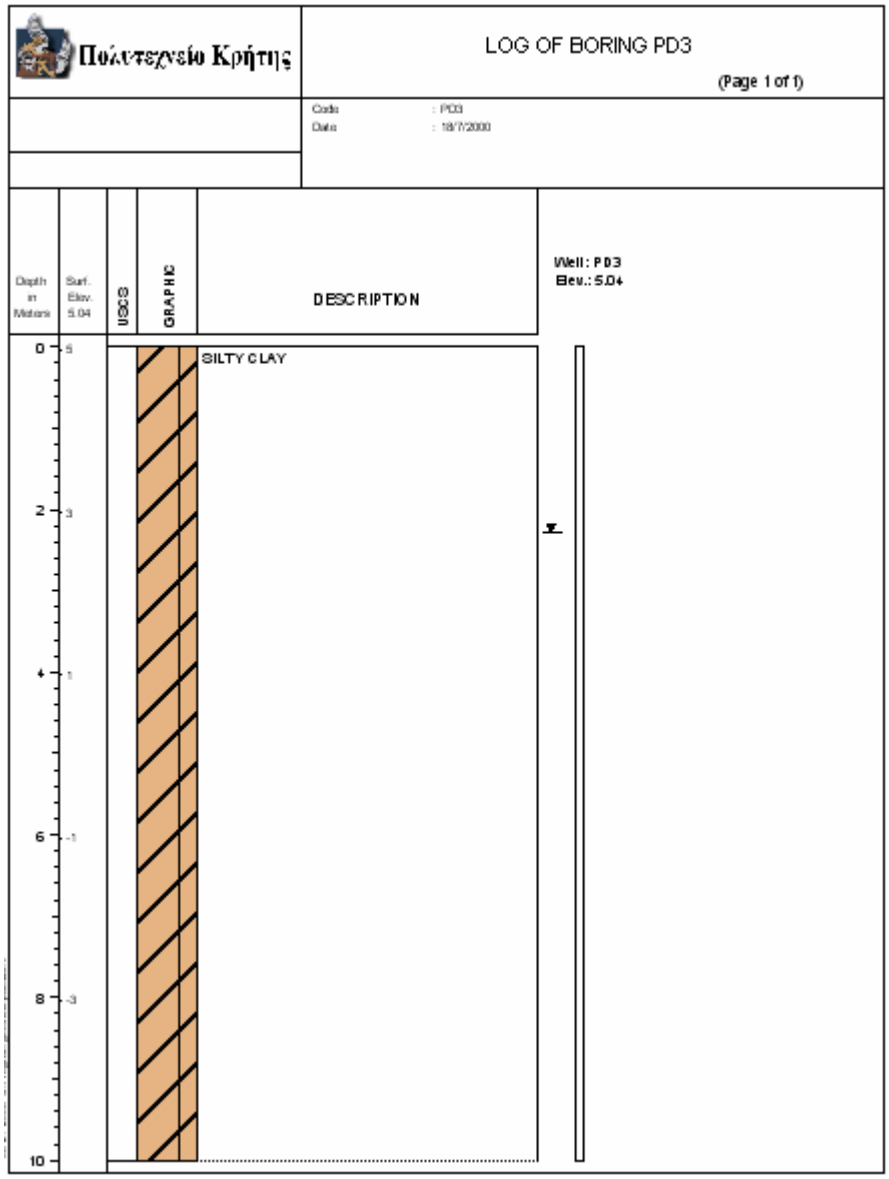
Μια αντιπροσωπευτική λιθολογική τομή των υπόλοιπων γεωτρήσεων είναι στη θέση PD3 και δίνεται στο σχήμα 5.22. Στη συνέχεια, με τη χρήση του μοντέλου “Quick Fence” σχεδιάστηκαν κάποιες εγκάρσιες λιθολογικές τομές με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου “Quick Log”, οι οποίες φαίνονται στα σχήματα 5.23 και 5.24.



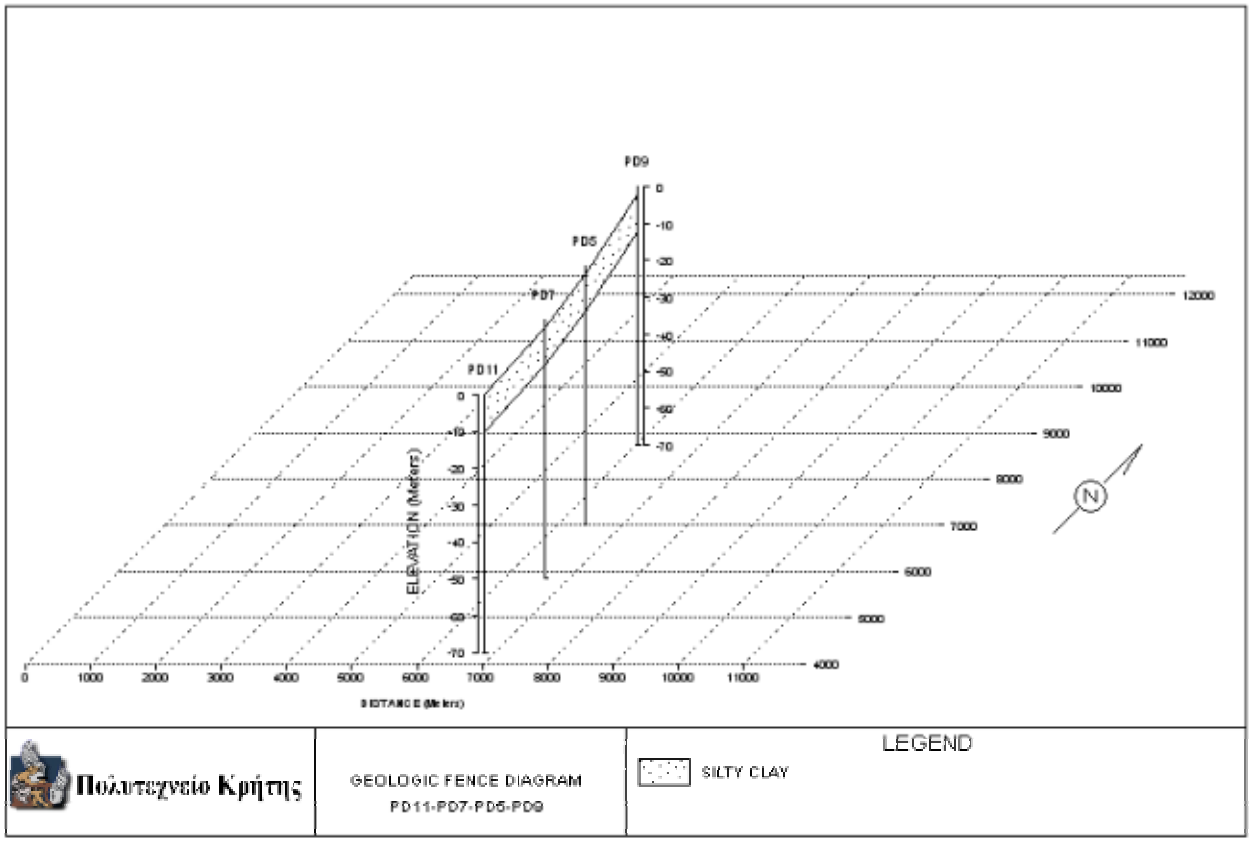

**Σχήμα 5.20. Λιθολογική τομή της γεώτρησης PD2.**



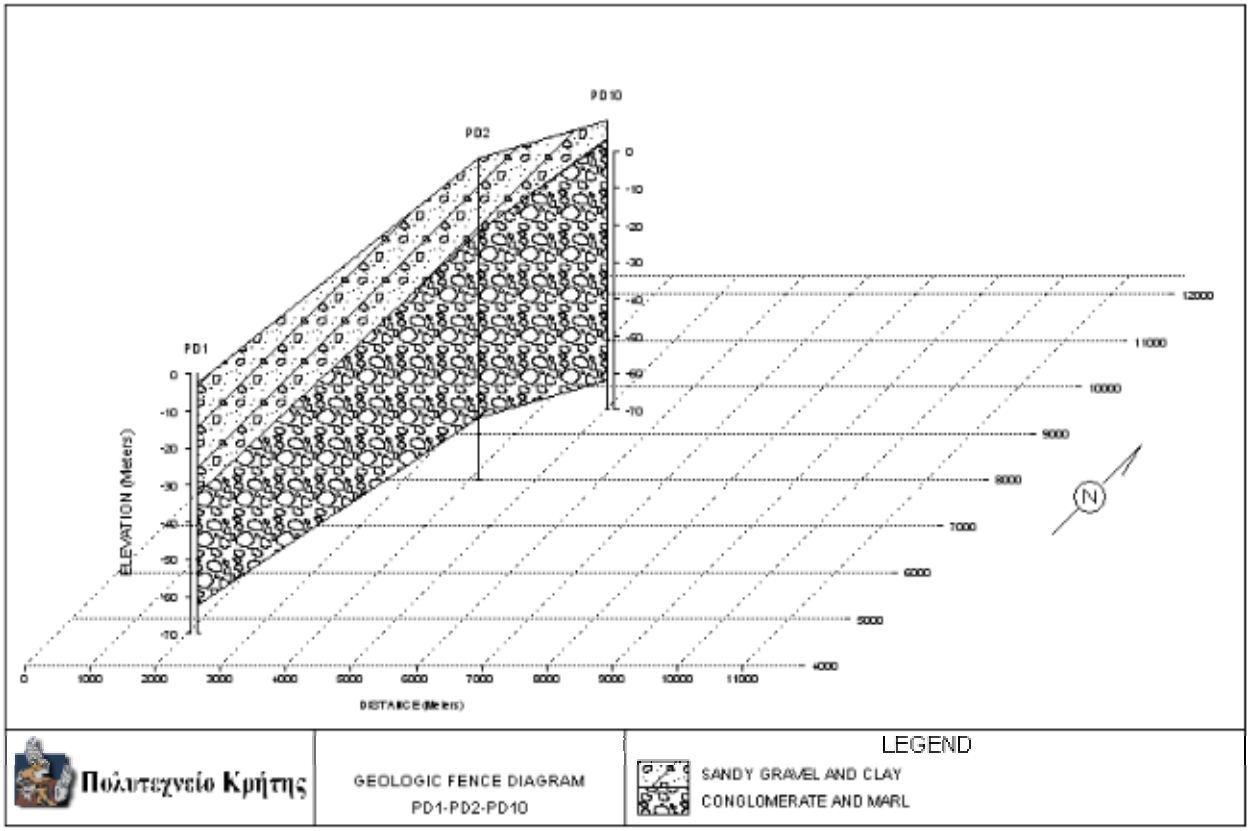

**Σχήμα 5.21. Λιθολογική τομή της γεώτρησης PD10.**




**Σχήμα 5.22. Λιθολογική τομή της γεώτρησης PD3.**

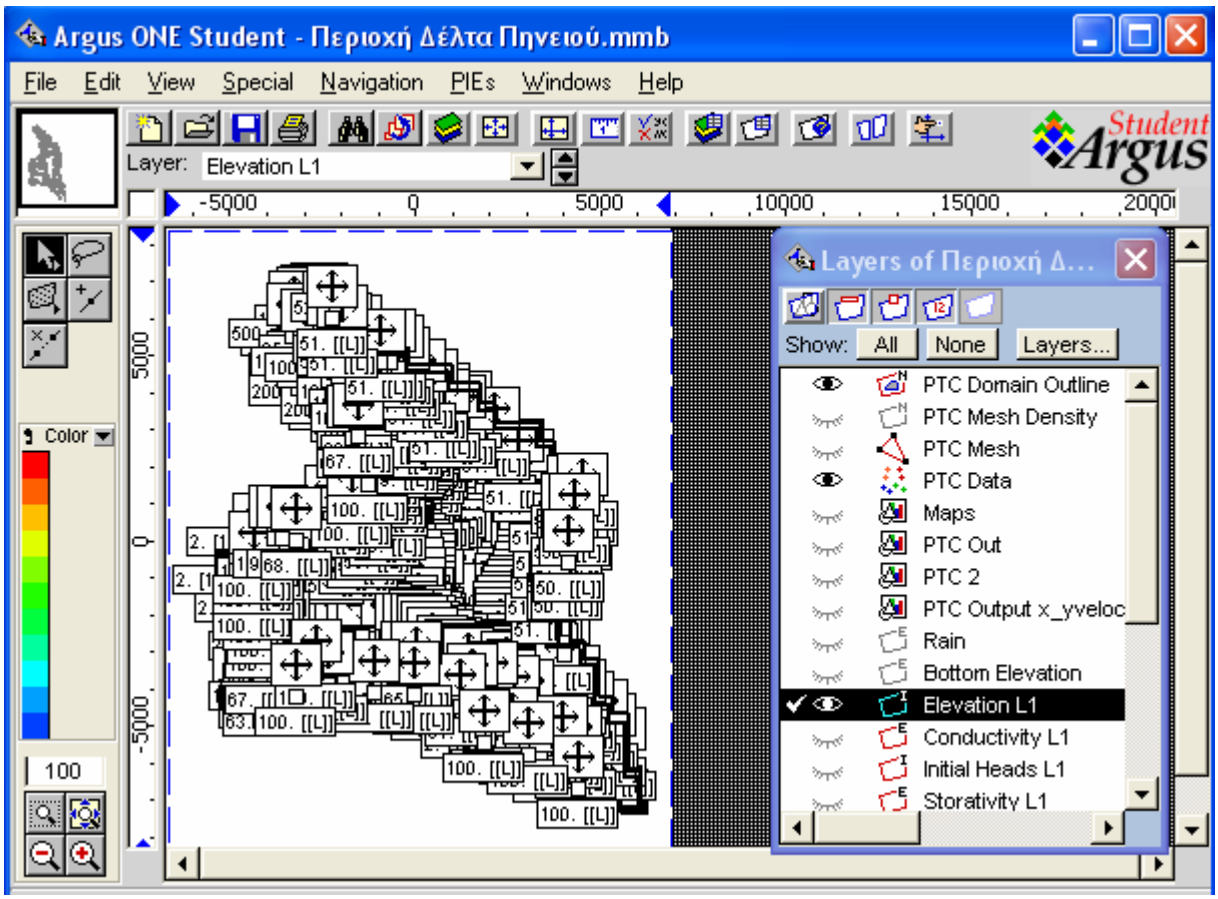



**Σχήμα 5.23. Εγκάρσια λιθολογική τομή PD11-PD7-PD5-PD9.**




**Σχήμα 5.24. Εγκάρσια λιθολογική τομή PD1-PD2-PD10.**

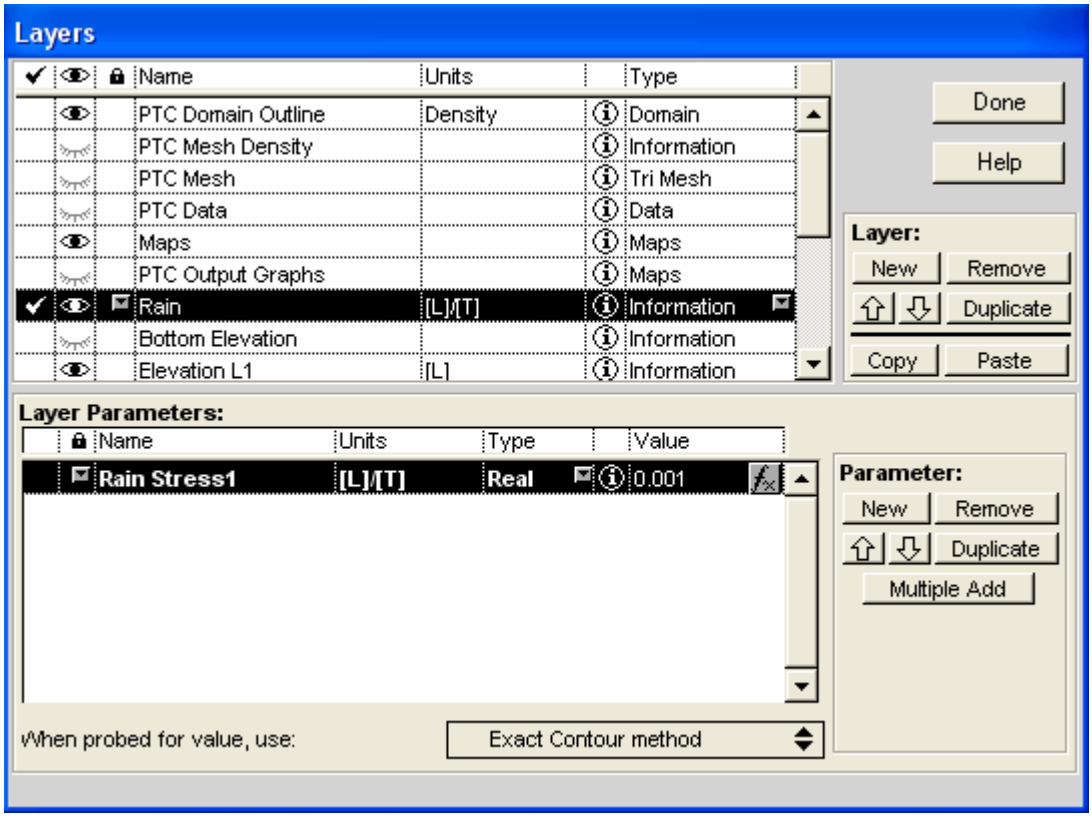
Ακόμη, στο “Layer” “Elevation”, εισήχθησαν οι υψομετρικές τιμές της περιοχής με βάση τον τοπογραφικό χάρτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.25. Στη συνέχεια, για την προσομοίωση της περιοχής εφαρμόστηκε η μέθοδος 624 Interpolation κάνοντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων αυτών και υπολογίζοντας το υψόμετρο όλης της περιοχής μελέτης.




**Σχήμα 5.25. Εισαγωγή των υψομετρικών τιμών στην περιοχή μελέτης.**

Επίσης, στο “Layer” “Rain” της βροχόπτωσης εισάγεται η ποσότητα του νερού που τελικά διηθείται και η οποία θεωρείται ότι είναι 0,001 m/d, με βάση το συντελεστή κατείσδυσης και τα βροχομετρικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν για την περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.26.

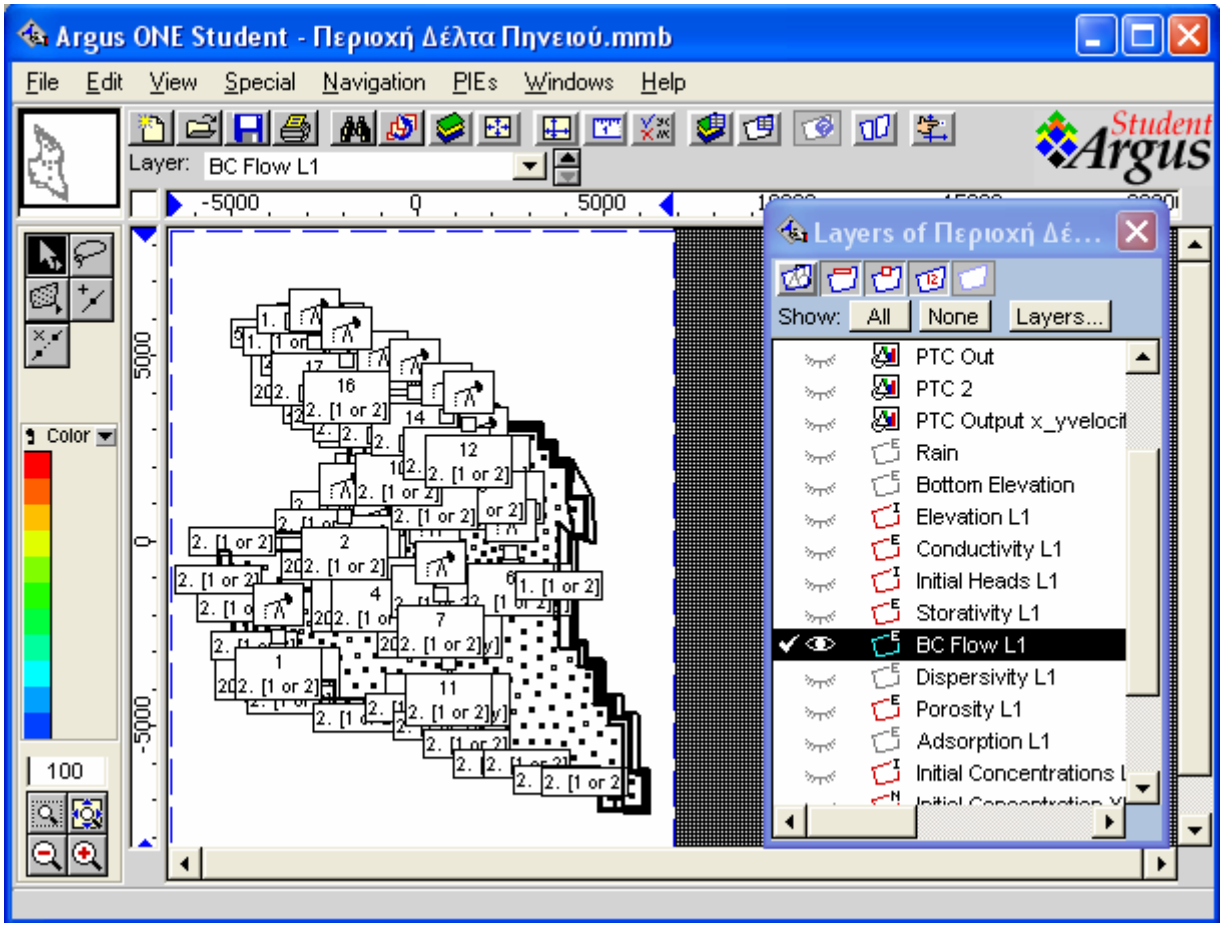
Όσον αφορά τα πηγάδια που υπάρχουν στην περιοχή, εξαιτίας της έλλειψης επαρκών στοιχείων, αξιοποιήθηκαν τα υπάρχοντα στοιχεία με βάση τα οποία στη συνέχεια, έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου. Εκτιμήθηκε ότι το πηγάδι 1 αντλεί 4100 $m^3$/d, το 2 αντλεί 1500 $m^3$/d, το 3 αντλεί 2400 $m^3$/d, το 4 αντλεί 2100 $m^3$/d, το 5 αντλεί 1500 $m^3$/d, το 6 αντλεί 1200 $m^3$/d, το 7 αντλεί 2500 $m^3$/d, το 8 αντλεί 1700 $m^3$/d, το 9 αντλεί 2900 $m^3$/d, το 10 αντλεί 3600 $m^3$/d, το 11 αντλεί 1600 $m^3$/d, το 12 αντλεί 900 $m^3$/d, το 13 αντλεί 1100 $m^3$/d, το 14 αντλεί 1850 $m^3$/d, το 15 αντλεί 1525 $m^3$/d, το 16 αντλεί 1000 $m^3$/d και το 17 αντλεί 1000 $m^3$/d.



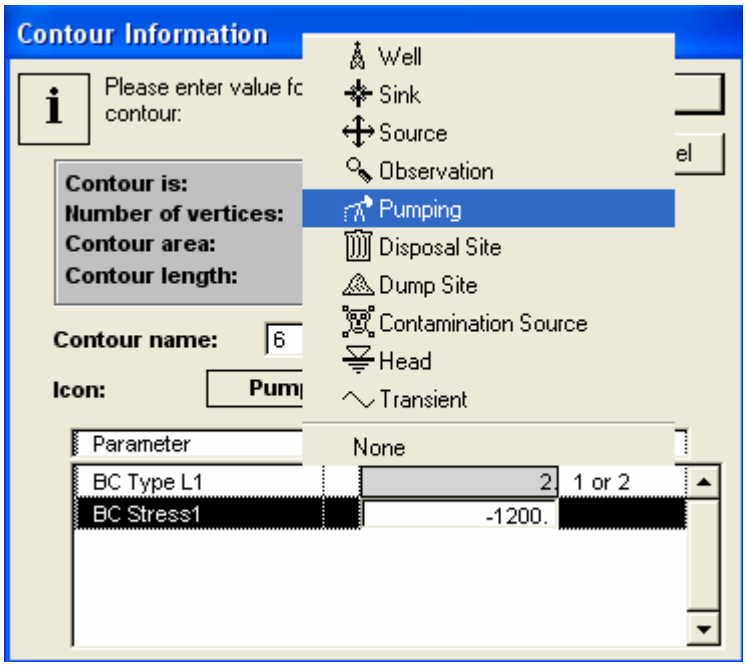

**Σχήμα 5.26. Εισαγωγή της τιμής της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης.**

Για την εισαγωγή των πηγαδιών άντλησης, αρχικά επιλέχθηκε το “Layer” “BC Flow L1” όπου προσδιορίστηκαν οι θέσεις τους. Ο τύπος της ροής είναι δευτέρου είδους και συμπληρώθηκαν οι τιμές άντλησής τους, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.27 και 5.28 αντίστοιχα. Το μείον, στο σχήμα 5.28 στην τιμή της φόρτισης, υποδηλώνει ότι σημειώνεται άντληση.

Μόλις προσδιοριστούν οι μεταβλητές αυτές, τα πηγάδια αντιγράφονται στο “Layer” “PTC Domain Outline” όπου ζητείται να προσδιοριστεί και η πυκνότητα των πηγαδιών, η οποία επιλέγεται να είναι 200.



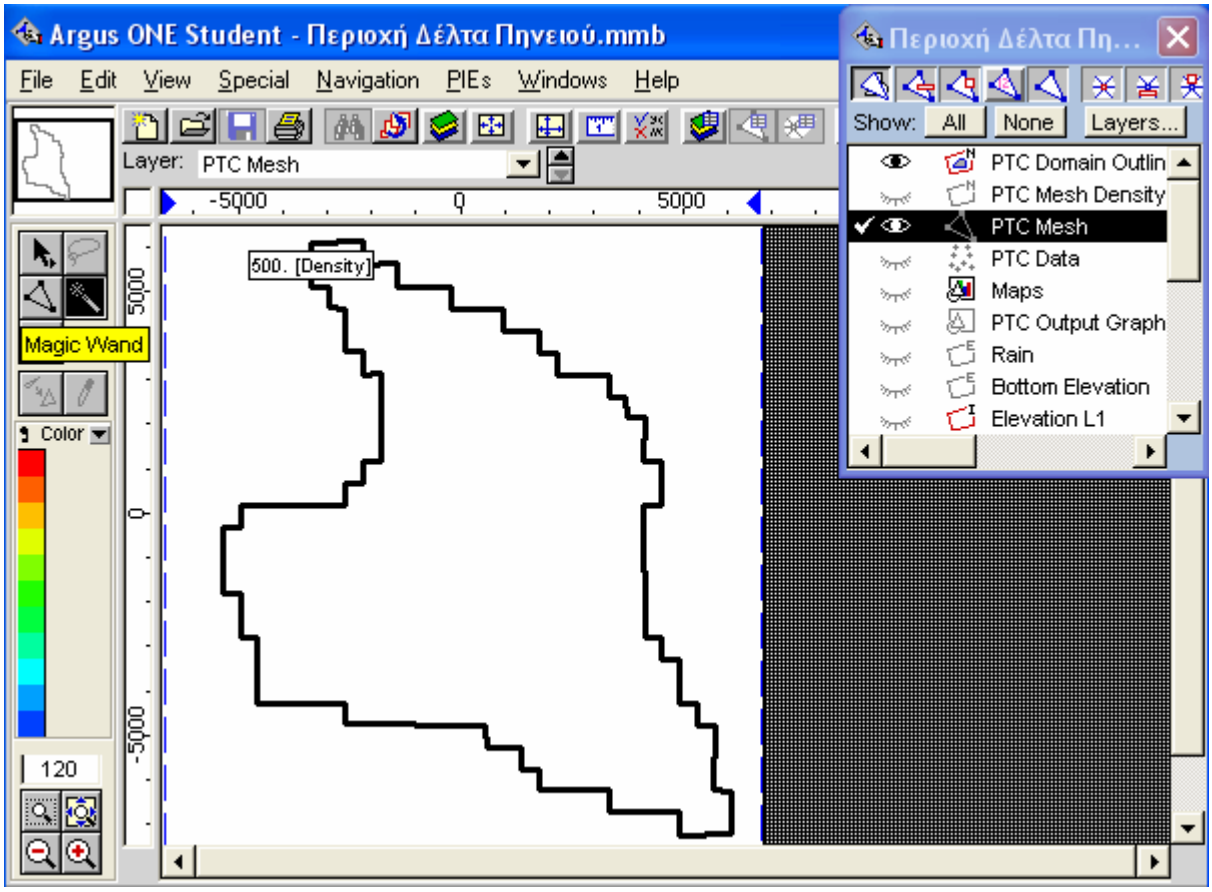

**Σχήμα 5.27. Οι θέσεις των πηγαδιών άντλησης.**



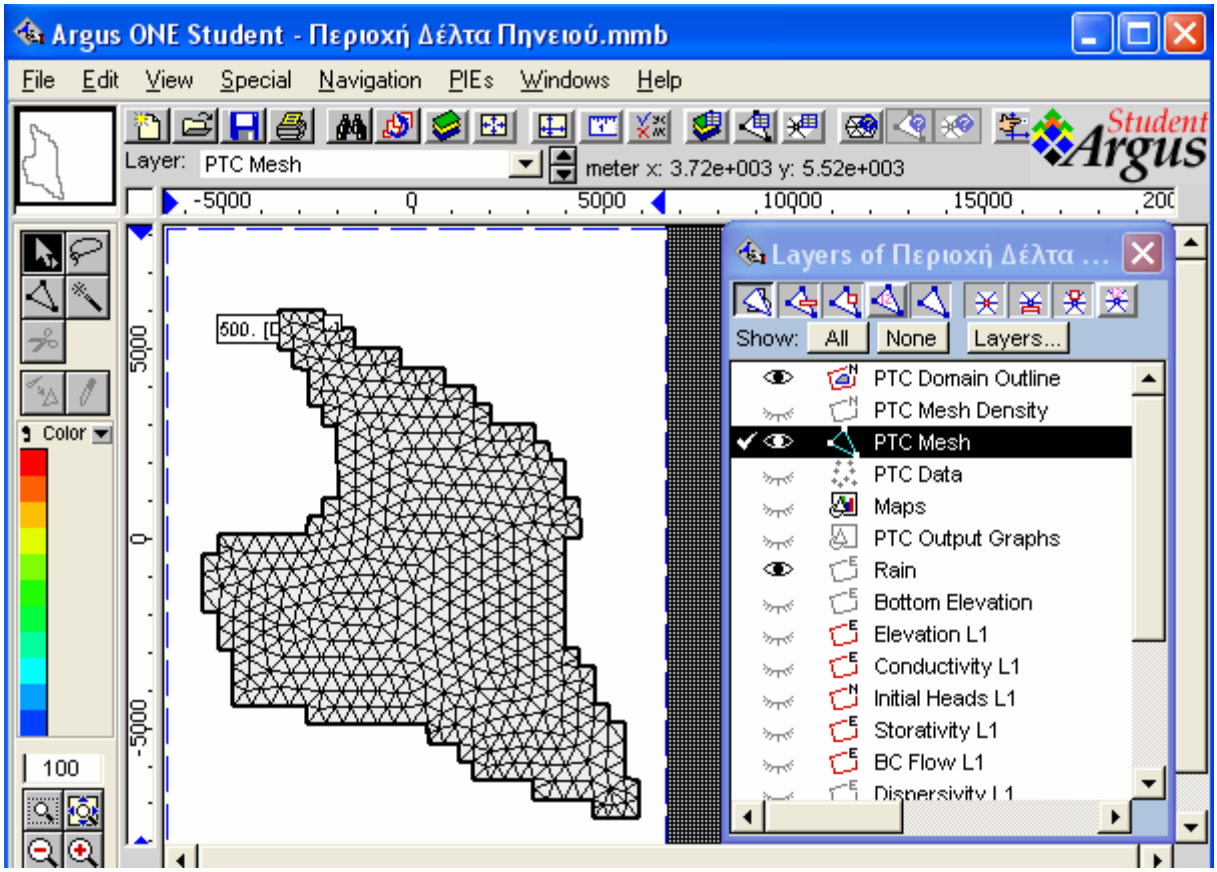

**Σχήμα 5.28. Εισαγωγή του τύπου ροής και της τιμής άντλησης του πηγαδιού.**

Μετά την εισαγωγή όλων των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του μοντέλου, ενεργοποιείται το “Layer” “PTC Mesh” και επιλέγεται από τα διαθέσιμα εργαλεία το “Magic Wand” όπως φαίνεται στο σχήμα 5.29. Στη συνέχεια κάνοντας “click” με το εργαλείο αυτό στην περιοχή μελέτης, δημιουργείται το πλέγμα που φαίνεται στο σχήμα 5.30.

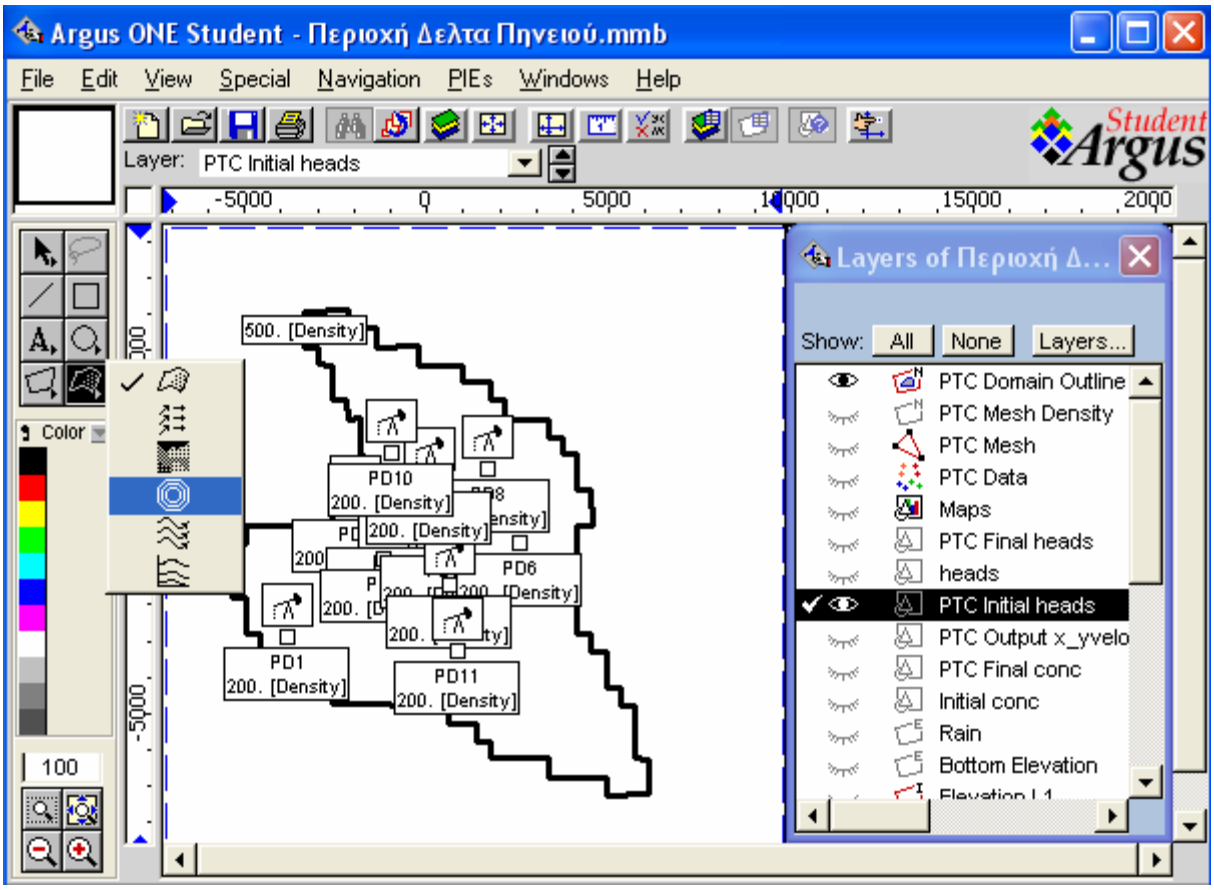
Με το πρόγραμμα αυτό μας δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης των αρχικών υδραυλικών υψών με γραφικό τρόπο, ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Επιλέγουμε το “Layer” “PTC Output Graphs” και το μετονομάζουμε σε “PTC Initial heads” και με το εργαλείο του σχήματος 5.31 δημιουργούμε ένα τετράγωνο εντός της περιοχής μελέτης. Κατόπιν εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του σχήματος 5.32 όπου επιλέγουμε “Initial Heads L1” ενώ στο φάκελο “Position” επιλέγουμε την ένδειξη “Overlay Source Data”, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.33. Τελικά, προκύπτει το γράφημα των αρχικών υδραυλικών υψών όπως φαίνεται στο σχήμα 5.34.



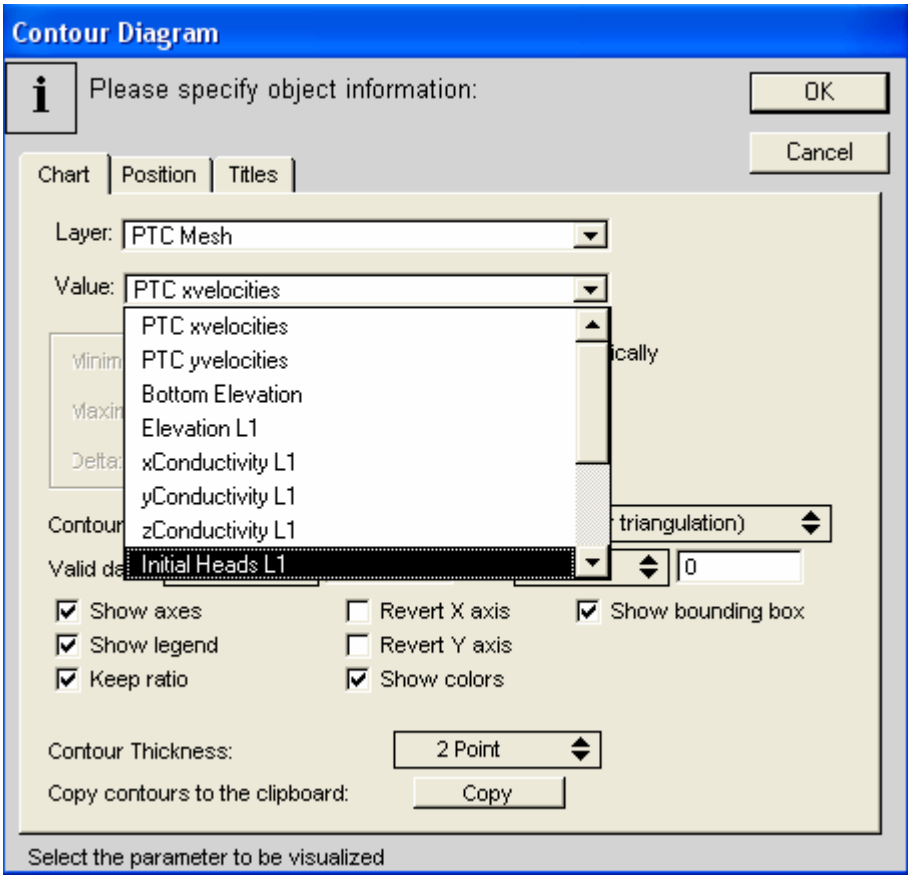

**Σχήμα 5.29. Διαδικασία κατασκευής του πλέγματος.**



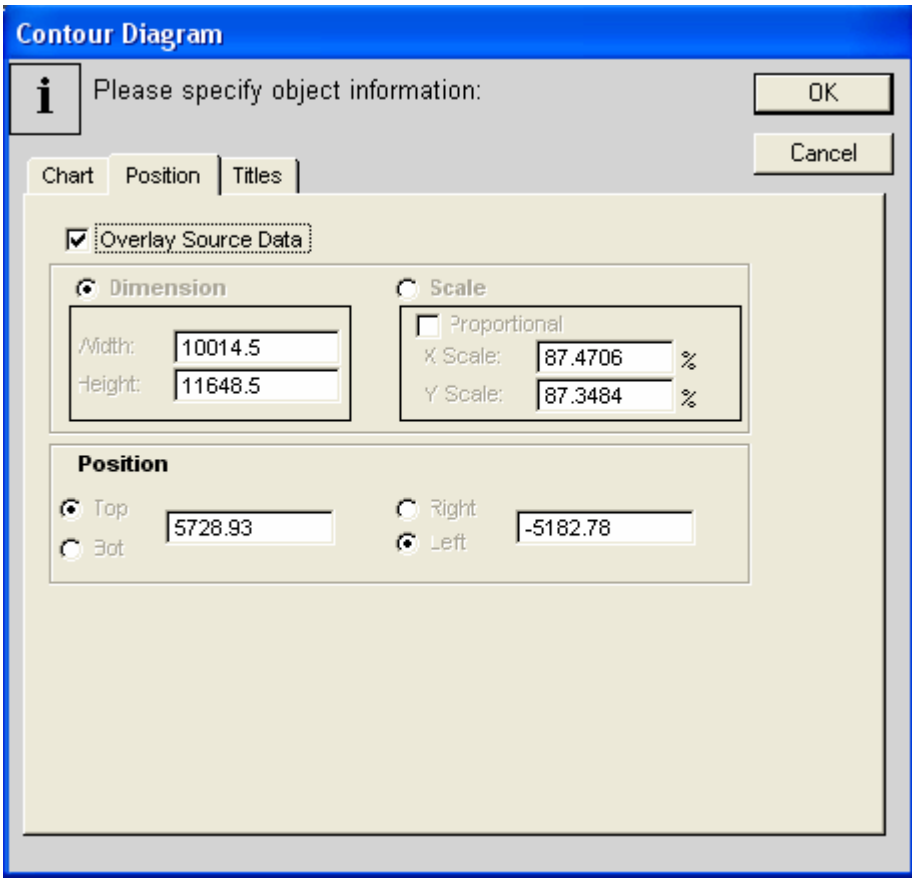

**Σχήμα 5.30. Το πλέγμα που κατασκευάστηκε.**



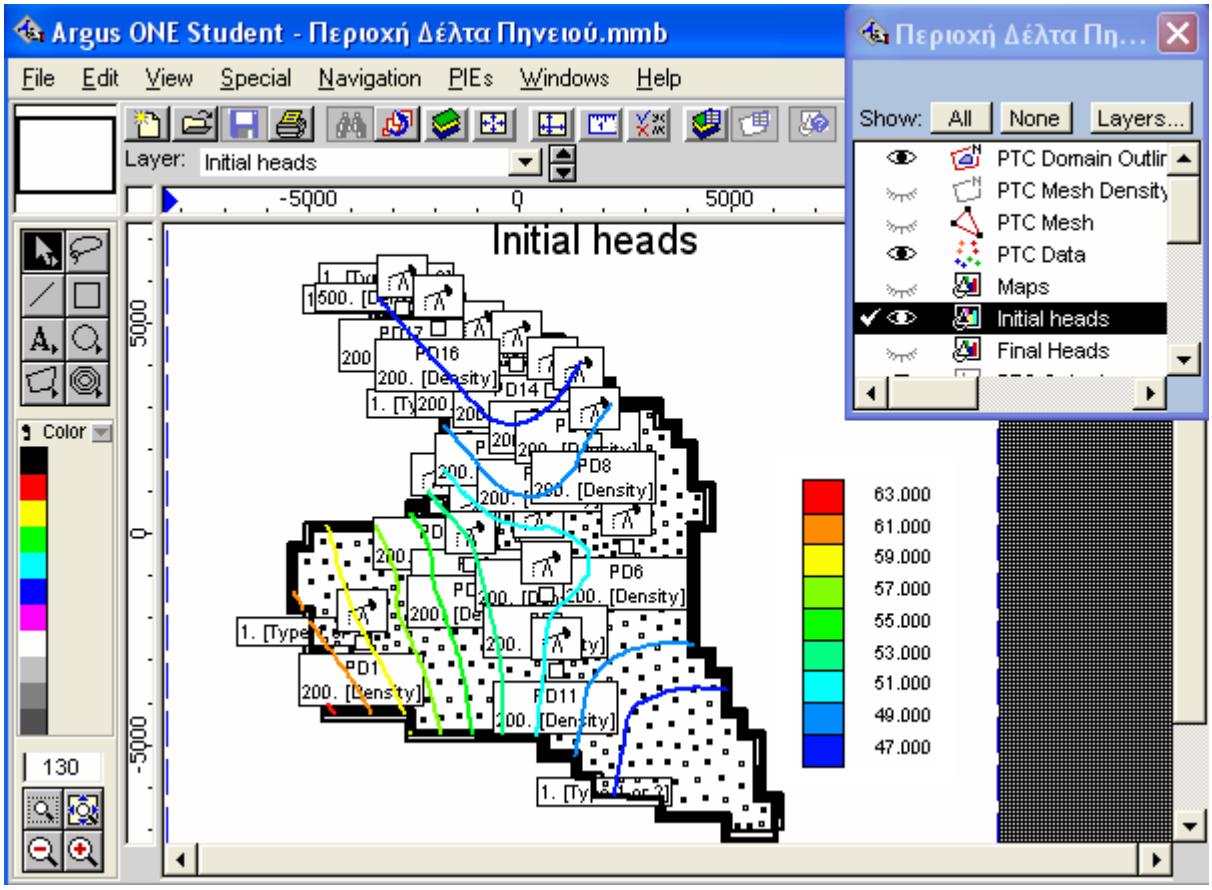

**Σχήμα 5.31. Διαδικασία γραφικής απεικόνισης των αρχικών υδραυλικών υψών.**




**Σχήμα 5.32. Επιλογή της ένδειξης "Initial Heads L1".**



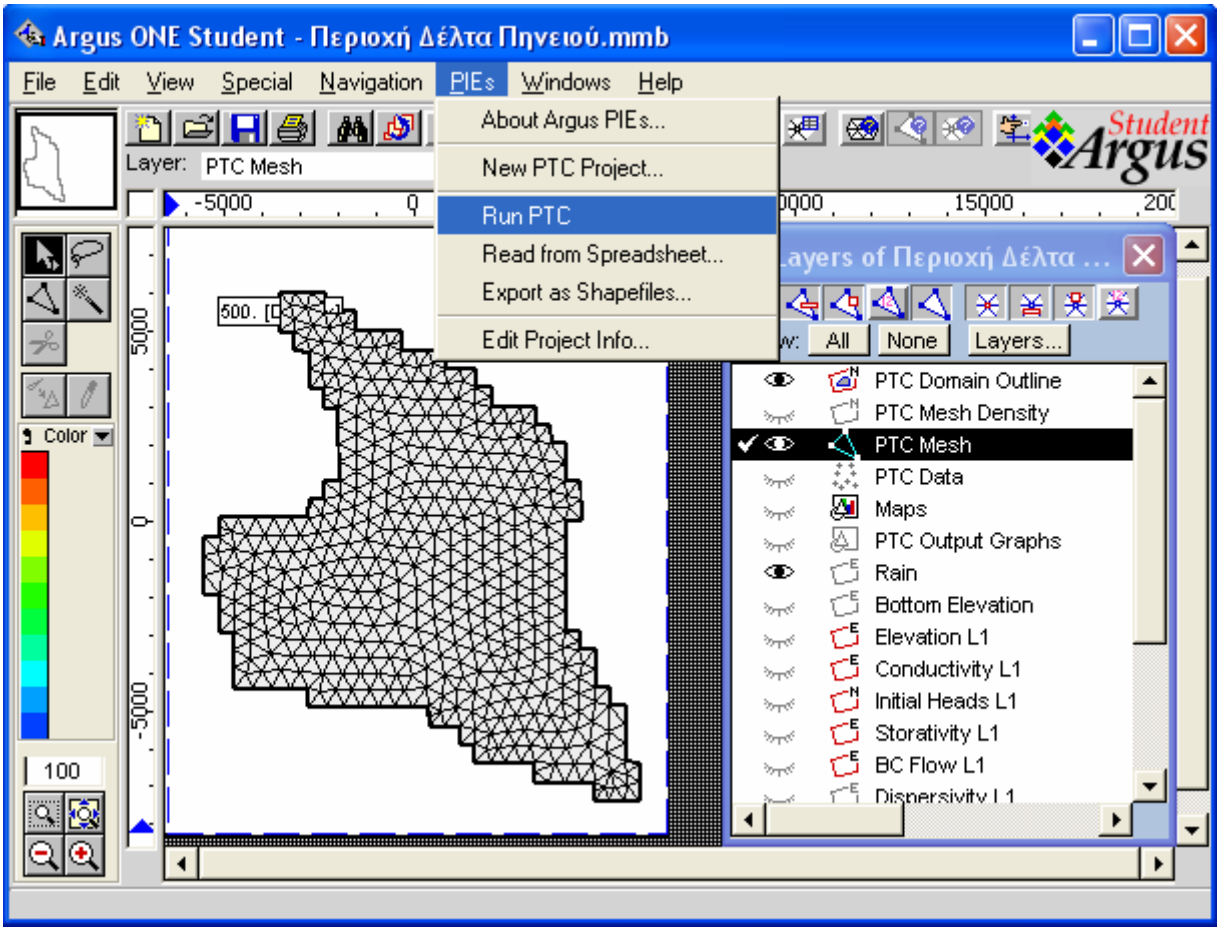

**Σχήμα 5.33. Επιλογή της ένδειξης "Overlay Source Data".**



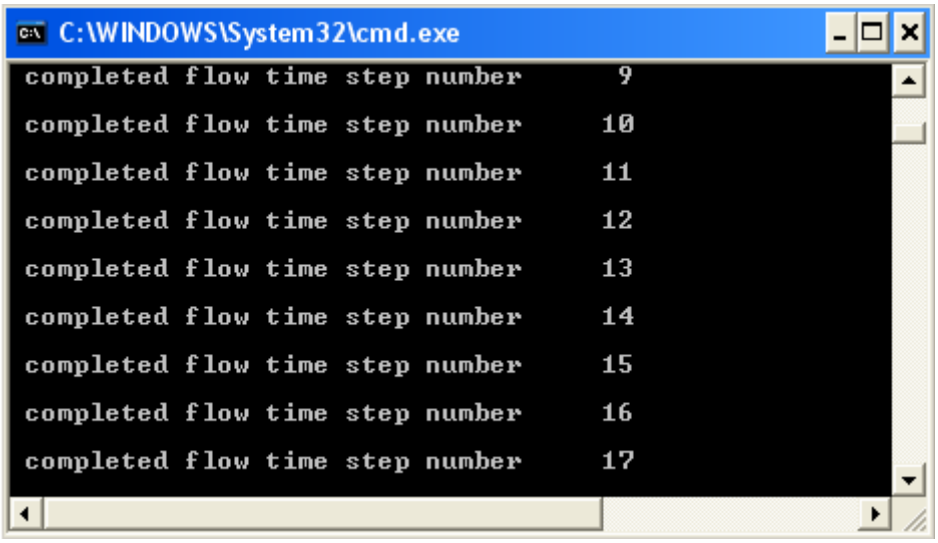

**Σχήμα 5.34. Γραφική απεικόνιση των αρχικών υδραυλικών υψών.**

Στη συνέχεια, επιλέγεται το “Layer” “PTC Mesh” και από το φάκελο PIEs η εντολή “Run PTC”, σχήμα 5.35, ώστε να εκτελεστεί το μοντέλο. Τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί στα “Layers” μεταφέρονται στο περιβάλλον του DOS όπου το PTC ξεκινά την προσομοίωση, η εξέλιξη της οποίας απεικονίζεται σε παράθυρο DOS όπως φαίνεται στο σχήμα 5.36.

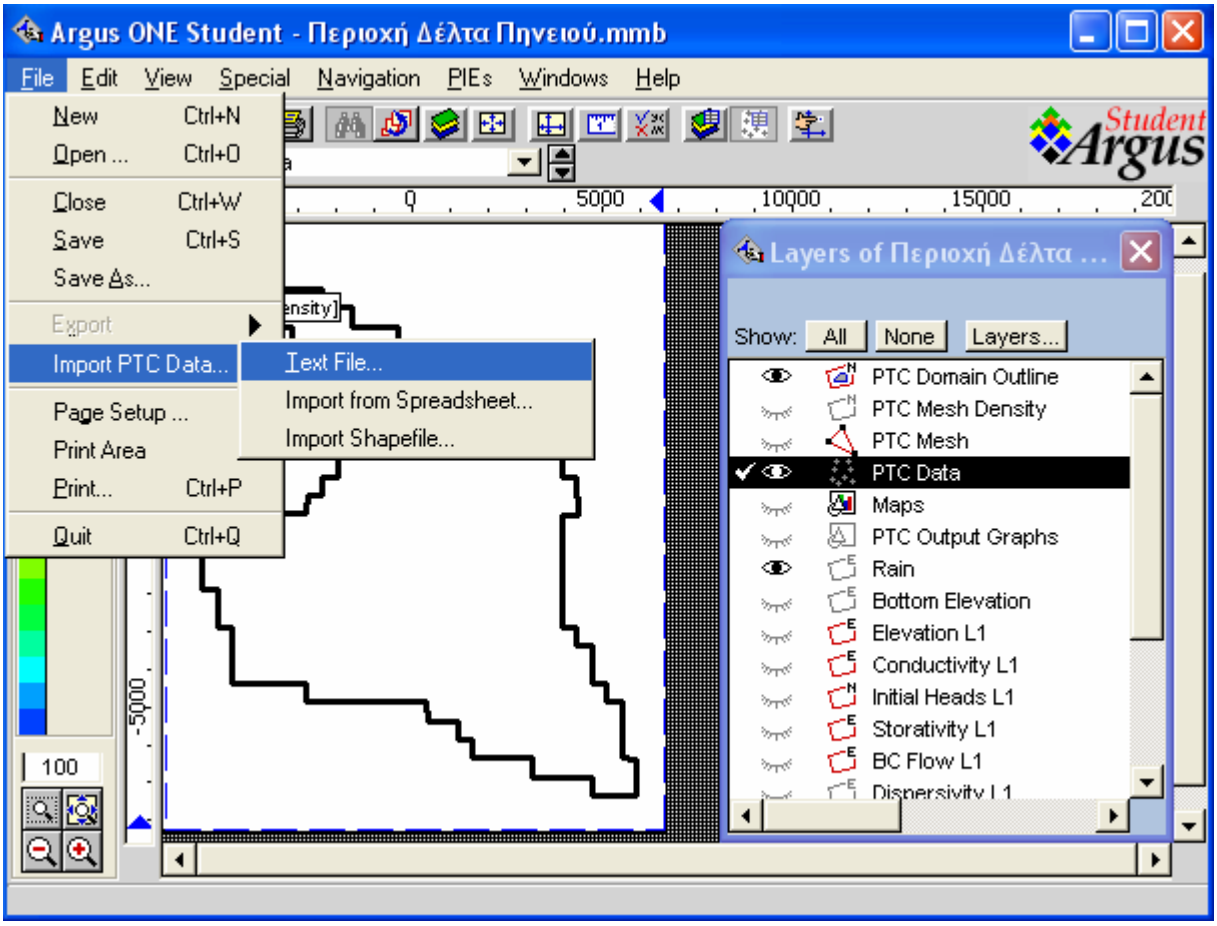
Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, κλείνει το παράθυρο του DOS και είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση των τελικών υδραυλικών υψών καθώς και των ταχυτήτων της ροής. Αρχικά επιλέγεται το “Layer” “PTC Data” και από το φάκελο “File” η εντολή “Import PTC Data” και “Text File”, σχήμα 5.37.




**Σχήμα 5.35. Διαδικασία εκτέλεσης του μοντέλου.**

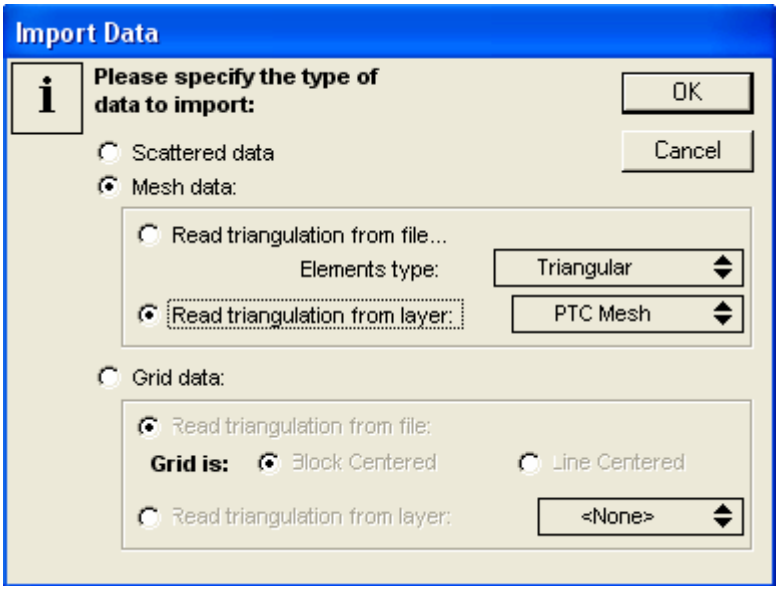



**Σχήμα 5.36. Εκτέλεση της προσομοίωσης.**




**Σχήμα 5.37. Διαδικασία γραφικής απεικόνισης των τελικών υδραυλικών υψών.**

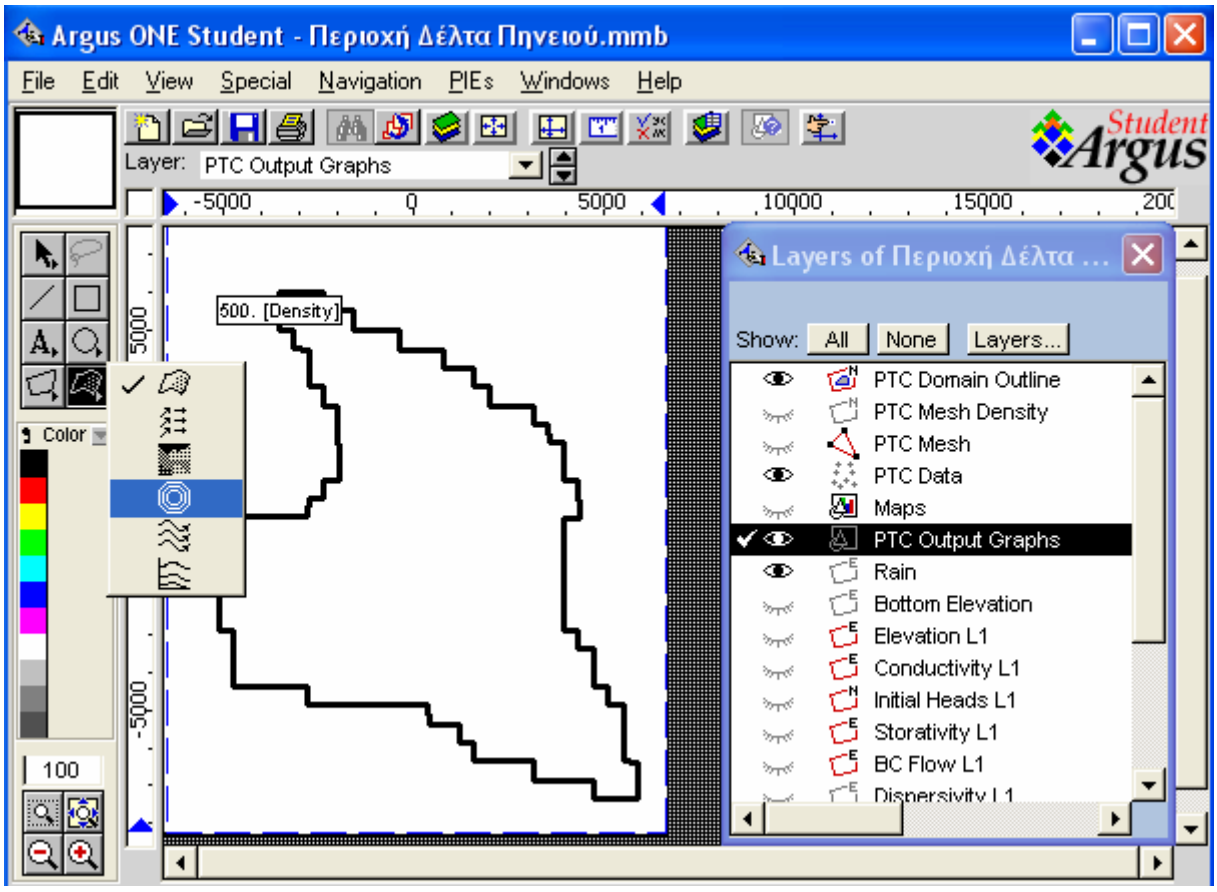
Αμέσως μετά εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου όπου προσδιορίζεται ο τύπος των αποτελεσμάτων που εισάγονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.38.



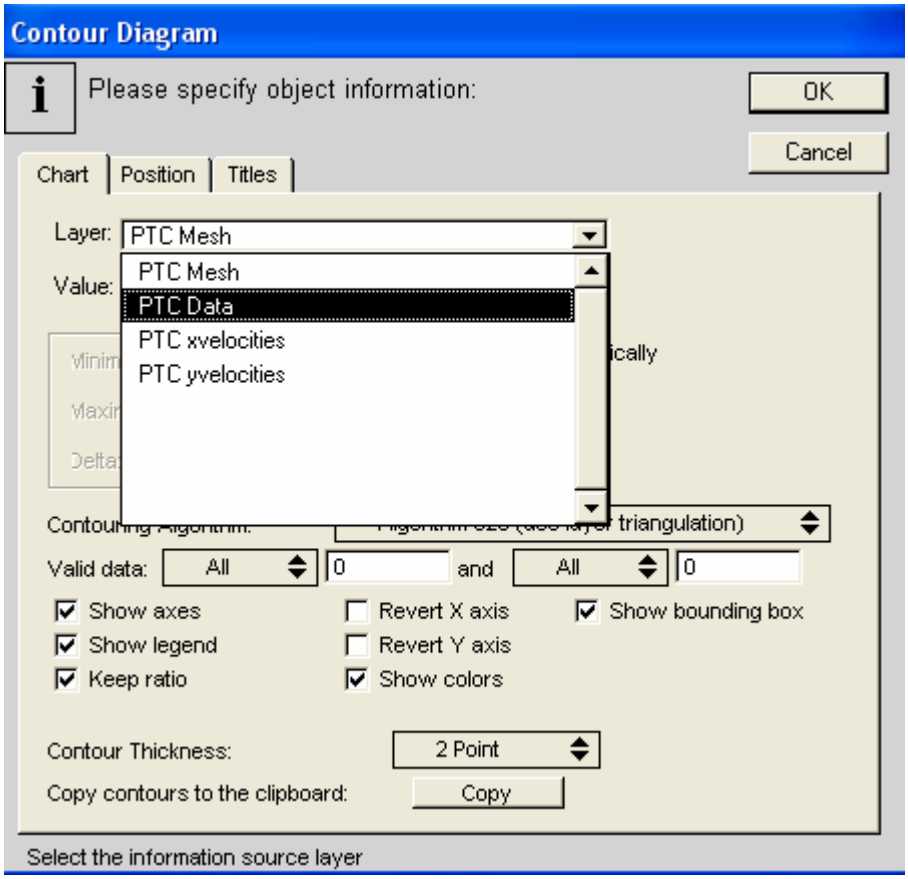

**Σχήμα 5.38. Αλλαγή τύπου αποτελεσμάτων.**

Έτσι, εισάγεται το αρχείο “PTC_Mesh_heads_s1.fin file”, που περιέχει τα αποτελέσματα των τελικών υδραυλικών υψών, στο “Layer” “PTC Data”. Στη συνέχεια επιλέγουμε το “Layer” “PTC Output Graphs”, το οποίο μετονομάζουμε “Final heads”, και το εργαλείο του σχήματος 5.39 με το οποίο δημιουργούμε ένα τετράγωνο εντός της περιοχής μελέτης, όπως και κατά τη δημιουργία του γραφήματος των αρχικών υδραυλικών υψών. Κατόπιν εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του σχήματος 5.40 όπου επιλέγουμε να γίνει η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που έχουμε εισάγει προηγουμένως στο “Layer” “PTC Data” ενώ στο φάκελο “Position” επιλέγουμε την ένδειξη “Overlay Source Data”.

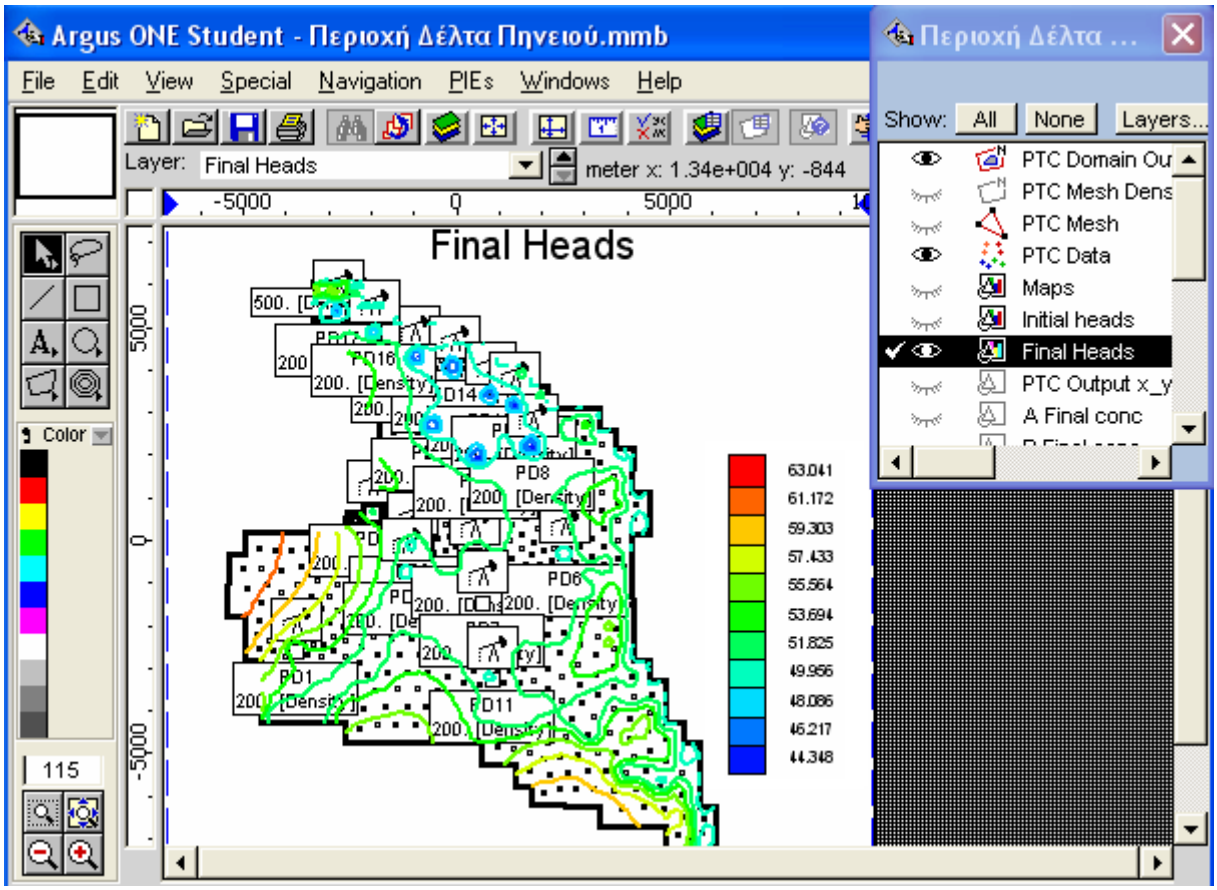
Έτσι, προκύπτει το γράφημα του σχήματος 5.41 στο οποίο παρουσιάζονται τα τελικά υδραυλικά ύψη.




**Σχήμα 5.39. Διαδικασία γραφικής απεικόνισης των τελικών υδραυλικών υψών.**



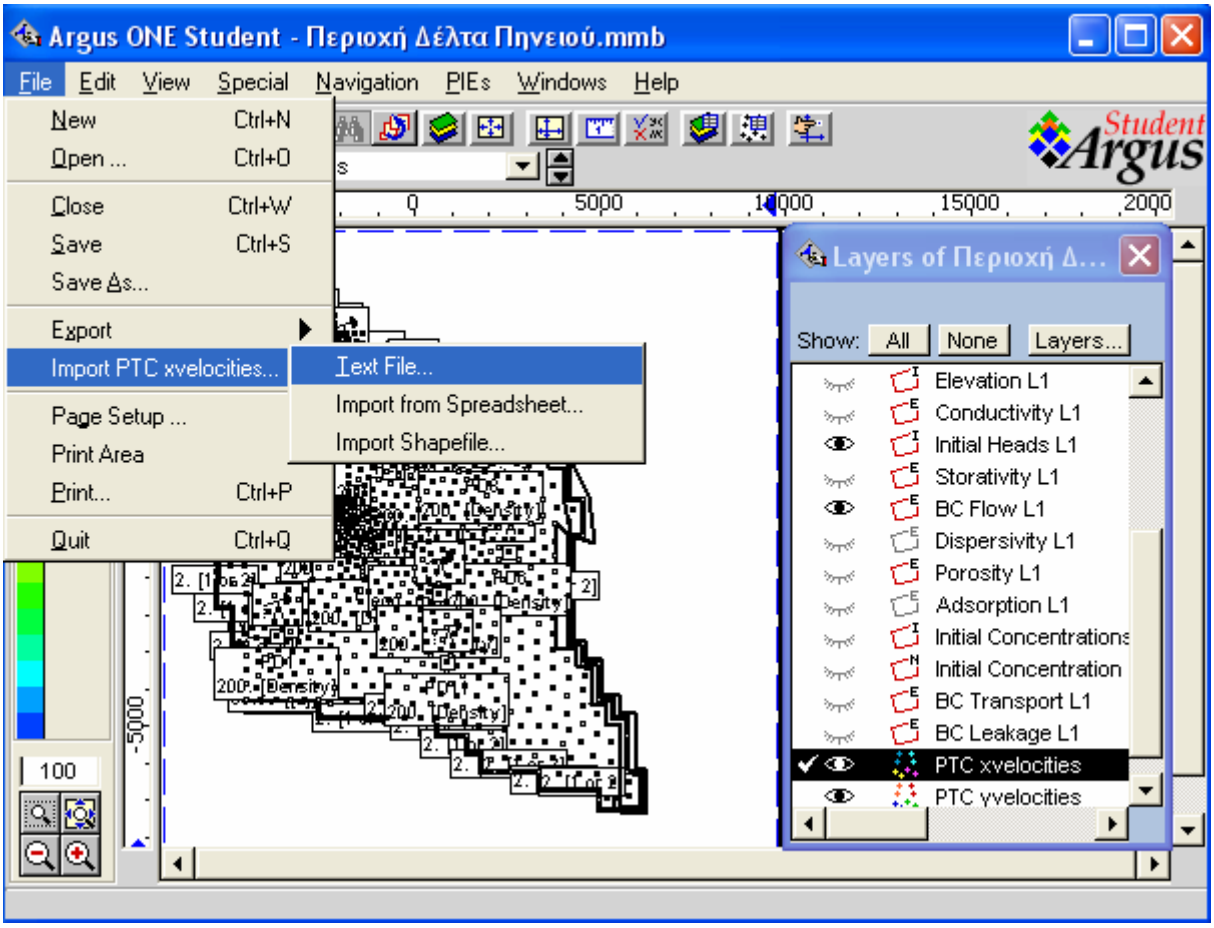

**Σχήμα 5.40. Επιλογή της ένδειξης "PTC Data".**



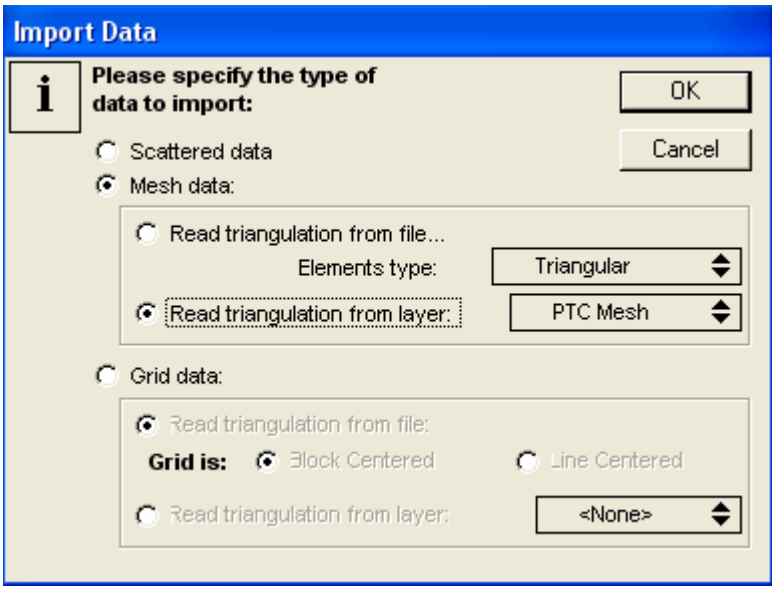

**Σχήμα 5.41. Γραφική απεικόνιση των τελικών υδραυλικών υψών.**

Όπως προκύπτει, στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης οι υδραυλικές κλίσεις είναι υψηλότερες και τα πιεζομετρικά φορτία χαμηλότερα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο σημαντικό όγκο άντλησης υπόγειου νερού που πραγματοποιείται για την κάλυψη των αρδευτικών και των υδρευτικών αναγκών. Στην περιοχή αυτή, η πιεζομετρική επιφάνεια είναι χαμηλότερη από τη μέση στάθμη της θάλασσας κατά 5 περίπου μέτρα, δημιουργώντας έτσι κατάλληλες συνθήκες για θαλάσσια διείσδυση. Αντίθετα, στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης, η πιεζομετρική επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από τη μέση στάθμη της θάλασσας, δημιουργώντας έτσι συνθήκες προστασίας του υπόγειου νερού από την υφαλμύρινση.

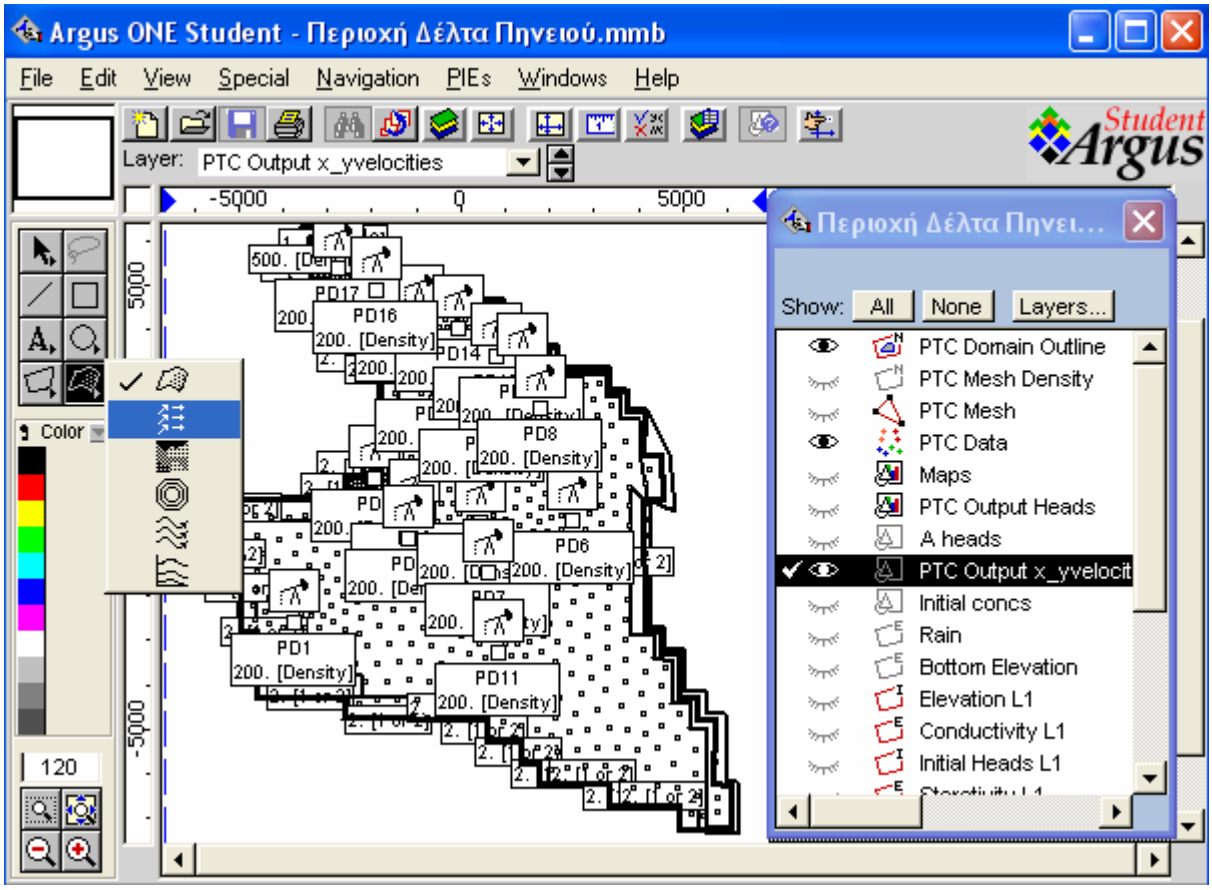
Για τη γραφική απεικόνιση της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού επιλέγεται αρχικά το “Layer” “PTC xvelocities” που είναι στη μορφή Data. Από το φάκελο “File” επιλέγεται το “Import PTC xvelocities” και στη συνέχεια το “Text file”, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.42, όπου εισάγεται το αρχείο “PTC_Mesh_xvel_s1.fin” που αποτελεί τη συνιστώσα $V_x$ της ταχύτητας στην κατεύθυνση x. Αμέσως μετά εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.43, στο οποίο γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις. Με την ίδια διαδικασία στο “Layer” “PTC yvelocities” εισάγεται το αρχείο “PTC_Mesh_yvel_s1.fin” αποτελώντας τη συνιστώσα της ταχύτητας στην κατεύθυνση y. Ακολούθως, επιλέγεται το “Layer” “PTC Output x_yvelocities” και από τα εργαλεία χρησιμοποιείται το “Post-Processing” όπως φαίνεται στο σχήμα 5.44, με το οποίο δημιουργούμε ένα τετράγωνο στην επιφάνεια της περιοχής μελέτης. Έτσι, εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.45 στο οποίο γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις και τελικά προκύπτει το γράφημα του σχήματος 5.46.



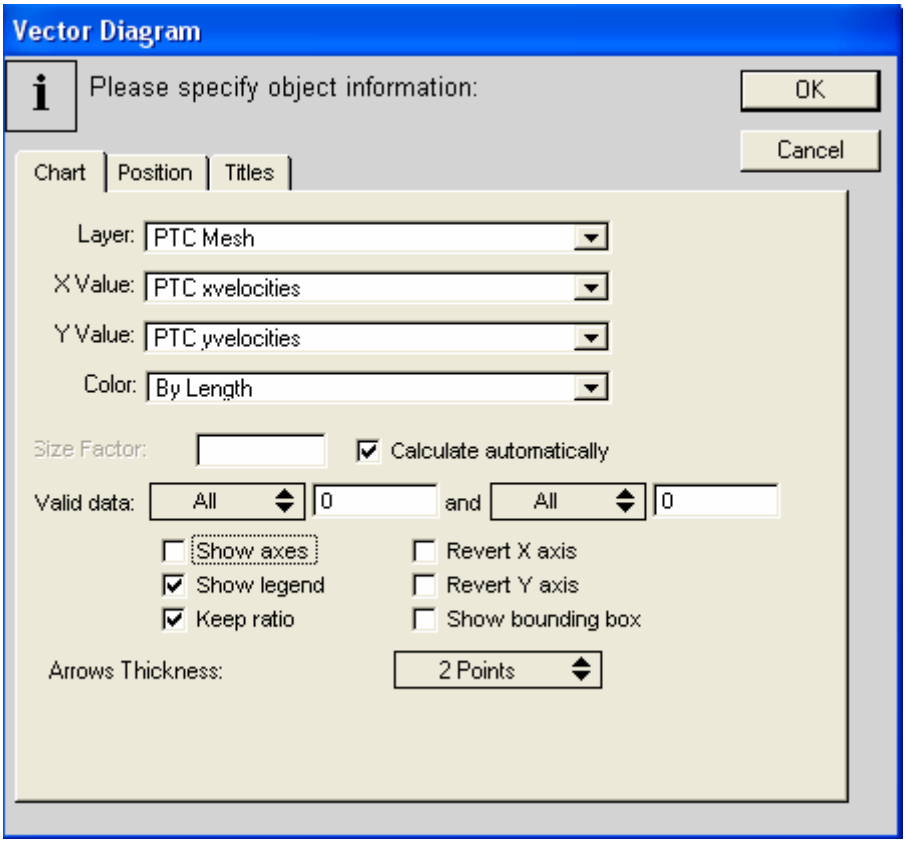

**Σχήμα 5.42. Διαδικασία γραφικής απεικόνισης της ταχύτητας ροής του υπόγειου νερού.**



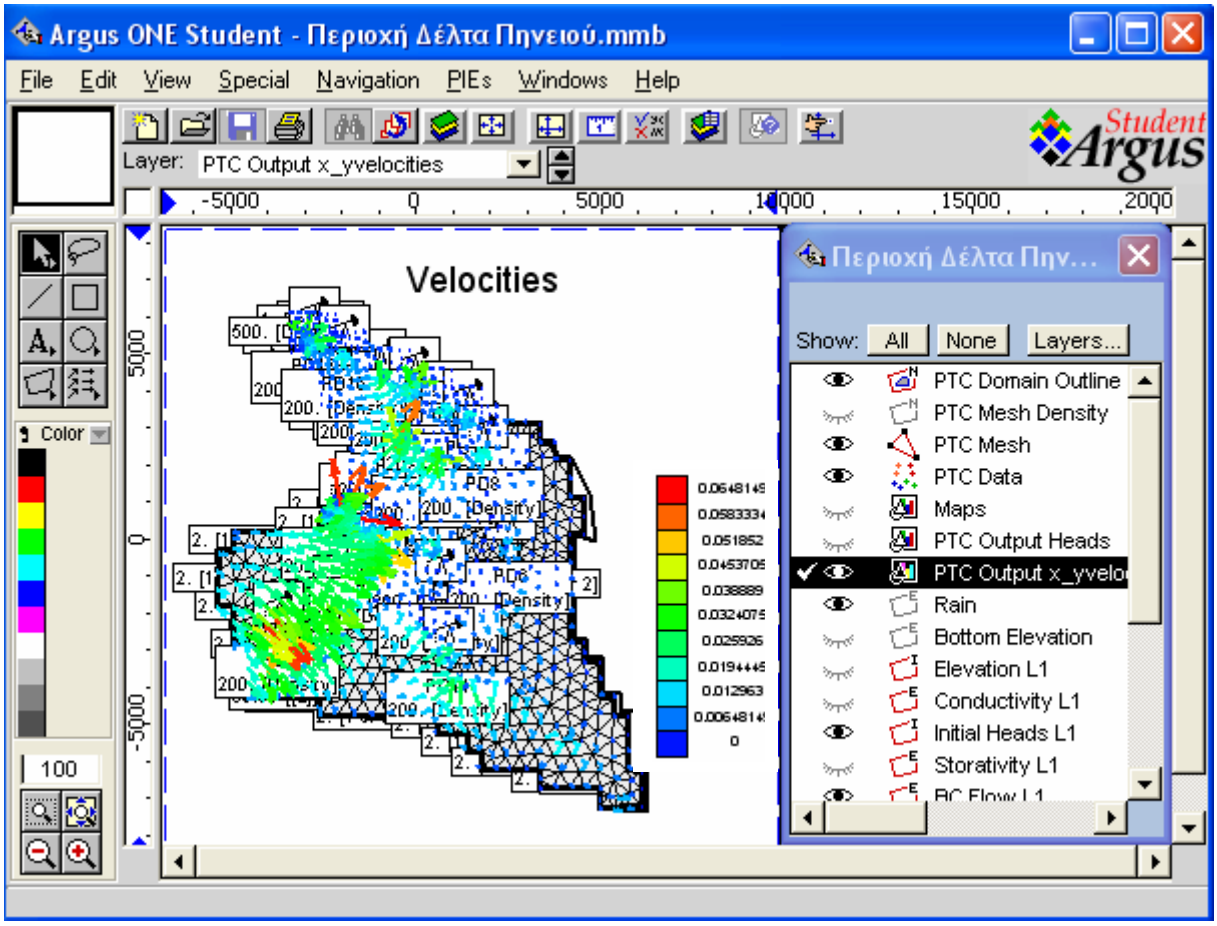

**Σχήμα 5.43. Επιλογή των κατάλληλων δεδομένων.**




**Σχήμα 5.44. Επιλογή του κατάλληλου εργαλείου για τη γραφική απεικόνιση της ταχύτητας του υπόγειου νερού.**




**Σχήμα 5.45. Εισαγωγή των κατάλληλων ρυθμίσεων.**



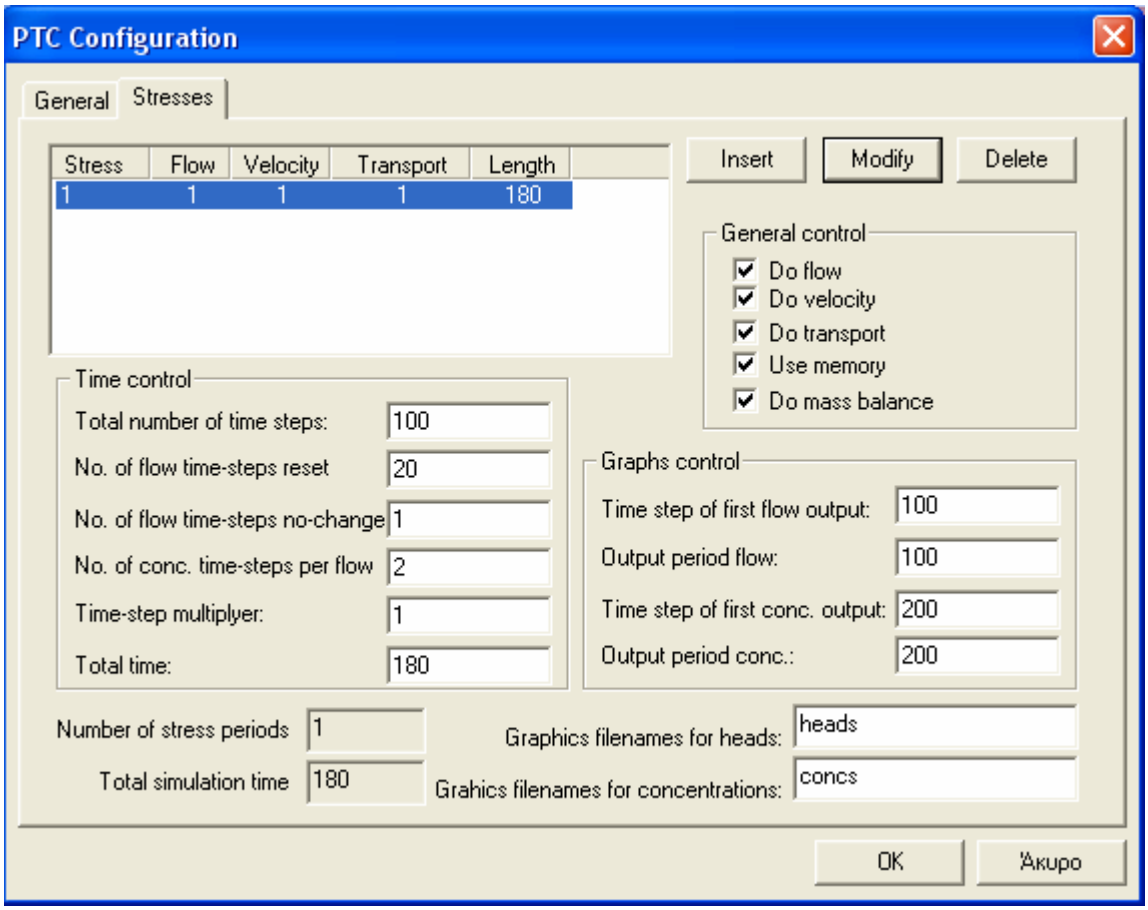

**Σχήμα 5.46. Γραφική απεικόνιση της ταχύτητας του υπόγειου νερού.**

Οι μεγαλύτερες ταχύτητες παρατηρούνται στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης εξαιτίας των πλευρικών υπόγειων εισροών από τη ζώνη ανάπτυξης των κώνων κορημάτων και των πλευρικών κορημάτων στην έξοδο της κοιλάδας του ποταμού Πηνειού προς τη λεκάνη του Δέλτα με κατεύθυνση ανατολική. Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης, οι ταχύτητες είναι μικρότερες εμφανίζοντας όμως μια αύξηση γύρω από τα πηγάδια άντλησης.

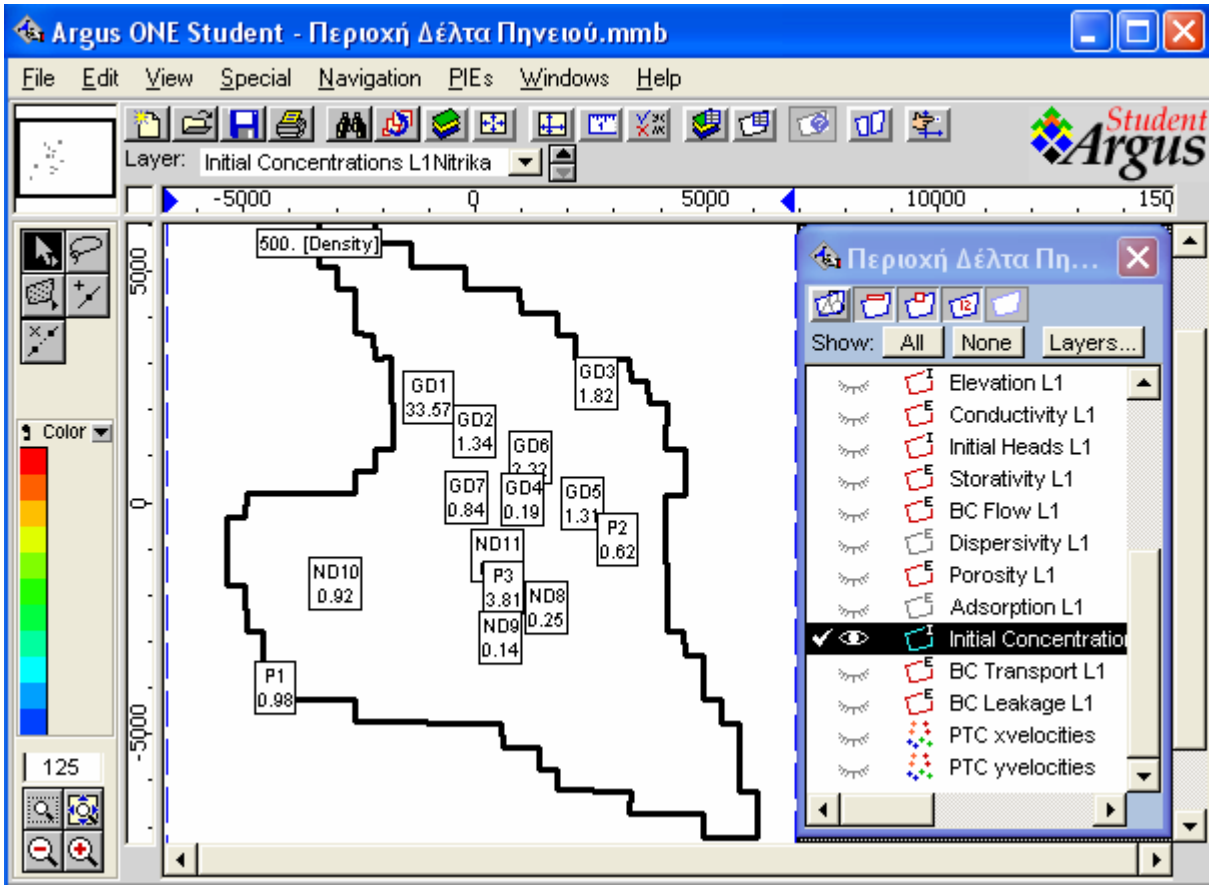
## 5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ ΣΤΟΝ ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ

Για την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν τη μεταφορά ρύπων, ενεργοποιείται το παράθυρο PTC Configuration, από το φάκελο "PIEs" επιλέγοντας το "Edit Project Info…", όπου στο φάκελο "Stresses" σημειώνεται τώρα και η επιλογή "Do transport" ώστε να γίνεται πλέον και ο υπολογισμός της μεταφοράς της μάζας του ρυπαντή, σχήμα 5.47.

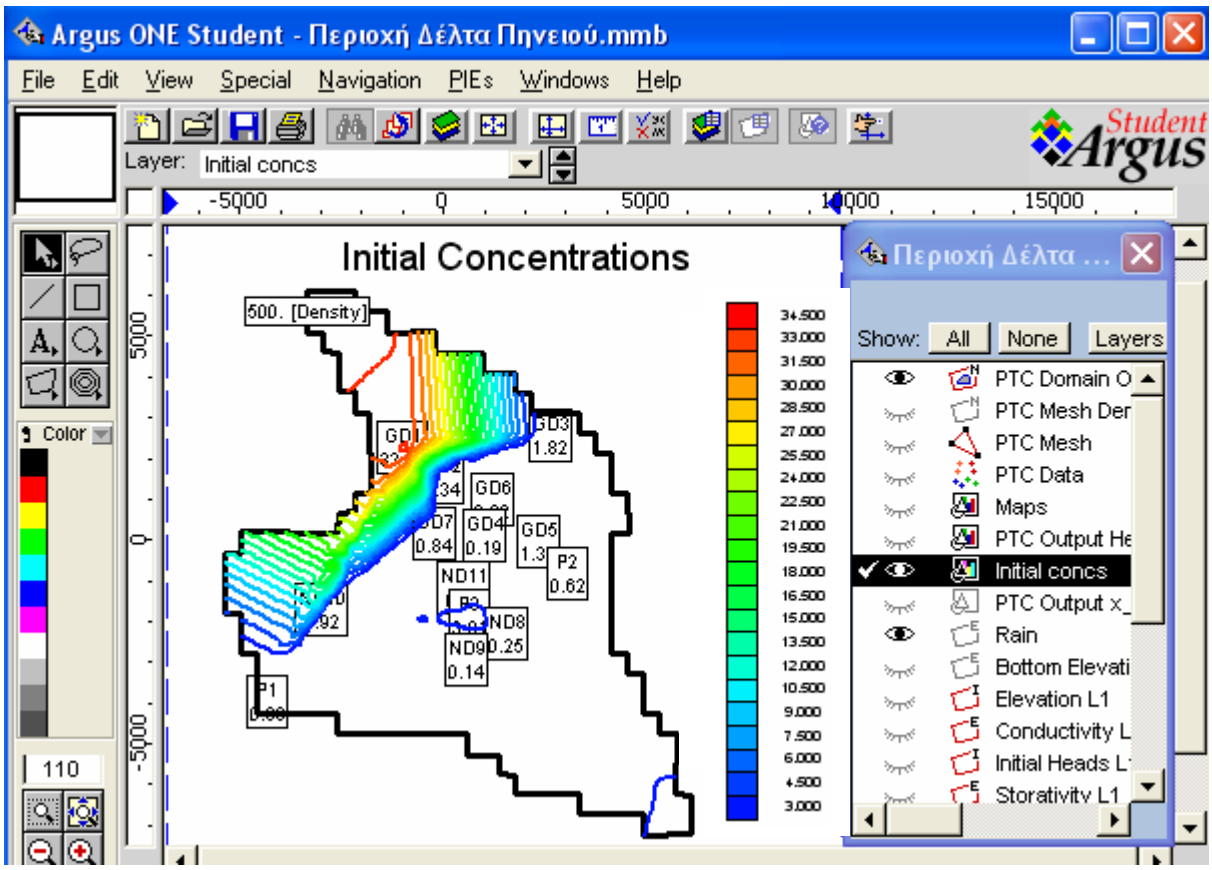
Αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός του έτους σε δύο περιόδους, που η κάθε μία διαρκεί 180 μέρες. Η καλλιεργητική περίοδος διαρκεί από τον Απρίλιο μέχρι τον Σεπτέμβριο και η δεύτερη περίοδος διαρκεί από τον Οκτώβριο μέχρι τον Μάρτιο. Στη συνέχεια στο "Layer" "Initial Concentration L1" εισάγονται οι αρχικές συγκεντρώσεις των νιτρικών οι οποίες προήλθαν από μετρήσεις που διεξήχθησαν στην περιοχή από το ΕΘΙΑΓΕ [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001], κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2000, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.48 ενώ στο σχήμα 5.49 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνισή τους.




**Σχήμα 5.47. Ενεργοποίηση της μεταφοράς μάζας του ρυπαντή.**

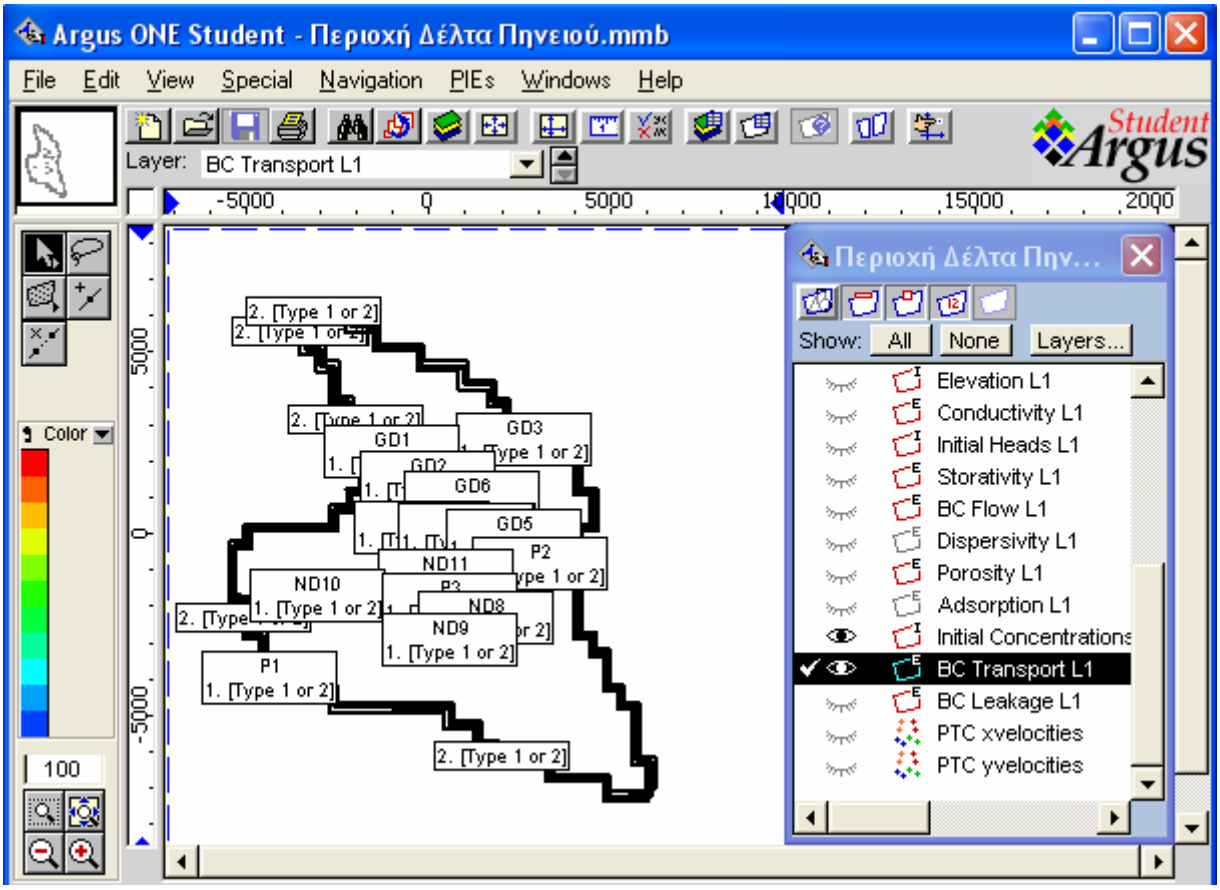



**Σχήμα 5.48. Εισαγωγή των συγκεντρώσεων νιτρικών με βάση μετρήσεις σε πηγάδια της περιοχής κατά την καλλιεργητική περίοδο 2000.**




**Σχήμα 5.49. Γραφική απεικόνιση των αρχικών συγκεντρώσεων των νιτρικών.**

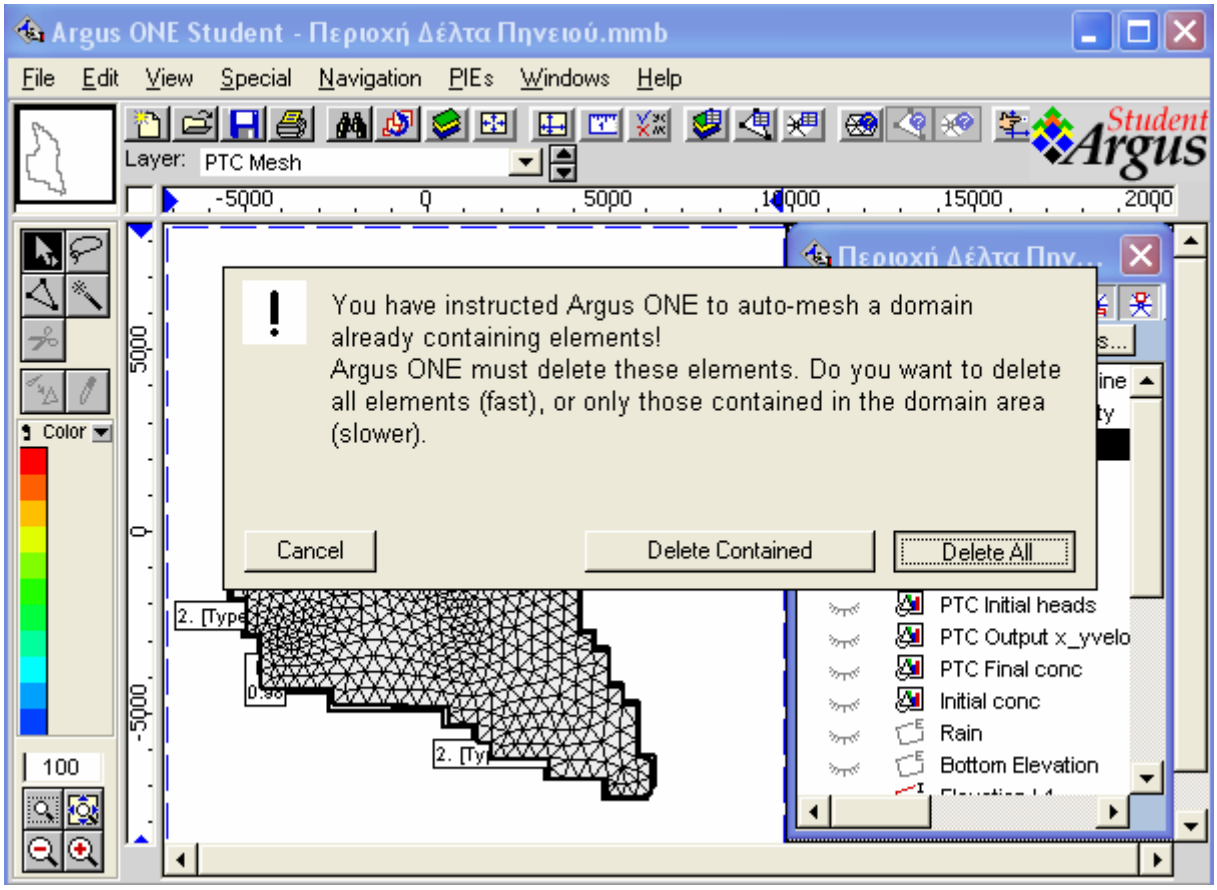
Για την εισαγωγή των οριακών συνθηκών μεταφοράς, επιλέχθηκε το “Layer” “BC Transport” και στα όρια της περιοχής μελέτης θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει ροή μάζας γι’ αυτό και ορίστηκε η συνθήκη δευτέρου είδους με τιμή μηδέν. Επιπλέον στο “Layer” αυτό έγινε εισαγωγή των συγκεντρώσεων των νιτρικών ως οριακές συνθήκες τύπου 1, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.50. Επίσης για την περίοδο αυτή, θεωρήθηκε ότι οι τιμές άντλησης των πηγαδιών είναι οι ίδιες με αυτές που ορίστηκαν για τη μοντελοποίηση της ροής ενώ η βροχόπτωση είναι μηδενική.



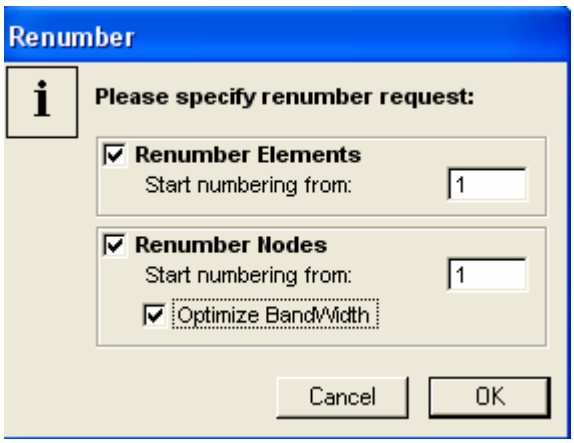

**Σχήμα 5.50. Καθορισμός των οριακών συνθηκών μεταφοράς στην περιοχή μελέτης.**

Αφού συμπληρωθούν τα δεδομένα που αφορούν τη μεταφορά του ρυπαντή, ενεργοποιείται το “Layer” “PTC Mesh” και γίνεται Remesh με τη βοήθεια του “Magic Wand”. Όταν εμφανιστεί το μήνυμα του σχήματος 5.51, επιλέγεται η εντολή “Delete all” και επαναδημιουργείται το πλέγμα.

Στη συνέχεια, από το φάκελο “Special” επιλέγεται το “Renumber” και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 5.52, στο οποίο σημειώνεται η ένδειξη “Optimize BandWidth”. Έτσι, το μοντέλο πραγματοποιεί τη βέλτιστη αρίθμηση των στοιχείων και των κόμβων που δημιουργούνται από το πλέγμα.



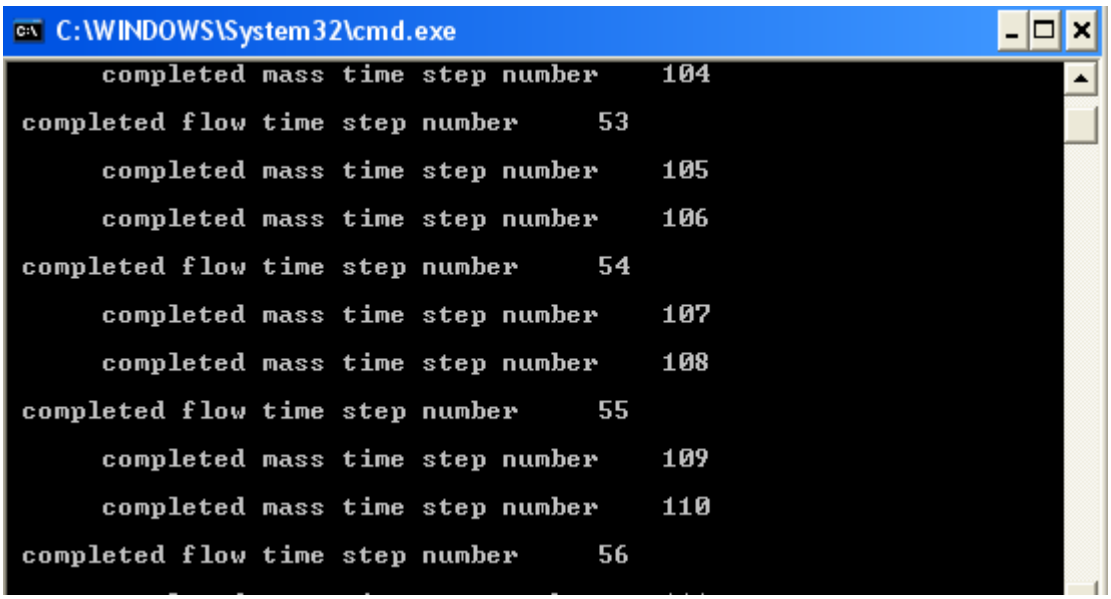

**Σχήμα 5.51. Επιλογή της εντολής "Delete all" και επαναδημιουργία του πλέγματος.**



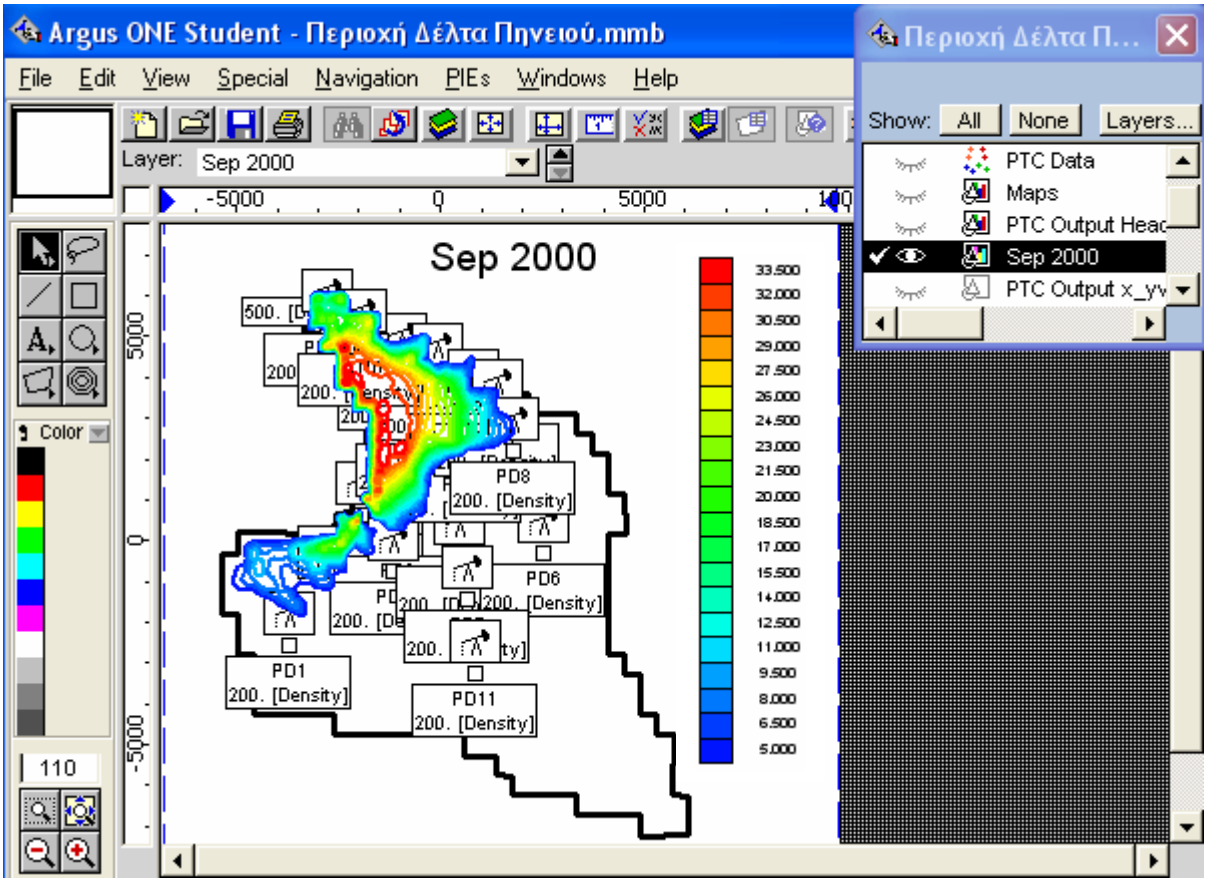

**Σχήμα 5.52. Επιλογή της ένδειξης "Optimize BandWidth".**

Μετά την εισαγωγή όλων των δεδομένων, γίνεται η εκ νέου εκτέλεση του μοντέλου η οποία πραγματοποιείται για την καλλιεργητική περίοδο Απριλίου – Σεπτεμβρίου 2000. Επιλέγεται το "Layer" "PTC Mesh" και από το φάκελο "PIEs" το "Run PTC". Το μοντέλο μεταφέρει τις πληροφορίες από το Argus ONE στο παράθυρο του DOS και στη συνέχεια το PTC αρχίζει την εκτέλεση της προσομοίωσης, η εξέλιξη της οποίας εμφανίζεται στο παράθυρο του DOS, σχήμα 5.53. Μετά την εκτέλεση του προγράμματος, επιλέγεται το "Layer" "PTC Data" και στη συνέχεια από το φάκελο "File", το "Import PTC Data" και το "Text File". Ακολούθως εισάγεται

το αρχείο PTC_Mesh_concs_s1.fin και ενεργοποιώντας το “Layer” “PTC Final conc”, που μετονομάζουμε “concs Sep 2000”, παρουσιάζονται με γραφικό τρόπο τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των νιτρικών μετά από 180 μέρες, δηλαδή στο τέλος Σεπτεμβρίου όπως φαίνονται στο σχήμα 5.54.




**Σχήμα 5.53. Εκτέλεση του PTC.**

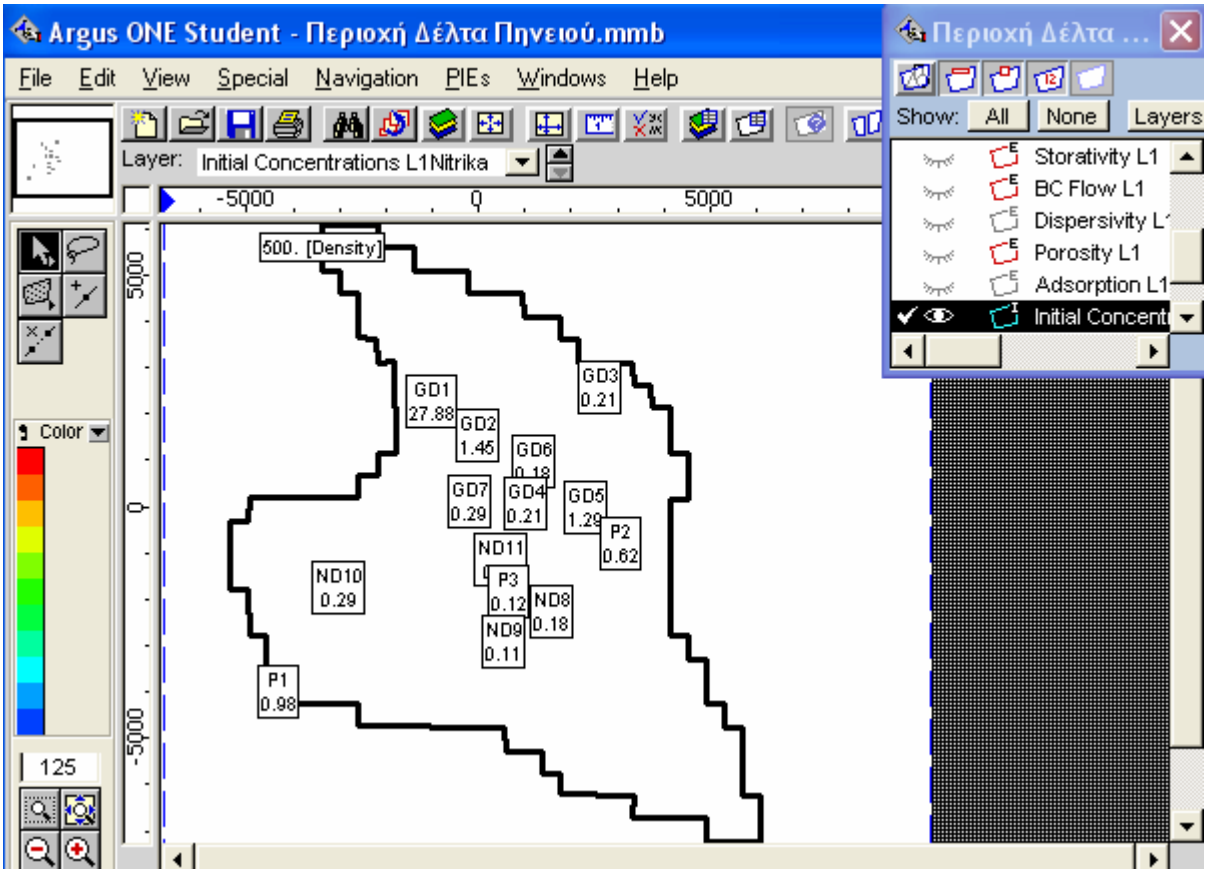



**Σχήμα 5.54. Γραφική απεικόνιση των τελικών συγκεντρώσεων των νιτρικών, το Σεπτέμβριο του 2000.**

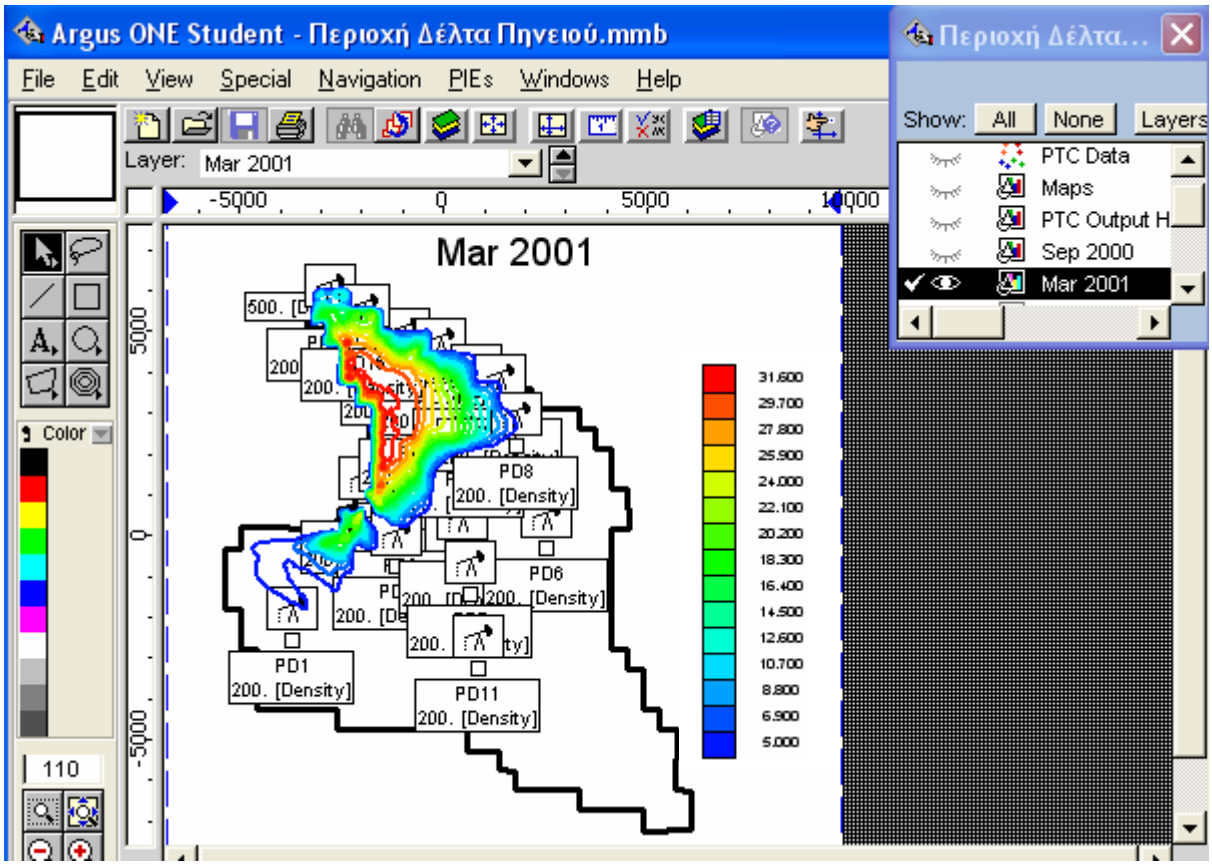
Όπως προκύπτει από το γράφημα οι τιμές των νιτρικών στην περιοχή είναι αρκετά χαμηλές και βρίσκονται κάτω από το όριο των 50 mg/l που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για το πόσιμο νερό. Έτσι, δεν υπάρχει κίνδυνος όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία αλλά και την ισορροπία του οικοσυστήματος στην περιοχή. Οι μεγαλύτερες τιμές τους πάντως εμφανίζονται στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης και φτάνουν στα 33,5 mg/l. Οι μικρές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων είναι ενδεικτικές της υψηλής ικανότητας αυτοκαθαρισμού του συστήματος δεδομένου ότι, στην περιοχή υπάρχει σημαντική αγροτική δραστηριότητα που συνοδεύεται από χημική λίπανση. Η απουσία υψηλών συγκεντρώσεων σε νιτρικά ιόντα όμως, πιθανόν να οφείλεται και στο γεγονός ότι η πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου συστήματος είναι ιδιαίτερα ρηχή, ο χρόνος παραμονής του ρύπου στη ζώνη αερισμού είναι μικρός και έτσι, δεν υπάρχει δυνατότητα οξείδωσής του στη μορφή νιτρικού αζώτου.

Για τη μελέτη των συγκεντρώσεων των νιτρικών ιόντων κατά τη διάρκεια του επόμενου εξαμήνου πραγματοποιείται επανεκτέλεση του προγράμματος χρησιμοποιώντας τις τελικές συγκεντρώσεις που προέκυψαν από την περίοδο αυτή ως αρχικές συνθήκες για την επόμενη περίοδο, λαμβάνοντας βέβαια υπόψη και τις μεταβολές που παρατηρούνται κατά την χειμερινή περίοδο.

Έτσι λοιπόν, μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο, που δεν πραγματοποιούνται αντλήσεις, τα πηγάδια δε λειτουργούν ενώ οι συγκεντρώσεις των νιτρικών είναι μειωμένες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.55. Επιλέγουμε αρχικά το “Layer” “BC Flow”, όπου μηδενίζουμε τις τιμές άντλησης των πηγαδιών, και στη συνέχεια επιλέγοντας το “Layer” “BC Transport” εισάγουμε τις νέες συγκεντρώσεις των νιτρικών. Για την εισαγωγή των τελικών συγκεντρώσεων των νιτρικών ως αρχικές συνθήκες του επόμενου εξαμήνου μετατρέπουμε το “Layer” “Initial Concentrations” από Information “Layer” σε Data “Layer”. Έτσι, το μοντέλο διαβάζει πλέον όχι πληροφορίες αλλά δεδομένα από κάποιο αρχείο που στην προκειμένη περίπτωση είναι το αρχείο που περιέχει τις τελικές συγκεντρώσεις των νιτρικών της προηγούμενης περιόδου. Από το φάκελο “File” επιλέγεται το “Import Initial Concentrations” και το “Text File” από όπου εισάγεται το αρχείο “PTC_Mesh_concs_s1.fin” της προηγούμενης εκτέλεσης της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό το πρόγραμμα αντιστοιχεί τις συγκεντρώσεις των νιτρικών στους κόμβους δημιουργώντας έτσι τις αρχικές συνθήκες που απαιτούνται για την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών. Ακόμη, θεωρούμε ότι κατά την περίοδο αυτή η τιμή της βροχόπτωσης στο “Layer” “Rain” είναι 0,001 m/d. Τελικά, μετά την εκτέλεση του προγράμματος με τον τρόπο που προαναφέρθηκε, προκύπτει η γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των νιτρικών τον Μάρτιο του 2001, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.56.



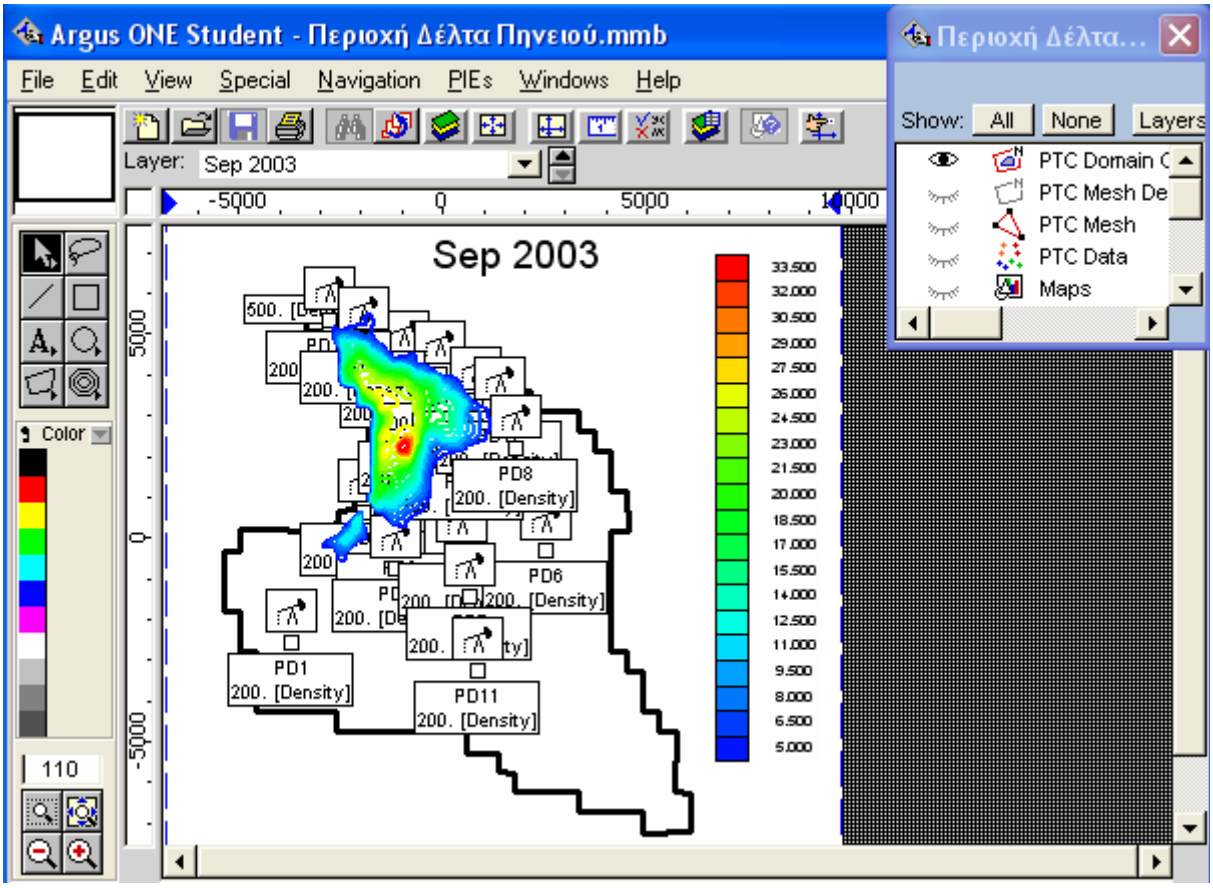

**Σχήμα 5.55. Συγκεντρώσεις των νιτρικών με βάση μετρήσεις σε πηγάδια της περιοχής κατά την χειμερινή περίοδο 2000-2001.**




**Σχήμα 5.56. Γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των νιτρικών το Μάρτιο του 2001.**

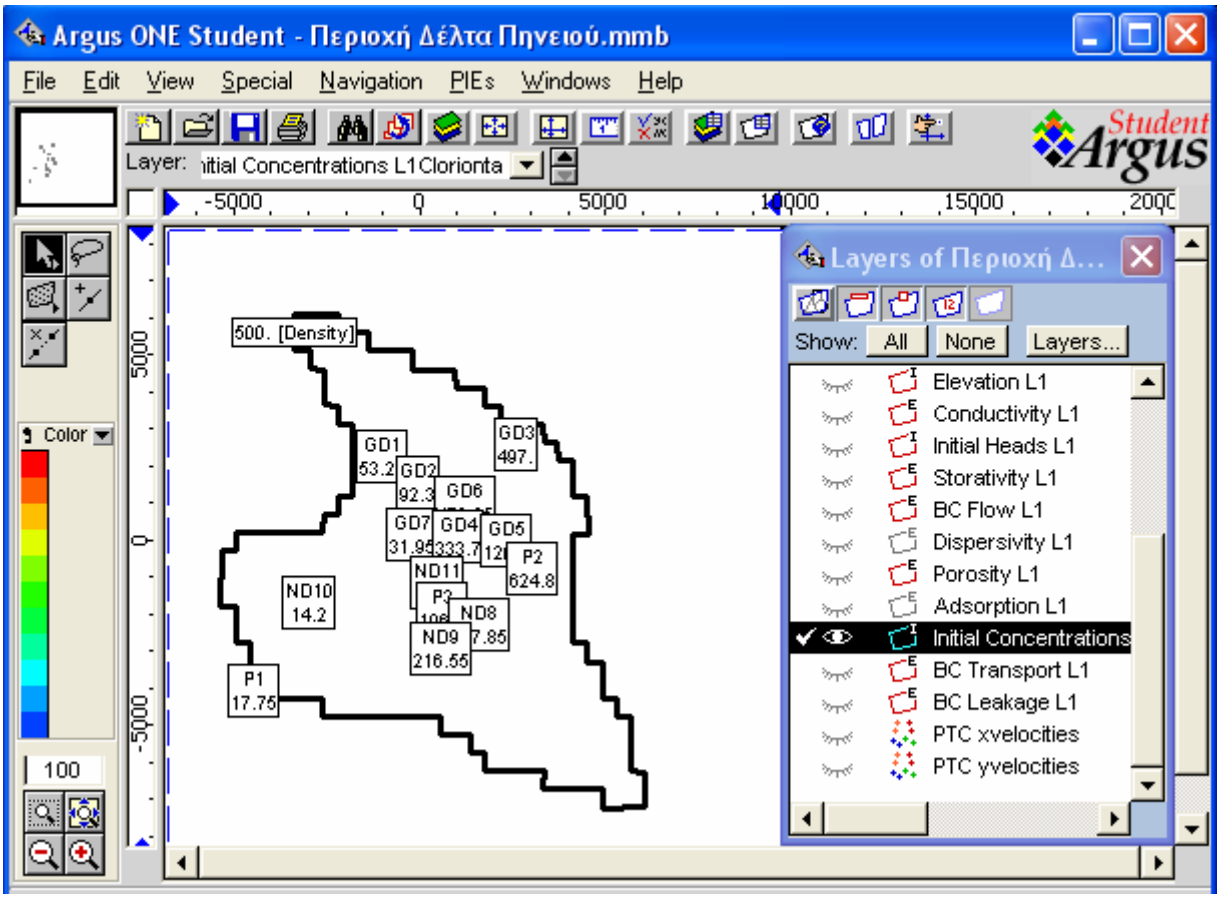
Όπως προκύπτει από το γράφημα του σχήματος 5.56, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών μειώνονται κατά 5,7 % την περίοδο αυτή φτάνοντας τα 31,6 mg/l λόγω της διακοπής της χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στην περιοχή. Επιπλέον το γεγονός ότι δεν πραγματοποιούνται αντλήσεις καθώς και η βροχόπτωση συντελούν στην αύξηση της πιεζομετρικής στάθμης και στην περαιτέρω μείωση των συγκεντρώσεων των νιτρικών.

Στη συνέχεια ακολούθησαν άλλες 5 εφαρμογές του μοντέλου με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω για κάθε εξάμηνο, εισάγοντας τις τελικές συγκεντρώσεις των νιτρικών ως αρχικές συνθήκες του επόμενου εξαμήνου, όπου τελικά η τελευταία εφαρμογή αποτελεί και την πρόβλεψη της συγκέντρωσης των νιτρικών για τη σημερινή υπάρχουσα κατάσταση στην περιοχή μελέτης, δηλαδή την περίοδο Απριλίου – Σεπτεμβρίου 2003, η γραφική απεικόνιση της οποίας φαίνεται στο σχήμα 5.57. Παρατηρείται λοιπόν, μια μείωση της έκτασης στην οποία εντοπίζονται συγκεντρώσεις νιτρικών με τη μέγιστη τιμή τους να εστιάζεται σε μια μικρότερη περιοχή. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών παραμένουν σε ικανοποιητικά επίπεδα όσον αφορά την ισορροπία του οικοσυστήματος της περιοχής.




**Σχήμα 5.57. Γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των νιτρικών το Σεπτέμβριο του 2003.**

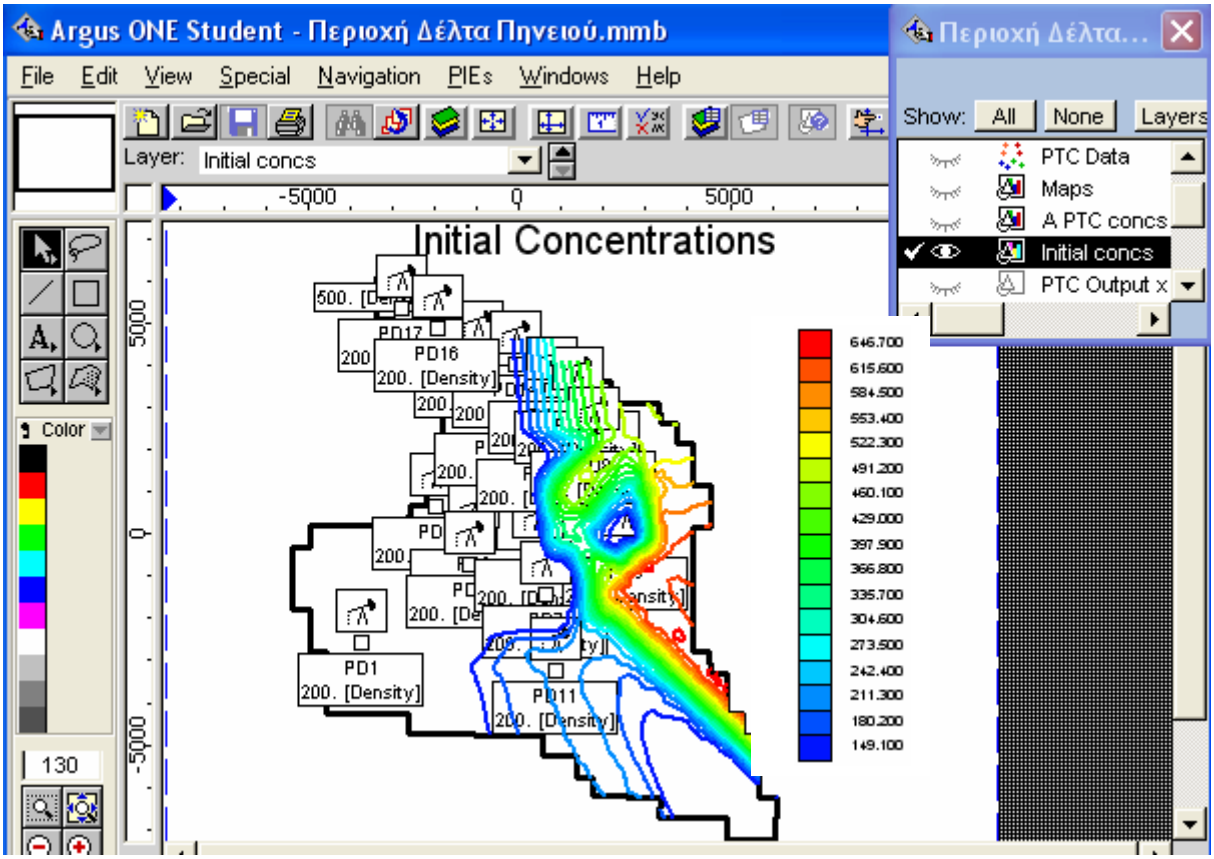
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τον υπολογισμό της μεταφοράς της μάζας των χλωριόντων. Στο “Layer” “Initial Concentration L1” εισήχθησαν οι αρχικές συγκεντρώσεις των χλωριόντων οι οποίες προήλθαν και αυτές από μετρήσεις που διεξήχθησαν στην περιοχή από το ΕΘΙΑΓΕ [Μελέτη ΕΘΙΑΓΕ, 2001], την καλλιεργητική περίοδο του 2000, σχήμα 5.58, ενώ η γραφική απεικόνισή τους φαίνεται στο σχήμα 5.59.



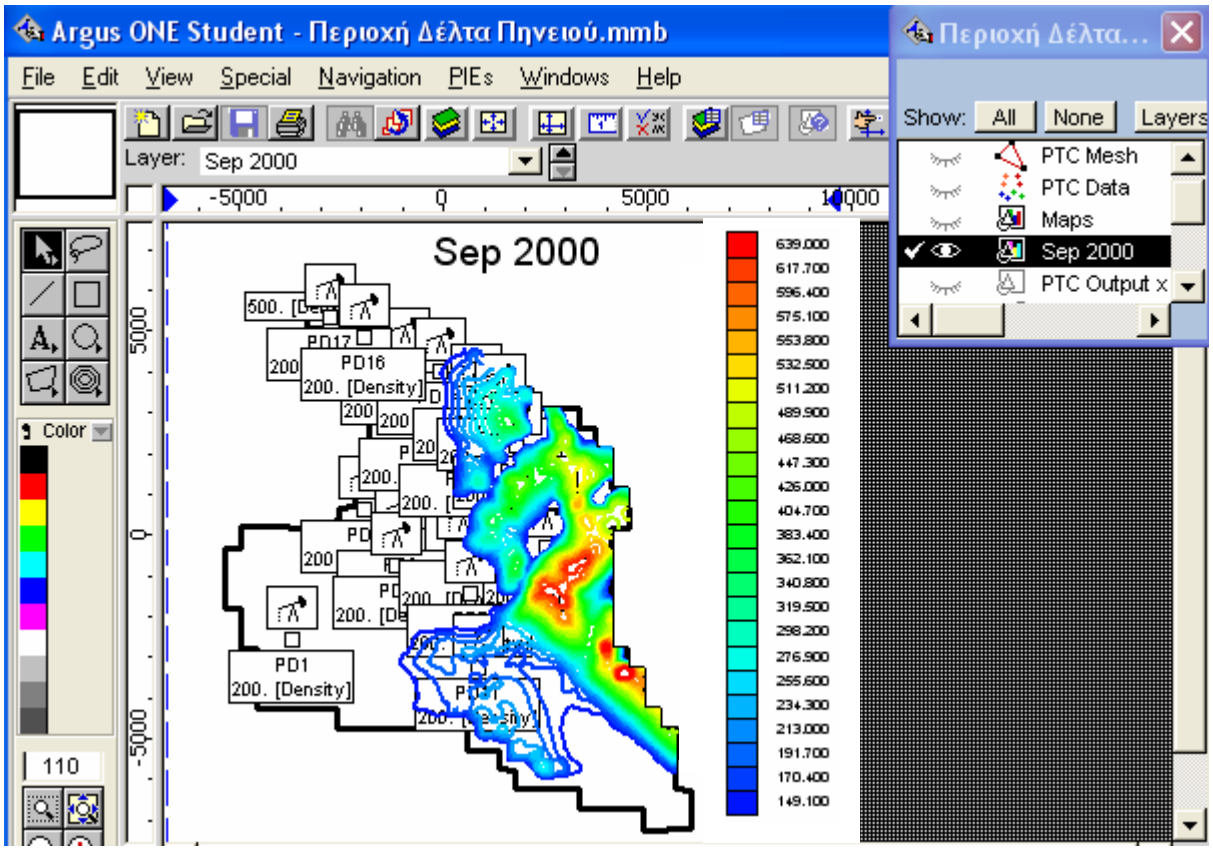

**Σχήμα 5.58. Εισαγωγή των συγκεντρώσεων χλωριόντων με βάση μετρήσεις σε πηγάδια της περιοχής την καλλιεργητική περίοδο του 2000.**

Για την εισαγωγή των οριακών συνθηκών μεταφοράς, επιλέχθηκε το “Layer” “BC Transport” και στα όρια της περιοχής μελέτης που βρίσκονται σε επαφή με τη θάλασσα εφαρμόστηκε η οριακή συνθήκη δευτέρου είδους με τιμή 10000 mg/l ιόντα χλωρίου, συγκέντρωση που χαρακτηρίζει το θαλασσινό νερό. Στην υπόλοιπη οριακή περιοχή εφαρμόστηκε η οριακή συνθήκη πρώτου είδους με τιμή 0. Επίσης για την περίοδο αυτή θεωρήθηκε ότι οι τιμές άντλησης των πηγαδιών είναι οι ίδιες με αυτές που ορίστηκαν για τη μοντελοποίηση της ροής ενώ η βροχόπτωση είναι μηδενική.

Μετά την εκτέλεση του προγράμματος η γραφική απεικόνιση των τελικών συγκεντρώσεων των χλωριόντων μετά από 180 μέρες, στο τέλος του Σεπτεμβρίου του 2000, φαίνεται στο σχήμα 5.60.




**Σχήμα 5.59. Γραφική απεικόνιση των αρχικών συγκεντρώσεων των χλωριόντων την καλλιεργητική περίοδο του 2000.**



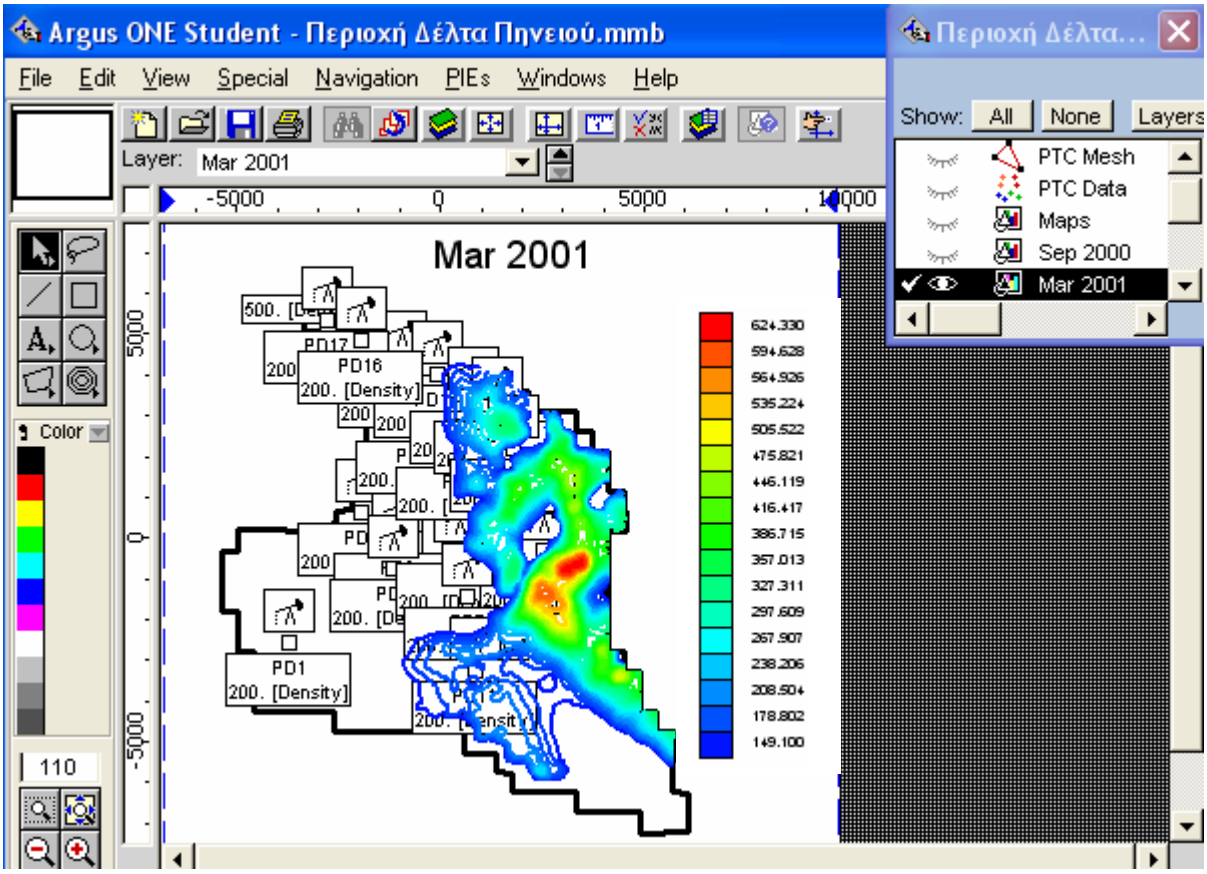

**Σχήμα 5.60. Γραφική απεικόνιση των τελικών συγκεντρώσεων των χλωριόντων το Σεπτέμβριο του 2000.**

Όπως προκύπτει από το γράφημα του σχήματος 5.60, κατά την καλλιεργητική περίοδο όπου η άρδευση γίνεται με εντατικό ρυθμό, η θαλάσσια διείσδυση προκαλεί σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού σχεδόν σε όλη την περιοχή της παράκτιας ζώνης. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, το όριο των χλωριόντων που έχει θεσπίσει για το πόσιμο νερό είναι 150 mg/l ενώ όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων ξεπεράσει τα 300 mg/l το νερό πλέον θεωρείται υφάλμυρο. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωριόντων, που είναι ενδεικτικές της θαλάσσιας διείσδυσης, παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης στην περιοχή Παλαιοποτάμου αλλά κυρίως πιο νότια στην κύρια έξοδο του ποταμού προς τη θάλασσα, όπου η συγκέντρωση φτάνει τα 639 mg/l και εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα ανάμιξης του θαλασσινού νερού με το γλυκό νερό εντός της κοίτης του Πηνειού ποταμού και μάλιστα σε αρκετή απόσταση από την ακτή. Η εμφάνισή της στις θέσεις αυτές σχετίζεται ακόμη, και με την περιορισμένη τροφοδοσία νερού που δέχονται οι περιοχές αυτές και πιθανόν με τη λιθολογία του συστήματος που δεν εμποδίζει αποτελεσματικά την είσοδο της θάλασσας.

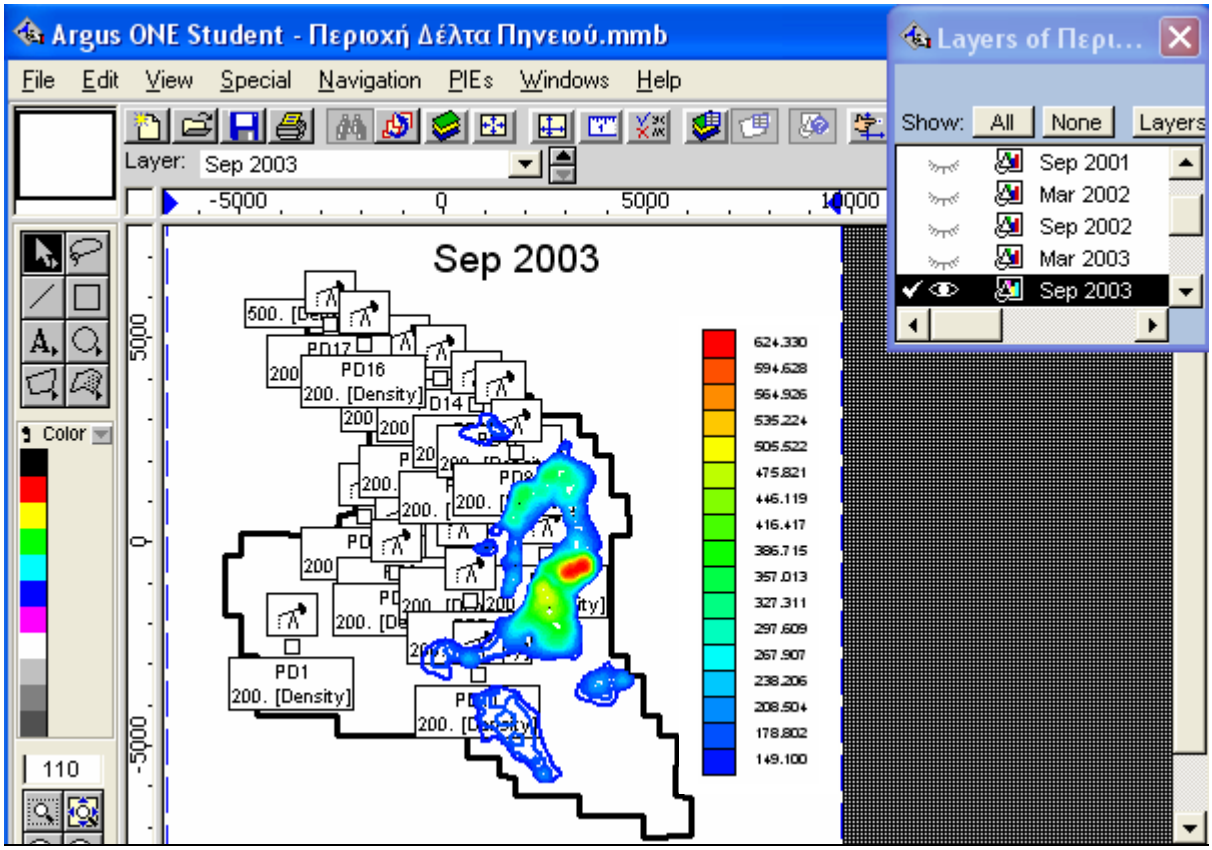
Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης, διατηρείται ικανό υδραυλικό φορτίο και η θαλάσσια διείσδυση εμποδίζεται αποτελεσματικά.

Με την ίδια διαδικασία γίνεται και η εκτέλεση της προσομοίωσης της κίνησης των χλωριόντων για τη χειμερινή περίοδο κατά την οποία δεν πραγματοποιούνται αντλήσεις από τα πηγάδια και η τιμή της βροχόπτωσης στο “Layer” “Rain” είναι 0,001 m/d. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το επόμενο εξάμηνο φαίνονται στο σχήμα 5.61.
Όπως προκύπτει από το γράφημα του σχήματος 5.61, την περίοδο αυτή εξαιτίας της διακοπής των αντλήσεων από τα πηγάδια, παρατηρείται ανάκαμψη της πιεζομετρικής στάθμης με αποτέλεσμα να μειώνεται και η θαλάσσια διείσδυση κατά 2,3 % φτάνοντας έτσι η μέγιστη συγκέντρωση των χλωριόντων τα 624,3 mg/l.

Στη συνέχεια ακολούθησαν άλλες 5 εφαρμογές του μοντέλου με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω για κάθε εξάμηνο, όπου τελικά η τελευταία εφαρμογή αποτελεί και την πρόβλεψη της συγκέντρωσης των χλωριόντων για τη σημερινή υπάρχουσα κατάσταση στην περιοχή μελέτης, δηλαδή την περίοδο Απριλίου – Σεπτεμβρίου 2003, η γραφική απεικόνιση της οποίας φαίνεται στο σχήμα 5.62. Όπως προκύπτει, σε σχέση με το 2000, παρατηρείται μία μικρή μείωση της έκτασης στην οποία εμφανίζεται η θαλάσσια διείσδυση και κατ’ επέκταση η μέγιστη τιμή των χλωριόντων, που φτάνει τα 624,3 mg/l. Το αποτέλεσμα λοιπόν είναι το πρόβλημα της υφαλμύρινσης να παραμένει έντονο στην περιοχή προκαλώντας αρνητικές επιπτώσεις.




**Σχήμα 5.61. Γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των χλωριόντων το Μάρτιο του 2001.**




**Σχήμα 5.62. Γραφική απεικόνιση των συγκεντρώσεων των χλωριόντων το Σεπτέμβριο του 2003.**

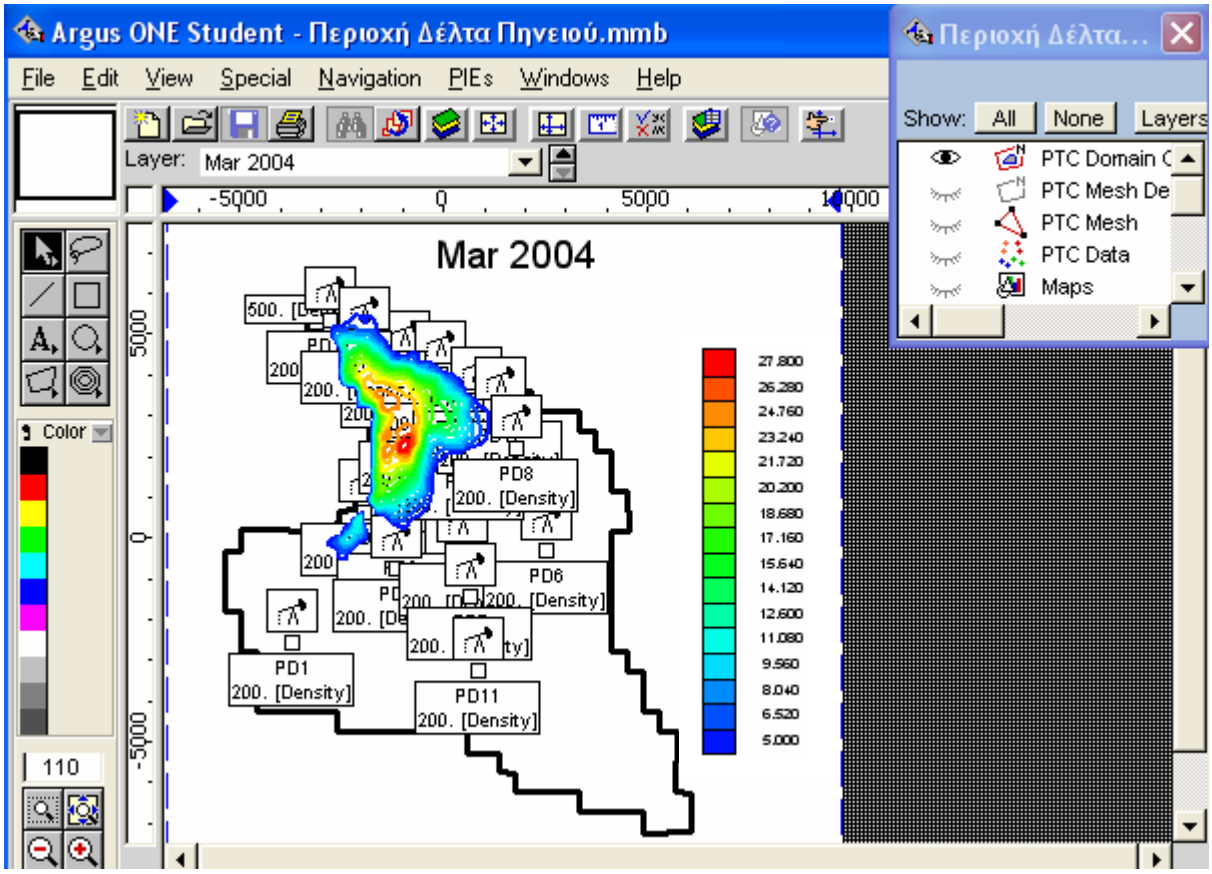
Η θαλάσσια διείσδυση αν και είναι ιδιαίτερα έντονη κατά την καλλιεργητική περίοδο, προκαλεί αθροιστική βλάβη στο υδροφόρο σύστημα με αποτέλεσμα την προοδευτική υποβάθμιση των υδατικών του πόρων. Σε μερικές περιοχές όπως φαίνεται και από το γράφημα του σχήματος 5.62, τα υπόγεια νερά είναι προβληματικά ακόμα και για αρδευτική χρήση σε ανθεκτικές καλλιέργειες και σε καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καλλιέργειες της περιοχής δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές, ότι τα εδάφη δεν είναι καλά αποστραγγιζόμενα και ότι η περιοχή αποτελεί ένα σημαντικό υγροβιότοπο, αναμένεται ότι το πρόβλημα της υφαλμύρινσης των υπόγειων νερών άρδευσης θα προκαλέσει στο μέλλον σημαντικά προβλήματα.

## 5.4 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

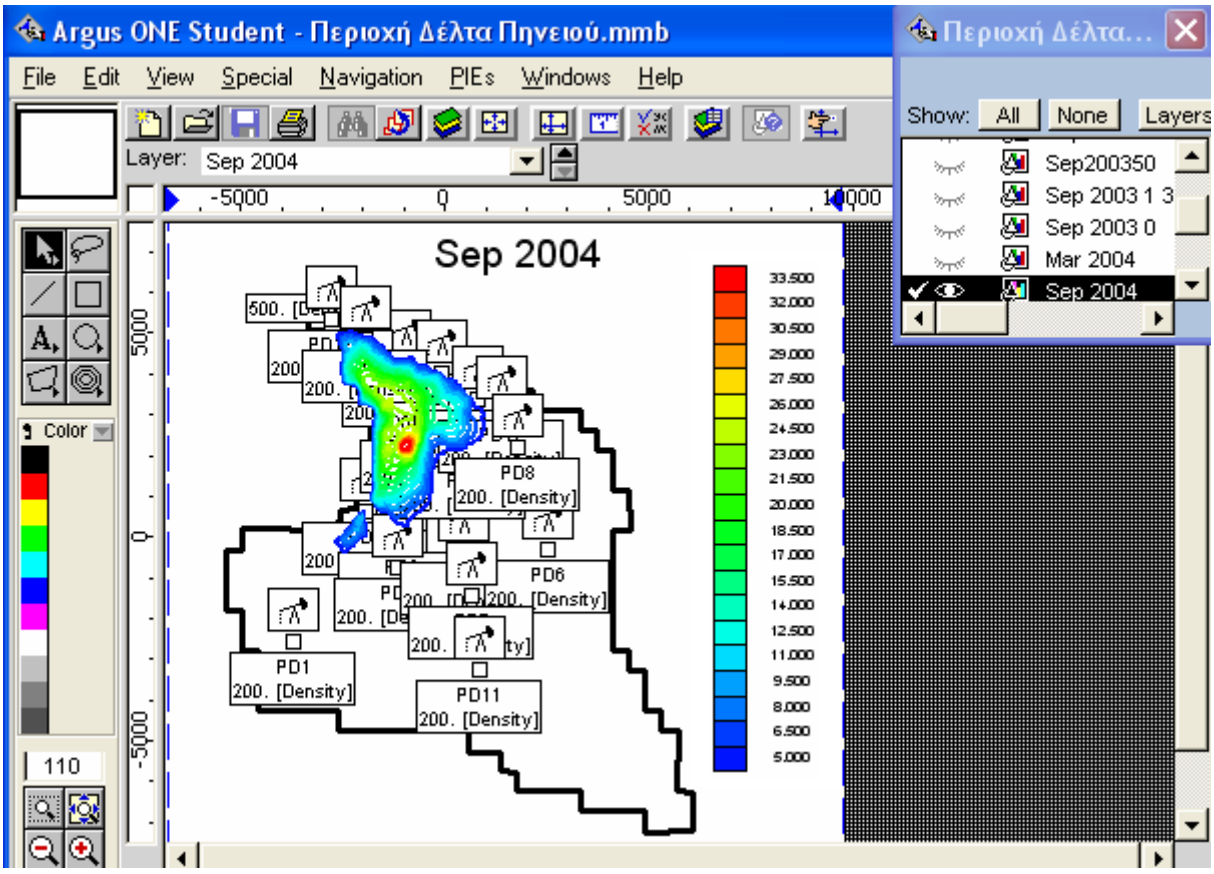
Όπως προέκυψε από το γράφημα του σχήματος 5.57 οι μέγιστες τιμές των νιτρικών που παρατηρούνται κατά το Σεπτέμβριο του 2003 φτάνουν τα 33,5 mg/l και είναι κυρίως στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Οι συγκεντρώσεις αυτές δεν εμπνέουν καμία ανησυχία όσον αφορά την ανθρώπινη υγεία αλλά και την οικολογία της περιοχής.
Σύμφωνα με την πρόβλεψη της συγκέντρωσης των νιτρικών για το Μάρτιο του 2004 όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.63, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης των νιτρικών σε ποσοστό 17 % με τη μέγιστη τιμή τους να είναι 27,8 mg/l.

Επίσης, μετά την καλλιεργητική περίοδο, το Σεπτέμβριο του 2004 η συγκέντρωση των νιτρικών σημειώνει μία αύξηση σε ποσοστό 20,5 % φτάνοντας τα 33,5 mg/l, σχήμα 5.64.

Εξαιτίας της έντονης καλλιεργητικής δραστηριότητας στην περιοχή καθώς και της αυξημένης χρήσης λιπασμάτων μια πιθανή συσσώρευση των νιτρικών στη περιοχή θα προκαλούσε σοβαρά προβλήματα. Έτσι, αν τριπλασιάζονταν η συγκέντρωση των νιτρικών στην περιοχή μελέτης, τότε για το Σεπτέμβριο του 2003 θα προέκυπτε το γράφημα του σχήματος 5.65. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή η μέγιστη συγκέντρωση των νιτρικών θα έφτανε τα 91 mg/l, συγκέντρωση πολύ μεγαλύτερη από τα ανώτατα επιτρεπτά όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για το πόσιμο νερό, που είναι 50 mg/l.

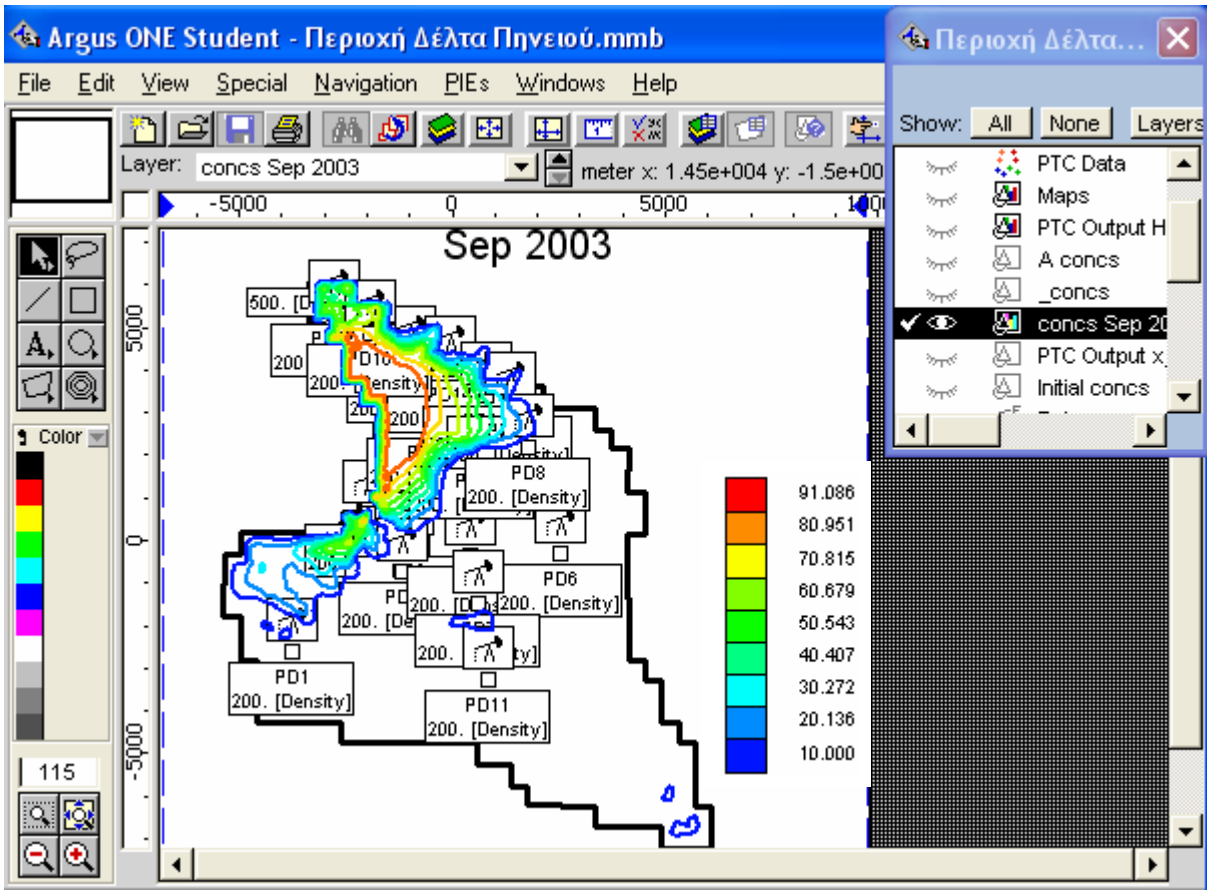



**Σχήμα 5.63. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των νιτρικών το Μάρτιο του 2004.**




**Σχήμα 5.64. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των νιτρικών το Σεπτέμβριο του 2004.**

Ακόμη, στην περίπτωση αυτή, η περιοχή στην οποία η συγκέντρωση των νιτρικών ξεπερνά το ανώτατο επιτρεπτό όριο καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση γεγονός, που θα προκαλούσε σημαντικά προβλήματα στη χρήση του νερού στην περιοχή αλλά και την διατάραξη του οικοσυστήματος αν λάβει κανείς υπόψη του το μεγάλο πληθυσμό πουλιών και ζώων που φιλοξενούνται στην περιοχή.

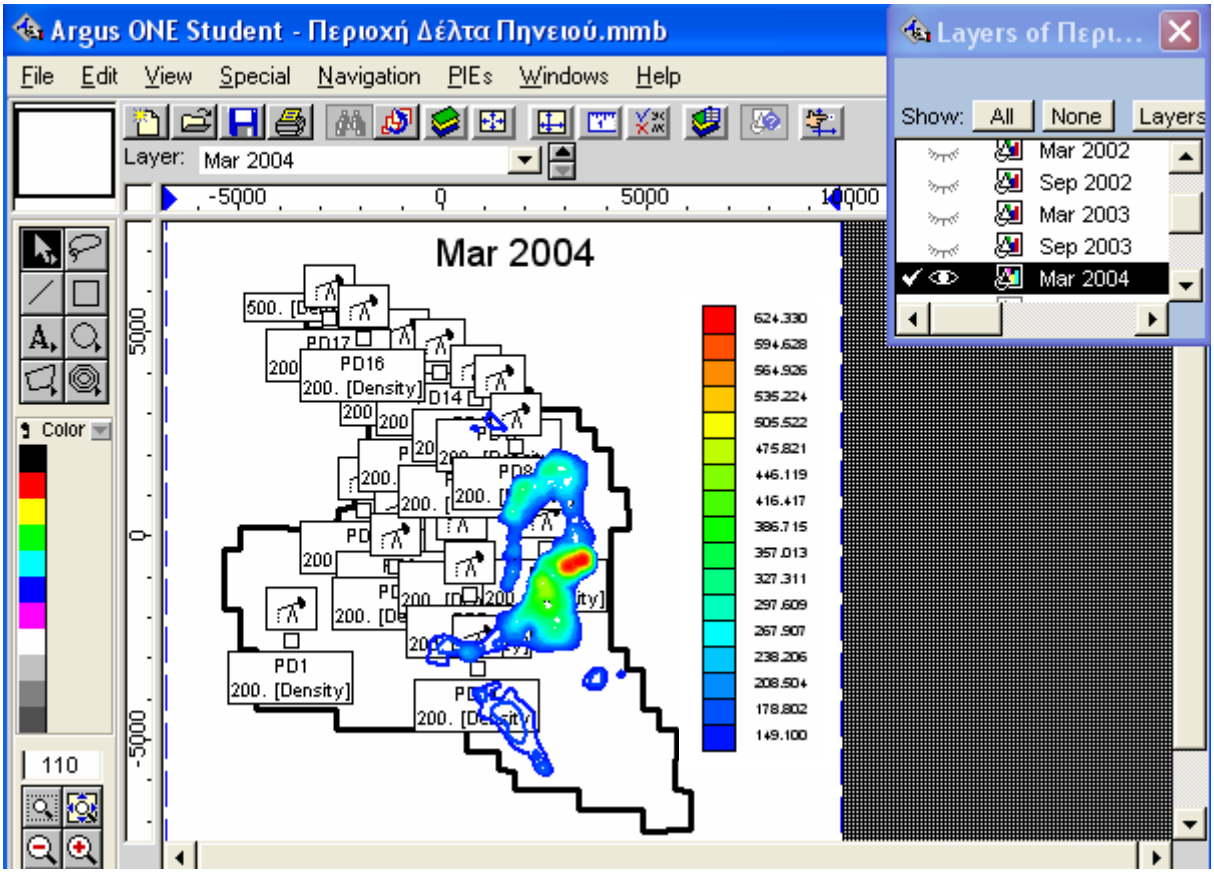



**Σχήμα 5.65. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των νιτρικών το Σεπτέμβριο του 2003, αν τριπλασιάζονταν η συγκέντρωση των νιτρικών.**

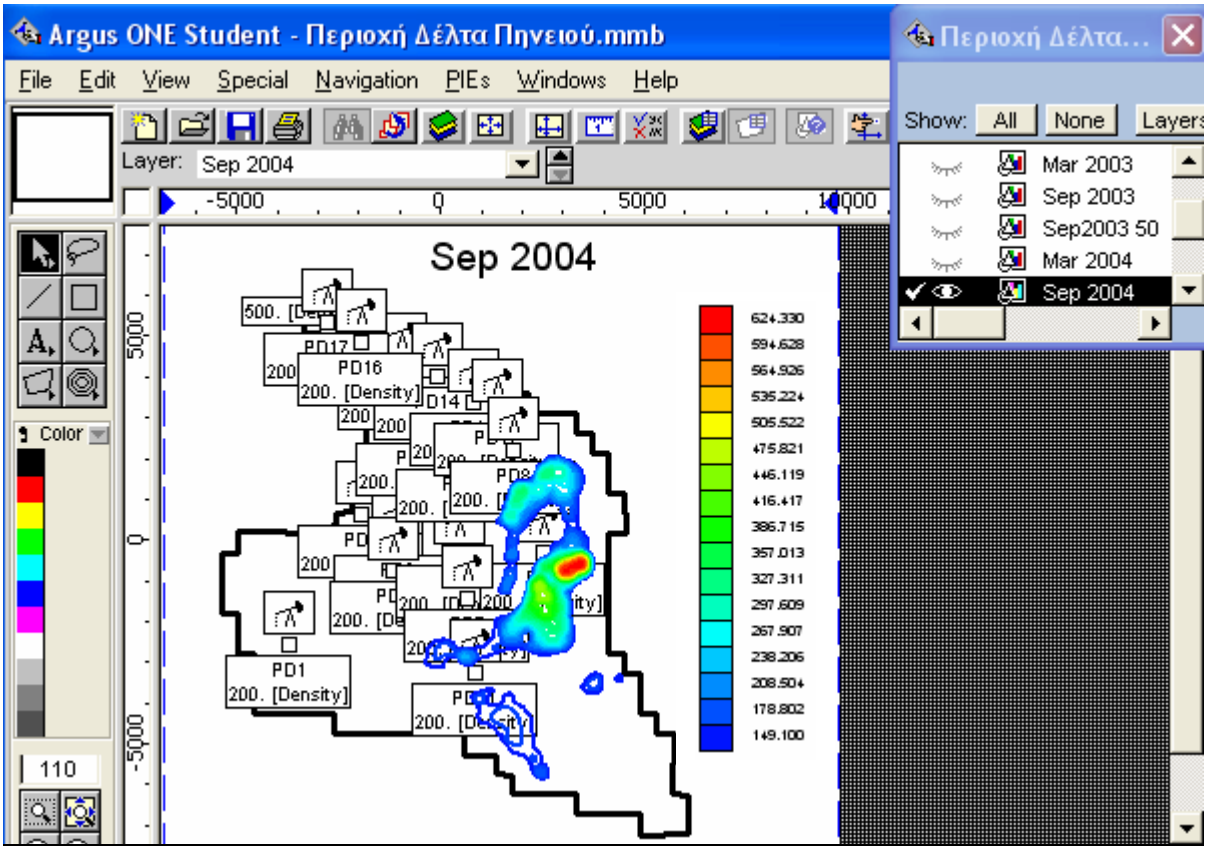
Όσον αφορά τη συγκέντρωση των χλωριόντων, όπως προέκυψε από το γράφημα του σχήματος 5.62, το Σεπτέμβριο του 2003 παρουσιάζεται αυξημένη στην παράκτια ζώνη, στο βόρειο και κεντρικό τμήμα αυτής όπου η τιμή φτάνει τα 624,3 mg/l. Η συγκέντρωση αυτή υπερβαίνει κατά πολύ το ανώτατο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το πόσιμο νερό που όπως προαναφέρθηκε είναι τα 150 mg/l. Σύμφωνα με την πρόβλεψη για τη συγκέντρωση των χλωριόντων το Μάρτιο του 2004 όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.66, παρατηρείται μια μικρή μείωση της έκτασης στην οποία εμφανίζεται θαλάσσια διείσδυση εξαιτίας της ανόδου της πιεζομετρικής στάθμης κατά τη χειμερινή περίοδο.

Μετά την καλλιεργητική περίοδο, το Σεπτέμβριο του 2004 το επίπεδο της συγκέντρωσης των χλωριόντων εξακολουθεί να είναι υψηλό κυρίως στο βόρειο και κεντρικό τμήμα της παράκτιας ζώνης με τη μέγιστη τιμή τους να εντοπίζεται και πάλι στο κεντρικό τμήμα της παράκτιας ζώνης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.67.

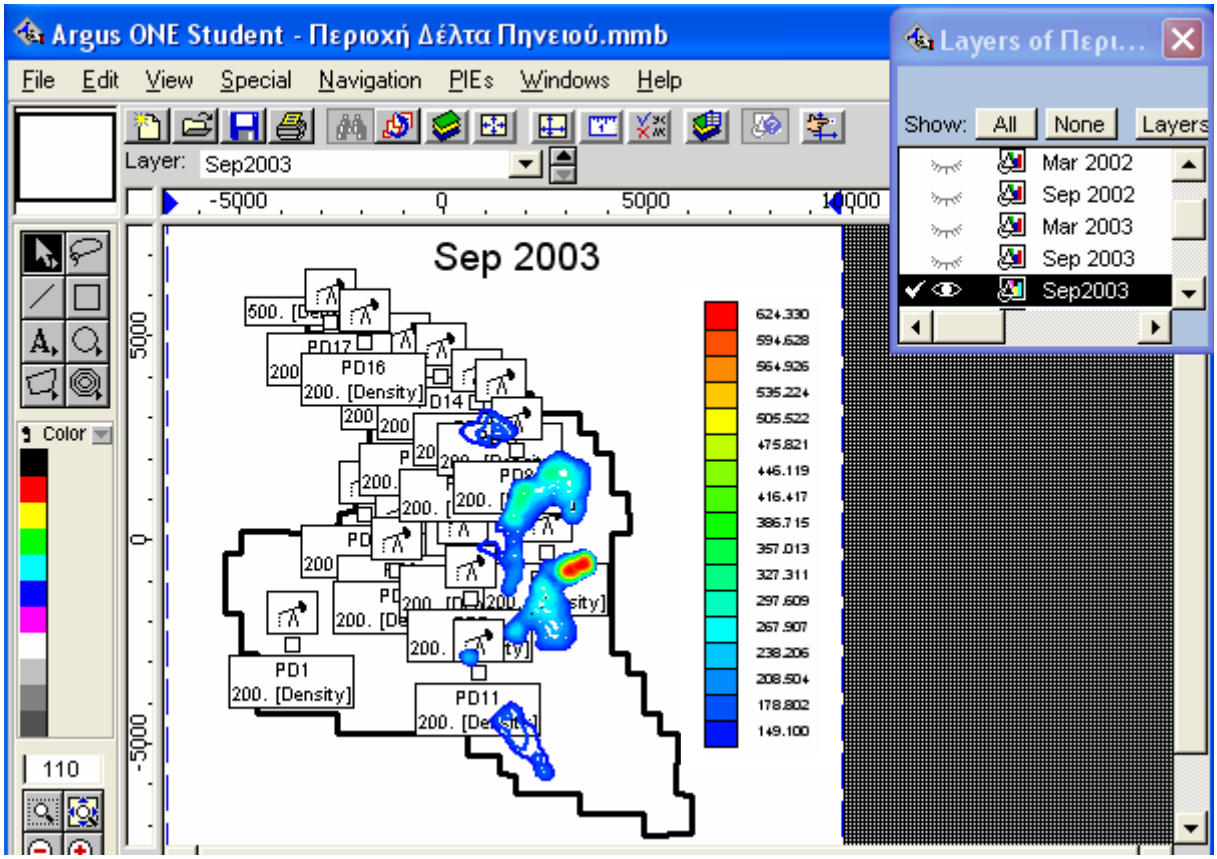
Σε περίπτωση που μειώνονταν κατά 50 % οι τιμές άντλησης των πηγαδιών κατά την καλλιεργητική περίοδο, τότε για το Σεπτέμβριο του 2003 θα προέκυπτε το γράφημα του σχήματος 5.68. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η έκταση της περιοχής στην οποία θα εμφανιζόταν υφαλμύρινση θα περιοριζόταν, σε ελάχιστο όμως βαθμό κι έτσι το πρόβλημα θα εξακολουθούσε να είναι έντονο στην παράκτια ζώνη της περιοχής μελέτης.




**Σχήμα 5.66. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των χλωριόντων το Μάρτιο του 2004.**




**Σχήμα 5.67. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των χλωριόντων το Σεπτέμβριο του 2004.**




**Σχήμα 5.68. Γραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης των χλωριόντων το Σεπτέμβριο του 2003, αν ο ρυθμός άντλησης των πηγαδιών μειωθεί κατά 50 %.**

# 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετήθηκε ο υπόγειος υδροφορέας στο Δέλτα Πηνειού και εφαρμόστηκε το πρόγραμμα "Argus ONE" για τη μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των νιτρικών και των χλωριόντων.

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της υπόγειας ροής στην περιοχή του Δέλτα Πηνειού, η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου Απριλίου – Σεπτεμβρίου μειώνεται σημαντικά. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης όπου έφτασε τα 5 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το γεγονός αυτό, οφείλεται τόσο στην περιορισμένη τροφοδοσία που δέχεται η συγκεκριμένη περιοχή όσο και στις σημαντικές ποσότητες νερού που αντλούνται κατά την καλλιεργητική περίοδο από τον υπόγειο υδροφορέα για την κάλυψη των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών. Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης, η πιεζομετρική στάθμη είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια της θάλασσας με εξαίρεση την παράκτια ζώνη όπου η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα βρίσκεται ελάχιστα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Παρά το γεγονός ότι στην περιοχή μελέτης πάνω από το 50 % της έκτασης καλύπτεται από αγροτικές καλλιέργειες με συνέπεια την έντονη χημική λίπανση, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων τόσο κατά την καλλιεργητική περίοδο όσο και κατά το υπόλοιπο έτος βρίσκονται κάτω από το ανώτατο επιτρεπτό όριο που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για το πόσιμο νερό. Μετά την προσομοίωση της μεταφοράς των νιτρικών για το άμεσο μέλλον, προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νιτρικών παρατηρούνται στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου η συγκέντρωσή τους φτάνει τα 33,5 mg/l ενώ μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου βρίσκεται στα 27,8 mg/l. Όπως είναι αναμενόμενο, η συγκέντρωση των νιτρικών κατά τη χειμερινή περίοδο μειώνεται εξαιτίας της διακοπής της χρήσης λιπασμάτων αλλά και της ανόδου της πιεζομετρικής στάθμης λόγω της αύξησης των βροχοπτώσεων και της διακοπής της άντλησης του υπόγειου νερού. Η διατήρηση των νιτρικών ιόντων σε χαμηλά επίπεδα πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή ικανότητα αυτοκαθαρισμού του συστήματος και στο γεγονός ότι η πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου συστήματος είναι ιδιαίτερα ρηχή με αποτέλεσμα ο χρόνος παραμονής του ρύπου στη ζώνη αερισμού να είναι μικρός κι έτσι δεν υπάρχει δυνατότητα οξείδωσής του στη μορφή νιτρικού αζώτου.

Εξαιτίας της έντονης καλλιεργητικής δραστηριότητας στην περιοχή καθώς και της αυξημένης χρήσης λιπασμάτων μια πιθανή συσσώρευση των νιτρικών στην περιοχή θα προκαλούσε σοβαρά προβλήματα. Έτσι, στην υποθετική περίπτωση τριπλασιασμού της συγκέντρωσης των νιτρικών στην περιοχή μελέτης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη συγκέντρωση των νιτρικών θα έφτανε τα 90 mg/l, συγκέντρωση πολύ μεγαλύτερη από το ανώτατο επιτρεπτό όριο, που είναι 50 mg/l που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για το πόσιμο νερό.
Ακόμη, στην περίπτωση αυτή, η περιοχή στην οποία η συγκέντρωση των νιτρικών θα ξεπερνούσε το ανώτατο επιτρεπτό όριο θα καταλάμβανε μεγαλύτερη έκταση γεγονός, που θα προκαλούσε σημαντικά προβλήματα στη χρήση του νερού στην περιοχή αλλά και την διατάραξη του οικοσυστήματος, αν λάβει κανείς υπόψη του το μεγάλο πληθυσμό πουλιών και ζώων που φιλοξενούνται στην περιοχή.

Από την προσομοίωση της μεταφοράς των χλωριόντων για το άμεσο μέλλον προέκυψε, ότι μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις που είναι ενδεικτικές της θαλάσσιας διείσδυσης, παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης στην περιοχή Παλαιοποτάμου αλλά κυρίως πιο νότια στην κύρια έξοδο του ποταμού προς τη θάλασσα, όπου η συγκέντρωση φτάνει τα 624,3 mg/l. Έτσι, εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα ανάμιξης του θαλασσινού νερού με το γλυκό νερό εντός της κοίτης του Πηνειού ποταμού και μάλιστα σε αρκετή απόσταση από την ακτή. Η συγκέντρωση αυτή υπερβαίνει κατά πολύ το ανώτατο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που είναι 150 mg/l για το πόσιμο νερό.

Μετά το τέλος της χειμερινής περιόδου εξαιτίας της διακοπής των αντλήσεων από τα πηγάδια αλλά και των αυξημένων βροχοπτώσεων, παρατηρείται ανάκαμψη της πιεζομετρικής στάθμης με αποτέλεσμα να μειώνεται και η θαλάσσια διείσδυση. Παρόλα αυτά όμως, το επίπεδο της συγκέντρωσης των χλωριόντων εξακολουθεί να είναι υψηλό κυρίως στο βόρειο και κεντρικό τμήμα της παράκτιας ζώνης. Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης, διατηρείται ικανό υδραυλικό φορτίο και η θαλάσσια διείσδυση εμποδίζεται αποτελεσματικά.

Σε περίπτωση που μειώνονταν κατά 50 % οι τιμές του ρυθμού άντλησης των πηγαδιών κατά την καλλιεργητική περίοδο, η έκταση της περιοχής στην οποία θα εμφανιζόταν υφαλμύρινση θα περιοριζόταν, σε ελάχιστο όμως βαθμό κι έτσι το πρόβλημα θα εξακολουθούσε να είναι έντονο στην παράκτια ζώνη της περιοχής μελέτης.

Η υπερβολική άντληση του υπόγειου νερού είναι η σημαντικότερη αιτία για το φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Έτσι, όσο αυξάνεται ο ρυθμός άντλησης του υπόγειου νερού και μειώνεται η πιεζομετρική στάθμη, αυξάνονται και οι πιθανότητες να παρατηρηθεί θαλάσσια διείσδυση και πιθανόν φαινόμενα καθίζησης. Η εμφάνιση της υφαλμύρινσης στην περιοχή σχετίζεται πιθανόν και με τη λιθολογία του συστήματος που δεν εμποδίζει αποτελεσματικά την είσοδο της θάλασσας.

Η θαλάσσια διείσδυση αν και είναι πιο έντονη κατά την καλλιεργητική περίοδο, προκαλεί αθροιστική βλάβη στο υδροφόρο σύστημα με αποτέλεσμα την προοδευτική υποβάθμιση των υδατικών του πόρων. Εξαιτίας του ότι οι καλλιέργειες της περιοχής δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές σε αλατότητα, τα εδάφη δεν είναι καλά αποστραγγιζόμενα και λαμβάνοντας υπόψη ότι η περιοχή αποτελεί ένα σημαντικό υγροβιότοπο, αναμένεται ότι το πρόβλημα της υφαλμύρινσης των υπόγειων νερών θα προκαλέσει στο μέλλον σημαντικά προβλήματα υποβαθμίζοντας το οικολογικό ισοζύγιο.

Κατά την εφαρμογή της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής και της μεταφοράς των νιτρικών και των χλωριόντων πολλά από τα στοιχεία των μετρήσεων που ήταν απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος παρουσίαζαν ελλείψεις με αποτέλεσμα να γίνουν αρκετές εκτιμήσεις με βάση τη βιβλιογραφία.

Η ποσότητα του αντλούμενου υπόγειου νερού που δίνεται από τους διάφορους φορείς δεν είναι ακριβής αφού δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για τον αριθμό των γεωτρήσεων και των θέσεών τους στην περιοχή ούτε και έλεγχος της ποσότητας που αντλεί η καθεμία. Έτσι, είναι αναγκαία η καθοριστική παρέμβαση της πολιτείας στο καθεστώς αξιοποίησης των υπόγειων νερών. Με τη συνεργασία ανάμεσα στις δημόσιες αρχές και τους καταναλωτές, την κατάλληλη εκπαίδευση, την πληροφόρηση και τη συμμετοχή των καταναλωτών σε διάφορες αποφάσεις είναι δυνατόν να μειωθεί η αλόγιστη κατανάλωση του νερού και να αποτραπούν οι χειρότερες συνέπειες.

Ακόμη, κρίνεται επιβεβλημένη η δημιουργία ενός φορέα που θα προσεγγίζει ποσοτικά και ποιοτικά όλους τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους με την δημιουργία ενός πλήρους αντιπροσωπευτικού δικτύου σταθμών υδρολογικών παραμέτρων χωρίς ελλείψεις στην περιοχή, όπου θα λαμβάνονται μετρήσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα της διακύμανσης των υπόγειων νερών.

Η οργανωμένη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων θα αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη καλύτερων μοντέλων ροής του υπόγειου νερού και μεταφοράς ρύπων.

# 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλεξίου, Ι., Καλφούντζος, Δ. και Ζέρβα-Καπετανάκη Γ., "Εκτίμηση της βασικής εξατμισοδιαπνοής με τις μεθόδους της ακτινοβολίας, των Blaney Criddle και Penman", Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου ΕΕΥ., Β, 467-476, Πάτρα 1994.

"Διερεύνηση υφιστάμενης κατάστασης των υδατικών πόρων λεκάνης Δέλτα ποταμού Πηνειού, Θεσσαλίας". Μελέτη που εκπονήθηκε από ερευνητές του ΕΘΙΑΓΕ και αποτελεί τμήμα του προγράμματος του Υπουργείου Γεωργίας με τίτλο: "Συμπληρωματικές περιβαλλοντικές δράσεις του κανονισμού 2078/92 ΕΟΚ - Μελέτη φυσικών πόρων και παραγόντων που επιδρούν στην απόδοση και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των καλλιεργειών της Θεσσαλίας", Φεβρουάριος, 2001.

ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε./Ι.Χ.Τ.Ε.Λ., "Εδαφολογική Μελέτη Περιοχής Δέλτα Πηνειού Ποταμού Ν. Λάρισας", Λάρισα, Μάϊος, 1997.

Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας.

Ευαγγελόπουλος, Αθ., "Υδρογεωλογική κατάσταση λεκανών Ν. Λάρισας", ΔΕΒ Λάρισας, 1994.

ΙΓΜΕ, Γεωλογικός χάρτης Ελλάδας, Φύλλο Ραψάνη, κλίμακα 1:50.000, Αθήνα, 1982.

Παπαζαφειρίου, Ζ. Γ., "Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1984.

Φλόκας, Απ., 1986. 'Μαθήματα Μετεωρολογίας και κλιματολογίας', σελ. 373 – 380, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M., "Crop Evapotranspiration : Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56", FAO, Rome, 1998.

Babu, K. D., Pinder, F. G., Niemi, A., Ahlfeld P. D., Stothoff, A. S., "Chemical Transport by three-dimensional groundwater flows", June, 1997.

Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., "Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 24", FAO, Rome, 1977.

Olivares, José-Luis, "Argus ONE – PTC interface, v.2.2, User's guide", 2002.

Oude Essink, H. P. Gualbert., "Improving fresh groundwater supply – problems and solutions", Ocean & Coastal Management ; 44: 429-449, 2001.

Pinder, F. George, "On the Modelling of Groundwater Systems using Geographical Information Systems", September, 2000.

Pinder, F. George, "Groundwater Modelling using Geographical Information Systems", August, 2001.

Shiklomanov, IA., "World fresh water resources. Proceedings of the Unesco International Symposium to Commemorate the 25 years of IHD/IHP", [Chapter 16], Paris, 15-17 March, 1990.

Yeung, Y., "Personal communications", Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, 1999.