ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσδιορισμός των ζωνών ρύπανσης Na, Mg, $Cl^-$, $NO_3$ και $SO_4$ των υπογείων υδάτων της περί – αστικής περιοχής της πόλεως Χίου, νήσου Χίου με χρήση μοντέλου υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας**

**ΦΥΤΙΛΗΣ ΝΙΚΟΣ**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)
ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΔΙΑΜΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

**ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007**

## *Ευχαριστίες*

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον κύριο Καρατζά Π. Γεώργιο, αναπληρωτή καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος για την πολύτιμη και καταλυτική βοήθεια που μου προσέφερε καθώς επίσης και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής καθηγητή κύριο Νικολαϊδη Νικόλαο και καθηγητή κύριο Διαμαντόπουλο Ευάγγελο.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

***Περιεχόμενα*** ..... ***3***

***Πρόλογος*** ..... ***6***

***Περίληψη*** ..... ***7***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Μοντελοποίηση υπόγειας ροής*** ..... ***9***

*1.1 Εισαγωγή* ..... ***9***

*1.2 Πρωτόκολλο μοντελοποίησης* ..... ***9***

*1.3 Βασικές εξισώσεις και Αριθμητικές μέθοδοι* ..... ***10***

*1.3.1 Βασικές εξισώσεις* ..... ***10***

*1.3.1.1 Εξαγωγή των βασικών εξισώσεων* ..... ***14***

*1.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι* ..... ***17***

*1.4 Θεμελιώδες μοντέλο και Σχεδιασμός πλέγματος* ..... ***18***

*1.4.1 Κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου* ..... ***18***

*1.4.2 Τύποι μοντέλων* ..... ***20***

*1.4.3 Σχεδιασμός πλέγματος* ..... ***23***

*1.4.4 Προσδιορισμός παραμέτρων* ..... ***25***

*1.5 Οριακές συνθήκες* ..... ***26***

*1.5.1 Είδη οριακών συνθηκών* ..... ***26***

*1.5.2 Θέτοντας όρια* ..... ***27***

*1.5.3 Προσομοιώνοντας όρια* ..... ***28***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Περιγραφή του μοντέλου PTC*** ..... ***30***

*2.1 Εισαγωγή* ..... ***30***

*2.2 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου* ..... ***30***

*2.3 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC* ..... ***31***

*2.4 Τρισδιάστατη ροή υπογείων υδάτων* ..... ***32***

*2.4.1 Βασική εξίσωση* ..... ***32***

*2.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων* ..... ***33***

*2.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών* ..... ***34***

*2.5 Οριακές συνθήκες* ..... **36**

*2.5.1 Καθορισμένου υδραυλικού ύψους* ..... **37**

*2.5.2 Καθορισμένης ροής* ..... **37**

*2.5.3 Τρίτου τύπου* ..... **37**

*2.6 Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα* ..... **38**

*2.7 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων* ..... **39**

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης υπόγειων υδροφορέων*** ..... **41**

*3.1 Εισαγωγή* ..... **41**

*3.2 Μηχανισμός υφαλμύρινσης– Μορφή διεπιφάνειας* ..... **42**

*3.3 Μέτρα απορρύπανσης της υφαλμύρινσης* ..... **44**

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Ρύπανση υπόγειων υδάτων με νιτρικά*** ..... **46**

*4.1 Εισαγωγή* ..... **46**

*4.2 Προβλήματα που σχετίζονται με τα νιτρικά* ..... **47**

*4.2.1 Επιπτώσεις στο περιβάλλον* ..... **47**

*4.2.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία* ..... **48**

*4.2.3 Επιπτώσεις στα ζώα* ..... **49**

*4.3 Τρόποι εξυγίανσης νερών ρυπασμένων με νιτρικά* ..... **49**

*4.3.1 Μέτρα για την πρόληψη της Νιτρορρύπανσης* ..... **49**

*4.3.2 Μέτρα εξυγίανσης των νιτρικών στα υπόγεια ύδατα* ..... **50**

*4.3.2.1 Ανταλλαγή ιόντων* ..... **51**

*4.3.2.2 Αντίστροφη όσμωση* ..... **52**

*4.3.2.3 Ηλεκτροδιάλυση* ..... **53**

*4.3.2.4 Βιολογική απονιτροποίηση* ..... **53**

*4.3.2.5 Βιολογική απονιτροποίηση in situ* ..... **54**

*4.3.2.6 Διάφορες τεχνικές* ..... **55**

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Ποιότητα πόσιμου νερού – Όρια*** ..... **56**

*5.1 Εισαγωγή* ..... **56**

*5.1 Όρια χημικών στοιχείων – Επιδράσεις* ..... **56**

*5.1 Τυπικές χημικές αναλύσεις* ..... ***60***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : Περιοχή μελέτης*** ..... ***62***

*6.1 Εισαγωγή* ..... ***62***

*6.2 Γενικά στοιχεία* ..... ***63***

*6.3 Μορφολογικά στοιχεία* ..... ***63***

*6.4 Υδρογραφικό δίκτυο* ..... ***65***

*6.5 Υδρολογία περιοχής* ..... ***65***

*6.6 Κλιματολογικά – υδρολογικά στοιχεία* ..... ***66***

*6.7 Γεωλογία – γεωλογική εξέλιξη* ..... ***67***

*6.7.1 Υδρολιθολογία* ..... ***69***

*6.7.2 Τεκτονική* ..... ***70***

*6.8 Περιοχή μελέτης* ..... ***71***

*6.8.1 Υδροχημεία* ..... ***73***

*6.8.2 Κίνηση υπόγειων υδάτων* ..... ***74***

*6.8.3 Δίκτυο ύδρευσης* ..... ***74***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : Υδράργυρος*** ..... *77*

*7.1 Εισαγωγή* ..... *77*

*7.2 Προσομοίωση διασποράς υδραργύρου* ..... ***78***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο : Χρήση του Argus One*** ..... ***80***

*8.1 Εισαγωγή δεδομένων* ..... ***81***

*8.2 Αποτελέσματα μοντέλου – Αρχικές συνθήκες* ..... ***85***

*8.2.1 Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα* ..... ***85***

*8.2.2 Προσομοίωση μεταφοράς χημικών ουσιών* ..... ***90***

*8.3 Σενάριο 1Ο : Μείωση 25% των ρυθμών άντλησης* ..... ***99***

*8.4 Σενάριο 2Ο : Μείωση 50% των ρυθμών άντλησης* ..... ***106***

*8.5 Σενάριο 3Ο : Μείωση 100% των ρυθμών άντλησης* ..... ***113***

***ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις*** ..... ***124***

***Βιβλιογραφία*** ..... ***126***

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια, με τη συνεχή επέμβαση του ανθρώπου στο περιβάλλον και την ολοένα αυξανόμενη υποβάθμισή του από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί επιτακτική ανάγκη.

Το νερό είναι απαραίτητο για τη ζωή των ανθρώπων τόσο γιατί αποτελεί το βασικότερο είδος της διατροφής όσο και γιατί αποτελεί μία από τις πρώτες ύλες της πρωτογενούς και της δευτερογενούς παραγωγής. Αποδεικνύεται εύκολα ότι το νερό ως φυσικός πόρος που συμμετέχει σε κάθε παραγωγική δραστηριότητα προσδιορίζει την δυνατότητα ή την αδυναμία επέκτασής τους. Συγχρόνως καθώς ο πληθυσμός της γης αυξάνεται και η παραγωγή αγαθών αναπτύσσεται και εντατικοποιείται το νερό γίνεται συνεχώς πολυτιμότερο.

Ο ποιοτικός έλεγχος του νερού και η χρήση του ως πόσιμο αποτελεί σημαντικό στόχο για κάθε οργανωμένη κοινωνία. Η σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων δεν είναι μόνο θέμα των αρχών σε μια χώρα αλλά σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η παιδεία των πολιτών και η ευαισθητοποίηση τους γύρω από θέματα περιβαλλοντικής διαχείρισης.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν κυρίως οι παράκτιες περιοχές και είναι αυτό της υφαλμύρινσης, δηλαδή της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα εστιάζει στη περίπτωση της περιοχής Κάμπος Χίου όπου το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα αυξημένο όλο το χρόνο. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από γεωργικές εκτάσεις και από μικρές βιομηχανίες εκμετάλλευσης των γεωργικών προϊόντων. Στο παραθαλάσσιο τμήμα της περιοχής έχει αναπτυχθεί αξιοσημείωτη τουριστική υποδομή. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών και ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες έχουμε την άντληση σε υψηλούς ρυθμούς με συνέπεια την υποχώρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και τη διείσδυση της θάλασσας. Ως αρχικό σενάριο εντοπίσαμε πόσο έχει προσχωρήσει το μέτωπο της υφαλμύρωσης καθώς επίσης και τη μεταφορά και διασπορά 6 βασικών χημικών ουσιών για τον προσδιορισμό του βαθμού και του μεγέθους ρύπανσης από τις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις.

Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code), το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά της ρύπανσης στον υπόγειο υδροφορέα, δίνοντας μια αντιπροσωπευτική εικόνα της. Μέσα από την εικόνα αυτή είναι δυνατός ένας, σε αρκετά μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας, ακριβής προσδιορισμός του υπαίτιου της ρύπανσης και του βαθμού στον οποίο συνέβαλε σε αυτήν. Στα πρώτα κεφάλαια αυτής της εργασίας αναφέρθηκαν οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα και οι μέθοδοι προσομοίωσης που είναι διαθέσιμοι στους χρήστες.

Μελετάται στη συνέχεια το φαινόμενο της υφαλμύρινσης και οι επιπτώσεις του καθώς επίσης και οι επιπτώσεις από την συντελούμενη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού της περιοχής. Πιο αναλυτικά αναφερόμαστε στις επιπτώσεις του φαινομένου της νιτρορρύπανσης και τους τρόπους αντιμετώπισης του. Η υποβάθμιση εξετάζεται προς την καταλληλότητα του για πόσιμο νερό. Τα χημικά στοιχεία που εξετάζουμε αποτελούν αναπόσπαστο μέρος στις συνήθεις αναλύσεις που ορίζονται από τις Υγειονομικές διατάξεις. Έπεται μια μελέτη της εμφάνισης και διασποράς των συγκεντρώσεων του υδραργύρου που αποτελεί χρόνιο και σοβαρό πρόβλημα της περιοχής.

Επίσης δόθηκε μια σύντομη περιγραφή της περιοχής που μελετάμε και πιο συγκεκριμένα περιγράψαμε το κλίμα της περιοχής, την γεωλογική και υδρογεωλογική της σύσταση, την μορφολογία, το υδρογραφικό δίκτυο και τέλος την χημεία και την τεκτονική της περιοχής. Με χρήση των παραπάνω δεδομένων έγινε η προσομοίωση της και μέσω των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσδιορίζεται η ζώνη υφαλμύρινσης και σε κάθε περίπτωση η συμβολή του κάθε χημικού στοιχείου στην υποβάθμιση του υπόγειου ύδατος.

Θεωρώντας αυτές ως αρχικές συνθήκες εξετάζουμε τρία σενάρια με βασική αρχή ότι αν σε έναν υπόγειο υδροφορέα στον οποίο το υδραυλικό ύψος έχει ταπεινωθεί αρκετά ώστε να έχει επιτραπεί η εισχώρηση αλμυρού νερού, η μείωση των ρυθμών άντλησης κατά 25%, 50% ή 100% θα αποδώσει αποτελέσματα στην προσπάθεια μείωσης του φαινομένου της υφαλμύρινσης και της γενικότερης υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου νερού.

Τα αποτελέσματα από τα 3 σενάρια δεν είναι ικανοποιητικά και τα προβλήματα υποβάθμισης παραμένουν στο μεγαλύτερο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής. Οι λύσεις που προτείνονται είναι τοπικής κλίμακας. Σε γενικές γραμμές η κατάσταση του συστήματος ροής και του υπόγειου υδροφορέα δεν είναι καλή για αυτό και οι προτάσεις που προτείνονται αφορούν την αναβάθμιση του δικτύου συλλογής και διανομής του νερού

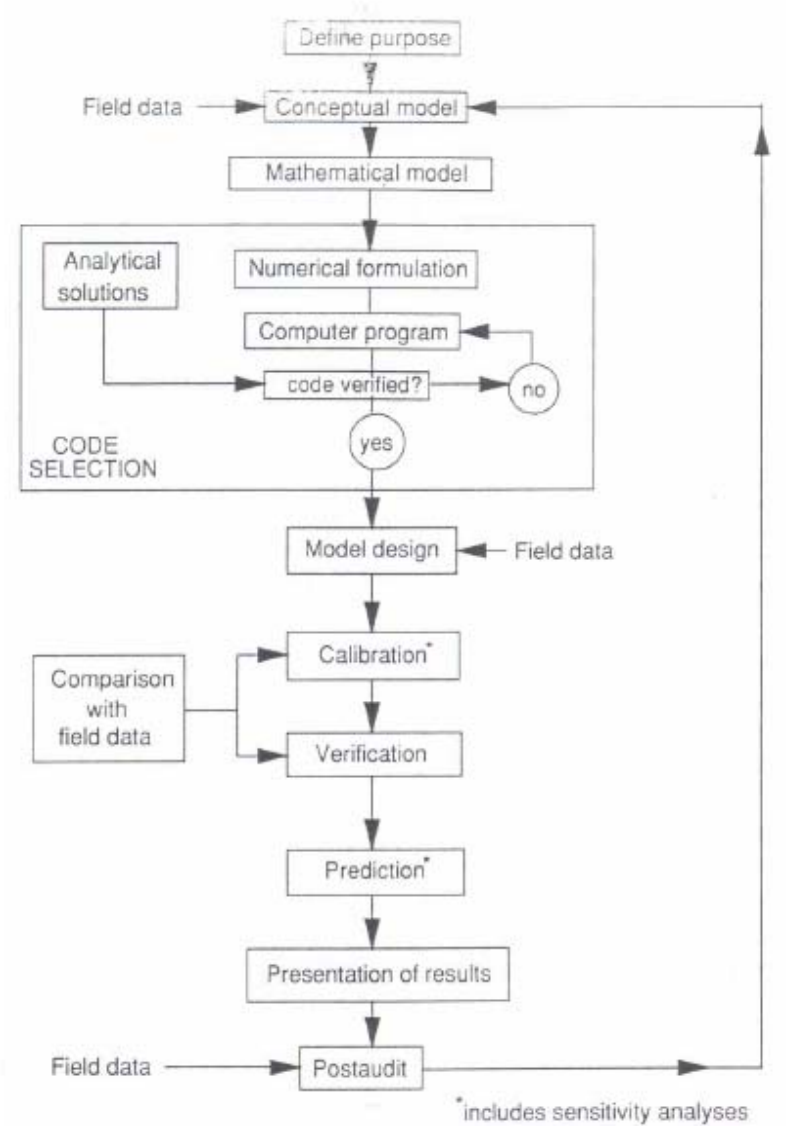
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{ο}$ : Μοντελοποίηση υπόγειας ροής

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όταν ένας μηχανικός ή πιο συγκεκριμένα ένας υδρογεωλόγος έρχεται αντιμέτωπος με ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα που έχει σχέση με συστήματα υπόγειων ροών και χρειάζεται η μελέτη και η καλύτερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων είναι απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου υπόγειας ροής. Μοντέλο καλείται κάθε εργαλείο που αναπαριστά προσεγγιστικά την πραγματική κατάσταση του πεδίου. Τα μοντέλα διακρίνονται σε φυσικά τα οποία προσομοιώνουν την υπόγεια ροή άμεσα και σε μαθηματικά τα οποία προσομοιώνουν έμμεσα με την χρήση μιας βασικής εξίσωσης, η οποία αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα, τις εξισώσεις των οριακών συνθηκών οι οποίες περιγράφουν τα υδραυλικά ύψη και τη ροή κατά μήκος των ορίων του μοντέλου, καθώς επίσης, και για προβλήματα μη σταθερών χρονικά συνθηκών, από τις εξισώσεις των αρχικών συνθηκών οι οποίες περιγράφουν την αρχική κατανομή των υδραυλικών υψών στο σύστημα. Ένα μαθηματικό μοντέλο μπορεί να επιλυθεί είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά χρειάζεται όμως πάντα η βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η μοντελοποίηση ενός πεδίου μας παρέχει την δυνατότητα οργάνωσης και σύνθεσης των πληροφοριών πεδίου που έχουν συλλεχθεί στην προσπάθεια μελέτης της δυναμικής του συστήματος αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι είναι μόλις ένα στοιχείο σε μια υδρογεωλογική πρόβλεψη και όχι το μοναδικό γιατί πολλές φορές τα δεδομένα έχουν κριθεί ανεπαρκή για να υποστηρίξουν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. [1]

## 1.2 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όταν κριθεί αναγκαία η χρήση ενός μοντέλου για την προσομοίωση της υπόγειας ροής και την μεταφορά των ρύπων το επόμενο βήμα είναι η επιλογή και η επαλήθευση του κώδικα καθώς επίσης και ο σχεδιασμός του μοντέλου, η βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας και η τελική πρόβλεψη όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :




***Εικόνα 1.1 :*** *Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου υπόγειων υδάτων*

## 1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 1.3.1 <u>Βασικές εξισώσεις</u>

Πριν παράγουμε μια θεμελιώδης εξίσωση για να περιγράψουμε την υπόγεια ροή εισάγοντας οριακές και αρχικές συνθήκες χρειαζόμαστε απαραίτητα ένα αρχικό μοντέλο του συστήματος (conceptual model). Υπάρχουν δύο δυνατοί τρόποι προσέγγισης των

συστημάτων υπόγειας ροής και διακρίνονται στην προσέγγιση του υδροφορέα (Aquifer viewpoint) και την προσέγγιση συστήματος ροής (Flow system viewpoint). Η προσέγγιση του υδροφορέα βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα, και είναι κατάλληλη για αναλύσεις της ροής σε πηγάδια άντλησης καθώς επίσης αποτελεί την βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων Thiem, Theis και Jacob. Ένας περιορισμένος υδροφορέας καλύπτεται στο πάνω μέρος του από ένα αδιαπέραστο στρώμα (confining bed) δηλαδή από μια μονάδα με πορώδες υλικό που επιβραδύνει την κίνηση του νερού, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας έχει ως ανώτερο όριο τον υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης η υπόγεια ροή θεωρείται ότι κινείται οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετα μέσα από τα στρώματα χαμηλής διαπερατότητας Η ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει νερό περιγράφεται από την υδραυλική του αγωγιμότητα (k), ή αλλιώς από τη μεταβιβασιμότητά του (T). Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή εάν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και σταθερού πάχους, ενώ στην περίπτωση ενός ελεύθερου υδροφορέα ποικίλλει χωρικά και εξαρτάται από το κορεσμένο στρώμα και την ανύψωση του νερού. Στις περισσότερες φορές οι υδροφορείς είναι ετερογενής και έτσι οι δύο αυτοί παράμετροι δεν είναι σταθερές. Η προσέγγιση του υδροφορέα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση δισδιάστατης οριζόντιας ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς, ενώ για περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή προβλέπεται η χρήση μιας ημι-τρισδιάστατης προσέγγισης, στην οποία η κάθετη ροή διαμέσου των περιοριστικών στρωμάτων αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί νερό από τους υδροφορείς που υπέρκεινται ή υπόκεινται του περιορισμένου υδροφορέα που διαρρέει. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την εγκάρσια υδραυλική μεταβολή του αδιαπέραστου στρώματος, από το πάχος και από την υδραυλική αγωγιμότητα. Στην προσέγγιση του υδροφορέα, τα υδραυλικά ύψη στα περιοριστικά στρώματα δεν ενδιαφέρουν και έτσι δεν υπολογίζονται κατά την προσομοίωση. Τα ύψη στους ελεύθερους υδροφορείς χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της υδραυλικής κλίσης στο περιοριστικό στρώμα. Η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(T_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)=S\frac{\partial h}{\partial t}-R+L \quad \textbf{(1.1)}$$

Όπου

$$L=-K_z^{'}\frac{h_{source}-h}{b'}$$

Οι όροι στο αριστερό μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύουν την οριζόντια ροή μέσω του υδροφορέα, όπου:

h: το υδραυλικό ύψος

$T_x$, $T_y$:οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στους άξονες x και y

S: ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

R: ο όρος εμπλουτισμού/ άντλησης. ο οποίος καθορίζεται ως θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού, ενώ σε περίπτωση άντλησης ισχύει R= -W, όπου W είναι ο ρυθμός άντλησης.

L: δηλώνει τη διαρροή μέσω ενός περιοριστικού στρώματος

$K_z$: η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του περιοριστικού στρώματος

$b'$ : το πάχος του στρώματος

$h_{source}$: το υδραυλικό ύψος της πηγής που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Όταν η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται σε ελεύθερο υδροφορέα τότε χρησιμοποιούνται οι παραδοχές Dupuit σύμφωνα με τις οποίες: 1) οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες και 2) η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίση με τη κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους.

Στην προσέγγιση συστήματος ροής δεν είναι απαραίτητη η αναγνώριση των υδροφορέων και των αδιαπέρατων στρωμάτων, αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, των υδραυλικών αγωγιμοτήτων και των αποθηκευτικών ιδιοτήτων σε κάθε σημείο του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει κάθετη και οριζόντια ροή – και μελέτη- του συστήματος σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο προφίλ. Μια γενική μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s \frac{\partial h}{\partial t}-R^* \quad \textbf{(1.2)}$$

όπου

$K_x$, $K_y$, $K_z$ οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε άξονα

$S_S$ :η ειδική αποθηκευτικότητα

$R^*$: ένας θετικός όρος που αντιπροσωπεύει τον όγκο του νερού που εισρέει στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου και στην περίπτωση άντλησης έχουμε $R^* = -W$.

Μια ακόμη περίπτωση που μπορούμε να εξετάσουμε είναι για την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα κάτω από τις παραδοχές Dupuit όπου έχουμε την υπόθεση ότι $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$ όπου h συμβολίζουμε το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Έτσι από την σχέση (1) προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση του Boussinesq :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y}\right)=S_y \frac{\partial h}{\partial t}-R$$

όπου το L είναι μηδέν και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι ίσος με την ειδική αποθηκευτικότητα. Επειδή όμως ισχύει και ότι:

$$\frac{\partial h^2}{\partial x}=2h\frac{\partial h}{\partial x}$$
$$\frac{\partial h^2}{\partial y}=2h\frac{\partial h}{\partial y}$$

η εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y}\right)=2S_y \frac{\partial h}{\partial t}-2R$$

Η μη γραμμικότητα της παραπάνω εξίσωσης εξηγείται επειδή ο όρος h είναι υψωμένος στη δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέλος της εξίσωσης ενώ είναι στην πρώτη δύναμη στο

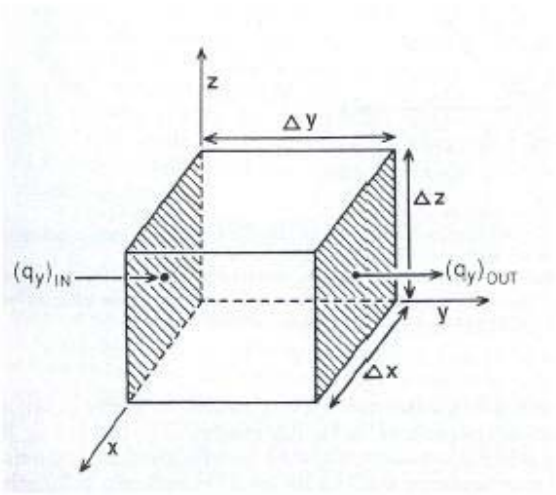
δεξί. Με την χρήση αριθμητικών μεθόδων η εξίσωση ανάγεται σε γραμμική γνωρίζοντας μια τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα. [1]

### 1.3.1.1 Εξαγωγή των βασικών εξισώσεων

Η εξίσωση (1.2) εξάγεται από το μαθηματικό συνδυασμό της εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy. Αναφερόμαστε παραδοσιακά σε έναν κύβο πορώδους υλικού που το μέγεθός του πρέπει να είναι τόσο μεγάλο ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου αλλά και τόσο μικρό ώστε μέσα στον κύβο να μην υπάρχει σημαντική μεταβολή του υδραυλικού ύψους. Ο όγκος του κύβου ισοδυναμεί με Δx Δy Δz ενώ η ροή του νερού διαμέσου του όγκου εκφράζεται σε σχέση με το ρυθμό εκροής q, όπου το q είναι ένα διάνυσμα με τρεις συνιστώσες (x,y,z). Δηλαδή ισχύει:

$$q = q_x\ i_x + q_y\ i_y + q_z\ i_z \qquad \textbf{(1.3)}$$

όπου $i_x$, $i_y$ και $i_z$ τα μοναδιαία διανύσματα των αξόνων x, y και z αντίστοιχα.




***Εικόνα 1.2 :*** *Μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται για την παραγώγιση εξισώσεων*

Από το ισοζύγιο της μάζας ισχύει ότι:

Εκροή – Εισροή = Μεταβολή Αποθέματος **(1.4)**

Θεωρώντας πως η ροή γίνεται κατά μήκος του άξονα y του κύβου, η εισροή σε αυτόν γίνεται από την επιφάνεια (ΔxΔz) και ισούται με $(q_y)_{ΕΙΣ}$ , ενώ η εκροή με $(q_y)_{ΕΚ}$. Επομένως η διαφορά του ρυθμού ογκομετρικής εκροής μείον την ογκομετρική εισροή κατά μήκος του άξονα y είναι :

$$[(q_y)_{\text{ΕΚ}} - (q_y)_{\text{ΕΙΣ}}]\ \Delta x\ \Delta z$$

ή αλλιώς μπορούμε να το γράψουμε :

$$\frac{(q_y)_{\text{ΕΚ}} - (q_y)_{\text{ΕΙΣ}}}{\Delta y}\ (\Delta x\ \Delta y\ \Delta z)$$

Ο ρυθμός ροής στον άξονα y επομένως ισούται με :

$$\frac{\partial q_y}{\partial y}(\Delta x\ \Delta y\ \Delta z)$$

Με παρόμοιο τρόπο είναι δυνατόν να γραφούν εξισώσεις και για τους ρυθμούς ροής κατά τους άξονες x και z. Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με τη μεταβολή της αποθηκευτικότητας και εκφράζεται ως εξής:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x\ \Delta y\ \Delta z = \text{μεταβολή αποθήκευσης}$$

Στην περίπτωση που έχουμε πηγή άντλησης ή εμπλουτισμού στον κύβο, προστίθεται ένας όρος που εκφράζει τον ρυθμό της ογκομετρικής εισροής ίσος με $R^*$ ΔxΔyΔz. Ο συντελεστής $R^*$ είναι θετικός όταν πρόκειται για πηγή εμπλουτισμού, επομένως τον μεταφέρουμε στο αριστερό μέρος της εξίσωσης και προκύπτει

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x\ \Delta y\ \Delta z = \text{μεταβολή αποθήκευσης} \qquad \textbf{(1.5)}$$

Τώρα όσον αναφορά το δεξί μέρος της εξίσωσης (1.4) η μεταβολή της αποθήκευσης αντιπροσωπεύεται από την ειδική αποθηκευτικότητα η οποία ορίζεται από τον όγκο του

νερού που απελευθερώνεται από το απόθεμα ανά μονάδα μεταβολής του υδραυλικού ύψους ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

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

Κατά σύμβαση το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό δηλαδή όταν το νερό απελευθερώνεται από τον υδροφορέα, το υδραυλικό ύψος μειώνεται οπότε ο ρυθμός αλλαγής της αποθηκευτικότητας είναι:

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

Η αντικατάσταση της παραπάνω εξίσωσης στην εξίσωση (1.5) και με διαίρεση με τον όγκο του κύβου(ΔxΔyΔz) προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου του νερού :

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad \textbf{(1.6)}$$

Η παραπάνω εξίσωση (1.6) ωστόσο δε χρησιμοποιείται συχνά επειδή το q δε μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy για τη συσχέτιση του q με το h, επειδή το υδραυλικό ύψος h μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Έτσι προκύπτει η εξίσωση (1.2) και θέτοντας $\partial h / \partial z = 0$ , προσθέτοντας τον όρο διαρροής και πολλαπλασιάζοντας επί b προκύπτει η εξίσωση (1.1).

Εάν ωστόσο η γεωλογία της περιοχής δεν επιτρέπει να θεωρήσουμε τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας παράλληλες με τους άξονες x, y και z χρησιμοποιείται μία τροποποιημένη μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης που περιλαμβάνει όλους τους συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας $(\overline{K})$ ο οποίος γράφεται ως εξής [1] :

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

### 1.3.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Αν απλοποιηθούν οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Οι απλοποιήσεις συνήθως περιλαμβάνουν υποθέσεις ομοιογένειας και μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής. Οι αναλυτικές λύσεις δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές σε αντίθεση με τις αριθμητικές λύσεις που είναι πολύ πιο ευπροσάρμοστες και μέσω των υπολογιστών πιο εύκολες στη χρήση από τις πιο σύνθετες αναλυτικές λύσεις. Οι πιο διαδεδομένες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

- Πεπερασμένες διαφορές
- Πεπερασμένα στοιχεία
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης
- Αναλυτικά στοιχεία

Οι δύο πρώτες μέθοδοι χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην επίλυση προβλημάτων ροής, ενώ οι δύο τελευταίες είναι σχετικά καινούριες μέθοδοι και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως.

Ένα πρόγραμμα ενός υπολογιστή ή ένας κώδικας μπορεί να επιλύσει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται προσεγγίζοντας τις χωρικές διαφορικές εξισώσεις(τη βασική εξίσωση, τις οριακές και αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Προσεγγιστικές τεχνικές όπως οι πεπερασμένες διαφορές και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων , οι οποίες ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο , το μετατρέπουν σε μια μορφή η οποία εύκολα μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση του υπολογιστή. Το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί ως ένας πίνακας αλγεβρικών εξισώσεων. Έτσι η διαδικασία της επίλυσης αποτελείται από δύο βήματα:

1.την προσέγγιση των πεπερασμένων διαφορών ή των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μαθηματικό μοντέλο και

2. την επίλυση των αποτελεσμάτων με τον πίνακα των αλγεβρικών εξισώσεων.

Η επιλογή ανάμεσα σε πεπερασμένες διαφορές ή πεπερασμένα στοιχεία εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και την προτίμηση του χρήστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολη τόσο στην κατανόηση όσο και στον προγραμματισμό. Γενικά απαιτούνται λίγα δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει μεγαλύτερη ικανότητα στην προσέγγιση ορίων με ακανόνιστα σχήματα, είναι ευκολότερη στην προσαρμογή του μεγέθους ξεχωριστών στοιχείων αλλά και της θέσης των ορίων. Επίσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι καλύτερη σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο να χειριστεί εσωτερικά όρια καθώς και να προσομοιώσει σημειακές πηγές, δεξαμενές, επιφάνειες διαρροής και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες.

Παρόλο που έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μεταξύ τους υπάρχει μια σημαντική διαφορά. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο η οποία είναι επίσης το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού το οποίο περιβάλλει τον κόμβο. Με αυτό τον τρόπο δεν γίνεται καμία εκτίμηση για τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίζει ακριβώς την διακύμανση του υδραυλικού ύψους σε ένα στοιχείο με τη μέθοδο της παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά είναι καθορισμένα παντού με χρήση βασικών συναρτήσεων. [1]

## 1.4 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

### 1.4.1 Κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου

Το θεμελιώδες μοντέλο είναι μια γραφική αναπαράσταση του συστήματος ροής των υπογείων υδάτων, το οποίο συνήθως έχει τη μορφή διαγράμματος με κουτιά ή κάθετη διατομή και αυτό είναι που καθορίζει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και τον σχεδιασμό του πλέγματος

Ο σκοπός της κατασκευής ενός θεμελιώδους μοντέλου είναι να απλοποιηθεί το πρόβλημα του πεδίου και να οργανωθούν τα πολύπλοκα δεδομένα του έτσι ώστε όλο το

σύστημα να μπορεί να αναλυθεί άμεσα. Η απλοποίηση του συστήματος είναι απαραίτητη επειδή ολόκληρη η ανακατασκευή του πεδίου είναι ανέφικτη. Η απλούστευση όμως του προβλήματος πρέπει να γίνεται σε τέτοιο βαθμό που το θεμελιώδες μοντέλο να παραμένει αντιπροσωπευτικό των πραγματικών υδρογεωλογικών συνθηκών. Είναι κριτικής σημασίας το θεμελιώδες μοντέλο να αποτελεί μια έγκυρη αναπαράσταση των σημαντικών υδρογεωλογικών συνθηκών του συστήματος.

Υπάρχουν τρία βήματα για τη κατασκευή του θεμελιώδους μοντέλου, τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα 1$^{ο}$ : Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων

Γεωλογικές πληροφορίες που περιέχονται σε γεωλογικούς χάρτες συνδυάζονται με υδρογεωλογικά δεδομένα για να καθοριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Με απλά λόγια οι υδροστρωματογραφικές μονάδες αποτελούνται από γεωλογικές μονάδες με παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες. Η έννοια της υδροστρωματογραφικής μονάδας χρησιμοποιείται κυρίως για προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα. Σε μικρότερες κλίμακες όμως αυτό είναι δύσκολο να γίνει γιατί για να οριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες σε αυτή τη κλίμακα, απαιτούνται πληροφορίες για τη στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα, οι οποίες είναι σπάνια διαθέσιμες σε κάθε τοποθεσία

Βήμα 2$^{ο}$ : Προετοιμασία του υδατικού ισοζυγίου

Οι πηγές νερού του συστήματος όπως και οι αναμενόμενες κατευθύνσεις ροής και τα σημεία εξόδου πρέπει να αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του θεμελιώδους μοντέλου. Οι εισροές περιέχουν υπόγεια εναπόθεση από βροχόπτωση, επιφανειακή ροή ή εναπόθεση από επιφανειακά νερά ενώ οι εκροές περιέχουν εξόδους από ανεξάντλητες πηγές, εναπόθεση σε ρέματα, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Υπόγεια ροή μπορεί να λαμβάνει χώρα τόσο στις εισροές όσο και στις εκροές. Το υδατικό ισοζύγιο υπολογίζει

τις αλλαγές στα παραπάνω δεδομένα και περιγράφει την μεταβολή στην αποθηκευτικότητα του υδροφορέα.

Βήμα 3$^{o}$ : Καθορισμός του συστήματος ροής

Η υδροστρωματογραφία αποτελεί την βάση του θεμελιώδους μοντέλου. Για την μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων μέσα στο σύστημα χρησιμοποιούνται υδρολογικές πληροφορίες δηλαδή μετρήσεις για τη βροχή, την εξάτμιση, την επιφανειακή απορροή, σε συνδυασμό με δεδομένα για τα υδραυλικά ύψη, και γεωχημικά δεδομένα. Η διακύμανση των επιπέδων του νερού χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής και του συσχετισμού των υπόγειων υδροφορέων με τα επιφανειακά υδατικά συστήματα. Ο καθορισμός της ροής μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά και μόνο σε φυσικά υδρολογικά δεδομένα αλλά για να ισχυροποιηθεί το μοντέλο θα ήταν καλό να περιέχει και πληροφορίες από τη γεωχημεία όπως η χημεία του νερού, για να εδραιωθεί η κίνηση του, να εκτιμηθεί ο ρυθμός της υπόγειας ροής και να αναγνωριστούν οι πηγές όπως επίσης και το ποσό της ανταλλαγής με τοπικά, ενδιάμεσα και περιφερειακά συστήματα ροής. [1]

### 1.4.2 Τύποι μοντέλων

Για την κατασκευή του πλέγματος ενός αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιούνται τα μοντέλα τα οποία ταξινομούνται με βάση τις χωρικές διαστάσεις. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε:

- Δισδιάστατα επιφανειακά
- Δισδιάστατα χωρικά (κάθετων τομών)
- Ήμι-τρισδιάστατα
- Τρισδιάστατα

Τα δισδιάστατα χωρικά και ήμι-τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούν την θεώρηση του υδροφορέα ενώ τα δισδιάστατα profile (επιφανειακά) και πλήρη τρισδιάστατα μοντέλα την θεώρηση του συστήματος ροής.

Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα

Οι δισδιάστατες χωρικές προσομοιώσεις αφορούν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων: τους περιορισμένους υδροφορείς, τους περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή, τους ελεύθερους και τους μεικτούς.

Περιορισμένοι υδροφορείς

Όταν προσομοιώνονται περιορισμένοι υδροφορείς, καθορίζεται η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Η μεταβολή στην μεταβιβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα παρουσιάζεται από τη διαφορά μεταξύ της μεταβιβασιμότητας στις x και y κατευθύνσεις. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από τη βιβλιογραφία ενώ οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας από το τεστ άντλησης.

Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή, το αδιαπέραστο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί τον περιορισμένο υδροφορέα δεν απεικονίζεται σαφώς στο μοντέλο αλλά εκπροσωπείται από έναν όρο διαρροής ο οποίος ισούται με το λόγο της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας ($K_Z$) του αδιαπέραστου στρώματος ως προς το πάχος (b) αυτού. Η πηγή του νερού σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι είτε ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας είτε ένας ελεύθερος ή ακόμη και επιφανειακά νερά. Το μοντέλο γενικά όποια κι αν είναι η πηγή του νερού υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό με το χρόνο. Επίσης υποθέτει ότι δεν υπάρχει αποδέσμευση νερού εντός του αδιαπέραστου στρώματος.

Ελεύθεροι υδροφορείς

Στους ελεύθερους υδροφορείς χρησιμοποιούνται οι παραδοχές του Dupuit οι οποίες εξασφαλίζουν οριζόντια ροή με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν αλλαγές στο υδραυλικό ύψος σε σχέση με το βάθος. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραδοχές ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετατρέπεται σε δισδιάστατο ή ακόμη και σε μονοδιάστατο. Η προσομοίωση απαιτεί πίνακες με τιμές από υδραυλική αγωγιμότητα, ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς Τόσο η υδραυλική αγωγιμότητα όσο και το ενεργό πορώδες υπολογίζονται από τεστ άντλησης. Όταν δεν είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθούν οι παραδοχές Dupuit, αντί για δισδιάστατα χωρικά μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δισδιάστατα μοντέλα κάθετων τομών ή πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα.

Μεικτοί υδροφορείς

Ένα μικτό σύστημα υδροφορέων αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω τριών τύπων υδροφορέων Σε αυτά τα συστήματα υδροφορέα περιέχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί που περιέχονται στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις. Ένας υδροφορέας μπορεί να διαφέρει χωρικά από έναν περιορισμένο σε έναν ελεύθερο ή και το αντίστροφο ως αποτέλεσμα άντλησης

Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα

Ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά από υδροφορείς στους οποίους παρεμβαίνουν αδιαπέραστα στρώματα. Όπως και στα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα με περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή, τα αδιαπέραστα στρώματα δεν απεικονίζονται σαφώς σε ένα ημι-τρισδιάστατο μοντέλο ούτε και το υδραυλικό ύψος. Η επίδραση των αδιαπέρατων στρωμάτων προσομοιώνεται από έναν όρο διαρροής L ο οποίος αντιπροσωπεύει την κάθετη ροή ανάμεσα σε δυο υδροφορείς και είναι συνάρτηση του συντελεστή διαρροής και της διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του αδιαπέραστου στρώματος. Η περίπτωση απελευθέρωσης αποθηκευμένου νερού ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα τυπικά δεν λαμβάνεται υπ’όψιν σε αυτή την προσέγγιση.

Δισδιάστατα επιφανειακά και τρισδιάστατα μοντέλα

Τα τρισδιάστατα μοντέλα ουσιαστικά έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε πίνακες όπως και τα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα με τη διαφορά ότι οι πίνακες παραμέτρων πρέπει να καθορίζονται για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα είναι ένας ειδικός τύπος μοντέλων των οποίων τα δεδομένα εισόδου μπορεί να δομηθούν όμοια με αυτά των δισδιάστατων χωρικών μοντέλων περιορισμένων υδροφορέων ή των τρισδιάστατων μοντέλων. Χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων όταν οι κατακόρυφες κλίσεις του υδραυλικού ύψους είναι σημαντικές. Στα μοντέλα αυτά ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί μέρος του ορίου. [1]

### 1.4.3 Σχεδιασμός πλέγματος

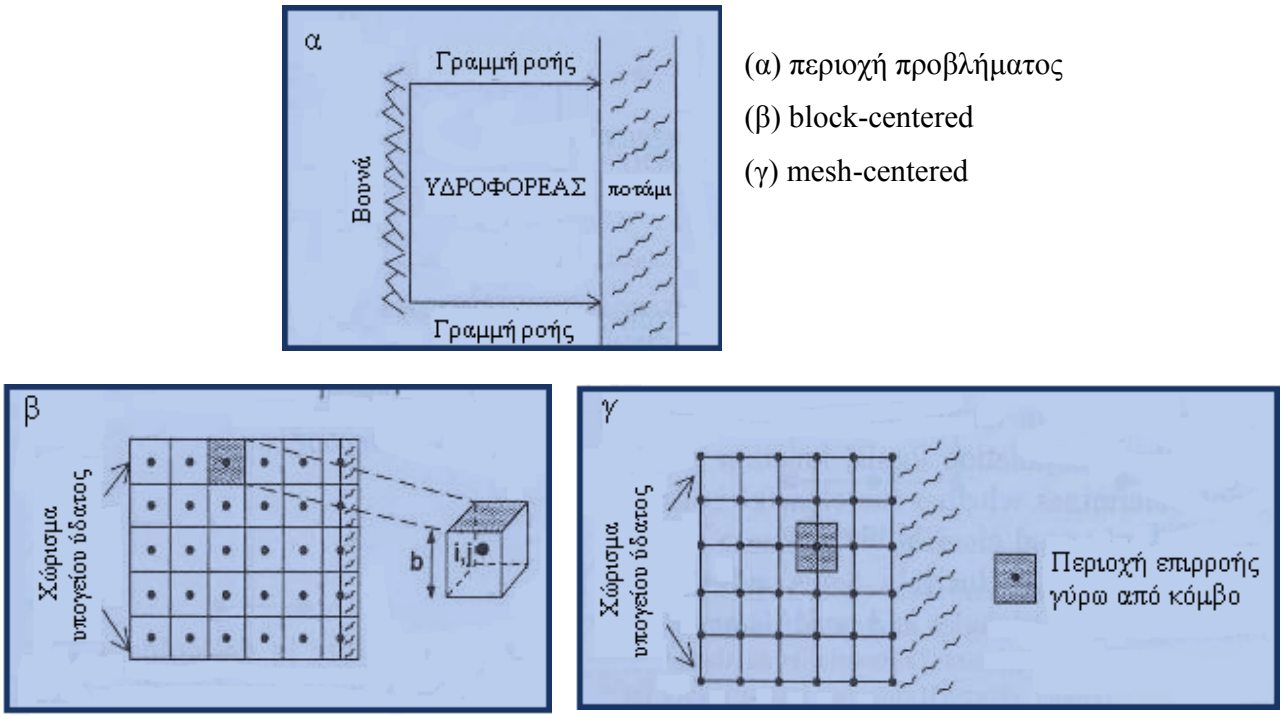
Σε ένα αριθμητικό μοντέλο το συνεχές πεδίο του προβλήματος αντικαθίσταται από ένα διακριτοποιημένο πεδίο το οποίο αποτελείται από ένα πίνακα κόμβων και τα αντίστοιχα κελιά πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Το πλέγμα που δημιουργείται αποτελεί το σκελετό του μοντέλου. Η επιλογή μοντέλου είτε πεπερασμένων διαφορών είτε πεπερασμένων στοιχείων επηρεάζει τη δομή του πλέγματος.

Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών

Υπάρχουν δύο είδη πλεγμάτων πεπερασμένων διαφορών. Τα πλέγματα block-centered και τα πλέγματα mesh-centered. Η διαφορά τους έγκειται στην αντιμετώπιση των οριακών συνθηκών της ροής. Στα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι ονομάζονται με τη χρήση δεικτών,i j και k, οι οποίοι δείχνουν τη θέση τους σε μία γραμμή, στήλη και στρώμα του πλέγματος. Οι κόμβοι χωρίζονται έτσι ώστε τα διαστήματα Δx,Δy και Δz να είναι σταθερά αλλά όχι και απαραίτητα ίσα. Τις περισσότερες φορές ακανόνιστο πλέγμα με μικρές αποστάσεις των κόμβων χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου συναντάται το κύριο πρόβλημα (π.χ. πηγάδια άντλησης) ή παρουσιάζονται άλλα σημαντικά υδρολογικά γνωρίσματα. Όταν στο εσωτερικό της περιοχής χρησιμοποιηθεί μικρό πλέγμα μπορεί να είναι απαραίτητο να

αυξηθούν οι αποστάσεις των κόμβων του πλέγματος και έτσι να διογκωθεί, και να βγει έξω από τα όρια. Γι' αυτό το λόγο το διάστημα ενός κόμβου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει κατά 1.5 φορές την απόσταση του προηγούμενου κόμβου.

***Εικόνα 1.3 :*** *Προσομοίωση με δισδιάστατα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών*




(α) περιοχή προβλήματος

(β) block-centered

(γ) mesh-centered

<u>Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων</u>

Το βασικότερο μειονέκτημα στα πλέγματα των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο μεγάλος αριθμός δεδομένων που απαιτούνται σε σχέση με τα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών. Κάθε κόμβος αλλά και στοιχείο πρέπει να είναι αριθμημένο και η συντεταγμένη θέση (x, y, z) κάθε κόμβου και ο αριθμός αυτού θα πρέπει να είναι στενά συνδεδεμένος με κάθε στοιχείο πριν αυτό εισαχθεί στο μοντέλο. Η αρίθμηση γίνεται από κάτω προς τα πάνω ή από πάνω προς τα κάτω και από αριστερά προς τα δεξιά ανάλογα με το που είναι η μικρότερη διάσταση από το κύριο πρόβλημα. Η αρίθμηση των κόμβων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, από τη μικρότερη διάσταση του πλέγματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εύρος φάσματος των δεδομένων που εισάγονται στο μοντέλο. Κατά

το σχεδιασμό του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων για ισοτροπικά υλικά θα πρέπει η αναλογία της μικρότερης και της μεγαλύτερης διάστασης να είναι κοντά στη μονάδα ή γενικά να μην ξεπερνάει το πέντε. Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, οι ιδιότητες του υδροφορέα προσδιορίζονται είτε από ένα κόμβο, είτε από ένα στοιχείο είτε από μία περιοχή που επηρεάζεται γύρω από τον κόμβο. Το είδος της παρεμβολικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο καθορίζει αν αυτό θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό.

Το πλέγμα θα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις συνιστώσες $K_X$, $K_Y$ και $K_Z$ της υδραυλικής αγωγιμότητας. Σε πλέγματα πεπερασμένων διαφορών πρέπει να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των κόμβων που βρίσκονται εκτός των ορίων της μοντελοποιημένης περιοχής λόγω του γεγονότος ότι τα πλέγματα πεπερασμένων διαφορών είναι ορθογώνια, ενώ τα όρια της περιοχής συνήθως δεν είναι. Στα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα εφόσον τα στοιχεία προσαρμόζονται ακριβώς στα όρια της περιοχής. Στο σχεδιασμό του πλέγματος σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η επιλογή της απόστασης μεταξύ των κόμβων, η οποία είναι συνάρτηση της καμπύλης που αναμένεται στον υδροφόρο ορίζοντα ή της ποτενσιομετρικής επιφάνειας και της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του υδροφορέα, μεταβολές που σχετίζονται με εμπλουτισμό ή άντληση στην περιοχή, καθώς και η συνολική έκταση της περιοχής. [1]

### 1.4.4. <u>Προσδιορισμός παραμέτρων</u>

Τα δεδομένα που απαιτούνται για να μοντελοποιηθεί η υπόγεια ροή μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η κατηγορία Α περιλαμβάνει τη γεωμετρία του συστήματος καθώς επίσης και το πάχος και την έκταση κάθε υδροστρωματογραφικής μονάδας δηλαδή τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στην κατηγορία Β περιέχονται υδρολογικές πληροφορίες για το υδραυλικό ύψος και τη ροή, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη θεμελίωση του μοντέλου, καθώς επίσης και στο να καθοριστούν οι ιδιότητες και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Κατά την προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων απαιτούνται πληροφορίες για τις τρεις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας

$K_X$, $K_Y$ και $K_Z$ . Η οριζόντια ανισοτροπία αντιπροσωπεύεται από τον λόγο των $K_X$ και $K_Y$ , ενώ η κάθετη από το λόγο $K_X$ και $K_Z$. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πλέγμα, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε οι τιμές των διαφόρων παραμέτρων να είναι συμβατές με την κλίμακα του μοντέλου. Στη συνέχεια, μπορούν να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του υδροφορέα σε υδρογραφική μονάδα που αναγνωρίζεται στο θεμελιώδες μοντέλο.

## 1.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

### 1.5.1 Είδη οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες είναι οι μαθηματικές δηλώσεις που καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο αυτής (ροή) στα όρια της υπό μελέτης περιοχής. Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι ένα σημαντικό βήμα στην κατασκευή του μοντέλου. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης, τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής. Τα φυσικά όρια ενός συστήματος υπόγειας ροής οφείλονται στην παρουσία μιας αδιαπέραστης μάζας ενός πετρώματος ή μιας μεγάλης μάζας επιφανειακού νερού. Άλλα όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρογεωλογικών συνθηκών, είναι νοητά και καλούνται υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια. Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών :

- Οριακές συνθήκες 1ου είδους, δηλαδή τις συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους (συνθήκες Dirichlet), για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο
- Οριακές συνθήκες 2ου είδους, δηλαδή τις συνθήκες σταθερής ροής (συνθήκες Neumann), για τις οποίες η ροή είναι δεδομένη. Για τον ορισμό οριακών συνθηκών μηδενικής ροής, η σταθερή ροή ορίζεται ίση με το μηδέν
- Οριακές συνθήκες 3ου είδους, δηλαδή τις συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος (συνθήκες Cauchy ή μικτές οριακές ) για τις οποίες η ροή δια μέσου του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μία τιμή του υδραυλικού ύψους.

Αυτές οι οριακές συνθήκες συχνά αποκαλούνται μικτές γιατί συσχετίζουν τις οριακές στάθμες με τις οριακές ροές.

### 1.5.2 Θέτοντας όρια

Κατά την διαδικασία επιλογής των ορίων συνιστάται η επιλογή φυσικών ορίων όπου αυτό είναι δυνατόν επειδή αποτελούν σταθερά στοιχεία του συστήματος ροής. Τέτοια φυσικά όρια συνήθως είναι τα αδιαπέρατα πετρώματα καθώς επίσης και στρώματα με υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη κατά δύο τάξεις μεγέθους από αυτήν των στρωμάτων όπου η ροή είναι οριζόντια αλλά και όρια με μικρή υδραυλική κλίση. Επιφανειακές μάζες νερού που διαπερνούν όλο τον υδροφορέα αποτελούν ιδανικά όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους. Ιδανικά όρια μηδενικής ροής αποτελούν υδροφορείς που καταλήγουν σε αδιαπέραστο στρώμα, και για παραλιακούς υδροφορείς, ελαττωματικές ζώνες, καθώς και η επιφάνεια του θαλασσινού νερού. Σε περίπτωση που δεν μπορούν να συμπεριληφθούν τα φυσικά όρια της περιοχής, συχνά χρησιμοποιούνται ως όρια μηδενικής ροής τοπικά υπόγεια χωρίσματα, τα οποία εντοπίζονται συνήθως κοντά σε τοπογραφικά υψώματα και μπορούν να σχηματιστούν κάτω αυτά μερικώς διαπερατές μάζες επιφανειακού νερού. Εάν δεν είναι δυνατή η χρήση ούτε φυσικών ορίων, ούτε υπόγειων χωρισμάτων, επιλέγονται άλλα υδραυλικά όρια που καθορίζονται από πληροφορίες σχετικές με τη διαμόρφωση του συστήματος ροής. Σ' αυτή την κατηγορία υπάρχουν δύο είδη τα οποία δεν συμπίπτουν με τα φυσικά τοπικά όρια:

- Απομακρυσμένα όρια. Σε παροδικές προσομοιώσεις, τα όρια είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένα αυθαίρετα και μακριά από το κέντρο του πλέγματος με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από τις πιέσεις που δέχεται το σύστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και το υδραυλικό ύψος αλλά και η ροή γύρω από τα όρια να παραμένει αμετάβλητη
- Υδραυλικά όρια. Τα όρια αυτά δεν συμπίπτουν με τα τοπικά και χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν μικρότερα προβλήματα. Συχνά καλούνται και τεχνητά όρια. [1]

### 1.5.3 Προσομοιώνοντας όρια

Κατά την προσομοίωση των ορίων, σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και πλέγματα mesh-centered οι κόμβοι θα πρέπει πάντα να συμπίπτουν με τα όρια ενώ σε block-centered πλέγματα τα καθορισμένα υδραυλικά ύψη τοποθετούνται πάνω στους κόμβους και οι οριακές συνθήκες της ροής στις εξωτερικές πλευρές των τετραγώνων. Πιο αναλυτικά για τις οριακές συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους η προσομοίωση γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους ίσο με μια γνωστή τιμή του. Εάν το όριο αυτό είναι ένα ποτάμι το υδραυλικό ύψος θα μεταβάλλεται χωρικά κατά μήκος του ορίου ενώ σε περίπτωση λίμνης παραμένει σταθερό. Ουσιαστικά αυτές οι οριακές συνθήκες αναπαριστούν μια ανεξάντλητη πηγή νερού. Οι οριακές συνθήκες 2$^{ου}$ είδους δηλαδή καθορισμένης ροής περιγράφουν την ροή σε μάζες επιφανειακού ύδατος, τη ροή από πηγή, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς πετρώματα που υπόκεινται του πεδίου. Γενικά προτιμώνται οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους όταν αυτό είναι δυνατόν επειδή είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό και στην βαθμονόμηση. Σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, οι οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής προσομοιώνονται με τη χρήση πηγαδιών άντλησης ή εμπλουτισμού νερού με συγκεκριμένο ρυθμό και η ροή θεωρείται πως διανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το κελί. Σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης καθορίζει τη ροή στο τμήμα του ορίου που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κόμβους και στη συνέχεια ο κώδικας ανάγει την τιμή αυτή στους κόμβους.

Οι συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνουν χώρα όταν η ροή κατά μήκος των ορίων είναι μηδέν, ενώ τα όρια μηδενικής ροής παρουσιάζονται σε αδιαπέραστους βράχους, σε ελαττωματικές ζώνες, σε υπόγεια χωρίσματα ή ακόμη και σε περιοχές όπου το θαλασσινό νερό συναντιέται με παραθαλάσσιους υδροφορείς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται ένα μοντέλο που να επιτρέπει την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων που προέρχονται από τη διάχυση και διασπορά του θαλασσινού νερού. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια μηδενικής ροής προσομοιώνονται με το μηδενισμό της μεταβιβασιμότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά

έξω από τα όρια. Στα περισσότερα μοντέλα όμως θεωρούν μηδενική ροή στα όρια και μόνο ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να παρέμβει και να αλλάξει αυτές τις συνθήκες.

Οι οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος η ροή κατά μήκος των ορίων εξαρτάται από τη διαφορά της τιμής του υδραυλικού ύψους που εισάγεται από τον χρήστη στη μια πλευρά του ορίου και στην τιμή που υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά. . Η διαφορά στα μοντέλα των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί σε αντίθεση με την δεύτερη περίπτωση που υπολογίζεται σε κάθε κόμβο. Με τη χρήση τέτοιων συνθηκών, μπορεί να προσομοιωθεί η διαρροή από ή προς ποτάμια, λίμνες, ή πηγές. Ο ρυθμός διαρροής σε αυτές τις περιπτώσεις ισούται με το λόγο της ογκομετρικής παροχής (Q) δια την περιοχή του κελιού διαμέσου του οποίου λαμβάνει χώρα η διαρροή. Εναλλακτικά η διαφορά του υδραυλικού ύψους επί την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα και δια το πάχος μπορούν να μας δώσουν τον ρυθμό διαρροής όπως φαίνεται και στις παρακάτω σχέσεις :

$$L = \frac{Q_L}{A} = K_z' \frac{(h_{source} - h)}{b'}$$

Η εξατμισοδιαπνοή διαμέσου του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί επίσης να προσομοιωθεί με οριακές συνθήκες αυτού του είδους, όπου η ροή θα εξαρτάται από το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Όλες οι επιλογές που υπάρχουν για την προσομοίωση με οριακές συνθήκες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο εσωτερικό του προβλήματος για να προσδιορίσουν πηγές ή σημεία συγκέντρωσης υπόγειου νερού ή ακόμη και για να προσδιορίσουν εσωτερικά όρια όπως λίμνες και ποτάμια που υπάρχουν στο εσωτερικό του πλέγματος. [1]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{ο}$ : Περιγραφή του μοντέλου PTC

## 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το PTC (Princeton Transport Code) είναι ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει την ροή υπογείων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων. Ο Κώδικας Μεταφοράς του Princeton (PTC) είναι το αποτέλεσμα των συνεισφορών πολλών ατόμων στο Πανεπιστήμιο του Princeton (G.F. Pinder, W.G. Gray, D. Krishna Babu, Auli Niemi, Stuart Stothoff, Roger Page). Σκοπός του μοντέλου PTC είναι να εισάγει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την υπόγεια ροή και τη μεταφορά ρύπων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί κυρίως για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για τους θεωρητικούς με αποτέλεσμα να επικεντρώνεται κυρίως στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης και στη βιβλιογραφία για τις πηγές του νερού και να αποφεύγει τις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη των εξισώσεων και στην ανάλυση του λάθους. Το PTC είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77. [2]

## 2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαραστήσει την υπόγεια ροή που περιγράφεται από :

- Το υδραυλικό ύψος,

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

- Τις συνιστώσες της ταχύτητας των υπογείων υδάτων,

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

- Τη μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση, C,

$$\frac{\partial}{\partial_x}[D_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}] + \frac{\partial}{\partial_y}[D_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}]$$
$$+ \frac{\partial}{\partial_z}[D_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}] - [V_x\frac{\partial c}{\partial x}+V_y\frac{\partial c}{\partial y}+V_z\frac{\partial c}{\partial z}] \qquad \textbf{(2.3)}$$
$$+ Q(c^w - c) - \theta\,[1+E(c)](\frac{\partial c}{\partial t}) = 0$$

Οι παραπάνω εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και τον νόμο του Darcy. Τα διάφορα σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω εξισώσεις ορίζονται στα επόμενα κεφάλαια. Η διαδικασία που ακολουθείται για την επίλυση των εξισώσεων ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: πρώτα υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη h από την (1.1) μετά οι ταχύτητες του Darcy Vx, Vy, Vz από την (1.2) και τελικά λύνεται η (1.3) για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου c. [2]

## 2.3 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ PTC

Για την επίλυση των εξισώσεων (2.1) – (2.3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα γενικά απαιτείται εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Ειδικά για συστήματα σε κλίμακα πεδίου όπου για το υπολογιστικό μέρος χρησιμοποιούνται τρισδιάστατες εξισώσεις η προσπάθεια επίλυσης είναι μεγάλη. Το PTC εφαρμόζει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για να επιλύει πλήρεις τρισδιάστατες εξισώσεις, ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό φορτίο σημαντικά.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει την διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού σε οριζόντια και παράλληλα στρώματα μέσα στα οποία χρησιμοποιείται διακριτικοποίηση πεπερασμένων στοιχείων για την ακριβή αναπαράσταση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα μέσω μιας διακριτικοποίησης πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική σύζευξη των δυο μεθόδων παρέχει την δυνατότητα για την εφαρμογή της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής επανάληψης όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο μέρη, στο πρώτο όπου όλες οι διακριτοποιήσεις των

οριζόντιων πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μία της άλλης και στο δεύτερο βήμα όπου επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.

## 2.4 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

### 2.4.1 Βασική εξίσωση

Το ΡΤC καθορίζει τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος υπόγειας ροής επιλύοντας ως προς το υδραυλικό ύψος την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial_x}(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial_y}(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial_z}(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}) \\ &-S\frac{\partial h}{\partial t}+\sum_{i=1}^{r}Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)=0 \end{aligned} \quad \textbf{(2.4)}$$

όπου με τις βασικές μονάδες χρόνου, μήκους και μάζας οι συντελεστές ορίζονται ως

h είναι το υδραυλικό ύψος [L],

Kxx είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση x [$LT^{-1}$],

Kyy είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση y [$LT^{-1}$],

Kzz είναι η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση z [$LT^{-1}$],

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

$Q_i$ ο όρος της πηγής/ πηγάδι στη θέση i [$L^3T^{-1}$] (π.χ. αντλίες, θετικές τιμές σημαίνουν άντληση)

δ( ) είναι η δέλτα συνάρτηση Dirac και

r ο αριθμός των σημείων πηγών/ πηγαδιών.

Για ευκολία ο τελευταίος όρος στην εξίσωση (2.4) θα συντμηθεί ως Q. Η βασική εξίσωση (2.4) λύνεται αριθμητικά από το ΡΤC, χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών όπου και θα εφαρμόσουμε παρακάτω περιγράφοντας αναλυτικά τα βήματα επίλυσης που ακολουθήθηκαν.[2]

### 2.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό σχέδιο που χρησιμοποιείται από το μοντέλο PTC για την επίλυση της εξίσωσης (2.4) περιλαμβάνει προσεγγίσεις των όρων που περιέχουν τις παραγώγους των x και y χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει ένα απεριόριστο σύνολο συναρτήσεων που θα αντιπροσωπεύει με ακρίβεια την λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την ροή των υπόγειων υδάτων. Μια προσεγγιστική μορφή της σειράς αυτής είναι :

$$h(x,y,z,t) \sim \hat{h}(x,y,z,t) = \sum_{i=1}^{N} h_i(z,t) w_i(x,y) \quad \textbf{(2.5)}$$

Όπου h είναι το υδραυλικό ύψος (L),

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

$h_i$ είναι ένας μη καθορισμένος συντελεστής [L],

$w_i$ είναι μια βασική συνάρτηση (αδιάστατη) και

N είναι ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (2.5) παρέχει μιαν ακριβή αναπαράσταση, όσο το N τείνει στο άπειρο (το $\hat{h}$ τείνει στο h). Με μια προσεκτική επιλογή των βασικών συναρτήσεων οι μη καθορισμένοι συντελεστές $h_i$ γίνονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες (x, y, z). Σημαντικό στοιχείο για την αποδοτικότητα υπολογισμού της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων με ξεχωριστά βήματα οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο σε μια μικρή υποπεριοχή του συνολικού πεδίου. Το PTC χρησιμοποιεί τέτοιες συναρτήσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συνεχίζει τονίζοντας ότι παρόλο που ο διαφορικός συντελεστής L (2.4) όταν συντελεί στο h είναι ίσος με μηδέν, όταν ο L λειτουργεί στην προσεγγιστική συνάρτηση παρουσιάζεται λάθος. Ξαναγράφοντας την (2.4) μαθηματικά έχουμε :

$$L(h) = 0 \text{ ενώ } L(\hat{h}) = R$$

όπου R είναι το παραμένων σφάλμα

Για να επιλυθεί η εξίσωση (2.5) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει αυτό το λάθος να ελαχιστοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας αρχικά ένα ολοκληρωμένο σύνολο συναρτήσεων $w_j$ και αναγκάζοντας το υπολειμματικό σφάλμα R να είναι ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές του $w_j$ έχουμε στην πραγματικότητα επιτύχει το R να ισούται με μηδέν αποκομίζοντας έτσι μια λύση της (2.5). Έτσι έχουμε [2]

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

### 2.4.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών

Ξαναγράφουμε υπό τη μορφή πινάκων την τελική μορφή της εξίσωσης (2.5) όπως αυτή προέκυψε από τα βήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων :

$$\mathbf{Ah} + \mathbf{B}\frac{\partial h}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = 0$$

Όπου τα κεφαλαία μαυρισμένα γράμματα παριστάνουν τετραγωνικούς πίνακες (N x N) και τα μικρά μαυρισμένα γράμματα παριστάνουν διανύσματα στήλης μήκους N. Τα στοιχεία των **A, B, v** και **f** (περιέχει γνωστές οριακές συνθήκες) είναι :

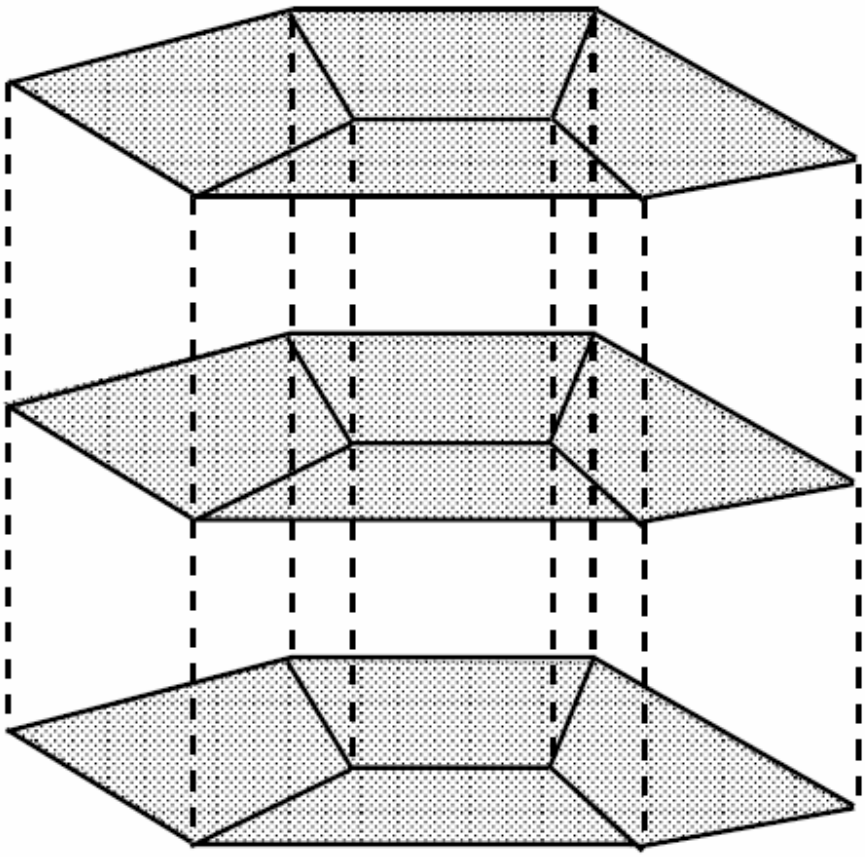
$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x}\frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y}\frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dxdy \quad \textbf{(2.6a)}$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ S w_i w_j \right] dxdy \quad \textbf{(2.6b)}$$

$$f_i = -\iint_{\Omega} Q w_i dxdy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad \textbf{(2.6c)}$$

$$v_i = \sum_{j=1}^{N} \left[ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) w_i w_j \, dxdy \right] \quad \textbf{(2.6d)}$$

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του κώδικα είναι η χρήση ενός διαχωριστικού σχήματος για τις χωρικές παραγώγους της διεύθυνσης z στην εξίσωση (2.6d). Η κάθετη διακριτικοποίηση επιτυγχάνεται εξασφαλίζοντας ότι τα οριζόντια πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων θα αντιγράφονται σε στρώματα με κόμβους που στοιβάζονται το ένα ακριβώς πάνω στο άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών ώστε να προσεγγίσει τη εξίσωση (2.6d).



***Εικόνα 2.1 :*** *Σχηματικό διάγραμμα οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στοίβες το ένα πάνω στο άλλο, δημιουργώντας της τρισδιάστατη διακριτοποίηση*

Χρησιμοποιώντας το k σαν κάθετο δείκτη και με k=1 ως το κατώτερο στρώμα, η προσέγγιση μπορεί να γραφτεί ως εξής σε μορφή πινάκων :

$$v \cong C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1}) \quad \textbf{(2.7)}$$

όπου ο αρμονικός μέσος των ιδιοτήτων των γειτονικών στρωμάτων χρησιμοποιείται για να ορίσει τα στοιχεία του $\mathbf{C}_\kappa^+$ **,** τον κάθετο όρο μεταξύ του στρώματος k και του στρώματος k +1, και του $\mathbf{C}_\kappa^-$ **,** του κάθετου όρου μεταξύ του στρώματος k και k-1.

***<u>Η παράγωγος του χρόνου</u>***

Σύμφωνα με την εμπειρία έχει αποδειχθεί ότι η πιο ακριβής λύση για τα προβλήματα υπόγειας ροής είναι μια προς τα πίσω διαφορική προσέγγιση της παραγώγου του χρόνου. Με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένα 1ης τάξης διορθωμένο πλάνο για την προσέγγιση και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται σε ένα νέο χρονικό επίπεδο. Άρα εφαρμόζοντας την παράγωγο του χρόνου για κάθε στρώμα προκύπτει η παρακάτω εξίσωση όπου έχουμε πλήρης διακριτοποίηση της (2.4) και μας παρέχεται ένα σύστημα M x N εξισώσεων με N αγνώστους από την (2.5) για κάθε M στρώματα.

$$\begin{aligned} & A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t}\left[h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t\right] \\ & -\left[C_k^+(h_{k+1} - h_k) - C_k^-(h_k - h_{k-1})\right]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \end{aligned} \quad \textbf{(2.8)}$$

## 2.5 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το μοντέλο PTC προσαρμόζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Αυτοί οι τρεις τύποι είναι οι συνθήκες καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Dirichlet), της καθορισμένης ροής (Neumann) και οι συνθήκες τρίτου τύπου (Διαρροής). Οι οριακές συνθήκες μπορούν να προσαρμοστούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής. Αυτό συνεπάγεται περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και στρώματα γύρω από

αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες μέσα στο πεδίο, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

### 2.5.1 Καθορισμένου υδραυλικού ύψους

Τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους καθορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τις τιμές του υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Ο κώδικας αναλύει ως σταθερές τις γραμμές και τις στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι που έχουν σταθερό υδραυλικό ύψος ουσιαστικά απαλείφονται από την εξίσωση του πίνακα, τότε απομένουν (N x M – $N_C$) εξισώσεις με $N_C$ τον συνολικό αριθμό των κόμβων με καθορισμένο σταθερό υδραυλικό ύψος.

### 2.5.2 Καθορισμένης ροής

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μας παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Έτσι ο χρήστης χρειάζεται μόνο να καθορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου. Για διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και αυτόματα κάνει ολοκλήρωση της περιοχής για να καθοριστεί η ογκομετρική ροή

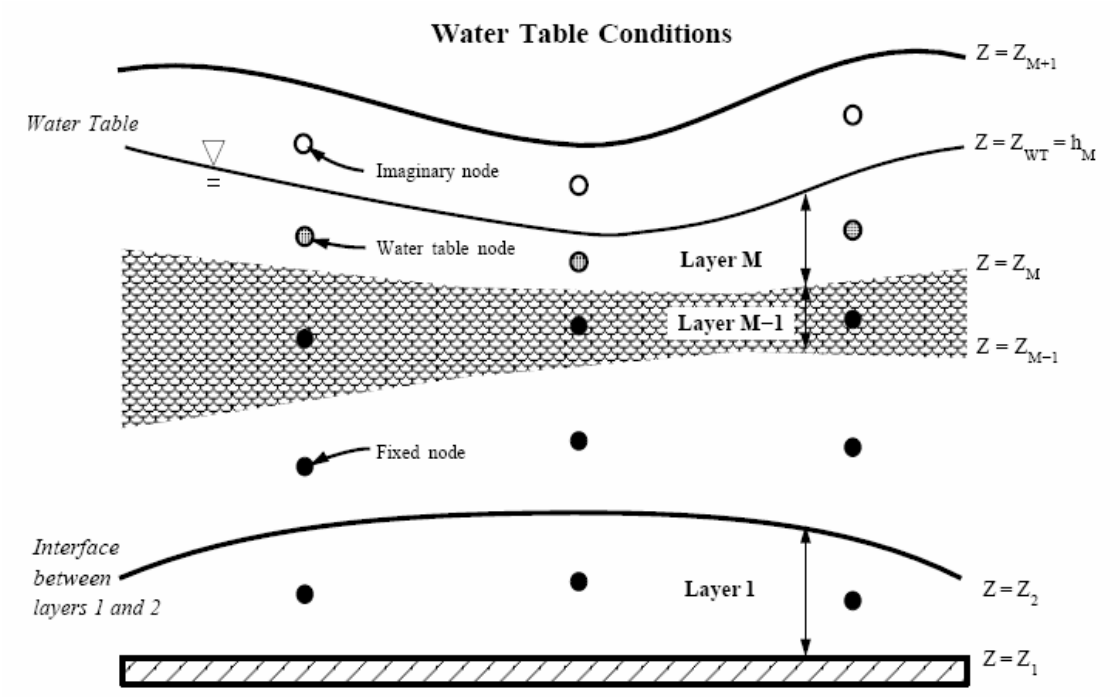
### 2.5.3 Τρίτου τύπου

Στις οριακές συνθήκες τρίτου τύπου εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (leakage conductance) ο οποίος είναι η υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση και ολοκληρώνεται στην περιοχή για να αναπαραστήσει την κάθετη διαρροή. Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Οι οριακές συνθήκες διαρροής δίνονται από τον τύπο :

$$Q = k_L (h^t_{j,L} - h^t_{j,k}) \quad \textbf{(2.9)}$$

## 2.6 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Η επιβολή του υδροφόρου ορίζοντα ή οριακών συνθηκών ελεύθερου υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα. Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται μια απεικόνιση της κατάστασης, στην οποία περιλαμβάνεται ένας κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας που υπόκειται σε διήθηση μεγέθους R(x, y, t). Η καθορισμένη ανύψωση του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση $z = z_{M+1}(x,y,t)$ και η πραγματική ανύψωση από τη σχέση $z = z_{WT}(x,y,t)$.




***Εικόνα 2.2 :*** *Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και κατακρήμνισης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες δηλώνονται με $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα.*

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα ($h_M$) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ($z_{WT} - z_M$). Έτσι σε κάθε κόμβο απαιτούμε να ισχύει η σχέση :

$$(z_{WT})i = (h_M)i \quad \textbf{(2.10)}$$

Επίσης υποτίθεται ότι το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται πάντα στην κορυφή του ανώτερου στρώματος (k=M). Έτσι όταν το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει για το εάν οι τιμές του $h_M$ στους κόμβους βρίσκονται ανάμεσα στις τιμές ανύψωσης που ικανοποιούν την παρακάτω εξίσωση :

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad \textbf{(2.11)}$$

Το PTC βγάζει ένα μήνυμα εάν παραβιάζεται η παραπάνω συνθήκη. Τυπώνει τη θέση του κόμβου, το μέγιστο πάχος κ.α. και σταματά την εκτέλεση του προγράμματος. Η παραπάνω συνθήκη πρέπει να ικανοποιείται και από τις αρχικές οριακές συνθήκες για το υδραυλικό ύψος. [2]

## 2.7 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ

Στην ενότητα που ακολουθεί θα παρουσιαστεί η εξίσωση μεταφοράς ρύπων με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξίσωση της υπόγειας ροής. Η εξίσωση δίνεται από τον τύπο :

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial_x}[D_{xx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{xy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{xz}\frac{\partial c}{\partial z}]+\frac{\partial}{\partial_y}[D_{yx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{yy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{yz}\frac{\partial c}{\partial z}]\\
&+\frac{\partial}{\partial_z}[D_{zx}\frac{\partial c}{\partial x}+D_{zy}\frac{\partial c}{\partial y}+D_{zz}\frac{\partial c}{\partial z}] + Q(c^w-c) \qquad \textbf{(2.12)}\\
&-[V_x\frac{\partial c}{\partial x}+V_y\frac{\partial c}{\partial y}+V_z\frac{\partial c}{\partial z}] - \theta\,[1+E(c)](\frac{\partial c}{\partial t})=0
\end{aligned}$$

Οι όροι διασποράς (συντελεστές) δίνονται από τις εξισώσεις :

$$
\begin{aligned}
D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\
D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\
D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2)/V + D_M \\
D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T)\ V_x V_y / V \qquad \textbf{(2.13)} \\
D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V)\ V_y V_z / V \\
D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_V)\ V_z V_x / V
\end{aligned}
$$

Και οι υπόλοιποι όροι είναι

$D_M$ ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, συνήθως μικρός ($L^2/T$),

$\alpha_L$ η επιμήκης διασπορά (L),

$\alpha_T$ η οριζόντια εγκάρσια διασπορά (L),

$\alpha_V$ η κάθετη εγκάρσια διασπορά (L),

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

C η χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y,z) στο χρόνο t ($M/L^3$),

θ το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),

E(c) η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες χημικής απορρόφησης,

Q η ισχύ της άντλησης (πηγής- πηγαδιού) (1/T) ($Q \equiv Q_i \delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i)$),

$Q_i$ ο ογκομετρικός ρυθμός εισροής / εκροής ($L^3/T$) στο σημείο ($x_i$, $y_i$, $z_i$),

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

δ( ) η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Για όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Qi \leq 0$) υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού $C^w$ στην αντλία ισοδυναμεί με τη συγκέντρωση c του περιβάλλοντα χώρου. Έτσι σε όλα τα πηγάδια άντλησης ο συντελεστής $Q(C^w - C)$ ισοδυναμεί με μηδέν και επομένως διατηρείται ο όρος Q στην εξίσωση (2.12) μόνο όταν το πηγάδι αντλεί ($Qi>0$) τη διαλυμένη ύλη με συγκέντρωση $C^w$ που αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του αντλούμενου ρευστού. [2]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης υπόγειων υδροφορέων

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο υφαλμύρινση υπόγειου υδροφορέα εννοούμε την διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό με παράλληλη αύξηση της αλατότητας του σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος. Η υφαλμύρινση ως φαινόμενο ποιοτικής υποβάθμισης είναι η πρώτη ρύπανση των υπογείων υδάτων που διαγνώστηκε επιστημονικά στην Ελλάδα. Η υφαλμύρινση υπόγειων υδροφορέων αποτελεί ειδική περίπτωση υπόγειας ροής και παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς. Πιο συχνά παρατηρείται το φαινόμενο αυτό σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού προκάλεσε την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η διείσδυση αυτή μπορεί να οφείλεται τόσο σε φυσικούς λόγους όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες [4]:

- Κλιματικές αλλαγές
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας
- Θαλασσινό νερό που διείσδυσε σε υδροφορείς κατά το παρελθόν
- Υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροιακές λίμνες, κοιλάδες
- Νερό από αρδευόμενη γη που καταλήγει σε ρυάκια
- Υπεραντλήσεις υδροφορέων
- Λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης

Η αλμύρινση των παράκτιων υδροφόρων οριζόντων είναι δυνατόν να λάβει χώρα υπό τα εξής σενάρια (Καλλέργης,1986) :

- Όταν καρστικοί αγωγοί βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα σε όλο τους το μήκος

- Όταν το στεγανό διάφραγμα ανάμεσα στο καρστικό σύστημα και τη θάλασσα διαταραχθεί κατά θέσεις από την διάβρωση ή τον τεκτονισμό
- Όταν το στεγανό διάφραγμα είναι πολύ ρηχό οπότε η κυκλοφορία γίνεται κάτω από αυτό

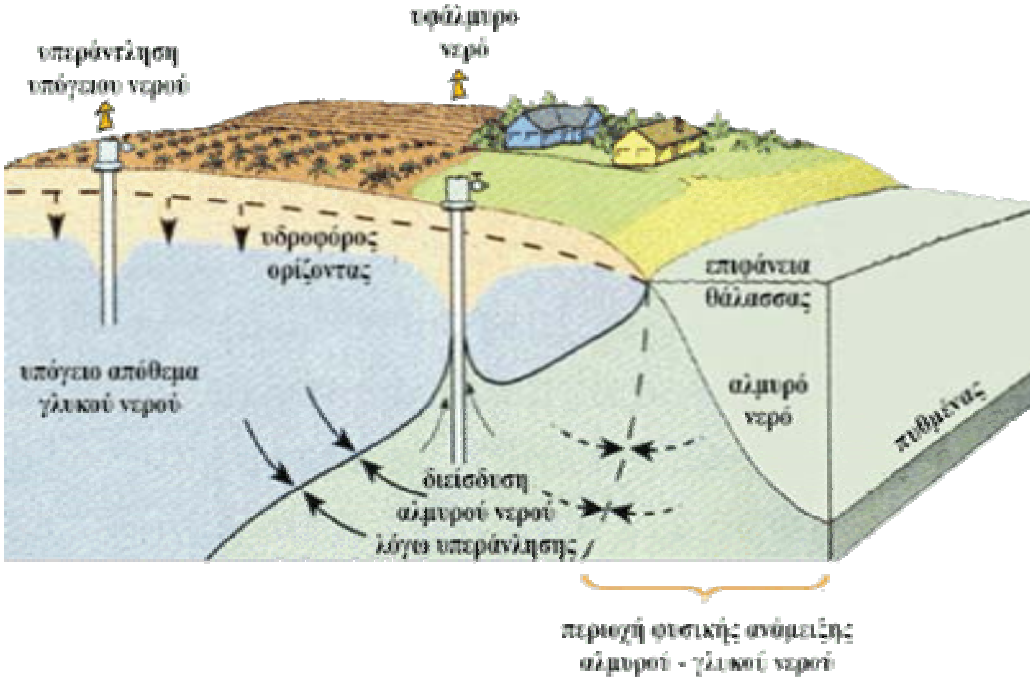
Το φαινόμενο της υφαλμύρινης δείχνει ότι μάλλον θα έχουμε όξυνση του προβλήματος. Στην Ελλάδα το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο και επηρεάζει τις περισσότερες νησιωτικές και παράκτιες περιοχές. Όταν σε έναν υδροφορέα εισχωρήσει αλμυρό νερό, το αλάτι προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών και μαζί με την αργή κίνηση του υπόγειου νερού επιβραδύνουν την διαδικασία της αναστροφής και την αποκατάσταση του υδροφορέα. Συγχρόνως έχουμε καταστροφή του υδροφορέα ως πηγή νερού. Η αλατότητα στο νερό είναι επικίνδυνη για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων, καταστρέφει τις καλλιέργειες και διαβρώνει σωλήνες και λέβητες σε βιομηχανικές χρήσεις. Επειδή ο χρόνος αποκατάστασης είναι συνήθως μεγάλος η προτεινόμενη αντιμετώπιση περιλαμβάνει την πρόβλεψη και την ορθή διαχείριση. Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60 για το νερό της Ε.Ε. υπάρχει ανάγκη καθιέρωσης διαδικασιών για τη ρύθμιση της άντλησης γλυκού ύδατος και για την παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας του, δεδομένου ότι η εξασφάλιση καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων επιβάλλει έγκαιρη δράση και σταθερό μακροπρόθεσμο σχεδιασμό μέτρων προστασίας, λόγω της φυσικής καθυστέρησης στο σχηματισμό και την ανανέωσή τους.[5]

## 3.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ – ΜΟΡΦΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η διείσδυση του θαλασσινού νερού εξαιτίας ενός από τους παραπάνω λόγους παρουσιάζεται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς. Επειδή το θαλασσινό νερό είναι βαρύτερο τείνει να κινείται κάτω από το στρώμα του γλυκού νερού. Το γλυκό νερό από την άλλη έχει υδραυλική κλίση που μειώνεται προς την ακτή με αποτέλεσμα να κινείται προς την πλευρά της θάλασσας. Αυτή η κλίση υπάρχει πάντα λόγω του εμπλουτισμού από την βροχόπτωση με αποτέλεσμα να έχουμε μια θέση ισορροπίας εμποδίζοντας την ανάντη κίνηση του

θαλασσινού νερού μέχρι να καταλάβει όλο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από την στάθμη της θάλασσας. Η αιχμή (toe) αποτελεί το μέγιστο σημείο διείσδυσης. Η διεπιφάνεια που σχηματίζεται μπορεί να προσεγγιστεί με τις παρακάτω δύο θεωρήσεις :

- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους (λόγω υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτημένη από την πυκνότητα για κορεσμένη ροή – έχουμε δύο αναμίξιμα υγρά )
- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας – ακίνητης ( το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα – παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά)

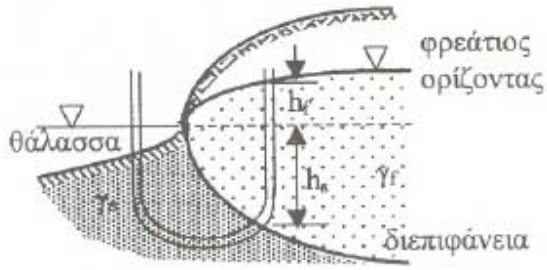



***Εικόνα 3.1 :*** *Υφαλμύρινση σε ελεύθερο υδροφορέα[3]*

Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg που βασίζεται στην δεύτερη θεώρηση και στη θεωρία του Dupuit στις παράκτιες ζώνες θεωρεί ότι το ανάγλυφο του εδάφους, η επιφάνεια του ελεύθερου υδροφορέα και η διεπιφάνεια γλυκού αλμυρού νερού συναντώνται στο ίδιο σημείο στην ακτή. Εφαρμόζοντας υδροστατική ισορροπία σε αυτό το σημείο ισχύει η σχέση :

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} * h_f$$

Όπου ξ η θέση της διεπιφάνειας κάτω από την στάθμη της θάλασσας, $h_f$ το υδραυλικό ύψος του γλυκού νερού πάνω από την στάθμη της θάλασσας, $\rho_f$ η πυκνότητα του γλυκού νερού και $\rho_s$ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού. Στο σχήμα που ακολουθεί η θέση της διεπιφάνειας συμβολίζεται με $h_S$ .




***Εικόνα 3.2 :*** *Σχηματική απεικόνιση της παραδοχής Ghyben – Herzgerg.[4]*

Αν στην παραπάνω σχέση αντικαταστήσω τις συνηθισμένες τιμές πυκνοτήτων για τα δύο μέσα δηλαδή $\rho_f$ = 1 g/cm$^3$ και $\rho_s$ = 1,025 g/cm$^3$ προκύπτει ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού πάνω από την στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια της υφαλμύρωσης ωθείται 40 μέτρα προς τα κάτω. Η αναλογία που προκύπτει δεν είναι αντιπροσωπευτική στις περιπτώσεις που έχουμε αυξημένη άντληση σε παραθαλάσσιες περιοχές καθώς εκεί το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να προσχωρεί σε μεγάλο βάθος μέσα στον υδροφορέα. Τα παραπάνω μπορούν να ισχύσουν και στην περίπτωση περιορισμένων υδροφορέων αντικαθιστώντας τον ελεύθερο υδροφόρο από την πιεζομετρική επιφάνεια ( H= f (p) ). Η προσέγγιση Ghyben – Herzberg είναι μια απλουστευμένη προσέγγιση χωρίς να λάβει υπόψη της την δυναμική κίνηση της υπόγειας ροής και τη μεταφορά μάζας του άλατος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ισχύει μόνο όταν το αλμυρό νερό είναι στάσιμο και το γλυκό νερό ρέει οριζόντια. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις στις οποίες η μεταβατική ζώνη είναι πολύ στενή με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούμε την απλουστευμένη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας.[5]

## 3.3 ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

Η απορρύπανση των υφάλμυρων υδροφορέων συχνά είναι μη αντιστρεπτή και στην καλύτερη περίπτωση απαιτούνται μακροχρόνιες προσπάθειες με μη προβλέψιμα συχνά αποτελέσματα δεδομένου ότι ο υδροφορέας θα πρέπει να εκλυθεί πολλές φορές ώστε να έχουμε απομάκρυνση των διαλυμένων ρύπων ( νάτριο και μαγνήσιο συνήθως) και την απομάκρυνση του νερού στο πορώδες μέσο.

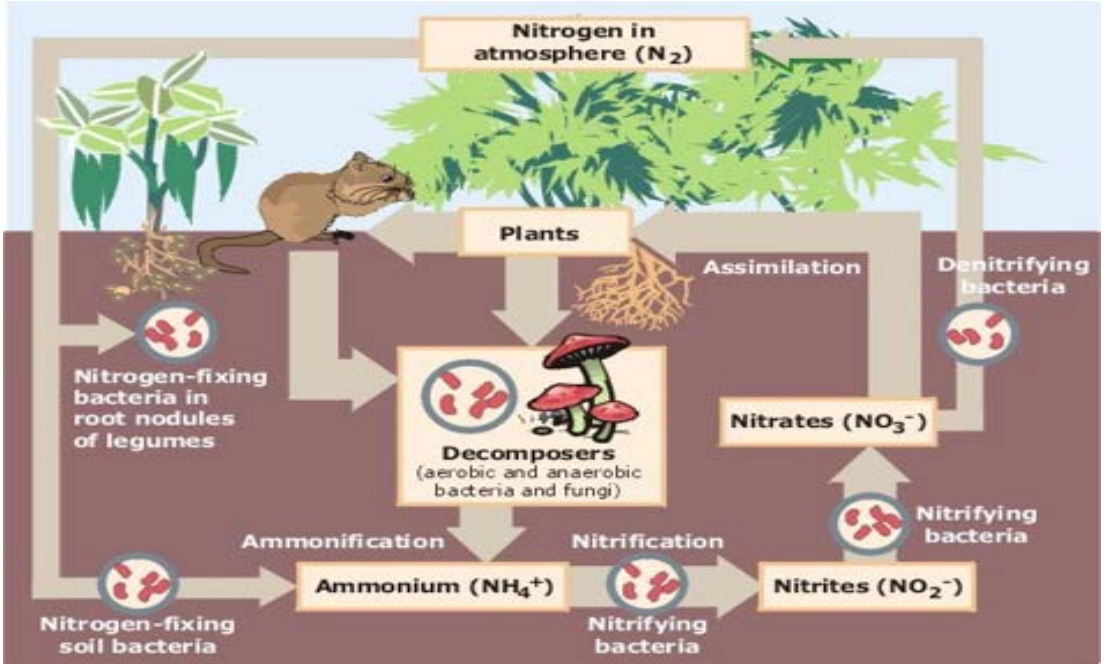
Ένας από τους εύκολους τρόπους αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης είναι ο βέλτιστος έλεγχος των ρυθμών άντλησης με απώτερο σκοπό ο όγκος της άντλησης να μην υπερβαίνει την φυσική αναπλήρωση. Μια άλλη μέθοδος είναι η τεχνητή αναπλήρωση με χρήση επεξεργασμένων υγρών λυμάτων αυξάνοντας έτσι την εκροή του υδροφορέα δημιουργώντας ένα φράγμα που απωθεί το θαλασσινό νερό. Ένα άλλο μέτρο είναι η απευθείας άντληση του θαλασσινού νερού από την περιοχή υφαλμύρινσης έτσι ώστε να επιτύχουμε μείωση της εξάπλωσης του φαινομένου με βασική προϋπόθεση την εύρεση τεχνικής επεξεργασίας ή διάθεσης του αντλούμενου νερού. Μια τεχνική που βασίζεται στην ίδια λογική με την παραπάνω είναι η ταυτόχρονη άντληση και στα δύο στρώματα για να αποφύγουμε την δημιουργία του κώνου διείσδυσης (αιχμή μετώπου). Τέλος η ανάπτυξη υποθαλάσσιων φραγμάτων για να εμποδιστεί η διαφυγή του γλυκού νερού μειώνοντας ή προλαμβάνοντας το φαινόμενο είναι μια λύση η οποία πρέπει να αποτελείται από συμπαγείς ή χαμηλής διαπερατότητας υλικά πλήρωσης για να μην έχουμε διαρροή. Οι τεχνικές που αναφέραμε μπορούν να συνδυαστούν ή να συμπληρώνουν η μία την άλλη για καλύτερα αποτελέσματα. Γενικά ο χρόνος απορρύπανσης μπορεί να συντομευθεί με τεχνητό εμπλουτισμό με νερό πλούσιο σε ανταλλάξιμο $Ca^{2+}$ όμως ο τελευταίος αποδίδει περισσότερο πριν την κατιονική ανταλλαγή του $Na^{+}$ με το $Ca^{2+}$.[5] ,[4]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Ρύπανση υπόγειων υδάτων με νιτρικά

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2% του ολικού αζώτου που υπάρχει στη γη βρίσκεται στην ατμόσφαιρα σε στοιχειακή κυρίως μορφή. Το υπόλοιπο 98% βρίσκεται στα πετρώματα και στο έδαφος υπό μορφή διαφόρων ενώσεων. Τα νιτρικά ($NO^-_3$) είναι η κύρια ανόργανη μορφή του αζώτου. Λόγω του φορτίου τους απωθούνται από τα αρνητικά φορτία που φέρουν τα σωματίδια του εδάφους και κινούνται ελεύθερα στο έδαφος με το νερό έκπλυσης και απορροής. Τα νιτρικά είναι από τους πιο προβληματικούς ρυπαντές των υπόγειων υδάτων. Είναι ενώσεις άγευστες, άχρωμες και άοσμες. Αν και υπάρχουν πολλές πηγές αζώτου που μπορούν δυνητικά να οδηγήσουν στη ρύπανση των υπογείων νερών με νιτρικά (φυσικές,ενδιάμεσες), οι πιο σημαντικές είναι εκείνες που σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες. Στις φυσικές πηγές περιλαμβάνονται οι διάφορες αέριες μορφές του αζώτου που με το βρόχινο νερό καταλήγουν στο έδαφος καθώς επίσης και η παραγωγή στο έδαφος ποσοτήτων αζώτου λόγω μικροβιακών διεργασιών (αμινοποίηση, αμμωνιοποίηση, νιτροποίηση). Ως ανθρωπογενείς πηγές ορίζονται οι μη γεωργικές δραστηριότητες και οι γεωργικές δραστηριότητες που ουσιαστικά προκύπτουν από την υπερβολική λίπανση των γεωργικών εκτάσεων και την απόρριψη λυμάτων και άλλων αποβλήτων. Η χρησιμοποίηση λιπασμάτων σε ποσότητες μεγαλύτερες από τις δυνατότητες πρόσληψης των καλλιεργειών κάνει δυνατή τη μεταφορά της περίσσειας του αζώτου στα υπόγεια υδάτινα σώματα μέσω των επιφανειακών απορροών και της διήθησης. Σημαντικοί παράγοντες είναι η συχνότητα και η ποσότητα άρδευσης και το βάθος του υποκείμενου υδροφορέα. Οι ενδιάμεσες πηγές χαρακτηρίζονται οι πηγές που έμμεσα επηρεάζονται από ανθρώπινες δραστηριότητες (καταστροφή δασών, παραγωγή αέριων μορφών αζώτου από την καύση ορυκτών καυσίμων) και σε συνδυασμό με τον φυσικό εμπλουτισμό έχουμε εμφάνιση ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Τέλος μία άλλη μορφή με την οποία εμφανίζεται το άζωτο στο έδαφος είναι το αμμωνιακό άζωτο που για κανονικές συνθήκες pH είναι υπό την μορφή αμμωνίου αλλά υπό αερόβιες συνθήκες

νιτροποιητικά βακτήρια το μετατρέπουν σε $NO^-_3$.




***Εικόνα 4.1 :*** *Ο κύκλος του αζώτου[13]*

## 4.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΑ ΝΙΤΡΙΚΑ

### 4.2.1 <u>Επιπτώσεις στο περιβάλλον</u>

Ο ευτροφισμός οφείλεται στη διοχέτευση μεγάλης ποσότητας θρεπτικών αλάτων και κυρίως αζώτου και φωσφόρου στην υδάτινη μάζα. Μία κύρια πηγή εμπλουτισμού των φυσικών υδάτων είναι και τα ρυπασμένα με νιτρικά υπόγεια νερά. Τα συμπτώματα εμφάνισης του φαινομένου είναι η «άνθηση» του φυτοπλαγκτόν, η αύξηση της πυκνότητας του νερού, η δημιουργία ενός πράσινου αφρού που περιορίζει την διέλευση του φωτός και η μείωση της ποικιλίας των ειδών. Ιδιαίτερη σημασία για τη δημιουργία ευτροφισμού έχει η ισορροπία αζώτου – φωσφόρου που λειτουργεί ως περιοριστικός παράγοντας.(1P/16N). Η σχέση αυτή μεταβάλλεται εποχιακά και είναι σημαντικός δείκτης για τον έλεγχο ευτροφισμού σε μια λίμνη. Γενικά περισσότερο ο φώσφορος παρά

το άζωτο φαίνεται να είναι το θρεπτικό εκείνο στοιχείο που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τον εμπλουτισμό. [6]

### 4.2.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Η τροφή και το πόσιμο νερό αποτελούν τις δύο κύριες πηγές από τις οποίες ο ανθρώπινος οργανισμός προσλαμβάνει νιτρικά. Η φύση των νιτρικών δεν είναι τοξική. Όταν αυτά εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος δεν παίρνουν μέρος στις κανονικές βιολογικές διεργασίες, αντίθετα αποβάλλονται σχετικά γρήγορα με τα ούρα ή τα περιττώματα και ανακυκλώνονται στο σάλιο. Η τοξικότητα των νιτρικών στους ανθρώπους οφείλεται στην αναγωγή των νιτρικών σε νιτρώδη με τη βοήθεια μικροοργανισμών στο σάλιο των ανθρώπων και στο γαστρεντερικό σύστημα. Η ενδογενής παραγωγή στο σάλιο του ανθρώπου μπορεί να είναι 20 φορές μεγαλύτερη από την πρόσληψη με τις τροφές.

Η τοξικότητα των νιτρωδών συνδέεται άμεσα με την μεθαιμογλοβιναιμία ή σύνδρομο κυάνωσης των βρεφών ( blue baby syndrome). Κατά την μεθαιμογλοβιναιμία η αιμογλοβίνη οξειδώνεται σε μεθαιμογλοβίνη. Τα νιτρώδη που παράγονται με τη μικροβιολογική αναγωγή των νιτρικών είναι ικανά για την παραπάνω μετατροπή. Αν η ποσότητα της μεθαιμογλοβίνης αυξηθεί τότε παράγονται στον οργανισμό κλινικά συμπτώματα έλλειψης οξυγόνου. Τα βρέφη μέχρι 6 μηνών είναι πιο ευάλωτα στην ασθένεια γιατί έχουν λίγα οξέα στα γαστρικά υγρά επιτρέποντας έτσι πιο εύκολα την μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη. Το πιο εμφανές σύμπτωμα είναι η μελανή απόχρωση στα χείλη, γύρω από τα μάτια και στα άκρα των βρεφών και δυσκολία στην αναπνοή. Η θεραπεία εφόσον έχει διαγνωστεί η ασθένεια είναι απλή και εύκολη.

Η θεωρία ότι τα νιτρικά στο πόσιμο νερό μπορούν να προκαλέσουν καρκίνο του στομάχου δείχνει να στερείται αποδείξεων. Πολλές μελέτες βέβαια έχουν δείξει ότι μια αύξηση στην πρόσληψη νιτρικών με ταυτόχρονη απορρόφηση αυτών με αμίνες σχηματίζοντας νιτροζαμίνες προκαλούν καρκίνο σε διάφορα όργανα. Αυτές οι ενώσεις θεωρούνται σημαντικές καρκινογόνες ουσίες. Γενικά δεν υπάρχουν ικανά αποδεικτικά στοιχεία που να επιβεβαιώνουν με σιγουριά αυτή τη θεωρία. Τα όρια που θέτει η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (1985) είναι 10 mg/l για το νιτρικό άζωτο και 1 mg/l για

το νιτρώδες άζωτο λόγω των συγκεντρώσεων που έχουν διαπιστωθεί ότι οδηγούν σε συμπτώματα. [6]

### 4.2.3 Επιπτώσεις στα ζώα

Τα επίπεδα νιτρικών που είναι δυνατόν να έχουν τοξικές επιδράσεις στα ζώα είναι πολύ υψηλότερα από ότι στον άνθρωπο. Η δηλητηρίαση από νιτρικά στην κτηνοτροφία σχετίζεται περισσότερο με τη λήξη τους μέσω της τροφής. Βέβαια είναι δύσκολη η εξακρίβωση της δόσης που προκαλεί χρόνια συμπτώματα. Συμπτώματα δηλητηρίασης είναι η κυάνωση, η δυσκολία στην αναπνοή, ταχυκαρδία, προβληματική ανάπτυξη και μείωση στη παραγωγή γάλακτος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μετατροπή στα ζώα είναι ο ρυθμός πρόσληψης, ο ρυθμός μετατροπής των νιτρωδών σε αμμωνία στο στομάχι, ο ρυθμός χώνεψης των τροφών και η κίνηση των νιτρωδών έξω από το στομάχι.

## 4.3 ΤΡΟΠΟΙ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ ΝΕΡΩΝ ΡΥΠΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΝΙΤΡΙΚΑ

### 4.3.1 Μέτρα για την πρόληψη της Νιτρορρύπανσης

Για την παρεμπόδιση και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων με νιτρικά είναι διαθέσιμα διάφορα μέτρα διαχείρισης. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σχετίζονται με τον κατάλληλο συνδυασμό του χρόνου και του ρυθμού ρίψης λιπασμάτων με τις ανάγκες της καλλιέργειας για λίπανση.

Οι Embleton et al. περιέγραψαν ένα μέτρο, το οποίο πραγματοποιήθηκε στην Καλιφόρνια για την ανάπτυξη πρακτικών προγραμμάτων διαχείρισης λιπασμάτων αζώτου σε εσπεριδοειδή τα οποία θα μείωναν το δυναμικό της νιτρορρύπανσης των υπογείων υδάτων χωρίς να έχει επιπτώσεις στη σοδειά, το μέγεθος και την ποιότητα των φρούτων. Η παροχή του απαιτούμενου αζώτου στα δένδρα με spray ουρίας στα φύλλα είχε ως αποτέλεσμα ένα δυναμικό χαμηλότερης ρύπανσης. Μια άλλη προσέγγιση για τη μείωση της ρύπανσης που προέρχεται από την γεωργία είναι η μείωση των δόσεων των λιπασμάτων στις άμεσα επαναφορτιζόμενες περιοχές των πηγαδιών (Canter,1997).

Ο όρος «Καλύτερη Πρακτική Διαχείρισης» (BMP) αφορά μια πρακτική ή συνδυασμό πρακτικών που προσδιορίζονται από ένα κράτος για την αποτίμηση προβλημάτων, εξέταση εναλλακτικών πρακτικών και κατάλληλη συμμετοχή του κοινού ώστε να αποτελέσουν τα πιο λειτουργικά εφαρμόσιμα μέτρα παρεμπόδισης ή μείωσης της ποσότητας της ρύπανσης που προέρχεται από σημειακές πηγές σε ένα επίπεδο συμβατό με τους στόχους ποιότητας των υδάτων. Η Καλύτερη Πρακτική Διαχείρισης για τον έλεγχο της νιτρορρύπανσης των υπογείων υδάτων μπορεί να συμπεριλάβει τόσο τη διαχείριση της καλλιέργειας όσο και του εδάφους. Η βασική αρχή είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας νιτρικών στη ριζική ζώνη ιδίως κατά τις περιόδους που λαμβάνει χώρα η διήθηση (Keeney,1986). Αυτό θα μπορούσε να συμπεριλάβει εφαρμογές πολλαπλών λιπασμάτων, χρησιμοποίηση φυτών που συγκρατούν νερό και λίπασμα ή φυτών με βαθιές ρίζες, γενετική επιλογή για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του αζώτου από την καλλιέργεια, χημικά πρόσθετα που αναχαιτίζουν το ρυθμό νιτροποίησης, αργή απελευθέρωση ανόργανων ή οργανικών λιπασμάτων, προσεκτική διαχείριση της άρδευσης για βελτίωση της απόδοσης της καλλιέργειας και της πρόσληψης αζώτου από τα φυτά, εναλλακτικές καλλιέργειες κ.α. Για να αναπτυχθεί κατάλληλα μια Καλύτερη Πρακτική Διαχείρισης είναι σημαντικό να εξεταστεί ο κύκλος του αζώτου με την προοπτική ενός οικοσυστήματος. (Keeney,1986). Η απόδοση των Καλύτερων Πρακτικών Διαχείρισης αφορά στην επίδραση των ρυπαντικών φορτίων, στη δεκτικότητα από τους άμεσα εμπλεκομένους, στην οικονομία και στην ευκολία της εφαρμογής και της συντήρησης. Μην ξεχνάμε ότι σε τοπικό επίπεδο χρειάζεται κάποιος χρόνος για να αναπτυχθεί η εφαρμογή και η επιβολή τέτοιων προγραμμάτων.[6]

### 4.3.2 <u>Μέτρα εξυγίανσης των νιτρικών στα υπόγεια ύδατα</u>

Για την εξυγίανση ρυπασμένων νερών με υπερβολικά μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικών υπάρχουν τα εξής μέτρα που παρέχουν εξυγίανση με :

- Φυσικοχημική επεξεργασία όπως ιονανταλλαγή, η αντίστροφη ώσμωση και η ηλεκτροδιάλυση

- Βιολογική επεξεργασία όπως η απονιτροποίηση και η βιολογική in situ απονιτροποίηση
- Διάφορες άλλες επεξεργασίες όπως η ανάμιξη με καθαρό νερό

Πρέπει να σημειωθεί ότι καμία από αυτές τις μεθόδους δεν εξαλείφει πλήρως τα νιτρικά από το νερό. Ειδικά για τις μεθόδους επεξεργασίας η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται κατά πολύ από τις άλλες ενώσεις που βρίσκονται στο νερό.[6]

#### 4.3.2.1 Ανταλλαγή ιόντων

Η ιονανταλλαγή είναι μια αντιστρέψιμη χημική αντίδραση κατά την οποία ένα ιόν σε ένα διάλυμα (μολυσμένα ύδατα) ανταλλάσσεται με ένα όμοιο φορτισμένο ιόν συνδεδεμένο με ένα ακίνητο στερεό μόριο. Οι ειδικές ρητίνες (στρώματα συνθετικών υλικών) που χρησιμοποιούνται έχουν την ικανότητα να αντικαθιστούν τις νιτρικές ρίζες με ιόντα χλωρίου. Η λειτουργία των ιονανταλλακτικών ρητινών είναι διακοπτόμενη γεγονός που απαιτεί διάφορα στάδια για επιτυχή απορρύπανση και όταν η ρητίνη δεν έχει τη δυνατότητα περαιτέρω ιονανταλλαγής γίνεται αναγέννηση.
Ουσιαστικά η διαδικασία βασίζεται στο γεγονός ότι υδατικά διαλύματα πρέπει να είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Η διαδικασία χρησιμοποιεί είτε ένα ισχυρό βασικό (από τεταρτοταγείς αμίνες) είτε από ένα ασθενή βασικό (από βάσεις αμινών) ανταλλάκτη ιόντων για την αντικατάσταση των νιτρικών. Ολόκληρη η διαδικασία αποτελείται από 4 στάδια :

- Επαναφόρτιση της ρητίνης
- Ανταλλαγή ανιόντων
- Εξασθένιση ρητίνης
- Ανάπλαση ρητίνης

Η ιονανταλλαγή είναι μια προτεινόμενη διεργασία καθώς προσφέρει έλεγχο της διεργασίας, αυτοματοποιείται εύκολα και δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία υπό

κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Το χαμηλό κόστος είναι επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα της διεργασίας.

Η ποσότητα του διαλύματος που προκύπτει μετά την ανάπλαση της ρητίνης έχει υψηλή συγκέντρωση σε θειικό άλας και νιτρικό άλας που το καθιστούν ακατάλληλο για διάθεση στην αγροτική γη. Ο μεγάλος όγκος αποβλήτων και τα αυξημένα επίπεδα χλωριούχου άλατος που μπορούν να οδηγήσουν σε διάβρωση των εξαρτημάτων διανομής είναι μερικά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Σημαντικό πρόβλημα επίσης αποτελεί και ο ανταγωνισμός των νιτρικών με τα θειικά ιόντα για τις «θέσεις» ανταλλαγής στη ρητίνη με αποτέλεσμα την ανάγκη χρήσης μεγαλύτερης ποσότητας υποστρώματος.[6]

#### 4.3.2.2 Αντίστροφη όσμωση

Η αντίστροφη όσμωση αναφέρεται σε μια διεργασία κατά την οποία ασκείται υδραυλική πίεση σε μια πλευρά μιας ημι-διαπερατής μεμβράνης με αποτέλεσμα την συγκράτηση των νιτρικών από αυτήν. Η διεργασία καταλήγει στην παραγωγή ενός ρεύματος επεξεργασμένου νερού και μιας ποσότητας συγκεντρωμένων αποβλήτων. Οι πιέσεις που ασκούνται φτάνουν τα 15-20 bar και οι μεμβράνες συνήθως αποτελούνται από οξικό άλας κυτταρίνης και παρόμοια πολυμερή προϊόντα που αντέχουν τις πιέσεις του συστήματος.

Οι όγκοι των αποβλήτων της αντίστροφης όσμωσης συγκρίνονται με εκείνους της ανταλλαγής ιόντων. Τα απόβλητα έχουν όμως υψηλά επίπεδα ρυπαντών για αυτό η διάθεση τους αποτελεί πρόβλημα. Το κόστος διαχείρισης είναι μεγαλύτερο λόγω της κατανάλωσης ισχύος αλλά η μέθοδος θα μπορούσε να είναι οικονομικώς εφικτή για πολύ μικρές παροχές νερού ή αν συνυπολογιστεί και η μείωση της σκληρότητας λόγω των διαλυμένων στερεών αλάτων που απομακρύνονται με την διαδικασία και πιθανόν είναι παρόντα στα υπόγεια ύδατα.

#### 4.3.2.3 Ηλεκτροδιάλυση

Η μέθοδος αναφέρεται σε μια διαδικασία της οποίας η δρώσα δύναμη είναι ο ηλεκτρισμός και στην οποία τα ιόντα μεταφέρονται επιλεκτικά δια μέσου ημιπερατών μεμβρανών από το ένα διάλυμα στο άλλο υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου συνεχούς ρεύματος. Για την επιτυχή λειτουργία της μεθόδου απαιτείται παροχή πεπιεσμένου νερού ατμοσφαιρικής πίεσης, ειδική μεμβράνη που αποτελείται από διάφορα επίπεδα (ζεύγη) και πηγή ενέργειας συνεχούς ρεύματος.
Πλεονεκτήματα της μεθόδου θεωρούνται η εύκολη χρήση και η γρήγορη εκκίνηση. Τα μειονεκτήματα από την άλλη πλευρά είναι η μεγάλη δαπάνη λόγω έλλειψης αποδοτικών μεμβρανών και μεγάλων απαιτήσεων ισχύος και η ανάγκη επεξεργασίας του νερού επειδή τα απόβλητα είναι πολύ συμπυκνωμένα.[6]

#### 4.3.2.4 Βιολογική απονιτροποίηση

Όταν υπάρχει απώλεια οξυγόνου το οποίο θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως δέκτης ηλεκτρονίων, διάφοροι μικροοργανισμοί (βακτήρια και μικρόβια) μπορούν να χρησιμοποιήσουν άλλα σύμπλοκα για δέκτες ηλεκτρονίων. Όταν τα νιτρικά χρησιμοποιούνται ως δέκτες ηλεκτρονίων μειώνονται σε αέριο άζωτο. Η διεργασία αυτή ονομάζεται βιολογική απονιτροποίηση. Η βιολογική απονιτροποίηση στα υπόγεια ύδατα περιλαμβάνει την επαφή μικροοργανισμών με υπόγεια ύδατα μολυσμένα με νιτρικά και μια πρόσθετη πηγή άνθρακα σε ένα ανοξικό περιβάλλον. Υπό αυτές τις συνθήκες τα βακτήρια χρησιμοποιούν τα νιτρικά ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων στη θέση του μοριακού οξυγόνου. Η πηγή άνθρακα είναι απαραίτητη καθώς παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στους μικροοργανισμούς για την αναπνοή και τη σύνθεση. Τα βακτήρια που συμμετέχουν στη διαδικασία της απονιτροποίησης είναι γενικά αναερόβια και μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τα νιτρικά και τα νιτρώδη ως δείκτες ηλεκτρονίων.
Σημαντικά μειονεκτήματα είναι οι μεγάλοι χρόνοι εκκίνησης, οι περιστασιακά αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικού και θειικού άλατος και τα προϊόντα της μικροβιολογικής δραστηριότητας (ενδοτοξίνες) που μπορούν να μεταδοθούν στο επεξεργασμένο νερό και

επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των οργανισμών. Τα πλεονεκτήματα συνοψίζονται στα εξής :

- Είναι πιο οικονομική σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους επεξεργασίας όσον αφορά το απαιτούμενο κεφάλαιο και τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας
- Η απόθεση της υπερβολικής βιολογικής ανάπτυξης (βιομάζα) που παράγεται ως απόβλητο απομακρύνεται εύκολα και οικονομικά χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία της διαδικασίας
- Η σταθερότητα και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι εξαιρετικές. Η μείωση σχεδόν φτάνει τη μηδενική συγκέντρωση στο επεξεργασμένο νερό
- Τα υπολείμματα είναι μικρά σε όγκο και λόγω έλλειψης ανεπιθύμητων χημικών μπορούν να διατεθούν εύκολα [6]

#### 4.3.2.5 Βιολογική απονιτροποίηση in situ

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη συμβατική διεργασία απονιτροποίησης με μόνη διαφορά το ότι διεξάγεται στο υποεπιφανειακό περιβάλλον χωρίς να αντληθεί το νερό από τον υδροφορέα και χωρίς να χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός, δεξαμενές, φυσικά εξαρτήματα και παροχή. Μερικά πλεονεκτήματα είναι η περαιτέρω μείωση του κόστους και των λειτουργικών εξόδων, η μείωση του πεπειραμένου κόστους και η μείωση των εξόδων απόθεσης των υπολειμματικών ουσιών. Οι τέσσερις βασικοί σχεδιασμοί για την in situ απονιτροποίηση είναι ονομαστικά ( Dahab and Bogardi,1990) :

- Χρήση της ίδιας γεώτρησης και για εμπλουτισμό και για άντληση
- Οριζόντιο σύστημα ζευγών
- Κάθετο σύστημα ζευγών
- Σύστημα «Μαργαρίτα»

#### 4.3.2.6 Διάφορες τεχνικές

Συνήθως χρησιμοποιούμε τον όρο «χωρίς επεξεργασία» για να προσδιορίσουμε τις μεθόδους αυτής της κατηγορίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι πρακτικές είναι εφαρμογές καθαρά τοπικού χαρακτήρα και κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

- Αντικατάσταση πηγής νερού
- Ανάμιξη με νερά χαμηλής συγκέντρωσης νιτρικά ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση σε νιτρικά του ρυπασμένου νερού
- Σύνδεση με ένα υπάρχον περιφερειακό σύστημα ύδρευσης
- Οργάνωση ενός περιφερειακού διπλού συστήματος ύδρευσης

Διάφορες άλλες μέθοδοι είναι η οζόνωση και ο συνδυασμός της με αμμόφιλτρα που έχει μεγάλη απόδοση στην απομάκρυνση μεγάλου εύρους ρυπαντών και η προτεινόμενη μέθοδος από τον Murphy (1991) που πρότεινε την προσθήκη αλουμινίου και την διαδοχική μείωση των νιτρικών σε νιτρώδη και τελικά σε αέριο άζωτο. [6]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Ποιότητα πόσιμου νερού – Όρια

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό αποτελεί το βασικότερο είδος διατροφής για τον άνθρωπο και συγχρόνως συμμετέχει σε κάθε σχεδόν παραγωγική διαδικασία. Ως φυσική πρώτη ύλη το νερό δεν αποτελεί τον καρπό μιας συγκομιδής και η ανανέωση του σε ένα περιορισμένο χώρο αποτελεί συνάρτηση των κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν, των ανθρώπινων παρεμβάσεων στα τοπικά χαρακτηριστικά του και της φυσικής προσφοράς και ζήτησης από τους χρήστες. Συνοπτικά μπορούμε να διακρίνουμε και να περιγράψουμε τα προβλήματα των υδάτινων πόρων σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

1. Προβλήματα που οφείλονται στην άνιση κατανομή στο χώρο και στο χρόνο της φυσικής προσφοράς και ζήτησης του νερού
2. Προβλήματα που δημιούργησε το είδος της ανάπτυξης και η διοικητική οργάνωση, η οποία δεν παρείχε τη δυνατότητα συντονισμένων ενεργειών
3. Προβλήματα που δημιουργούνται από την έλλειψη ευαισθησίας και παιδείας του απλού πολίτη σχετικά με την ποιοτική και ποσοτική διαχείριση του νερού

Γίνεται φανερό λοιπόν ότι πρόκειται για ένα σύνθετο πρόβλημα που το αποτελούν και το συντηρούν πολλαπλές κοινωνικές παράμετροι και αντιθέσεις. Οι μικροοργανισμοί παίζουν από πολλές απόψεις σπουδαίο ρόλο στον έλεγχο ποιότητας του νερού αλλά λόγω έλλειψης στοιχείων δεν θα εξετάσουμε την περίπτωση υποβάθμισης του νερού εξαιτίας της εμφάνισης αυτών. [9]

## 5.2 ΟΡΙΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

Το νερό όπως γνωρίζουμε αποτελεί μία από τις κύριες πηγές τροφοδοσίας του ανθρώπινου οργανισμού σε ανόργανα άλατα τα οποία είναι απαραίτητα για την καλή

λειτουργία του. Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τη μέγιστη παρατηρούμενη τιμή της συγκέντρωσης που προκαλεί εμφανής αρνητικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.

***Πίνακας 5.1 :*** *Τιμές ορίων συγκέντρωσης χημικών ουσιών στο πόσιμο νερό σύμφωνα με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την ΚΥΑ Υ2/2600/2001 (Πηγή : ΦΕΚ829Β)*

| **ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΊΑ** | **Τιμή ορίου (mg/l)** |
|---|---|
| ΧΛΩΡΙΟΥΧΑ (mg/lt) | 250 |
| ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ(μs/cm 20 C) | 2500 |
| ΝΑΤΡΙΟ( mg/lt) | 200 |
| ΜΑΓΝΗΣΙΟ ( mg/lt) | 125 |
| ΚΑΛΙΟ( mg/lt) | 12 |
| ΑΣΒΕΣΤΙΟ( mg/lt) | 1800/100 |
| ΘΕΙΙΚΑ( mg/lt) | 250 |
| ΝΙΤΡΙΚΑ( mg/lt) | 50 |

Στη συνέχεια αναφέρονται οι επιδράσεις των στοιχείων αυτών στον ανθρώπινο οργανισμό.

**ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ** :

Η παράμετρος αυτή δίνει ένα μέτρο της συγκέντρωσης των διαλυμένων αλάτων στο νερό. Ως εκ τούτου δεν μπορεί να συνδεθεί άμεσα με την υγεία. Επομένως μπορεί να θεωρηθεί μόνο σαν μια σημαντική λειτουργική παράμετρος. [9]

**ΑΣΒΕΣΤΙΟ :**

Η μεγαλύτερη ποσότητα του ασβεστίου στον άνθρωπο είναι συγκεντρωμένη στο σκελετό με τη μορφή του φωσφορικού και ανθρακικού ασβεστίου. Η λειτουργία του ασβεστίου στο ανθρώπινο σώμα είναι αντιαλλεργική, είναι διουρητικό, επιδρά στην πήξη του αίματος και στη ρύθμιση του περιφερικού και του νευρικού συστήματος, μειώνει την κυτταρική διαπερατότητα καθώς επίσης δρα αρνητικά στην υπέρταση. Σε περίπτωση πρόσληψης περίσσειας ασβεστίου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα, το πιο χαρακτηριστικό από τα οποία είναι το σύνδρομο Burnet.

Τόσο οι ευρωπαϊκές οδηγίες όσο και η ΠΟΥ δεν ορίζουν κάποιο συγκεκριμένο όριο και δεν περιλαμβάνουν το ασβέστιο σε κανένα κατάλογο παραμέτρων προς επιτήρηση.

Συγκεντρώσεις μέχρι τα 1800 mg/lt στο πόσιμο νερό έχει αναφερθεί ότι είναι αβλαβής. Η σκληρότητα του νερού οφείλεται στην διάλυση αλάτων του ασβεστίου και μαγνησίου. Χαμηλά επίπεδα σκληρότητας έχουν συσχετιστεί με καρδιαγγειακές παθήσεις. [9]

**ΘΕΙΙΚΑ :**

Στο φυσικό υδάτινο περιβάλλον τα θειικά ιόντα συναντώνται σαν αμμωνιακά άλατα ή αμμωνιακά μεταλλικά σύμπλοκα. Στην παράμετρο αυτή δεν συμπεριλαμβάνονται τα θειικά που είναι δεσμευμένα σε οργανικές ενώσεις. Τα κύρια παρατηρούμενα συμπτώματα υγείας από κατάποση μεγάλων δόσεων θειικών είναι η κάθαρση, η αφυδάτωση και ο γαστρεντερικός ερεθισμός.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από 400 mg/l προσδίδουν γεύση στο νερό. Για το λόγο αυτό σαν ανώτατο όριο καθορίσθηκαν τα 250 mg/l .

**ΚΑΛΙΟ:**

Το κάλιο είναι βασικό στοιχείο στο εσωτερικό των κυττάρων όμως οι ανάγκες του οργανισμού καλύπτονται κυρίως από τις τροφές.

Τόσο οι ευρωπαϊκές οδηγίες όσο και η ΠΟΥ δεν ορίζουν κάποιο συγκεκριμένο όριο και δεν περιλαμβάνουν το ασβέστιο σε κανένα κατάλογο παραμέτρων προς επιτήρηση. Το κάλιο είναι σημαντικό στοιχείο για τον οργανισμό. Συμπτώματα έλλειψης καλίου είναι η αδυναμία, ανορεξία, ναυτία, εμετοί. Το κάλιο στα υπόγεια νερά συναντάται σε συγκεντρώσεις μικρότερες των 10 mg/lt με εξαίρεση κάποιες ιδιαίτερες γεωλογικές συνθήκες οπού η συγκέντρωση μπορεί να ανέβει στα 20-25 mg/lt.

**ΜΑΓΝΗΣΙΟ:**

Το μαγνήσιο είναι βασικό στοιχείο για τον άνθρωπο επειδή είναι απαραίτητο στις λειτουργίες του νευρομυϊκού συστήματος. Παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην λειτουργία πολλών ενζύμων. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι καθαρτικό και έχει καταπιεστικές επιπτώσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα.

Τόσο οι ευρωπαϊκές οδηγίες όσο και η ΠΟΥ δεν ορίζουν κάποιο συγκεκριμένο όριο και δεν περιλαμβάνουν το ασβέστιο σε κανένα κατάλογο παραμέτρων προς επιτήρηση. Το

μαγνήσιο συνεισφέρει σημαντικά στην σκληρότητα του νερού. Το όριο συγκέντρωσης που προκαλεί δυσάρεστη γεύση για τα συνήθη άτομα είναι 500 mg/lt. Δεν έχουν παρουσιαστεί φαινόμενα έλλειψης – στέρησης μαγνησίου.

**ΝΑΤΡΙΟ :**

Το νάτριο μαζί με το κάλιο παίρνει μέρος στην οσμωτική ισορροπία του κυττάρου δημιουργώντας την αντλία Na –K η οποία βοηθάει το μηχανισμό μεταφοράς ενώσεων όπως τα αμινοξέα και οι υδρογονάνθρακες. Η σχέση της αναλογίας νατρίου /καλίου στο πόσιμο νερό σε σχέση με την πίεση του αίματος παίζει σημαντικό ρόλο για υπερτασικούς και ανθρώπους που υποφέρουν από κυρώσεις ή νεφρική ανεπάρκεια. Στις περισσότερες χώρες οι πηγές υδροδότησης περιέχουν λιγότερο από 20 mg/lt αλλά σε μερικές περιπτώσεις η συγκέντρωση του νατρίου ξεπερνά τα 250 mg/lt. Το ανώτατο όριο συγκέντρωσης στο πόσιμο νερό ορίστηκε στα 200 mg/lt. [9]

**ΝΙΤΡΙΚΑ :**

Τα νιτρικά είναι από τα σημαντικότερα ιόντα του φυσικού νερού με τυπική συγκέντρωση στα επιφανειακά νερά τα 1 έως 2 mg/lt ενώ στα υπόγεια νερά οι συγκεντρώσεις είναι μεγαλύτερες λόγω της ρύπανσης σε παγκόσμια κλίμακα.

Η τοξικότητα των νιτρικών για τον άνθρωπο οφείλεται κυρίως στη μετατροπή τους σε νιτρώδη τα οποία οξειδώνουν τη φυσική αιμογλοβίνη του αίματος σε μεθαιμογλοβίνη η οποία δεν μπορεί να μεταφέρει οξυγόνο στους ιστούς. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στο κεφάλαιο για τα νιτρικά και την αντιμετώπιση τους.

**ΧΛΩΡΙΟΥΧΑ:**

Αποτελούν από ποσοτική άποψη τα πιο σημαντικά ανιόντα του οργανισμού. Χρειάζονται για την παρασκευή υδροχλωρικού οξέος στο στομάχι και ακολουθούν παθητικά τα πρωτόνια για να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα. Παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ηλεκτρικής ουδετερότητας των ερυθρών αιμοσφαιρίων όταν από αυτά αποβάλλονται τα όξινα ανθρακικά ιόντα κατά υην διαδικασία της αναπνοής. Συμβάλλει σημαντικά στις οσμωτικές διαδικασίες των εξωκυτταρικών υγρών.

Νερό με συγκέντρωση μεγαλύτερη από 150 mg/lt επιταχύνει την διαδικασία της διάβρωσης στους μεταλλικούς αγωγούς με αποτέλεσμα να εντείνονται τα φαινόμενα «καφετί» χρωματισμού του νερού λόγω σκουριάς. Υπόγειοι υδροφορείς που βρίσκονται κοντά σε ακτή μπορεί να παρουσιάσουν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού. Όταν υπάρχουν στο νερό ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου η δυσάρεστη γεύση που οφείλεται στα ιόντα χλωρίου δεν εμφανίζεται ακόμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις.

## 5.3 ΤΥΠΙΚΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για την διερεύνηση περιπτώσεων ρύπανσης πρέπει να γίνουν χημικές αναλύσεις. Ωστόσο θα ήταν πολύ δαπανηρό και χρονοβόρο να προσδιορισθούν πολλές παράμετροι και σε συνεχή βάση. Έτσι η Υγειονομική Διάταξη αναφέρει τις παρακάτω παραμέτρους που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στους ελέγχους :

- Ελάχιστος έλεγχος : Οσμή, γεύση, αγωγιμότητα, χλωριόντα, μικροβιολογικά
- Έλεγχος ρουτίνας : Οσμή, γεύση, θολερότητα, αγωγιμότητα, pH, υπολειμματικό χλώριο, νιτρικά, νιτρώδη, αμμωνία, μικροβιολογικά
- Περιοδικός έλεγχος : Όλες τις παραμέτρους του ελέγχου ρουτίνα και άλλες φυσικοχημικές παράμετροι
- Έκτακτος έλεγχος : Σε ειδικές περιπτώσεις ή ατυχήματα όπου η αρμόδια αρχή καθορίζει τις παραμέτρους ανάλογα με τις συνθήκες

Παρατίθεται πίνακας με τις μετρήσεις που έγιναν από την Χημική Υπηρεσία Χίου για λογαριασμό του τμήματος Εγγείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας την τελευταία πενταετία. Παρατηρούμε πόσες από αυτές είναι πάνω από τα προβλεπόμενα όρια επί του συνόλου των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν και ποιες από τις παραμέτρους οι μετρήσεις είναι μέσα στα όρια και για τον λόγο αυτό δεν θα εξετάσουμε την μεταφορά και την διασπορά τους όταν προσομοιώσουμε την περιοχή μελέτης. [9]

**Πίνακας 5.2** Μετρήσεις χημικών στοιχείων πάνω από τα όρια – Πηγή : Χημική Υπηρεσία Χίου

| | ΧΛΩΡΙΟΥΧΑ (mg/lt) | ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (μs/cm 20 C) | ΝΑΤΡΙΟ ( mg/lt) | ΜΑΓΝΗΣΙΟ ( mg/lt) | ΚΑΛΙΟ (mg/lt) | ΑΣΒΕΣΤΙΟ ( mg/lt) | ΘΕΙΙΚΑ ( mg/lt) | ΝΙΤΡΙΚΑ ( mg/lt) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **G1** | 4/7 | 0 | 0 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G2** | 7/7 | 1/7 | 3/7 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G3** | 7/7 | 4/7 | 2/6 | √ | √ | 7/7 | √ | 1/7 |
| **G4** | 7/7 | 6/7 | 5/6 | √ | √ | 7/7 | √ | 3/7 |
| **G5** | 7/7 | 0 | 2/6 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G7** | 7/7 | 7/7 | 7/7 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G9** | 6/7 | 0 | 0 | √ | √ | 7/7 | 1/7 | ** |
| **G11** | 7/7 | 5/7 | 7/7 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G12** | 7/7 | 3/7 | 4/6 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G14** | 7/7 | 7/7 | 7/7 | √ | √ | 6/7 | √ | √ |
| **G17** | 3/7 | 2/7 | 2/6 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G18** | 7/7 | 3/7 | 3/6 | 1/7 | √ | 7/7 | √ | ** |
| **G19** | 7/7 | 4/7 | 4/6 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G20** | 7/7 | 7/7 | 5/6 | 5/7 | √ | 7/7 | √ | ** |
| **G21** | 7/7 | 1/7 | 5/6 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G22** | 7/7 | 7/7 | 7/7 | √ | √ | 7/7 | √ | √ |
| **G23** | 7/7 | 7/7 | 7/7 | 1/7 | √ | 7/7 | √ | 1/7 |
| **G24** | 7/7 | 7/7 | 5/6 | √ | √ | 7/7 | √ | 1/7 |

Και οι υπόλοιπες τιμές για κάθε γεώτρηση (ειδικά για νάτριο – λιγότερο για αγωγιμότητα, χλωριόντα και θειικά) είναι συνήθως πολύ κοντά στο όριο της συγκέντρωσης.
(**) παραπλήσια τιμή ορίου
(√ ) εκτός ορίου

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6$^{ο}$ : Περιοχή μελέτης

## 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Νομός Χίου έχει έκταση 904 τετρ. χιλιόμετρα. Αποτελείται από τρία νησιά, τη Χίο, τις Οινούσσες και τα Ψαρά. Η Χίος είναι ένα από τα μεγαλύτερα νησιά του Β. Α. Αιγαίου και πέμπτο σε μέγεθος νησί στην Ελλάδα, με μήκος ακτών 213 χλμ. Βρίσκεται πολύ κοντά στη Μικρά Ασία και απέναντι από τη χερσόνησο της Ερυθραίας, από την οποία χωρίζεται με τον ομώνυμο Πορθμό. Ο πληθυσμός της Χίου φθάνει τους 54.000 κατοίκους που ζουν τόσο στην πόλη της Χίου, όσο και στα 64 χωριά του νησιού. Έχει σχήμα επιμήκες με μέγιστο μήκος τα 50 χλμ. και πλάτος στο βόρειο τμήμα 28 χλμ., στο κεντρικό 13 χλμ. και στο νότιο 23 χλμ. Το μεγαλύτερο τμήμα της Χίου είναι ορεινό και τραχύ ενώ τα πετρώματα είναι κατά τα 2/3 περίπου ασβεστόλιθοι. Κυριαρχεί η εναλλαγή βαθιών χαραδροκοιλάδων και μεμονωμένων υψιπέδων με υψηλές κορυφές με απότομες και βραχώδεις κλιτύες. Στο ΒΔ και ΝΑ τμήμα του νησιού το ανάγλυφο είναι ηπιότερο με το υψόμετρο να πέφτει σταδιακά από βορρά προς νότο. Οι υψηλότερες κορυφές είναι το Πεληναίο (1297 m), το Όρος (1118 m), ο Κοχλίας (790 m), η Κακή Ράχη (525 m), ο Κορακάρης (397 m) και ο Τράχωνας (347 m). Στο κέντρο της ανατολικής πλευράς, με θέα τα μικρασιατικά παράλια, είναι χτισμένη η πόλη της Χίου, Χώρα για τους ντόπιους, με 30.000 μόνιμους κατοίκους. Η ιστορία της πόλης ξεπερνά τα 3000 χρόνια και στην μακροχρόνια αυτή περίοδο, γνώρισε περιόδους ακμής και παρακμής και δέχθηκε επιρροές από πολλούς κατακτητές. Η Χώρα είναι μέχρι σήμερα, το σπουδαιότερο λιμάνι του νησιού, καθώς και αξιόλογο πνευματικό, εκπαιδευτικό, εμπορικό, και πολιτιστικό κέντρο για όλο το Βόρειο Αιγαίο. Ο ξακουστός Κάμπος με τα περιβόλια του - σε αυτόν άλλωστε οφείλεται ο χαρακτηρισμός «μυροβόλος» που δόθηκε στο νησί- απλώνεται νότια της πόλης και χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό στιλ. [12]

## 6.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Κάμπος (2880 κάτοικοι), μια από τις πιο όμορφες περιοχές της Χίου, συνιστά ένα μοναδικό οικιστικό σύνολο, όπου συνδυάζεται αρμονικά το εξαίρετο φυσικό τοπίο με ιδιαίτερα τοπικά αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά. Τόπος κατάφυτος από περιβόλια εσπεριδοειδών, διάσπαρτος με παλιά αρχοντικά σπίτια, 6 μόλις χλμ. στα Νότια της πόλης της Χίου. Ο Κάμπος έχει κηρυχθεί <ιστορικός τόπος> και <παραδοσιακός οικισμός>, προστατευόμενος από το ΥΠ.ΠΟ. Φιλοξενώντας 38 Βυζαντινές Εκκλησίες και πολλά αρχοντικά (64 από αυτά έχουν κηρυχθεί ως διατηρητέα μνημεία από το Υπουργείο Πολιτισμού) μυεί τον επισκέπτη στην αρχοντιά και τον πλούτο που διέθετε η Χίος χάρη στο εμπόριο και τη ναυτιλία. Δεν είναι τυχαίο ότι το χώρο αυτό επέλεξαν οι Γενοβέζοι κατακτητές του νησιού για να κτίσουν τις επαύλεις τους το 14ο αι, ξεκινώντας τη συστηματική καλλιέργεια των εσπεριδοειδών και το εξαγωγικό εμπόριο, όσο και οι ντόπιοι αριστοκράτες στα μετέπειτα χρόνια (Ράλληδες, Αργέντηδες, Πετροκόκκινοι, Καλβοκορέσηδες, Μαυροκορδάτοι κ.α), οι οποίοι αποτελούν την ισχυρή άρχουσα τάξη στο νησί με τίτλους ευγενείας, οικόσημα και διεθνή παρουσία στο εμπόριο. Ο Κάμπος γνώρισε τη μεγάλη του ακμή κατά το 17ο και 18ο αιώνα. Όμως τόσο η σφαγή της Χίου το 1822, όσο και ο καταστρεπτικός σεισμός του 1881 κατέστρεψαν πολλά αξιόλογα κτίσματα. Από τα παλαιότερα, διατηρούνται μερικά κατεστραμμένα (Ράλληδων, Πετροκόκκινων, Σκυλίτσηδων, Χρυσολωράδων). Περισσότερο καλοδιατηρημένα αρχοντικά που ξανακτίστηκαν μετά το σεισμό, συνδυάζοντας την τοπική αρχιτεκτονική με αρκετά νεοκλασσικά στοιχεία, είναι οι οικίες Καλβοκορέση, Μαυροκορδάτου, Ζυγομαλά, Καλουτά, Καζανόβα κ.α. [12]

## 6.3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ανάλογα με τους επικρατούντες γεωλογικούς σχηματισμούς και τα τεκτονικά συμβάντα η Χίος μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω γεωμορφολογικές μονάδες :

I. Νοτιοανατολική μονάδα : λοφώδης και ημιορεινή με σχετικά ήπιο ανάγλυφο αποτελούμενη από ιζήματα του Νεογενούς

II. Βορειοδυτική μονάδα : ημιορεινή και ορεινή μονάδα με συγκριτικά ομαλό ανάγλυφο αποτελούμενη από σχιστοψαμμιτικά ιζήματα του Παλαιοζωικού.
III. Βορειοκεντρική μονάδα : ορεινή μονάδα με τραχύ και βραχώδες ανάγλυφο αποτελούμενη από μεσοζωικούς ασβεστόλιθους έντονα καρστιωμένους
IV. Νότια – νοτιοδυτική μονάδα : ημιορεινή με λιγότερο τραχύ ανάγλυφο. Αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους και παλαιοζωικούς σχιστοψαμμίτες που εναλλάσσονται μεταξύ τους λόγω εναπόθεσης κατά θέσεις από νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις.

Σύμφωνα με την υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας η περιοχή του Κάμπου βρίσκεται στην Νοτιοανατολική μονάδα αλλά πολύ κοντά στα σύνορα με την Βορειοκεντρική μονάδα με αποτέλεσμα να επιδρά η δεύτερη λόγω του αναγλύφου της. Πιο αναλυτικά για την Νοτιοανατολική μονάδα γνωρίζουμε ότι είναι χαμηλή σε υψόμετρο (μέχρι 300 μ.) και αποτελεί τεκτονική τάφρο που πληρώθηκε με Νεογενή ιζήματα. Κατά την διάρκεια του Τεταρτογενούς διαβλήθηκε από κοιλάδες λόγω της ευαισθησίας των μαργαϊκών ως επί το πλείστον ιζημάτων στους παράγοντες της αποσάθρωσης και διάβρωσης. Για την Βορειοκεντρική μονάδα που μας ενδιαφέρει λόγω της υδρογραφικής σύνδεσης της με την Νοτιοανατολική παρατηρούμε ότι δεσπόζει στο νησί και δομείται από ασβεστόλιθους έντονα καρστιωμένους. Το υψόμετρο θεωρείται ιδιαίτερα υψηλό ( Πεληναίο) και με μεγάλες διακυμάνσεις. Τα όρια της μονάδας αυτής είναι χαρακτηριστικά εξαιτίας των απότομων και βραχωδών πρανών που σχηματίζουν. Μεγάλη εντύπωση προκαλεί η επιφάνεια διάβρωσης που διαμορφώνεται στο υψόμετρο 600-700 μ. και προσδίδει στην περιοχή επίπεδη μορφή. Η επιφάνεια αυτή κλίνει με μικρή γωνία προς τον Νότο όπου συναντάται σε υψόμετρο 400-500 μ. Οι βαθιές χαραδροκοιλάδες διαμορφώθηκαν αργότερα σαν αποτέλεσμα της έντονης ρηξιγενούς τεκτονικής του Πλειστοκαίνου και συγχρόνως λόγω της διακυμάνσεως της στάθμης της θάλασσας λόγω των παγετώνων του Τεταρτογενούς. [10]

## 6.4 ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η Χίος αποστραγγίζεται από μεγάλο αριθμό υδατορεμάτων και χειμάρρων που έχουν διεύθυνση κυρίως Β-Ν με εξαίρεση την ανατολική πλευρά του νησιού όπου αξιόλογα ρέματα έχουν διεύθυνση Δ-Α. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα ρέματα Φανοπύργου και Κατράρη (νότια), των Καταράκτη, Κοκκαλά, Παρθένη, Αρμένη (ανατολικά-νοτιοανατολικά), της Λαγκάδας και των Καρδαμύλων (βόρεια- βορειοανατολικά) και της Αγίας Μαρκέλλας, της Βολισσού και της Ελούντας (δυτικά-βορειοδυτικά). Ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει το υδρογραφικό δίκτυο κάθε περιοχής είναι η λιθολογική σύσταση των πετρωμάτων και κατ' επέκταση η υδατοπερατότητά τους. Έτσι έχουμε δίκτυο με αδρά ύφη σε περιοχές με αυξημένη υδατοπερατότητα και δίκτυο με λεπτή υφή σε αντίστοιχες με χαμηλή. Η εκτίμηση της υδατοπερατότητας ανάλυσε το δίκτυο με την βοήθεια της μεθόδου Horton και Melon. Σύμφωνα με την ποιοτική ανάλυση του υδρογραφικού δικτύου στις κυριότερες λεκάνες περιμένουμε μικρή υδατοπερατότητα και μεγάλη επιφανειακή απορροή στις περιοχές όπου επικρατούν οι ψαμμιτοσχιστόλιθοι του Παλαιογενούς και οι μάργες και οι ψαμμίτες του Νεογενούς. Αντίθετα αναμένουμε μεγάλη κατείσδυση και ελάχιστη επιφανειακή απορροή σε περιοχές κυριαρχίας ασβεστόλιθων και δολομιτών. Στην περιοχή που εξετάζουμε δεσπόζει η λεκάνη του ποταμού Κοκκαλά και τα αποτελέσματα ήταν τα εξής :

1. Λόγω της συμμετοχής άκρως στεγανών σχηματισμών στο πίσω ημιορεινό και ορεινό τμήμα της λεκάνης έχουμε μεγάλη επιφανειακή απορροή
2. Στο χαμηλό πεδινό τμήμα στο οποίο καταλήγουν τα νερά της απορροής είναι υδροπερατά με μεγάλη διήθηση με αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της προσχωματικής υπόγειας υδροφορίας τόσο από την άμεση διήθηση όσο και από τα νερά που ρέουν στο υδρογραφικό δίκτυο. [8]

## 6.5 ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η Χίος χαρακτηρίζεται από ένα βασικό υδροκρίτη που έχει διεύθυνση Β-Ν. Στο νότιο τμήμα ο υδροκρίτης αυτός χωρίζεται σε δύο με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μίας

επιμήκης στενής λεκάνης. Σχηματίζεται μεγάλος αριθμός υδρολογικών λεκανών με σημαντικότερες να είναι :

- Στο **νότιο τμήμα** *του νησιού* οι λεκάνες Φανοπύργου (42km$^2$) και Κατράρη (35km$^2$).
- Στο **νότιο - νοτιοανατολικό** οι λεκάνες Καταρράκτη (14,25km$^2$), Κοκκαλά (46km$^2$), Παρθένη (30km$^2$) και Αρμένη (22,12km$^2$).
- Στο **βόρειο - βορειοανατολικό** οι λεκάνες Λαγκάδας (27,5km$^2$) και Καρδαμυλιώτικου (35,25km$^2$).
- Στο **δυτικό** οι λεκάνες Βολισσού (44km$^2$) και Ελούντας (65km$^2$).

Οι λεκάνες αυτές καλύπτουν επιφάνεια 382,5km$^2$, δηλαδή μόλις το 47% του εμβαδού του νησιού. Αυτό συμβαίνει καθώς η Χίος είναι διάσπαρτη από μικρές λεκάνες που καλύπτουν το υπόλοιπο 53%.

## 6.6 ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΚΑ – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το νησί της Χίου παρουσιάζει μεσογειακό κλίμα με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και υγρό και ξηρό χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία για τη θερινή περίοδο είναι 26,3 $^0$C, για τη χειμερινή 13,8 $^0$C οπότε η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,3 $^0$C.

Η βροχόπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη στη βόρεια Χίο από ότι στη νότια όπως και στα υψηλότερα σημεία σε σχέση με τα χαμηλότερα λόγω των κορεσμένων υδρατμών που περικλείονται στους επικρατέστερους ανέμους που κινούνται από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά . Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής στην κεντρική Χίο είναι 668mm. Το ημερήσιο μέγιστο ύψος βροχής κυμαίνεται μεταξύ 2,8 και 134,9mm. Η περίοδος ανομβρίας που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των βροχών του μεσογειακού χώρου με ιδιαίτερα μεγάλη σημασία στην οικονομία και την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων στο Νομό της Χίου έχει μια μέση τιμή 140 ημερών. Χιονόπτωση έχουμε κάθε χρόνο στα ορεινά τμήματα του νησιού και σχεδόν κάθε χρόνο και σε χαμηλότερα υψόμετρα.

Η μέση σχετική υγρασία βρίσκεται το καλοκαίρι στο 50% και το χειμώνα στο 74% με μέση ετήσια τιμή στο 64%. Η τιμή αυτή είναι αντιπροσωπευτική για την περιοχή του

Κάμπου επειδή ο μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται στο αεροδρόμιο, σε χαμηλό υψόμετρο, με πλούσια βλάστηση που αρδεύεται και η στάθμη των υπόγειων υδάτων είναι σε μικρό βάθος.

Τα στοιχεία για την απορροή των υδατορεμάτων και συγκεκριμένα για τις λεκάνες του Κοκκαλά και του Παρθένη που ανήκουν στην περιοχή μελέτης μας εμφανίζουν επιφανειακή και υπόγεια απορροή που διαρκεί από τα τέλη Δεκεμβρίου μέχρι τις αρχές Μαΐου. Η απορροή οφείλεται στην ύπαρξη πηγών στα ανάντη των λεκανών και αργότερα στη τροφοδοσία του ρέματος με υπόγεια νερά του υπερπληρωμένου προσχωματικού υδροφορέα. [8]

## 6.7 ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η γεωλογική και τεκτονική δομή της Χίου είναι ιδιαίτερα περίπλοκη. Σε αυτήν συμμετέχουν κυρίως κλαστικά και ανθρακικά ιζήματα του Παλαιοζωικού, Μεσοζωικού και του Νεογενούς. Η γεωλογική ιστορική εξέλιξη της Χίου περιληπτικά έχει ως εξής : Στο Παλαιοζωικό και ειδικότερα από το Σιλούριο μέχρι το Ανώτερο Λιθανθρακοφόρο αποτέθηκε ένα φλυσχοειδές σύστημα αποτελούμενο από γραουβάκες, ψαμμίτες, αργιλικούς σχιστόλιθους και μεμονωμένα τμήματα από ασβεστόλιθους. Η ανεύρεση Κωνοδόντων αποδεικνύει τη θαλάσσια προέλευση των ιζημάτων αυτών. Κατά το Ανώτατο Λιθανθρακοφόρο και Κατώτερο Πέρμιο τα εν λόγω ιζήματα υπέστησαν έντονη πτύχωση και ενδεχομένως ελαφριά επιμεταμόρφωση και σχιστοποίηση. Κατά το Μαιστρίχθιο η Χίος υπέστη τη πρώτη αλπική πτύχωση κυρίως στο βόρειο τμήμα όπου έλαβαν χώρα και μεγάλες αφιππεύσεις. Σε μια δεύτερη ορογενετική φάση, στο Κρητιδικό / Κατώτατο Τριτογενές μια αλλόχθονη ενότητα από ιζήματα του Νεότερου Παλαιοζωικού και Λιασίου αποτέθηκε πάνω στα πτυχωμένα αυτόχθονα στρώματα. Στο Ανώτερο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο το νοτιοανατολικό τμήμα αποτέλεσε μια εκτεταμένη λίμνη στην οποία αποτέθηκαν ερυθροί αργιλοψαμμίτες και μάργες σε θέσεις λιγνιτοφόρες. Στο Πλειστόκαινο έλαβε χώρα έντονη ρηξιγενής τεκτονική που προκάλεσε ισχυρές κατακόρυφες μετακινήσεις. Μετά το πέρας της τελευταίας παγετώδους εποχής του Τεταρτογενούς η Χίος έλαβε τη σημερινή της μορφή.

Στο νησί της Χίου διακρίνουμε δύο στρωματογραφικές ενότητες, την αυτόχθονη και την αλλόχθονη σειρά. Η δεύτερη είναι αυτή που κατά τόπους απωθείται πάνω στην πρώτη. Η στρωματογραφία της περιοχής μελέτης αποτελείται από τα 7 στρώματα που περιγράφονται παρακάτω :

**Αυτόχθονη σειρά – Παλαιοζωικό S-C** : τα ίζημα του Παλαιοζωικού αποτελούνται κυρίως από γραουβάκες, ψαμμίτες και αργιλικούς ψαμμιτικούς σχιστόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται κροκαλοπαγή, σχιστόλιθοι και πυριτόλιθοι. Το πάχος του συστήματος είναι πολύ μεγάλο και υπερβαίνει τα 1000μ. Υδρογεωλογικά το σύστημα είναι σχεδόν αδιαπέρατο και παίζει καθοριστικό ρόλο στη διακίνηση και τη κατεύθυνση ροής των υπογείων υδάτων

**Κατώτερο Μεσοζωικό – Πολύχρωμη σειρά** : αποτελούνται από πολλές εναλλαγές καρστικών, πυριτόλιθων και ερυθρών ασβεστολιθικών ιζημάτων και συχνά εμφανίζονται κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Το πάχος έχει μεγάλη διακύμανση με το μέγιστο να παρατηρείται στο βόρειο τμήμα. Λόγω της καρστιώσεως και του κερματισμού είναι ιδιαίτερα υδατοπερατή.

**Κατώτερο Μεσοζωικό – Ανώτερο μέρος** : το υπερκείμενο στρώμα της κατώτερης σειράς ασβεστόλιθων αποτελείται από ποικίλα ιζήματα όπως ψαμμίτες, μάργες και τόφφοι. Η λιθολογική εναλλαγή είναι αποτέλεσμα της εμφάνισης των πρώτων τεκτονικών κινήσεων οι οποίες συνοδεύτηκαν από ηφαιστειακή δράση. Υδρογεωλογικά πρόκειται για σχηματισμό χαμηλής περατότητας που όμως λόγω της μη συνεχούς ανάπτυξης δεν λειτουργεί στη δημιουργία στεγανού ορίζοντα.

**Τριαδικό – Οριζόντιας ανάδευσης** : στις σειρές των ασβεστόλιθων και δολομιτών παρεμβάλλονται 3 τουλάχιστον ορίζοντες με αργιλικούς σχιστόλιθους, ψαμμίτες και συνεκτικά κροκαλοπαγή. Το πάχος των στρωμάτων αυτών είναι μικρό και δεν υπερβαίνει τα 60 μ. Η περατότητα είναι χαμηλή λόγω της λιθολογικής σύστασης. Δεν σχηματίζονται υδροφόροι ορίζοντες εξαιτίας ρηγμάτων και ασυνεχούς ανάπτυξης.

**Αυτόχθονη σειρά / Ανώτερο Μειόκαινο – Νεογενής ψαμμίτες** : πρόκειται για λεπτόκοκκους σκληρούς ψαμμίτες με παρεμβολές λεπτότερου υλικού (άμμος και

χαλίκια). Έχει πάχος 150 μ. και είναι γνωστοί σαν Θυμιανόπετρα λόγω της περιοχής εμφάνισης του. Έχουν σχετικό ενδιαφέρον από υδρογεωλογικής άποψης εξαιτίας του δευτερογενούς πορώδους.

**Ανώτερο Μειόκαινο – Σιδηρούχοι τοφφικοί ψαμμίτες** : πρόκειται για τοπικά αναπτυσσόμενους ψαμμίτες οι οποίοι υπέστησαν τη διεργασία της διάβρωσης, μεταφοράς και απόθεσης στο λιμναίο περιβάλλον της λεκάνης. Εμφανίζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον λόγω της παρεμβολής ανθρακούχων και κροκαλοπαγών ιζημάτων.

**Τεταρτογενές – Αλλουβιακές αποθέσεις** : στη βάση των σημαντικότερων χειμάρρων του νησιού και κυρίως στη περιοχή που αυτοί εκβάλλουν στη θάλασσα αναπτύσσονται πεδινές εκτάσεις που οφείλονται στην απόθεση υλικών από τα ποτάμια. Αποτελούνται από κροκάλες, χαλίκια, άμμο και ιλύ. Είναι σε μεγάλο βαθμό υδροπερατοί και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικής υδροφορίας. [8]

### 6.7.1 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ

Η συμπεριφορά των διαφόρων σχηματισμών απέναντι στο νερό είναι συνάρτηση της λιθολογικής σύστασης στα χαλαρά πετρώματα και του βαθμού διαγένεσης και τεκτονισμού στα συμπαγή πετρώματα. Οι σχηματισμοί που διακρίνονται είναι :

<u>Σχηματισμοί με πολύ υψηλή υδροπερατότητα</u>

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται σχηματισμοί που λόγω προχωρημένου κερματισμού και καρστιώσεως έχουν ιδιαίτερα μεγάλο και συνεχόμενο πορώδες. Αυτοί είναι βασικά οι ασβεστόλιθοι του Παλαιοζωικού και κυρίως του Μεσοζωικού τόσο της αυτόχθονης όσο και της αλλόχθονης σειράς. Περισσότερο αναπτυγμένοι εμφανίζονται στο βόρειο μισό του νησιού ενώ στα κεντρικά αποτελούν υποκείμενο στους ψαμμίτες.

<u>Σχηματισμοί με υψηλή υδροπερατότητα</u>

Εδώ κατατάσσονται οι χαλαροί κοκκώδεις σχηματισμοί και ειδικότερα οι προσχωματικές αποθέσεις των υδατορεμάτων. Η υψηλή περατότητα των σχηματισμών προκύπτει και

από το γεγονός της αλληλεπίδρασης των πηγαδιών που υπάρχουν στον Κάμπο του Κοκκαλά ( μεγάλη ακτίνα κώνου) και από τη διαβάθμιση των υλικών

Σχηματισμοί με μέτρια υδροπερατότητα

Η κατηγορία αυτή περιέχει τους ψαμμίτες της βάσης του Νεογενούς που αναπτύσσονται στην ανατολική και νότια περίμετρο του Κορακάρη όπου υπάρχουν πολλά πηγάδια. Η παρεμπόδιση εισχώρησης της θάλασσας παρά την εντατική άντληση και την ταπείνωση της στάθμης χαρακτηρίζει τον σχηματισμό αδιαπέρατο. Η αντίθεση αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός ότι οι ασβεστόλιθοι του Κορακάρη εξασφαλίζουν τη συνεχή τροφοδότηση των ψαμμιτών με πλευρική μετάγγιση διατηρώντας μια σχετική ισορροπία. Άλλωστε η μέτρια περατότητα προκύπτει και από την σχετικά ταχεία πτώση της στάθμης κατά την άντληση των πηγαδιών.

Σχηματισμοί με χαμηλή υδροπερατότητα

Στην κατηγορία αυτή κατατάσσεται η πολύχρωμη σειρά του Μεσοζωικού που παρεμβάλλεται μεταξύ του κατώτερου και του ανώτερου Τριαδικού καθώς και διάφοροι οριζόντιας ανάδυσης εντός των ασβεστόλιθων και δολομιτών. Η κατάταξη τους βασίζεται αποκλειστικά σε λιθολογικά κριτήρια. Πρόκειται για μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και ψαμμίτες.

Σχηματισμοί αδιαπέρατοι

Οι ερυθροί άργιλοι του Νεογενούς που αναπτύσσονται στη δυτική και νότια περίμετρο της λεκάνης του Κορακάρη κατατάσσονται στην κατηγορία αυτή. Πρόκειται ουσιαστικά για υδατοστεγή σχηματισμό κατά τον οποίο δεν βρέθηκαν καθόλου υδροφόρα στρώματα έστω και με εξαντλήσιμη υδροφορία.

### 6.7.2 ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η σημερινή τεκτονική δομή της Χίου είναι αποτέλεσμα πολλών χρονικά διαδοχικών τεκτονικών επεξεργασιών τόσο των προαλπικών όσο και αλπικών. Η βαρισική ορογένεση προκάλεσε πτύχωση των παλαιοζωικών ιζημάτων και δημιούργησε πτυχές με διεύθυνση Β-ΒΔ. Αποτέλεσμα των καταπονήσεων λόγω της πτυχώσεως είναι η διάτμηση και σχιστοποίηση των ιζημάτων. Η τελευταία ορογένεση προκάλεσε αρχικά πτυχές και

εφιππεύσεις, μετά την απόθεση της αλλόχθονης σειράς και τέλος την δημιουργία πιέσεων στις πτυχές. Μετά το τέλος της τελευταίας ορογένεσης το νησί δέχτηκε έντονη ρηξιγενής τεκτονική εφελκυσμού που προκάλεσε διασταυρούμενα ρήγματα τα οποία καθορίζουν και την ακτογραμμή του νησιού. Η ηλικία των ρηγμάτων τοποθετείται στο Πλειστόκαινο και γενικά παρατηρούνται κλίσεις 20°-40° με δυτικές διευθύνσεις. [8]

## 6.8 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Ο Κάμπος Κοκκαλά και Παρθένη, γνωστός σαν Κάμπος Χίου έχει εμβαδό 6000 στρέμματα. Καλλιεργείται βασικά με εσπεριδοειδή και αρδεύεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Ο Κάμπος Κοκκαλά αρδεύεται από 700 περίπου πηγάδια που είναι ανοιγμένα εντός των αρδευόμενων αγροτεμαχίων (περιβόλια) και από 22 γεωτρήσεις που είναι διανοιγμένες στο καρστικό υδροφόρο σύστημα του ορεινού όγκου του Κορακάρη. Από τις γεωτρήσεις το νερό μεταφέρεται με επιφανειακό δίκτυο σωλήνων ταχείας συνδέσεως στα προς άρδευση περιβόλια. Μέρος των γεωτρήσεων Κορακάρη χρησιμοποιείται για την ύδρευση του Δήμου Χίου, των περιοχών γύρω από τον Κάμπο και σε μεγάλο ποσοστό του Δήμου Ομηρούπολης. Γενικά, από τον Κορακάρη λαμβάνονται συνολικά 2,8 – 3,0 $*10^6$ $m^3$ ετησίως. Η λεκάνη του Κοκκαλά μαζί με αυτήν του Παρθένη και τον ορεινό όγκο του Κορακάρη αποτελούν ουσιαστικά μια ενότητα μεγάλης υδρογεωλογικής σημασίας. Αναλυτικά για κάθε λεκάνη έχω :

**Στοιχεία Λεκάνης Κοκκαλά:**

Μέγεθος υδρολογικής λεκάνης: 46,3 $km^2$

Μέγεθος υδρογεωλογικής λεκάνης: Λόγω της εφιππεύσεως της κυρίως ασβεστολιθικής πλάκας της Χίου πάνω στο παλαιοζωικό σχιστολιθικό υπόβαθρο και της κλίσης προς τη Δύση (εκτός λεκάνης) της επιφάνειας εφιππεύσεως, το ½ των υδάτων των βροχοπτώσεων που διηθούνται στην ασβεστολιθική μάζα εξέρχονται υπογείως εκτός της υδρολογικής λεκάνης. Η επιφάνεια που αφαιρείται για τον λόγο αυτό, ανέρχεται σε 10$km^2$ και το μέγεθος της υδρογεωλογικής λεκάνης, περιορίζεται στα 36,3$km^2$.

Μορφή λεκάνης: Λεβητοειδής, ανοιχτή προς Α.

Υψόμετρο: Μέσο υψόμετρο ορεινού τμήματος 250m (μέγιστο 707m) και πεδινού 15m.

Βλάστηση: Αρδευόμενα εσπεριδοειδή και κηπευτικά στο πεδινό τμήμα, έκτασης 6-7km$^2$ και ελιές, αμυγδαλιές και μαστιχόδενδρα στις πλαγιές.

Γεωλογία: -Ασβεστόλιθοι 40% που αναπτύσσονται στα ορεινά τμήματα και στον Κορακάρη.

-Μάργες Νεογενούς 45%

-Προσχώσεις 15%

Μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο σύνολο της λεκάνης: 0,74m

**Στοιχεία λεκάνης Παρθένη:**

Μέγεθος υδρολογικής λεκάνης: 30,7km$^2$

Μέγεθος υδρογεωλογικής λεκάνης: Λόγω της εφιππεύσεως της κυρίως ασβεστολιθικής μάζας και της κλίσης προς τη Δύση (εκτός λεκάνης) της επιφάνειας εφιππεύσεως, το ½ των υδάτων που κατεισδύουν στους ασβεστολίθους της μάζας αυτής εξέρχονται υπογείως εκτός της υδρολογικής λεκάνης. Η επιφάνεια που αφαιρείται για το λόγο αυτό, ανέρχεται σε 7km$^2$ και το μέγεθος της υδρογεωλογικής λεκάνης, περιορίζεται στα 23,7km$^2$.

Μορφή λεκάνης: Επιμήκης με έντονο και τραχύ ανάγλυφο.

Υψόμετρο: Μέσο υψόμετρο 350m (μέγιστο 800m). Πεδινού τμήματος 10m.

Βλάστηση: Εσπεριδοειδή και κηπευτικά, που αρδεύονται σε έκταση 0,5km$^2$. Βοσκότοποι 15km$^2$. Θάμνοι και πεύκα 15km$^2$.

Γεωλογία: -Ασβεστόλιθοι 45% που αναπτύσσονται στα ορεινά τμήματα και στον Κορακάρη.

-Ψαμμιτοσχιστόλιθοι του Παλαιοζωικού 50%.

-Προσχώσεις επάνω σε ψαμμίτες του Νεογενούς 5%

Μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο σύνολο της λεκάνης: 0,82m

**Στοιχεία λεκάνης Κορακάρη:**

Μέγεθος υδρολογικής λεκάνης: 10,0km$^2$

Μορφή λεκάνης: Κυκλικό υψίπεδο με ελαφρά κλίση προς Ν και ΝΑ

Υψόμετρο: Μέσο υψόμετρο 150m (μέγιστο 397m).

Βλάστηση: Γυμνό 80% ,Εσπεριδοειδή 20%

Γεωλογία: -Ασβεστόλιθοι 70%.

-Ψαμμίτες του Νεογενούς πάνω σε ασβεστολίθους 30%

Μέσο ετήσιο ύψος βροχής στο σύνολο της λεκάνης: 0,74m

**Ενότητα λεκανών Κοκκαλά, Παρθένη και Κορακάρη:**

Από όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως οι τρεις λεκάνες συνδέονται μεταξύ τους. Σε αυτές δημιουργούνται τρεις υδροφορίες:

Α. Καρστικού συστήματος Κορακάρη

Β. Ψαμμιτών Νεογενούς

Γ. Προσχώσεων και ψαμμιτών

οι οποίες όμως τελικά επικοινωνούν μεταξύ τους. Η στάθμη και στις τρεις υδροφορίες κάθε άνοιξη επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Η διακύμανση είναι 1,0m στους ασβεστόλιθους και 4m στους ψαμμίτες και τις προσχώσεις. Η ποιότητα του νερού εμφανίζει μεταβολές μεταξύ θέρους και χειμώνα μόνο στις προσχώσεις, αλλά πάντοτε την άνοιξη αποκαθίστανται. Εξαίρεση αποτελούν μόνο το χαμηλό τμήμα του Κοκκαλά, όπου το νερό είναι μόνιμα βεβαρημένο.

Μέγεθος ενότητας: Το μέγεθος της ενότητας σε ό,τι αφορά επιφανειακά νερά είναι 77km$^2$, ενώ σε ό,τι αφορά τα υπόγεια είναι ίση ή μεγαλύτερη (Κορακάρης) από 70km$^2$.

Γεωλογία: -Ασβεστόλιθοι 50%

-Ψαμμιτοσχιστόλιθοι και μάργες 40%

-Προσχώσεις 10%.

### 6.8.1 ΥΔΡΟΧΗΜΕΙΑ

Η υδροφορία του καρστικού συστήματος του Κορακάρη βρίσκεται σε εκμετάλλευση εδώ και 30 χρόνια. Από αναλύσεις προέκυψαν ιόντα χλωρίου, θειικά και ανθρακικά. Η αύξηση που παρατηρείται τους χειμερινούς μήνες οφείλεται στην μικρότερη άντληση με βραδύτερη ροή και μεγαλύτερη παραμονή εντός των ασβεστόλιθων. Ουσιαστικά

πρόκειται για άντληση μονιμότερων αποθεμάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι τα ιόντα μαγνησίου δεν προέρχονται από την θάλασσα αλλά από τους δολομίτες (πετρώματα μαγνησιούχα). Πρόκειται για νερά σχετικώς σκληρά αλλά κατάλληλα για αρδεύσεις. Στους ψαμμίτες αναπτύσσεται υδροφορία από άμεση διήθηση και παρατηρούνται επίσης ιόντα καλίου και νατρίου. Επί πλέον σοβαρό ρόλο διαδραματίζουν και οι άνεμοι παρασύροντας σωματίδια από τη θάλασσα προς τη ξηρά στα χαμηλά υψόμετρα της ενότητας λεκανών Κοκκαλά, Παρθένη και Κορακάρη.

### 6.8.2 ΚΙΝΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Η κίνηση των υπογείων υδάτων που διηθούνται στους ασβεστόλιθους ρυθμίζεται αρχικά από τη διεύθυνση του συστήματος των ασυνεχειών, των ρηγμάτων και των καρστικών φαινομένων και στη συνέχεια από τη μορφολογία του Παλαιοζωικού κάτω από τους ασβεστόλιθους όπως αυτή διαμορφώθηκε από τη πτυχωσιγενή και τη ρηξιγενή τεκτονική. Βασικά η μορφολογία του στεγανού παλαιοζωικού υποβάθρου δεν συμπίπτει με το μέγεθος των υδρολογικών λεκανών. Στις προσχώσεις τα πλευρικά ιζήματα και τους Νεογενείς ψαμμίτες η ροή των υπογείων υδάτων ακολουθεί την επιφανειακή μορφολογία και κατευθύνεται τελικά στη θάλασσα. [8]

### 6.8.3 ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Το πρόβλημα της λειψυδρίας στη περιοχή του Αιγαίου και ειδικότερα του Νομού Χίου είναι μεγάλο. Στη πρωτεύουσα του Νομού Χίου παρατηρείται το παρακάτω φαινόμενο, η Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Δήμου Χίου – ΔΕΥΑΧ ,δεν μπορεί να τροφοδοτήσει με πόσιμο νερό τους κατοίκους του Δήμου. Επίσης η διάθεση του νερού (όχι πόσιμου) στους δημότες παρατηρείται συγκεκριμένες μέρες και ώρες τις εβδομάδας. Το νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενές που υπάρχουν στις ταράτσες των σπιτιών, για να μπορέσουν αργότερα να το χρησιμοποιήσουν για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους. Το νερό που παρέχει η υπηρεσία δεν είναι πόσιμο μιας και η συγκεντρώσεις σε άλατα και αλλά στοιχειά είναι υψηλές. Οι τρόποι συλλογής και διανομής είναι :

Φράγματα

Σύμφωνα με τον ορισμό φράγμα είναι τεχνικό έργο που κατασκευάζεται κάθετα στην κοίτη ενός φυσικού ρεύματος (ποταμού) για την αποκοπή της ροής , με σκοπό την αποθήκευση , παροχέτευση ή ανάσχεση της πλημμυρικής παροχής του ρεύματος. Το φράγμα **Ψαρρόπετρας** το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί ανήκει στη κατηγορία των ανασχετικών και αντιπλημμυρικών φραγμάτων. Σκοπός αυτού του έργου είναι:

α) Η πρόληψη αντιπλημμυρικών έργων

β)Η υδροληψία και η χρήση του νερού από το δήμο Χίου

γ)Ο εμπλουτισμός της υπόγειας λεκάνης του Κορακάρη

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα εξής :

1) Αφού κατασκευασθεί μεγάλο ανοιχτό διυλιστήριο εντός του 2004 θα υδροδοτείται ο Δήμος Χίου . Από το Φράγμα αυτό για 7 - 8 μήνες το χρόνο με επεξεργασμένο νερό άριστης ποιότητας «πόσιμο» και το κυριότερο από νερό που πήγαινε στη θάλασσα.

2) Θα σταματήσουν οι γεωτρήσεις και η λεκάνη Κορακάρη θα εμπλουτισθεί τόσο από τις εισροές αλλά και από καινούριες που σίγουρα δημιούργησε η πίεση στη λεκάνη κατάκλισης του σημερινού φράγματος. [10]

Γεωτρήσεις

Η εκμετάλλευση του υπογείου νερού έχει μεγάλη σημασία για το Δήμο μια και το επιφανειακό νερό είναι σχετικά λίγο και λόγω του ορεινού ανάγλυφου οδηγείται γρήγορα προς τη θάλασσα. Σημαντικά στάδια για την ανόρυξη και εκμετάλλευση μιας υδρογεώτρησης είναι τα παρακάτω:

α) Προσδιορισμός του σημείου ανόρυξης της γεώτρησης.

β) Διάτρηση και εκτίμηση των υδροφόρων

γ) Σωλήνωση και τοποθέτηση φίλτρων.

δ) Τσιμέντωση.

ε) Χαλίκωση.

στ) Δοκιμαστική άντληση.

Στην περιοχή της Χίου υπάρχουν και ιδιωτικές και δημοτικές γεωτρήσεις. Εμείς θα μελετήσουμε τις 19 γεωτρήσεις που εντάσσονται γεωγραφικά στην ενότητα λεκανών Κοκκαλά, Παρθένη και Κορακάρη για την προσομοίωση της ροής.

Δεξαμενές

Το νερό που αντλείται από τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια αποθηκεύεται σε δεξαμενές οι οποίες είναι τοποθετημένες σε υψηλά σημεία για να μπορεί να το νερό να διανέμεται στο δήμο. Οι δεξαμενές είναι αποθηκευτικοί χώροι κατασκευασμένοι με σκυρόδεμα. Οι δεξαμενές που υπάρχουν σε όλο το δήμο είναι οκτώ με συνολική χωρητικότητα 2.800$m^3$.

**Πίνακας 6.1** Δεξαμενές – Πηγή : Δημοτική επιχείρηση Ύδρευσης Χίου

| | |
|---|---|
| Ορφανού(νέα) | 400 $m^3$ |
| Ορφανού(παλιά) | 600 $m^3$ |
| Πετεινάκη | 150 $m^3$ |
| Μονοδέντρι (άνω) | 300 $m^3$ |
| Μονοδέντρι (κάτω) | 150 $m^3$ |
| Κουτρολόμυλου | 350 $m^3$ |
| Τουρλωτής | 350 $m^3$ |
| Λατόμι | 500 $m^3$ |
| Σύνολο | 2.800$m^3$ |

Λιμνοδεξαμενές

Οι λιμνοδεξαμενές αποτελούν ένα είδος μικρού τεχνητού ταμιευτήρια και σκοπό έχουν να συγκεντρώνουν τις χειμερινές κυρίως απορροές και να τις αποδίδουν για αρδευτικούς ή/και για υδρευτικούς σκοπούς Στο Δήμο Χίου ανήκει μια μόνο λιμνοδεξαμενή αυτή του Αγίου Αρτεμίου με συνολικό όγκο 100.000 $m^3$. Ο χαρακτήρας της είναι καθαρά αποθηκευτικός- είναι εξωτερική. Τα πετρώματα στη περιοχή δεν είναι αδιαπέραστα έτσι και γίνεται χρήση γεωμεμβράνης. [10]

Κερματοδέκτες

Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός μιας και το νερό που παρέχεται από την υπηρεσία δεν είναι πόσιμο υπάρχουν 3 κερματοδέκτες στο δήμο Χίου. Βέβαια πολλοί είναι αυτοί οι οποίοι αγοράζουν εμφιαλωμένα νερά από το εμπόριο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : Υδράργυρος

## 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υδράργυρος ανήκει στην κατηγορία των βαρέων μετάλλων με μεγάλο ειδικό βάρος. Είναι το πιο τοξικό από τα βαρέα μέταλλα και δημιουργεί τα περισσότερα προβλήματα δηλητηρίασης. Βρίσκεται στη φύση ως ορυκτό κινναβάρι HgS και σε μικρότερα ποσοστά ως αυτοφυής ανάμεσα σε πετρώματα με τη μορφή σταγονιδίων. Ο οργανικός υδράργυρος χρησιμοποιείται ως φυτοφάρμακο και ειδικότερα ως μυκητοκτόνο. Στο νερό υπάρχει ως ανόργανο άλας και ως οργανικός (μεθυλιούχος) στις αποθέσεις και τα ψάρια. Η παγκόσμια παραγωγή δεν είναι μεγάλη αλλά όταν τα άλατα αυτού βρεθούν στο περιβάλλον τότε αλκυλιώνονται και εισέρχονται πιο εύκολα στο σύστημα. Η πιο σπουδαία αντίδραση είναι αυτή της μεθυλίωσης και αυτό γιατί τα μεθυλιωμένα παράγωγα είναι πολύ πιο τοξικά και επικίνδυνα από τα απλά ιόντα. Η αντίδραση είναι η εξής :

$$Hg^{2+} \rightarrow \underset{\uparrow}{CH_3Hg^+} \rightarrow \underset{\uparrow}{(CH_3)_2 Hg}$$

Μέσο μεθυλίωσης η μεθυλοκοβαλαμίνη

Ο υδράργυρος δημιουργεί σοβαρά έως και θανατηφόρα προβλήματα δηλητηριάσεων. Η ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση του υδραργύρου στο πόσιμο νερό είναι 1 μg/l αναφερόμενη στον ολικό υδράργυρο. Οι δηλητηριάσεις που προέρχονται από τις ενώσεις του υδραργύρου οφείλονται στην αντίδρασή τους με ένα μεγάλο αριθμό ενζύμων. Ειδικότερα οι μεθυλιωμένες μορφές του απορροφώνται από το γαστρεντερικό σύστημα σχεδόν 100%. Οι επιδράσεις είναι κυρίως στις μεμβράνες των κυττάρων και έτσι συσσωρεύονται στον εγκέφαλο, στο συκώτι και τα νεφρά. Οι δηλητηριάσεις από υδράργυρο προκαλούν την ασθένεια Minamata, ανίατη βλάβη στον εγκέφαλο και παθολογικές διαταραχές στα νεφρά. [7]

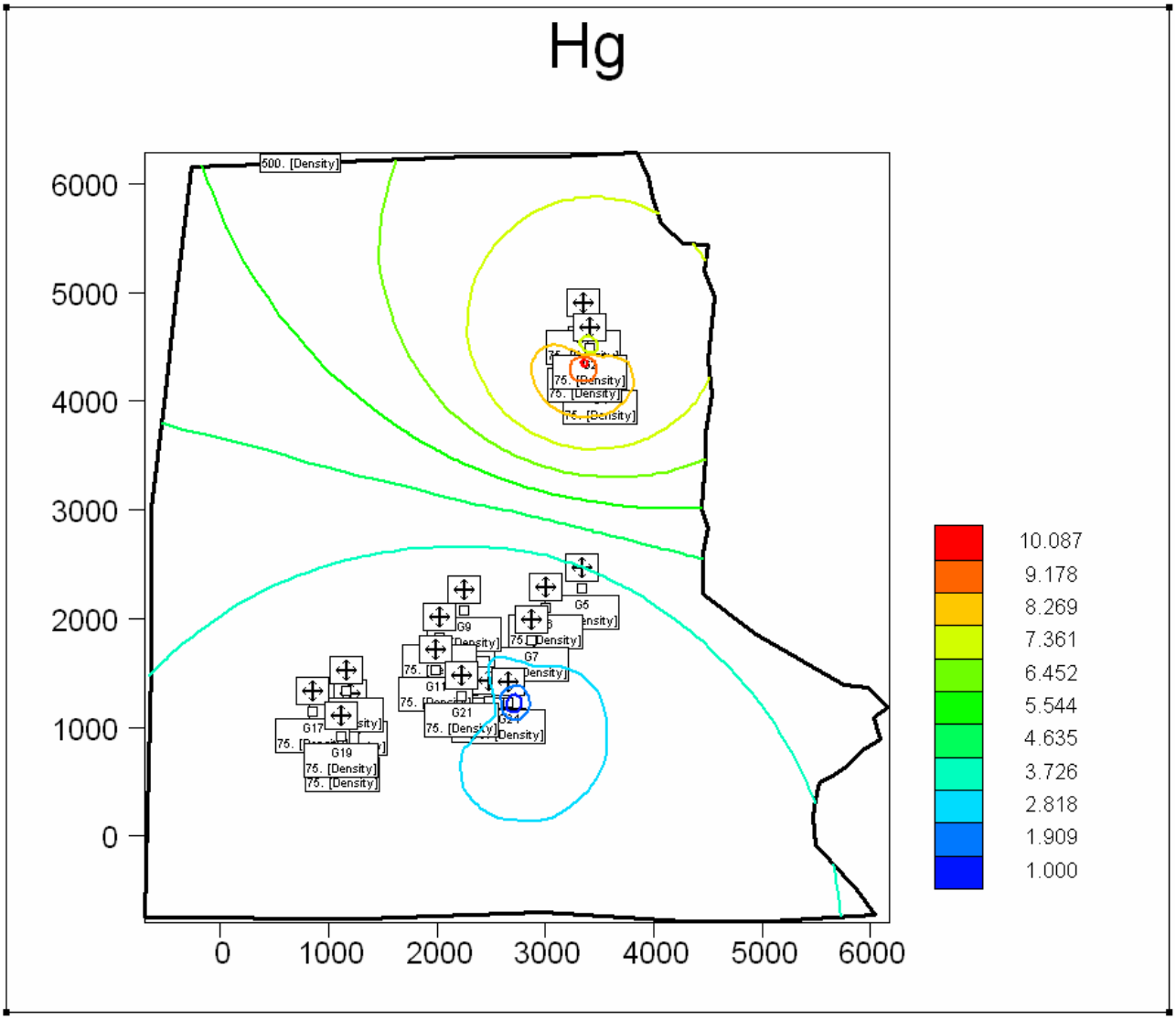
## 7.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ

Στο μοντέλο που δημιουργήσαμε για την προσομοίωση του υδροφορέα στον Κάμπο της Χίου θα εισάγουμε ως σημειακές φορτίσεις τιμές συγκεντρώσεων του υδραργύρου για το 2002 και θα εξετάσουμε αυτές οι αρχικές συγκεντρώσεις τι προφίλ διασποράς δίνουν για την υπάρχουσα κατάσταση της ροής. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις τιμές των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις 6 γεωτρήσεις που έχουμε δεδομένα και παίρνοντας κάθε φορά την μέγιστη τιμή συγκέντρωσης που έχει παρατηρηθεί.

**Πίνακας 7.1** Συγκεντρώσεις υδραργύρου ανά γεώτρηση – Πηγή : Δημοτική επιχείρηση Ύδρευσης Χίου

| Γεώτρηση | Συγκέντρωση (μg/l) |
|---|---|
| **G2 Γούλια** | 6,7 |
| **G3 Χέλιου** | 10,2 |
| **G7 Κουτρουλόμυλου** | 3,1 |
| **G22 Βροντάδου** | 3,2 |
| **G23 Ε.Γ.Σ. Χίου** | 3,5 |
| **G24 Πίττα - Ξυλά** | 1 |

Το πρόβλημα με τις υψηλές συγκεντρώσεις υδραργύρου στη Χίο υπάρχει εδώ και χρόνια. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι όλη η περιοχή βρίσκεται πολύ πάνω από το όριο που προτείνεται για το πόσιμο νερό. Η κατάσταση γίνεται ακόμα πιο δύσκολη επειδή δεν γνωρίζουν οι τοπικές αρχές τον ακριβή λόγο της εμφάνισης τέτοιων τιμών. Τα τελευταία χρόνια ύστερα και από την αντίδραση των πολιτών μετά από την δημοσίευση του θέματος γίνεται προσπάθεια εξεύρεσης του λόγου αλλά και μείωσης των τιμών (με φυσικούς τρόπους). Ιδιαίτερης σημασίας είναι η περίπτωση που φαίνεται να δημιουργείται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου ο υδράργυρος διοχετεύεται στη θάλασσα σε σημείο που χρησιμοποιείται ως χώρος κολύμβησης.




***Εικόνα 7.1 :*** *Προσομοίωση διάχυσης /διασποράς του υδραργύρου(μg/l) το έτος 2002 στην περιοχή Κάμπος Χίου*

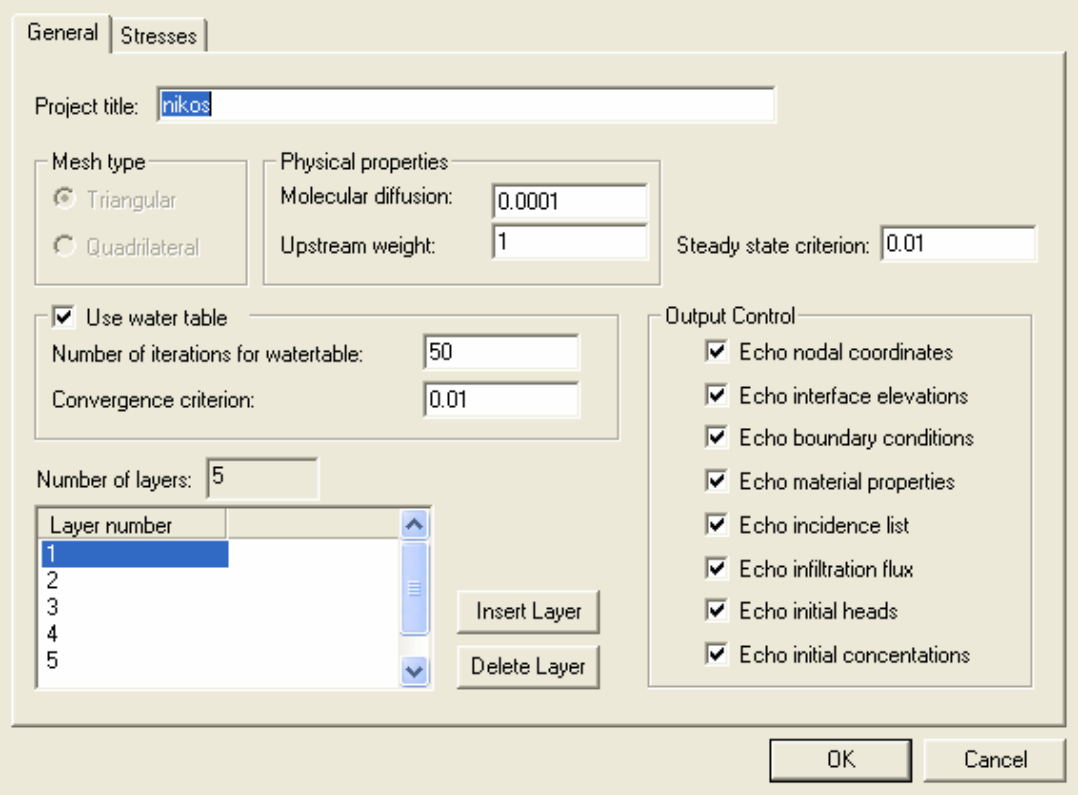
Η αιτία εμφάνισης αυτών των συγκεντρώσεων εξαιτίας της σύστασης των πετρωμάτων δεν δικαιολογεί τις υψηλές συγκεντρώσεις. Η εμφάνιση μάλλον οφείλεται στο είδος των καλλιεργειών και στη διαχείριση αυτών (λιπάσματα, πότισμα) που εξηγούν τις κατά περιόδους αυξημένες τιμές υδραργύρου. Παρόλο αυτά μετά και την δημοσίευση του θέματος οι συγκεντρώσεις έχουν μειωθεί παραμένοντας βέβαια τις περισσότερες φορές πάνω από το όριο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο : Χρήση του Argus One

## 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

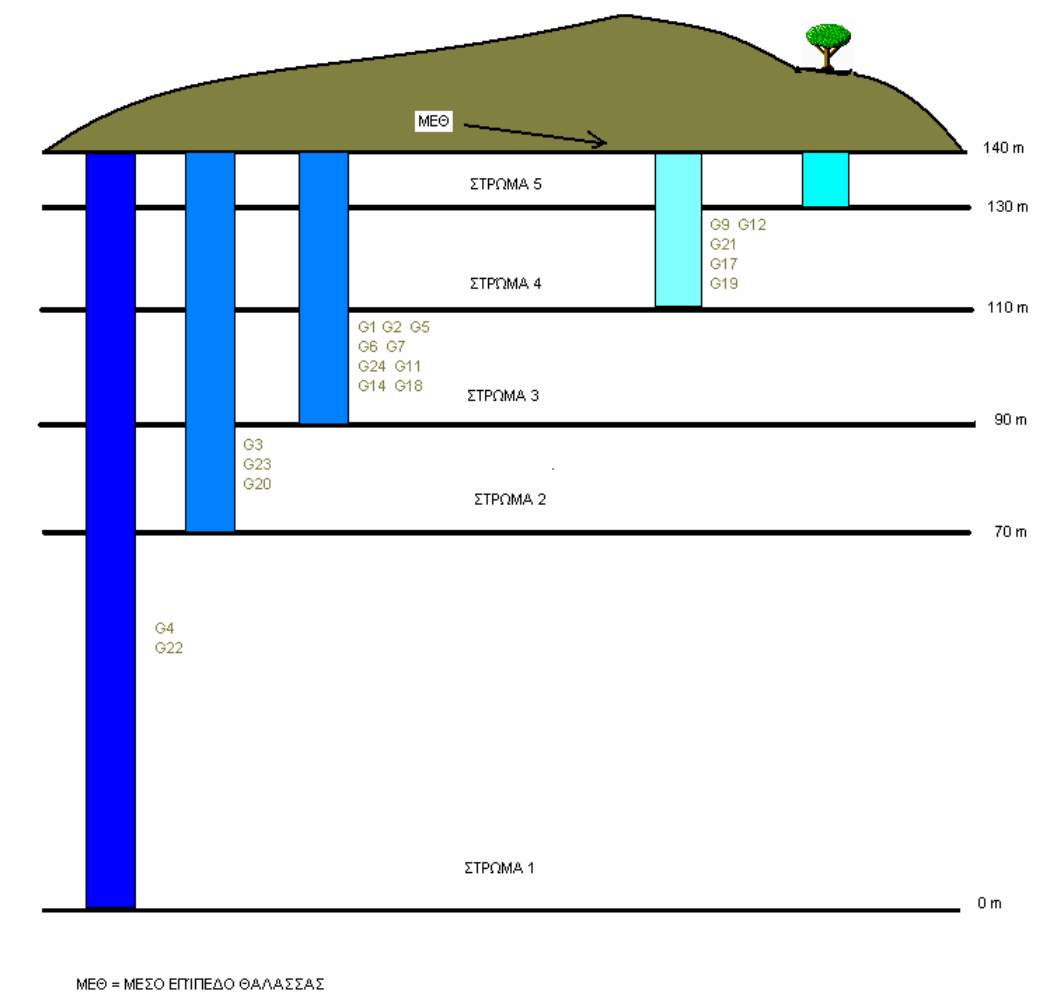
Το μοντέλο PTC που θα χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση της περιοχής Κάμπος Χίου χρειάζεται αρχικά κάποια γενικά στοιχεία και πληροφορίες για την δημιουργία του υδροφορέα. Τα δεδομένα για την προσομοίωση εισάγονται συνήθως με την ακόλουθη σειρά :

1. Ορίζουμε το είδος του πλέγματος (τριγωνικό), καθορίζουμε τη διαφορά των διαδοχικών χρονικών βημάτων (steady state criterion) ίση με 0,01, ορίζουμε ότι ο υδροφορέας της περιοχής μας είναι ελεύθερος (use water table) και αναλόγως το χημικό στοιχείο που εξετάζουμε βάζουμε την αντίστοιχη τιμή μοριακής διάχυσης από την βιβλιογραφία.



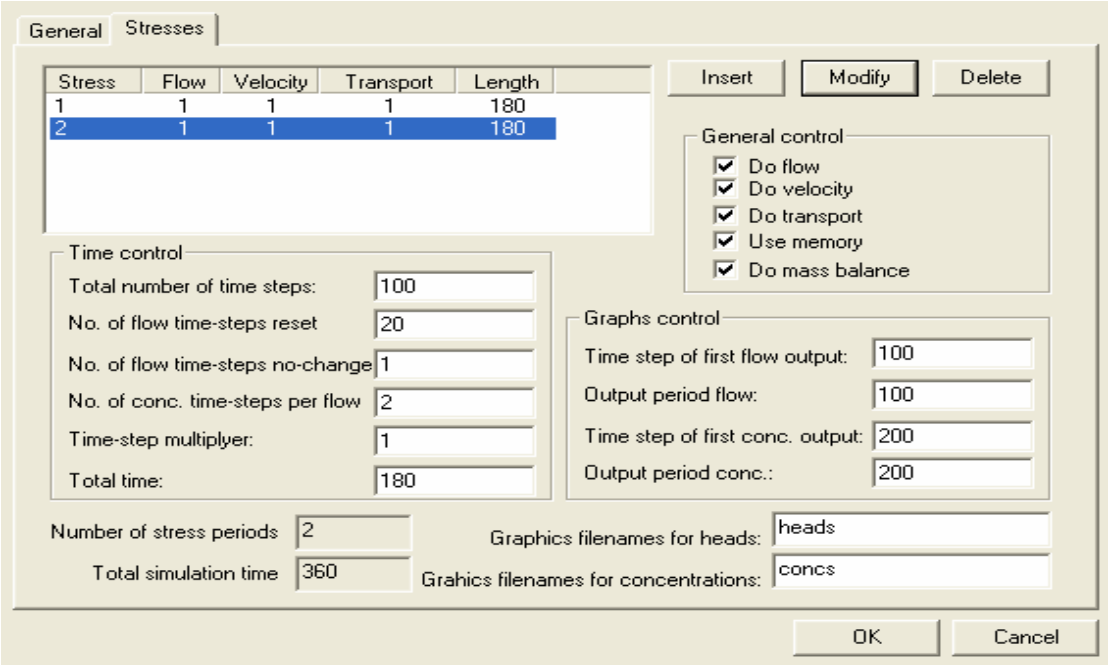

***Εικόνα 8.1*** *: Παράθυρο εισαγωγής αρχικών – βασικών δεδομένων στο Argus One*

Ανάλογα με το βάθος στο οποίο φτάνει ο πυθμένας της κάθε γεώτρησης χωρίζουμε την περιοχή σε 5 στρώματα-επίπεδα, ξεκινώντας από το χαμηλότερο και ανεβαίνοντας. Θεωρούμε επίπεδο αναφοράς λίγο χαμηλότερα από το κατώτερο σημείο που φτάνει η βαθύτερη γεώτρηση δηλαδή τα 140m βάθος. Τα αποτελέσματα του διαχωρισμού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



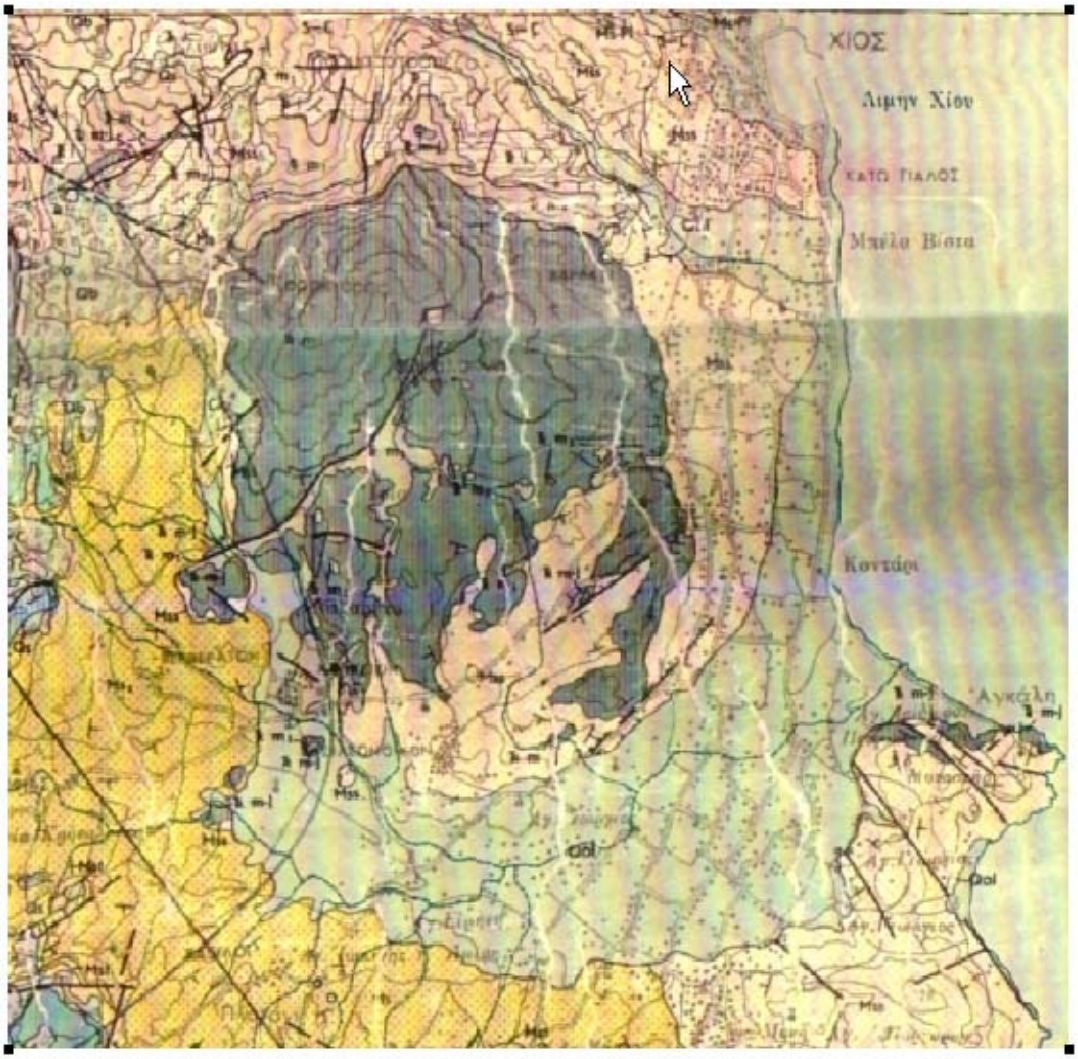

***Εικόνα 8.2 :*** *Εικονική αναπαράσταση των γεωτρήσεων στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής μελέτης*

2. Επιλέγουμε να κάνουμε την προσομοίωση σε δυο περιόδους, καλοκαίρι (stress 1) και χειμώνα (stress 2) και να μελετήσουμε την ροή (flow), την ταχύτητα (velocity) και τη μεταφορά των ρύπων (transport)




***Εικόνα 8.3 :*** *Παράθυρο επιλογής των διαδικασιών και του χρόνου που θέλουμε να προσομοιώσουμε και να εξάγουμε αποτελέσματα*

3. Για τη δημιουργία της περιοχής μελέτης εισήχθησαν δυο χάρτες, ο ένας γεωλογικός και ο άλλος τοπογραφικός. Οι χάρτες ήταν τις ίδιας κλίμακας και έτσι το μόνο που χρειάστηκε να κάνουμε ήταν να τους προσαρμόσουμε καταλλήλως ώστε να αλληλοεπικαλύπτονται. Ο γεωλογικός χάρτης μας παρέχει στοιχεία για την υδραυλική αγωγιμότητα (conductivity) των πετρωμάτων που περιέχονται στην περιοχή. Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίζεται και στις τρεις διευθύνσεις. Έχει την ίδια τιμή στην διεύθυνση x και y, ενώ διαφοροποιείται στην διεύθυνση z (κάθετη στο επίπεδο του χαρτιού), όπου ισούται με το 10% των αντίστοιχων αγωγιμοτήτων της x και y διεύθυνσης.



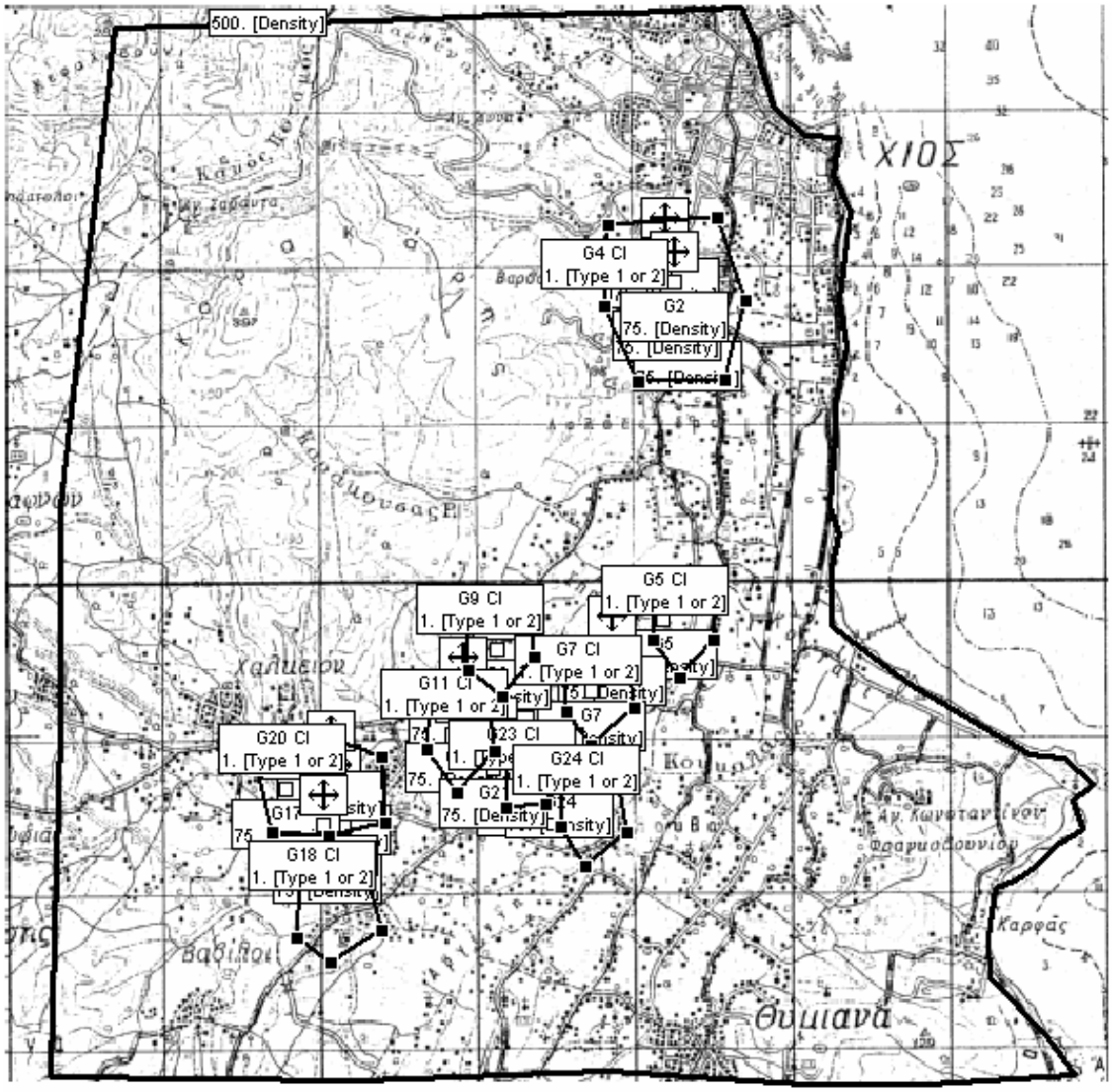

***Εικόνα 8.4 :*** *Τοπογραφικός περιοχής μελέτης*

4. Με βάση τον τοπογραφικό χάρτη εισήχθησαν στο μοντέλο οι γεωτρήσεις της περιοχής και τα αρχικά υδραυλικά τους ύψη. Στη διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε η μέθοδος της παρεμβολής (interpolation method) έτσι ώστε να μπορέσει το μοντέλο να κάνει μια όσο το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση του ανάγλυφου της περιοχής. Οι γεωτρήσεις εισάγονται στο μοντέλο ως οριακές συνθήκες $2^{ου}$ τύπου και οι ρυθμοί άντλησης για κάθε περίοδο σε $m^3/d$.
5. Για τις οριακές συνθήκες (boundary conditions) η παράκτια γραμμή θεωρείται $1^{ου}$ είδους οριακή συνθήκη ίση με 140 μ. Δηλαδή στο επίπεδο της θάλασσας ο

υδροφορέας έχει βάθος 140 μέτρα. Οριακή συνθήκη δευτέρου είδους υπάρχει στα σημεία που υπάρχουν διαπερατά πετρώματα στα όρια της περιοχής μελέτης. Έγινε η παραδοχή ότι σε δυο από αυτά τα σημεία έχουμε εισροή σταθερού όγκου και στις δυο περιόδους και στο άλλο εκροή σύμφωνα και με την μορφολογία της περιοχής (λεκάνες απορροής ενότητας)

6. Το μοντέλο ζητάει ως βροχόπτωση την διήθηση μέσω του εδάφους προς τον υπόγειο υδροφορέα. Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουμε στην διάθεσή μας για τα υδροπερατά και αδιαπέρατα στρώματα προκύπτει η συνολική διήθηση που δεχόμαστε ότι αναφέρεται μόνο στην χειμερινή περίοδο.
7. Τέλος για την αποθηκευτικότητα και το πορώδες χρησιμοποιούνται οι προκαθορισμένες τιμές που δίνει το μοντέλο. Όσον αφορά την διασπορά χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που προέκυψαν από την βιβλιογραφία.
8. Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα 5 στρώματα βάζοντας κάθε φορά τις γεωτρήσεις που αντιστοιχούν σε κάθε στρώμα και κρατώντας σταθερές τις τιμές για όλες τις άλλες παραμέτρους.
9. Όταν θελήσαμε να εξετάσουμε και την μεταφορά ρύπων εκτός της αλλαγής στην μοριακή διάχυση ομαδοποιήσαμε τις γεωτρήσεις για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Από 19 γεωτρήσεις πήραμε τα δεδομένα για 9 από αυτές και συμπεριλάβαμε μέσα στο contour τις γειτονικές γεωτρήσεις. Οι τιμές των χημικών στοιχείων των γεωτρήσεων που δεν λήφθηκαν υπόψη ήταν παραπλήσιες οπότε δεν χρειάστηκε να εξετάσουμε πολλές περιπτώσεις.

Στην παρακάτω εικόνα 8.6 φαίνεται η ομαδοποίηση που κάναμε για την μεταφορά των ρύπων καθώς επίσης και η επιλογή πυκνότητας (density) 500 για όλη την περιοχή και 75 γύρω από τις γεωτρήσεις για να μην είναι το πλέγμα ούτε πολύ αραιό ούτε πολύ πυκνό.



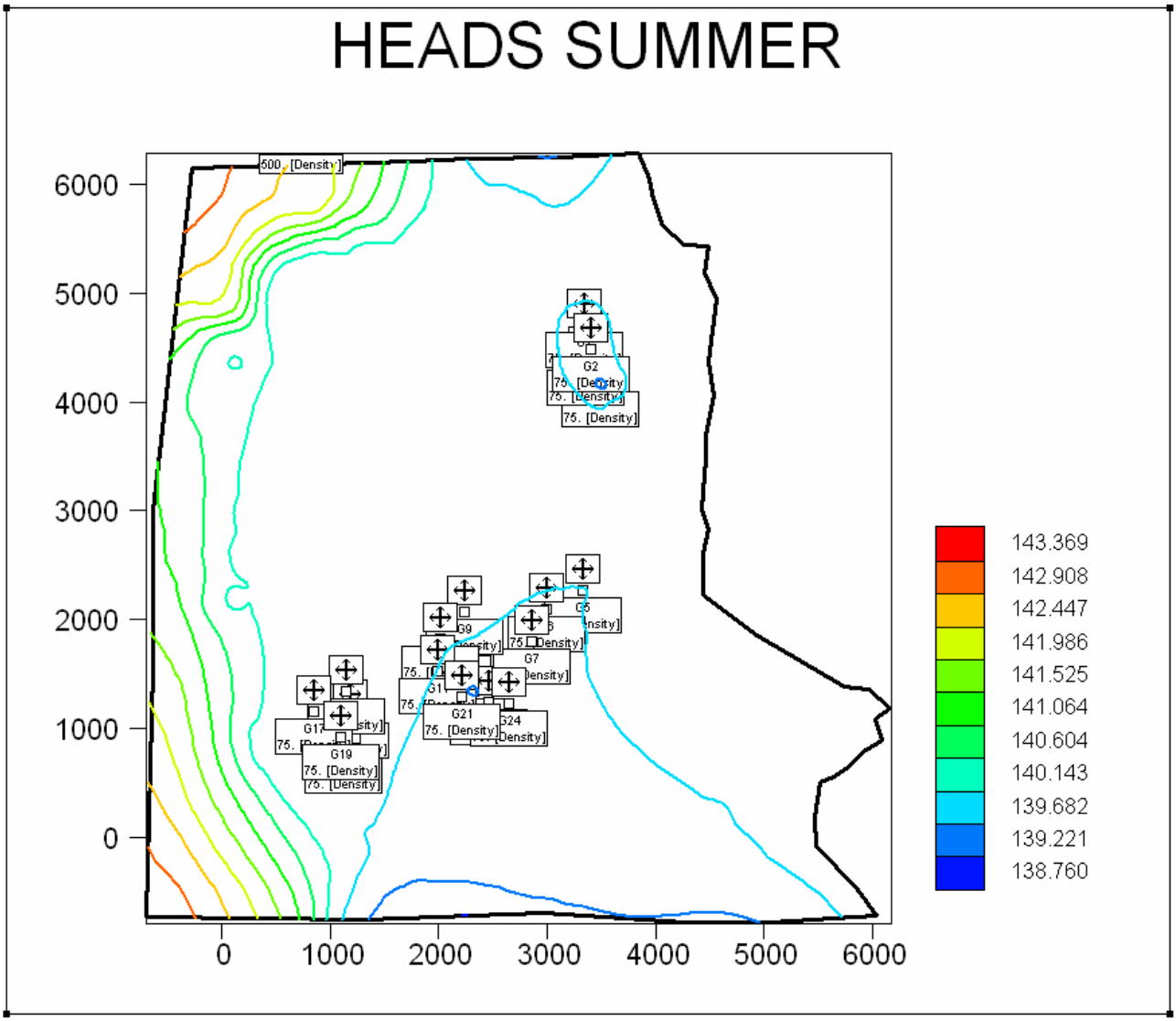

***Εικόνα 8.6*** *Τοπογραφικός περιοχής*

## 8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

### 8.2.1 <u>Προσδιορισμός του υπόγειου υδροφορέα</u>

Μετά από την εισαγωγή όλων των παραπάνω στοιχείων στο μοντέλο PTC γίνεται η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα μετά το πέρας της καλοκαιρινής και της χειμερινής περιόδου. Τα δεδομένα αναφέρονται για την μεν ροή σε δεδομένα της

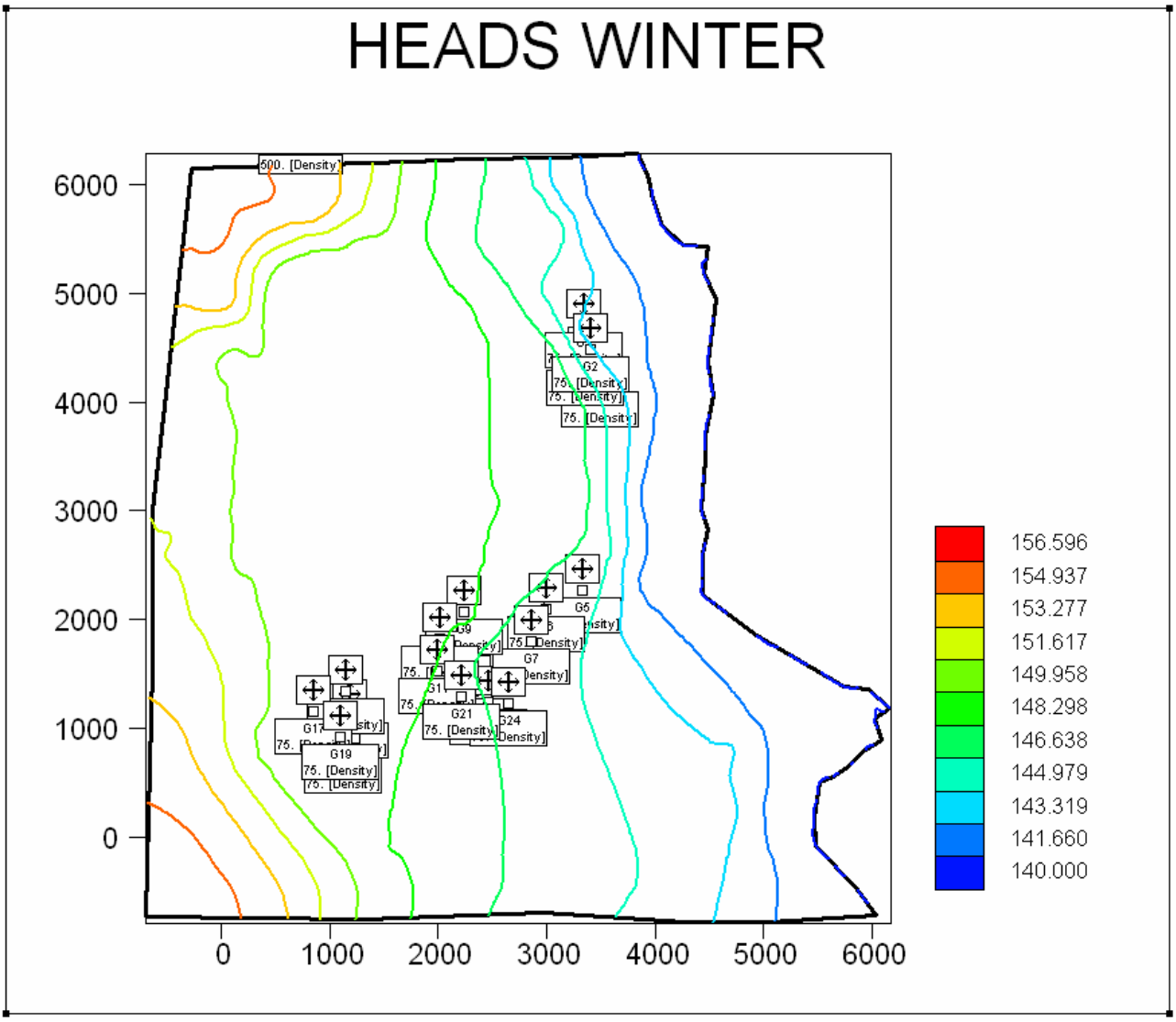
δεκαετίας του ’80 και για την μεταφορά σε δεδομένα της πενταετίας 2002-2007. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα για το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα.




***Σχήμα 8.1*** *: Αρχική κατάσταση υδραυλικού ύψους (m) την θερινή περίοδο*

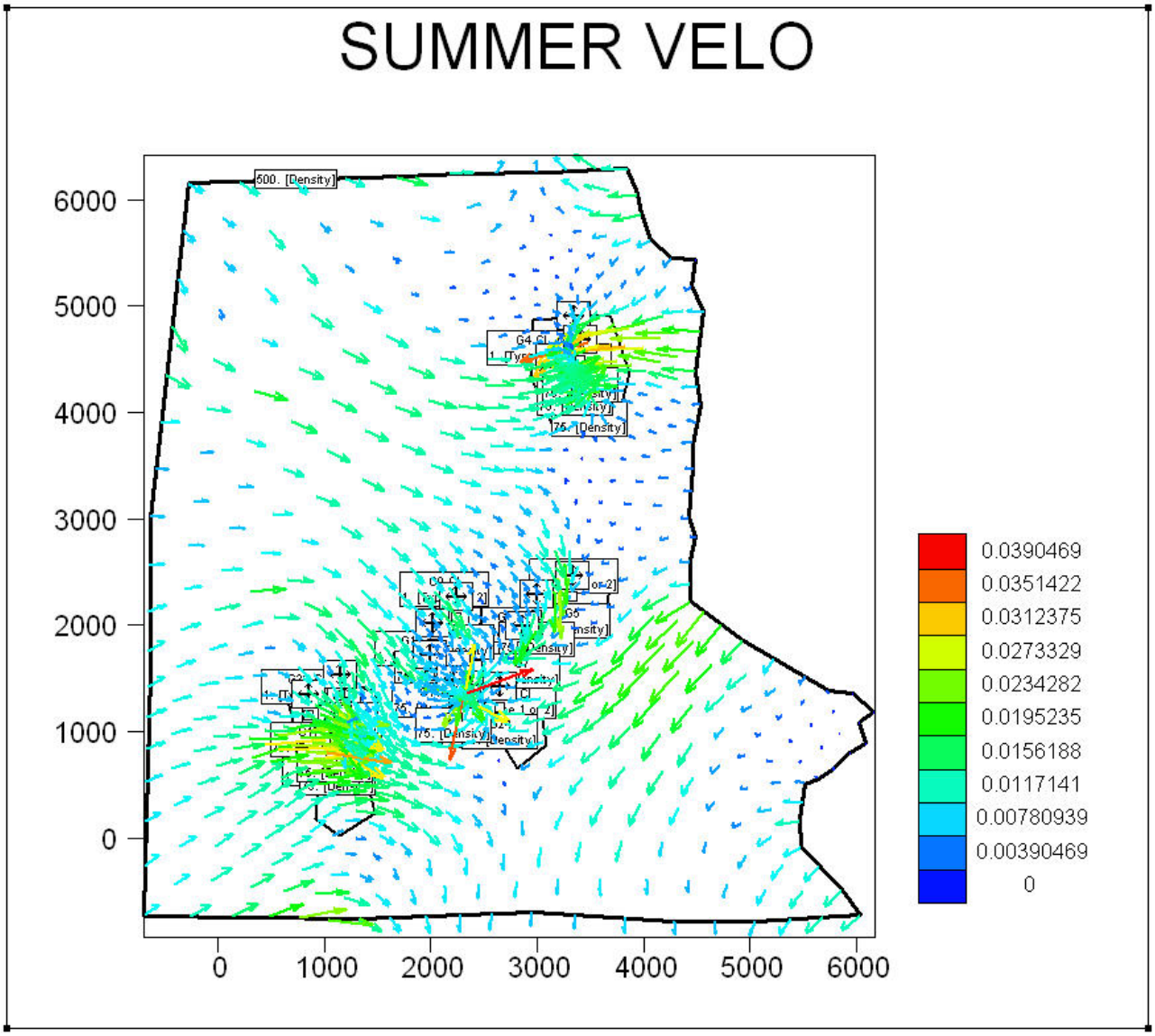
Σύμφωνα με τη προσέγγιση Ghyben – Herzgerg, η μέγιστη στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Επειδή το

πάχος του υδροφορέα στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 140 μέτρα, το σημείο όπου θα εμφανίζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης θα έχει υδραυλικό ύψος 143,5 μέτρα. Όλα τα σημεία που έχουν μικρότερο υδραυλικό ύψος από αυτό θα βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρωσης. Για το καλοκαίρι παρατηρούμε ότι όλη η περιοχή μελέτης είναι υφάλμυρη (μέγιστο υδραυλικό ύψος 143,37 μ.) ενώ για τον χειμώνα το μέτωπο της υφαλμύρινσης καλύπτει μικρότερη περιοχή έχοντας μετατοπιστεί σε σχέση με το μέτωπο του καλοκαιριού προς την θάλασσα και καλύπτοντας μόνο αστικά κέντρα και όχι τόσο καλλιεργήσιμες εκτάσεις.



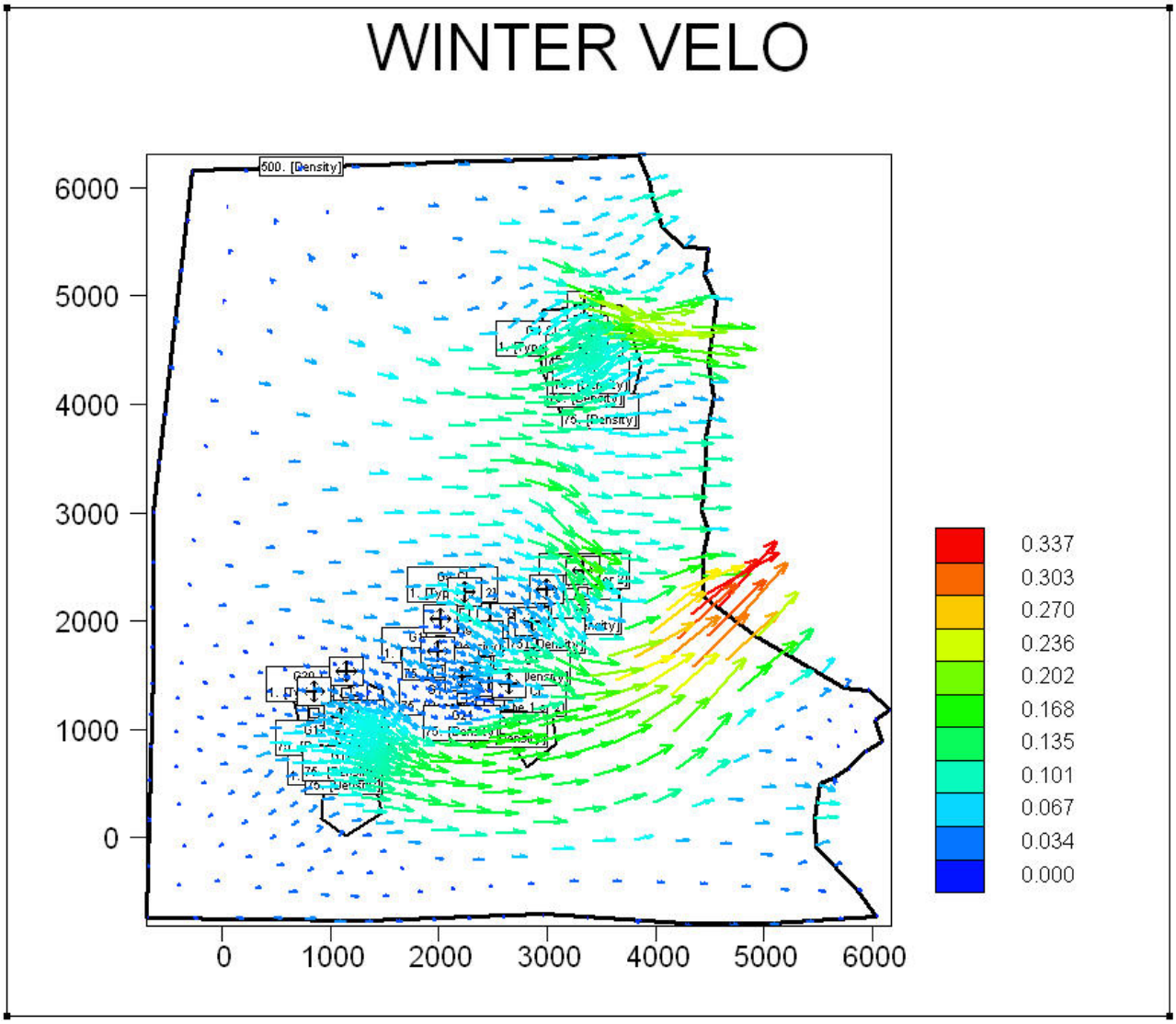

***Σχήμα 8.2*** *: Αρχική κατάσταση υδραυλικού ύψους (m) την χειμερινή περίοδο*

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η υφαλμύρινση είναι στην ενδοχώρα και οι γεωτρήσεις βόρεια της περιοχής του Κάμπου είναι ήδη μέσα στη ζώνη υφαλμύρινσης ακόμα και στο τέλος της χειμερινής περιόδου. Το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι σχετικά χαμηλό όπως αναμένεται σε μια περιοχή με μικρή βροχόπτωση. Η ίδια περίπου κατάσταση και το χειμώνα με ελαφρά υψηλότερα υδραυλικά ύψη λόγω της βροχόπτωσης και των υψηλότερων εισροών που αναμένονται.




***Σχήμα 8.3*** *: Αρχική κατάσταση ταχύτητας (m/d) την θερινή περίοδο*

Μελετώντας τα διαγράμματα των ταχυτήτων του νερού, διαπιστώνεται αρχικά ότι οι ταχύτητες την χειμερινή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της καλοκαιρινής περιόδου λόγω των μεγαλύτερων απορροών και την συμβολή της βροχόπτωσης. Επίσης είναι εμφανές ότι στις περιοχές όπου τα πετρώματα έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα (τοφφιτών - μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι) η ταχύτητα του νερού είναι μικρή (μικρό διάνυσμα) και έτσι η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται με δυσκολία. Αντίθετα σε περιοχές με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα (άμμος – θαλάσσιες αποθέσεις – ανθρακούχες συνθέσεις ) οι ταχύτητες είναι μεγάλες (μεγάλο διάνυσμα), το νερό κινείται γρήγορα και διοχετεύεται στην θάλασσα. Οι μικρές ταχύτητες το καλοκαίρι συνεισφέρουν στην μεγαλύτερη εισροή υφάλμυρου νερού και τον εγκλωβισμό του. Παρατηρούμε επίσης ότι δεν έχουμε κατευθύνσεις προς τη θάλασσα το καλοκαίρι λόγω των υψηλών ρυθμών άντλησης. Ειδικά για την περίπτωση μας που έχουμε σταθερές συνθήκες σχετικά γρήγορα τα όρια καθορίζουν την μορφή της ροής που όπως παρατηρούμε είναι κατεύθυνσης προς την θάλασσα. Η τάση του νερού να διαφύγει από τα σημεία που υπάρχει μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα είναι εμφανής περισσότερο τον χειμώνα που έχουμε μικρότερους ρυθμούς άντλησης και κατά συνέπεια μικρότερη ακτίνα επιρροής (κώνο στάθμης) γύρω από τις γεωτρήσεις.




***Σχήμα 8.4*** *: Αρχική κατάσταση ταχύτητας (m/d) την χειμερινή περίοδο*

### 8.2.2 <u>Προσομοίωση μεταφοράς χημικών ουσιών</u>

Αφού προσομοιώσαμε το μοντέλο και υπολογίσαμε την ροή και τις ταχύτητες θα εξετάσουμε για την περιοχή μελέτης την διασπορά και την μεταφορά χημικών στοιχείων τα δεδομένα των οποίων αφορούν τα τελευταία χρόνια( 2002-2007) και είναι μετρήσεις που έγιναν από την Χημική Υπηρεσία της Χίου. Για την καλύτερη μοντελοποίηση ομαδοποιήσαμε τα στοιχεία και πήραμε τις 9 γεωτρήσεις που καταλαμβάνουν τον

περισσότερο χώρο και έχουν τις πιο αντιπροσωπευτικές τιμές. Οι 9 γεωτρήσεις αν και σε διαφορετικά στρώματα εξετάστηκαν ως προς την επίδραση τους σε όλο το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Τα όρια των συγκεντρώσεων για αυτά τα στοιχεία δίνονται σε παραπάνω ενότητα και από ότι παρατηρούμε οι περισσότερες συγκεντρώσεις είναι πάνω από τα όρια.

**Πίνακας 8.1** Συγκεντρώσεις χημικών ουσιών – ρύπων, Πηγή : Δημοτική επιχείρηση Ύδρευσης Χίου

| **ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **$Cl^-$ (mg/l)** | **Na (mg/l)** | **Mg (mg/l)** | **Ca (mg/l)** | **$SO_4^{-2}$ (mg/l)** | **$NO_3^-$ (mg/l)** |
| **ΒΑΡΒΑΣΙΟΥ Γ4** | 990 | 250 | 97 | 384 | 220 | 155 |
| **ΓΚΙΑΛΗ ΤΕΤΤΕΡΗ Γ5** | 480 | 150 | 46 | 160 | 75 | 28 |
| **ΚΟΥΤΡΟΥΛΟΜΥΛΟΥ Γ7** | 1030 | 400 | 70 | 240 | 135 | 38 |
| **ΠΑΤΑΠΗ Γ9** | 315 | 120 | 58 | 184 | 75 | 44 |
| **ΧΑΛΚΟΥΣΗ Γ11** | 920 | 382 | 73 | 192 | 105 | 22 |
| **Ε.Μ ΧΙΟΥ Γ18** | 600 | 210 | 117 | 175 | 155 | 48 |
| **ΜΠΟΥΓΔΑΝΟΥ Γ20** | 1240 | 475 | 140 | 215 | 144 | 46 |
| **Ε.Γ.Σ ΧΙΟΥ Γ23** | 1135 | 400 | 120 | 240 | 165 | 57 |
| **ΠΙΤΤΑ-ΞΥΛΑ Γ24** | 1135 | 410 | 115 | 255 | 195 | 53 |

| **ΧΕΙΜΩΝΑΣ** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **$Cl^-$ (mg/l)** | **Na (mg/l)** | **Mg (mg/l)** | **Ca (mg/l)** | **$SO_4^{-2}$ (mg/l)** | **$NO_3^-$ (mg/l)** |
| **ΒΑΡΒΑΣΙΟΥ Γ4** | 1030 | 380 | 100 | 208 | 165 | 35 |
| **ΓΚΙΑΛΗ ΤΕΤΤΕΡΗ Γ5** | 710 | 290 | 44 | 208 | 80 | 33 |
| **ΚΟΥΤΡΟΥΛΟΜΥΛΟΥ Γ7** | 990 | 410 | 70 | 230 | 100 | 32 |
| **ΠΑΤΑΠΗ Γ9** | 345 | 115 | 54 | 160 | 315 | 45 |
| **ΧΑΛΚΟΥΣΗ Γ11** | 1240 | 575 | 88 | 224 | 100 | 28 |
| **Ε.Μ ΧΙΟΥ Γ18** | 990 | 375 | 126 | 160 | 125 | 45 |
| **ΜΠΟΥΓΔΑΝΟΥ Γ20** | 1560 | 735 | 141 | 224 | 134 | 32 |
| **Ε.Γ.Σ ΧΙΟΥ Γ23** | 1985 | 820 | 134 | 288 | 188 | 34 |
| **ΠΙΤΤΑ-ΞΥΛΑ Γ24** | 1310 | 410 | 93 | 224 | 135 | 32 |

Παρατηρούμε πως στα περισσότερα χημικά στοιχεία τον χειμώνα έχω υψηλότερες τιμές συγκεντρώσεων από ότι το καλοκαίρι. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μετακίνηση του μετώπου υφαλμύρινσης προς την ακτή τον χειμώνα και το λεγόμενο «ξέβγαλμα» των γεωλογικών κοιλοτήτων από τα στοιχεία αυτά. Τα μονιμότερα αποθέματα του χειμώνα λόγω μικρότερης άντλησης εξηγούν την εμφάνιση συγκεντρώσεων νατρίου και μαγνησίου που οφείλονται στο φαινόμενο της υφαλμύρινσης. Οι ενώσεις που οφείλουν την παρουσία τους στα λιπάσματα του καλοκαιριού όπως τα νιτρικά και τα θειικά λόγω του είδους των καλλιεργειών (εσπεριδοειδή) που χρησιμοποιούν λιπάσματα και τον χειμώνα έχω σημαντικές διαφορές στις παρατηρούμενες συγκεντρώσεις και κατά επέκταση στο φαινόμενο μεταφοράς και διασποράς. Τέλος λόγω και τις λιθολογικής σύστασης της περιοχής η αναλογία κάλιο/ νάτριο επηρεάζεται από τους ψαμμίτες και οι τιμές του μαγνησίου από τους δολομίτες.

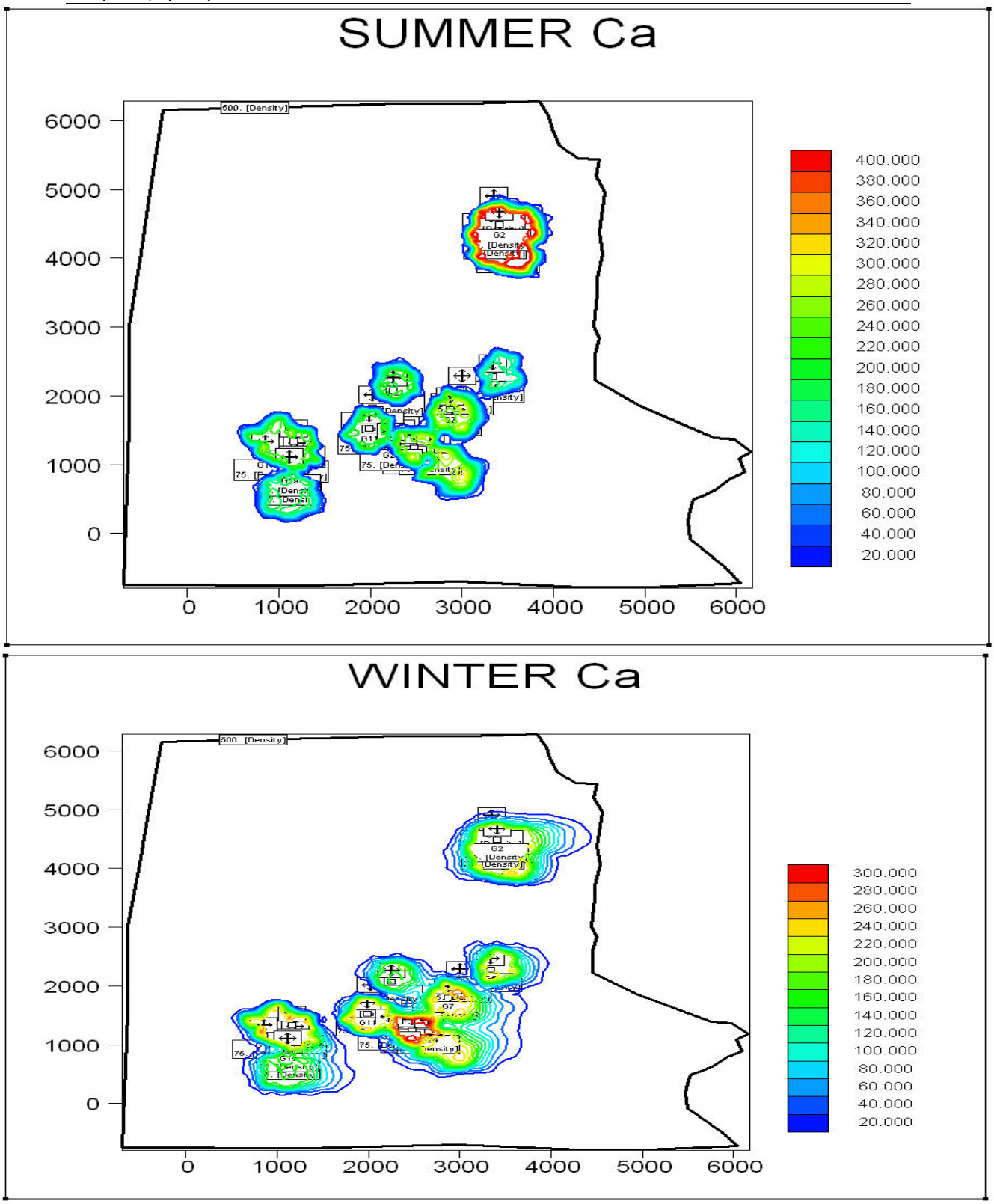
Στη συνέχεια θα δούμε τα αποτελέσματα τόσο για την θερινή περίοδο ( Απρίλιος – Σεπτέμβριος ) πρώτα και μετά για τη χειμερινή περίοδο ( Οκτώβριος – Μάρτιος). Τα αποτελέσματα στα σχήματα που ακολουθούν έχουν τις μικρότερες τιμές συγκέντρωσης ήδη πάνω από το επιτρεπτό όριο για το πόσιμο νερό. Για κάθε χημικό στοιχείο – ρύπο η μοριακή διάχυση που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

***Πίνακας 8.2 :*** *Συντελεστές μοριακής διάχυσης [11]*

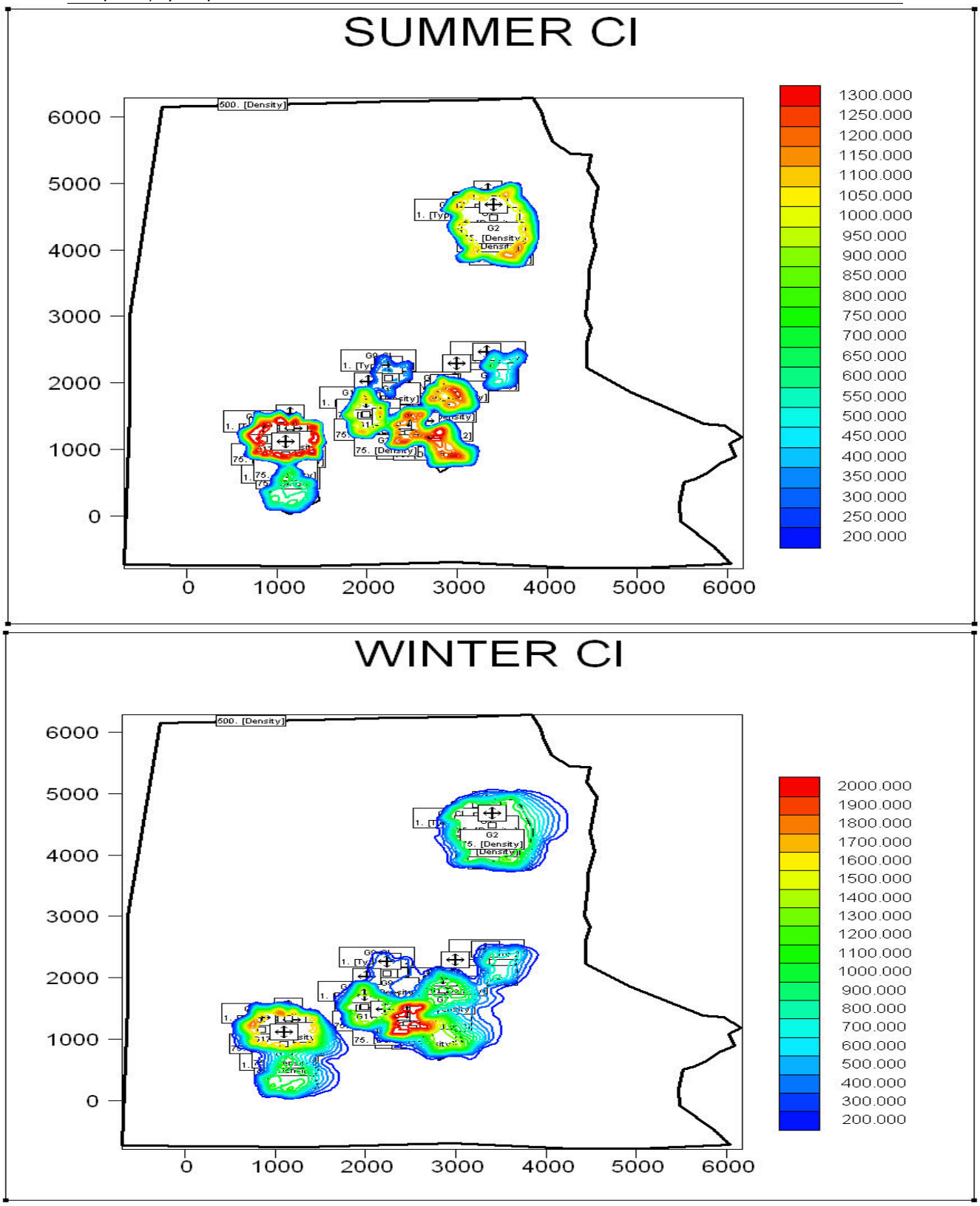
| **Χημικό στοιχείο - Ρύπος** | **Μοριακή διάχυση ($m^2$/day)** |
|---|---|
| **$Cl^-$** | 0.0261 |
| **Na** | 0.0291 |
| **Mg** | 0.00052 |
| **Ca** | 0.00061 |
| **$SO_4^{-2}$** | 0.00086 |
| **$NO_3^-$** | 0.0015 |

***Πίνακας 8.3 :*** *Συντελεστές διασποράς [11]*

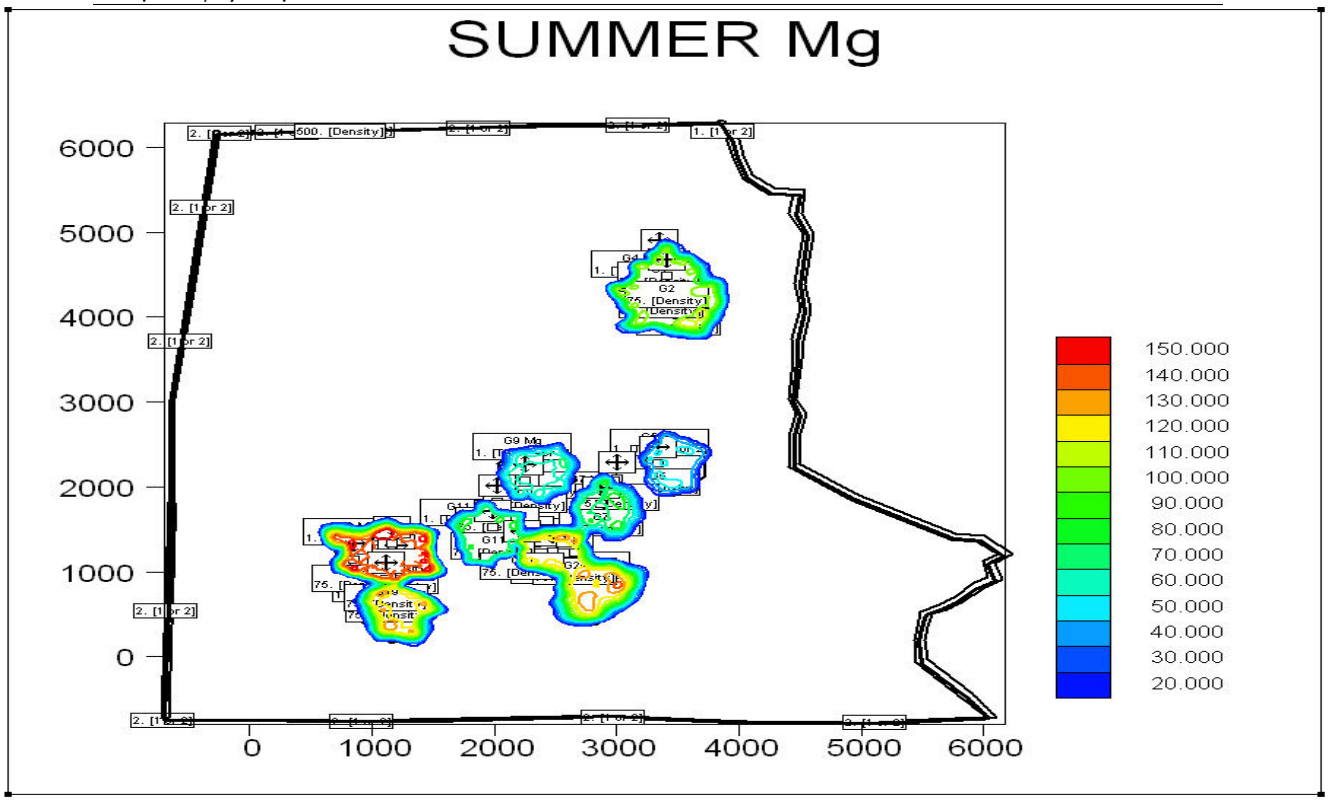
| **Κατεύθυνση** | **Συντελεστής ($m^2$/day)** |
|---|---|
| **X** | 0.0261 |
| **Y** | 0.0291 |
| **Z** | 0.00052 |

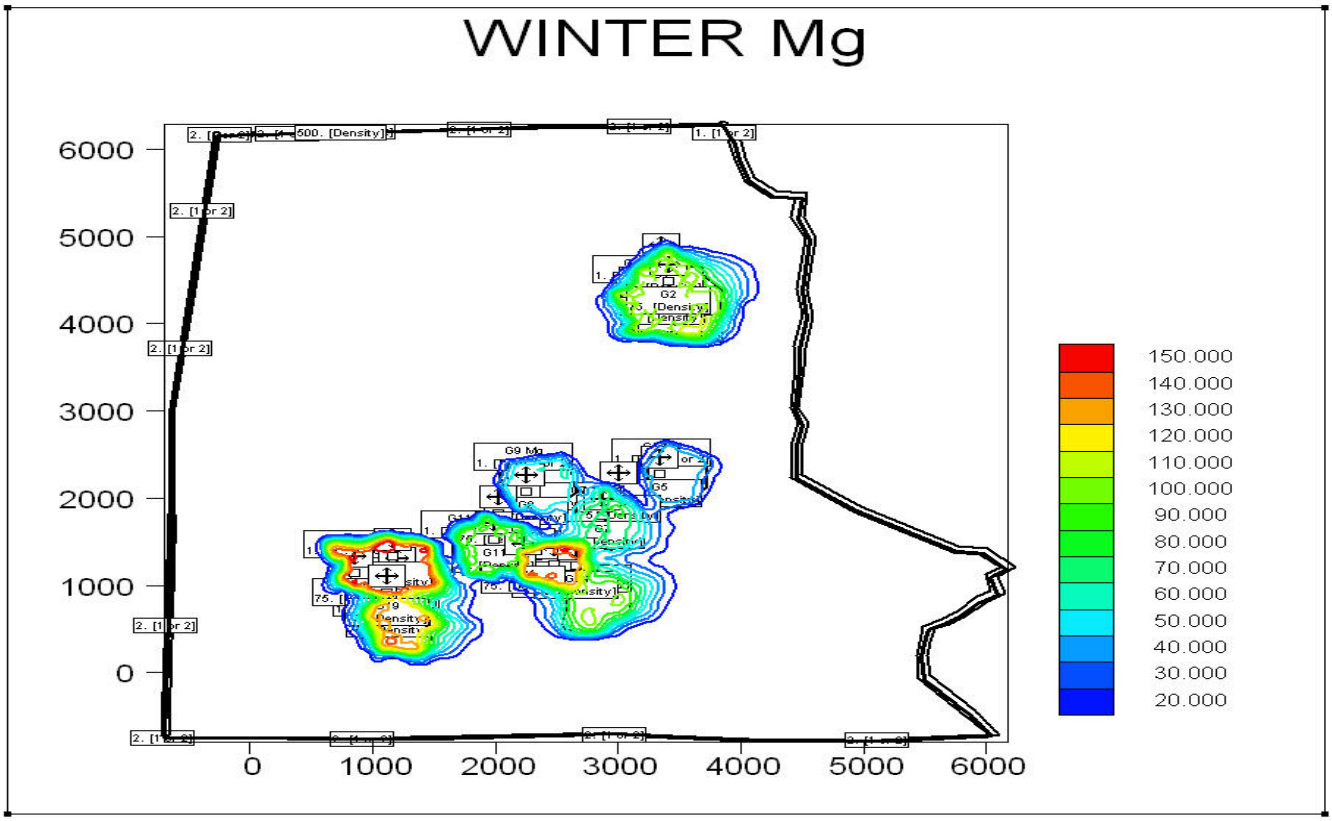



***Σχήμα 8.5*** *: Αρχικό σενάριο ασβεστίου (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*

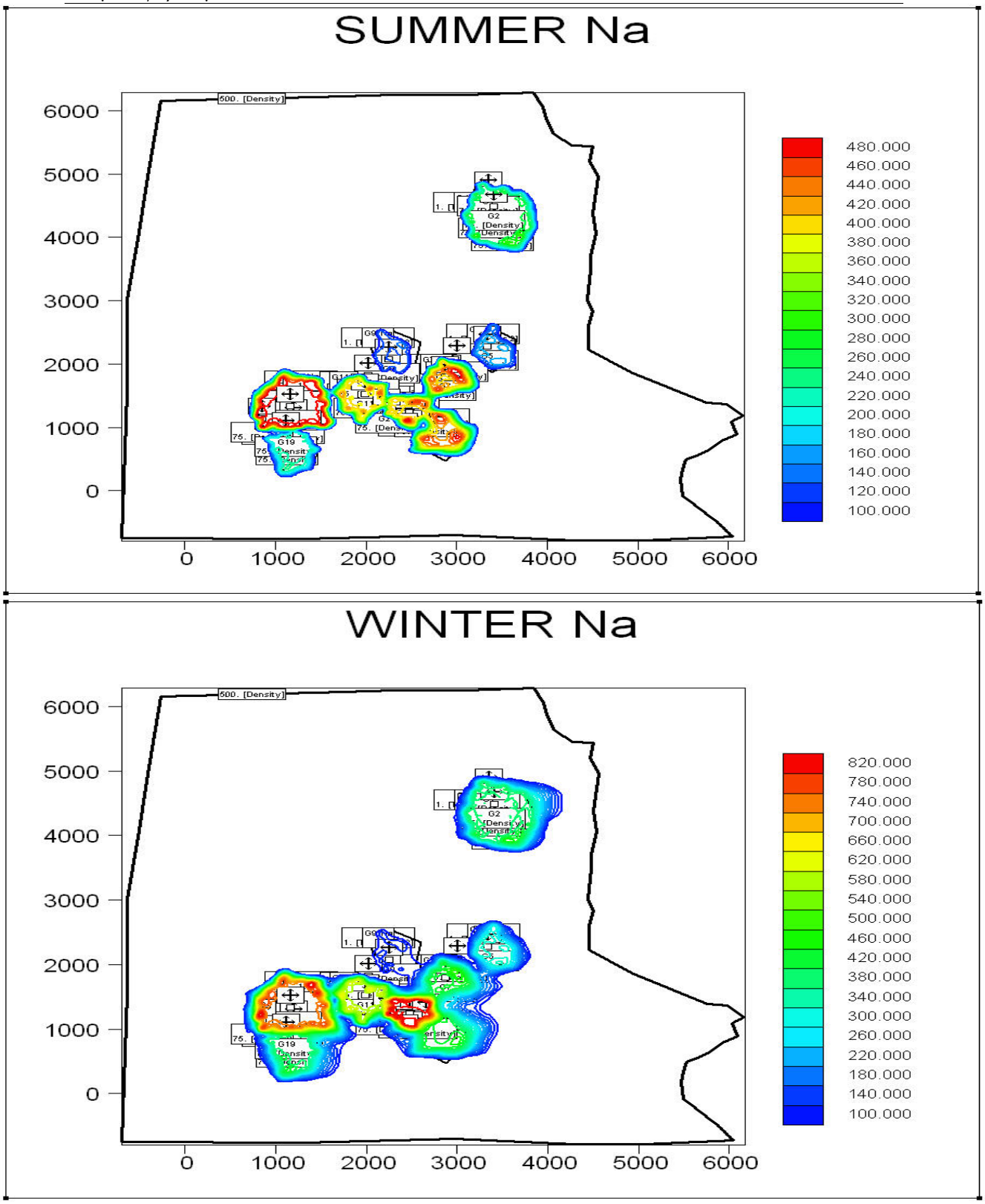



***Σχήμα 8.6*** *: Αρχικό σενάριο χλωριόντων (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*

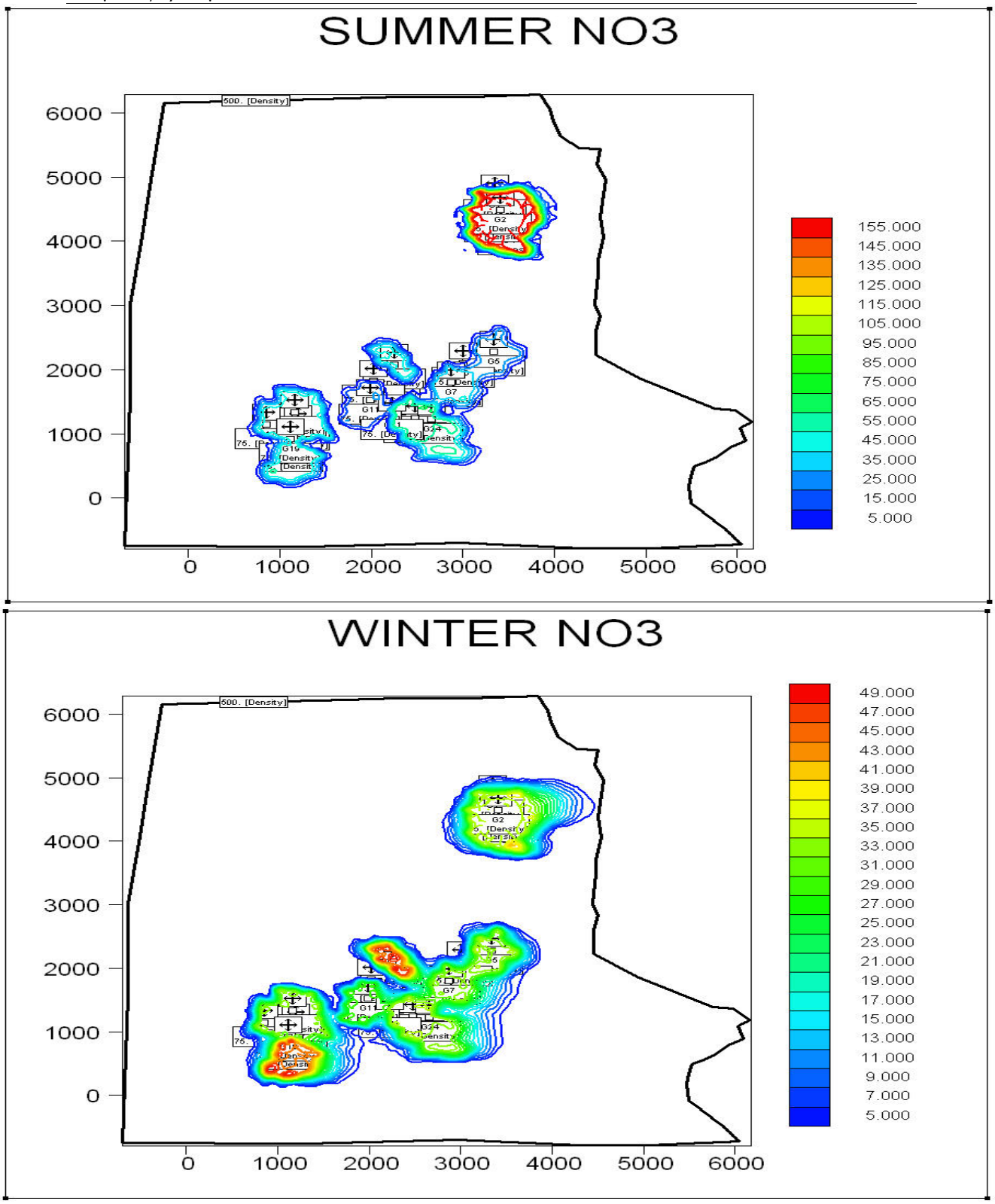


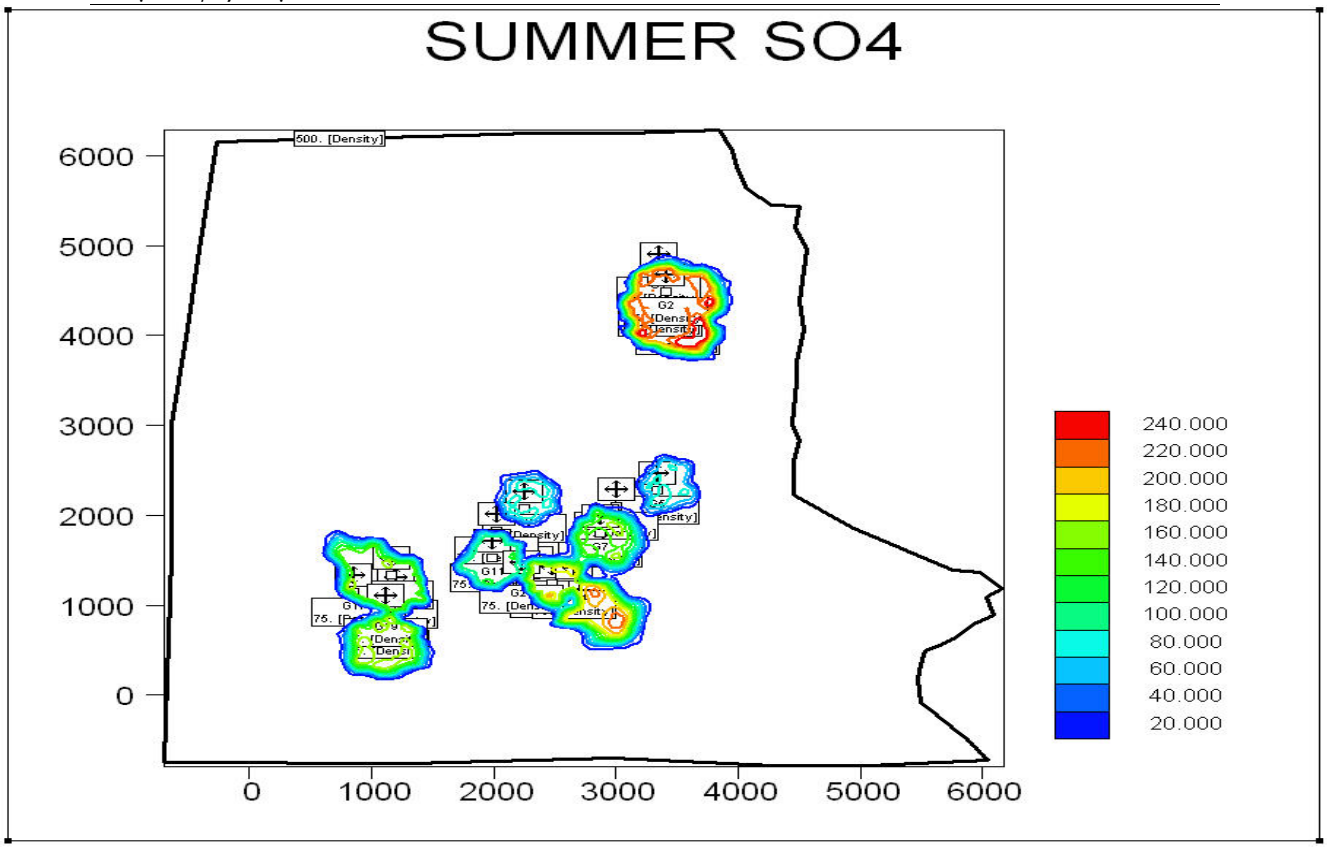

***Σχήμα 8.7*** *: Αρχικό σενάριο μαγνησίου (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*

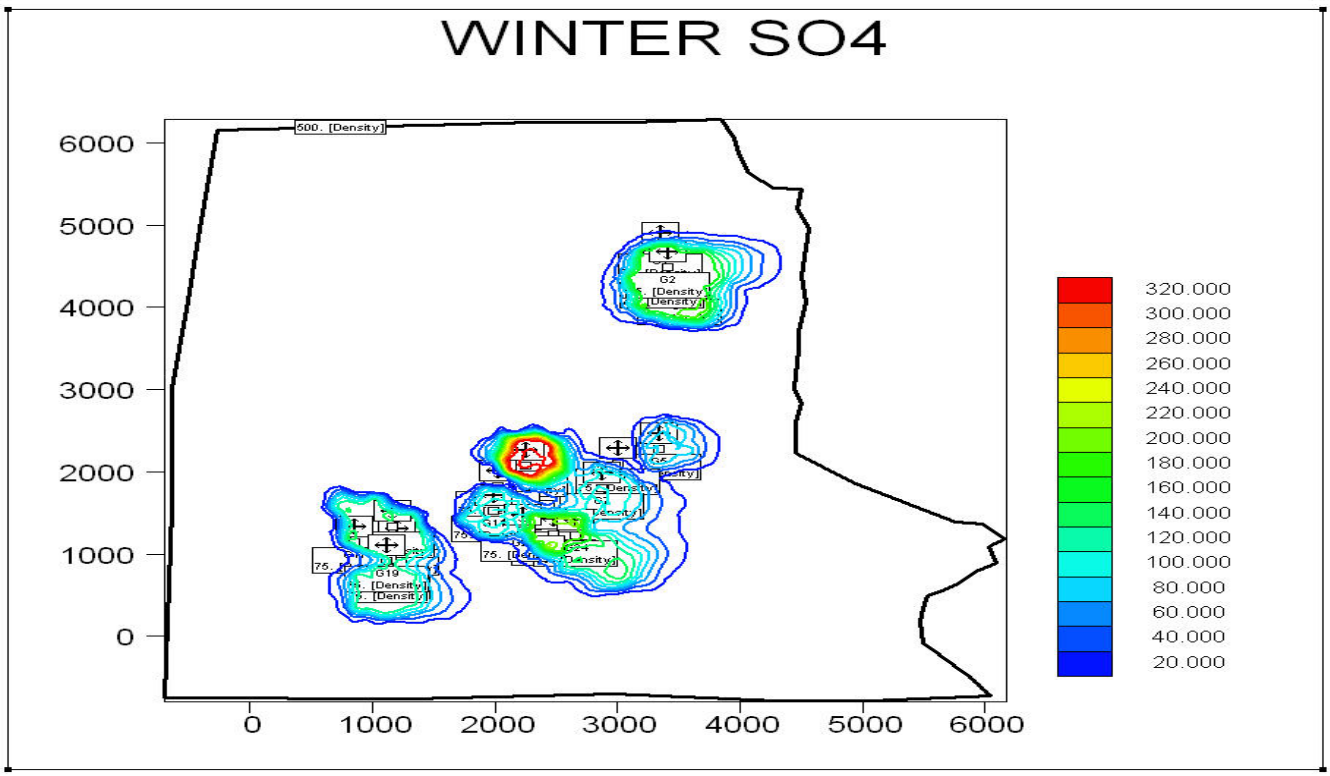



***Σχήμα 8.8*** *: Αρχικό σενάριο νατρίου (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*




***Σχήμα 8.9*** *: Αρχικό σενάριο νιτρικών (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*

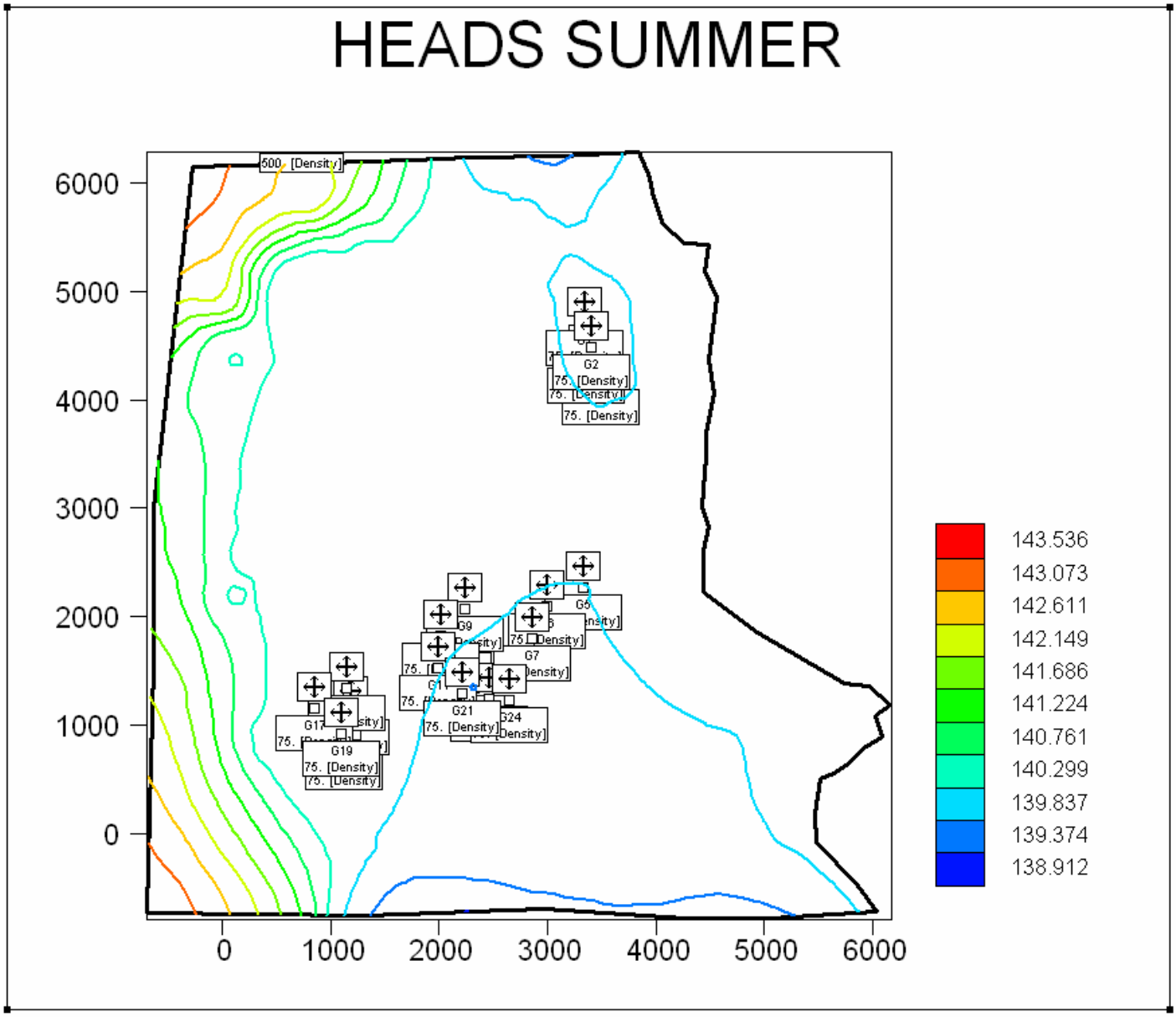



***Σχήμα 8.10*** *: Αρχικό σενάριο θεϊκών (mg/l ) την θερινή και την χειμερινή περίοδο αντίστοιχα*

## 8.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 1$^{O}$ : ΜΕΙΩΣΗ 25% ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

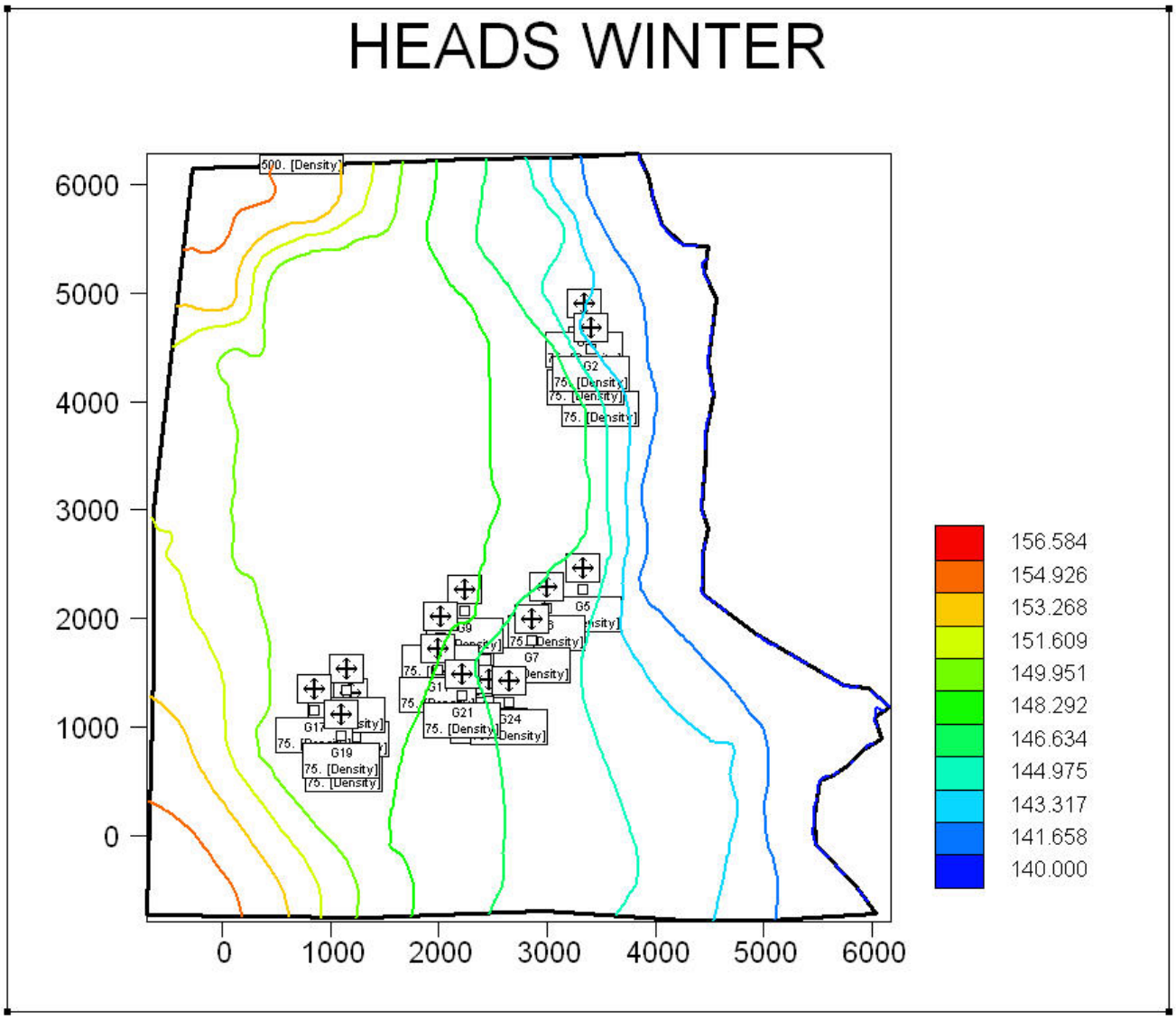
Στο σενάριο αυτό προτείνεται η μείωση του ρυθμού άντλησης κατά 25% με απώτερο σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρινσης και της μεταφοράς ρύπων. Η μείωση αυτή έγινε μόνο για την καλοκαιρινή περίοδο γιατί εκεί παρατηρούνται οι μεγαλύτεροι ρυθμοί άντλησης αλλά και επειδή το χειμώνα μόλις 7 από τις 19 γεωτρήσεις λειτουργούν με μικρότερους ρυθμούς άντλησης από το καλοκαίρι. Θα παρατηρήσουμε που θα φτάσει το μέτωπο υφαλμύρινσης και για τις δύο περιόδους γιατί ακόμα και αν δεν αλλάξουμε καμιά παράμετρο τον χειμώνα υπάρχει σαφή επίδραση μεταξύ των δύο περιόδων. Πάλι θα εξετάσουμε το μέτωπο της υφαλμύρινσης σύμφωνα με την θεωρία Ghyben – Herzgerg και θα παρατηρήσουμε τις μεταβολές στο προφίλ της ταχύτητας μόνο όμως για το καλοκαίρι. Τα αποτελέσματα όπως παρατηρούμε θεωρούνται ανεπαρκή. Μπορεί να έχουμε μείωση του κώνου πτώσης στάθμης αλλά το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα παραμένει σχετικά χαμηλό λόγω και της μικρής βροχόπτωσης αλλά και λόγω της μικρής μείωσης των ρυθμών άντλησης. Τέλος όσον αφορά τα χημικά στοιχεία που εξετάζουμε θα παρουσιάσουμε μόνο τα αποτελέσματα για την θερινή περίοδο αν και δεν συμπεραίνουμε μεγάλες διαφορές στο μέγεθος της ζώνης ρύπανσης σε αντίθεση με τις ισοδυναμικές γραμμές συγκεντρώσεων που αναφέρονται σε χαμηλότερες τιμές από ότι αυτές των αρχικών και πιο ομαλή εξάπλωση αυτών.




***Σχήμα 8.11*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 1$^o$ (-25%)*

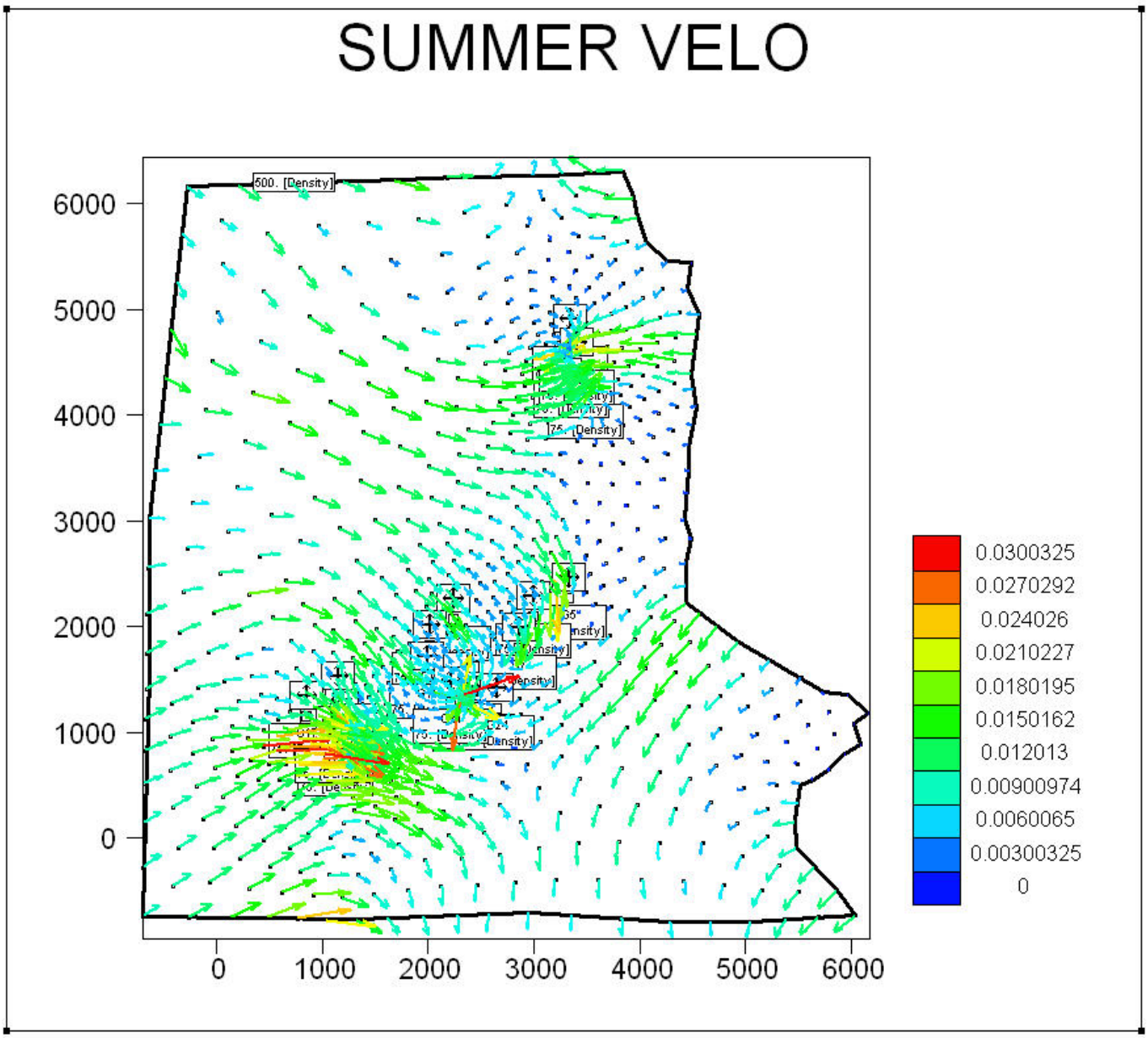
Τα υδραυλικά ύψη που παρατηρούνται το καλοκαίρι κυμαίνονται στις ίδιες τιμές με αυτές των αρχικών συνθηκών. Το μέτωπο της υφαλμύρινης καλύπτει πάλι όλη την περιοχή μελέτης όπου ανήκουν και οι γεωτρήσεις. Σημαντική διαφορά είναι ότι σε αυτό το σενάριο υπάρχουν δύο περιοχές εκτός της ζώνης υφαλμύρινσης. Επίσης φαίνεται ξεκάθαρα ότι η μετατόπιση του φαινομένου έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της

περιοχής μελέτης όπου λόγω των αδιαπέραστων στρωμάτων στα όρια της περιοχής και της μη αλληλεπίδρασης των ακτίνων επιρροής των γεωτρήσεων.



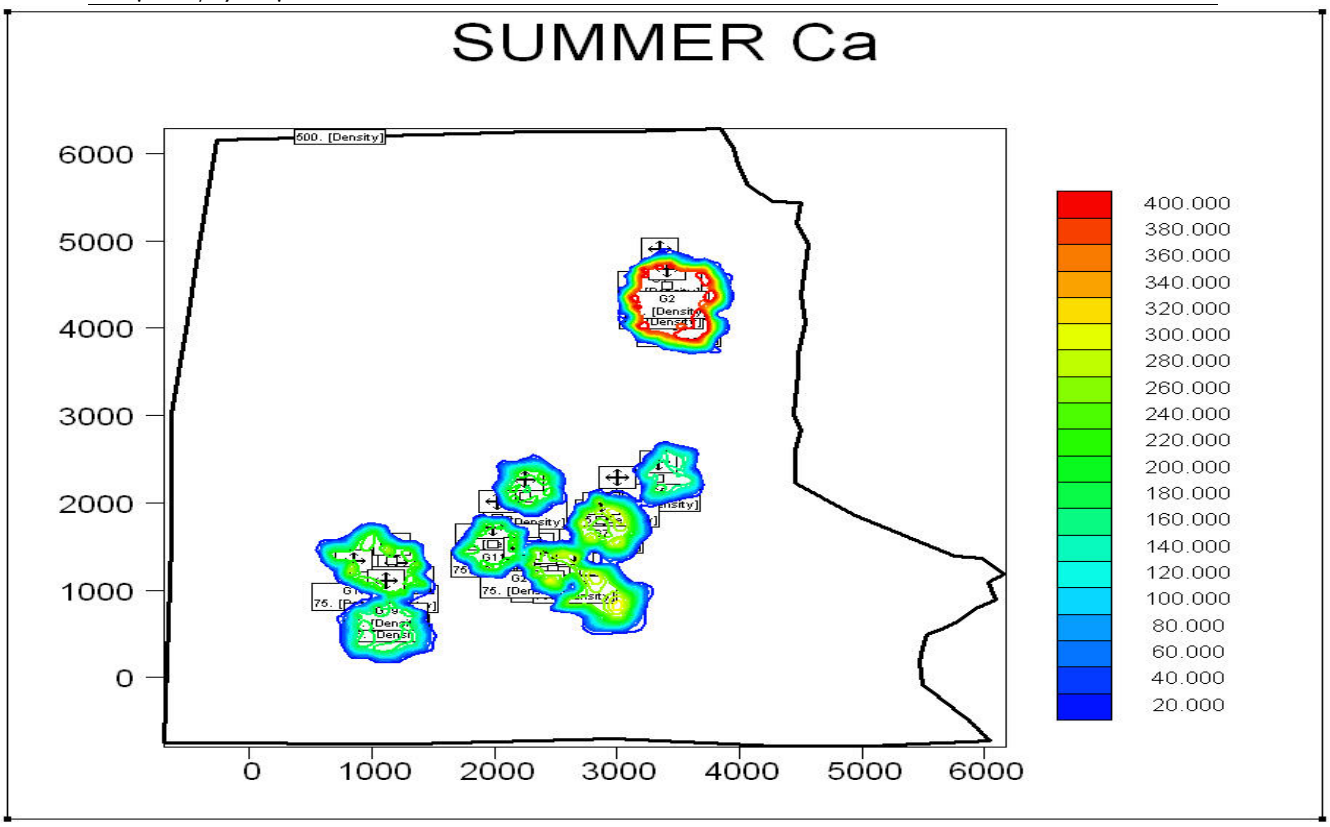

***Σχήμα 8.12*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την χειμερινή περίοδο – Σενάριο 1ο (-25%)*

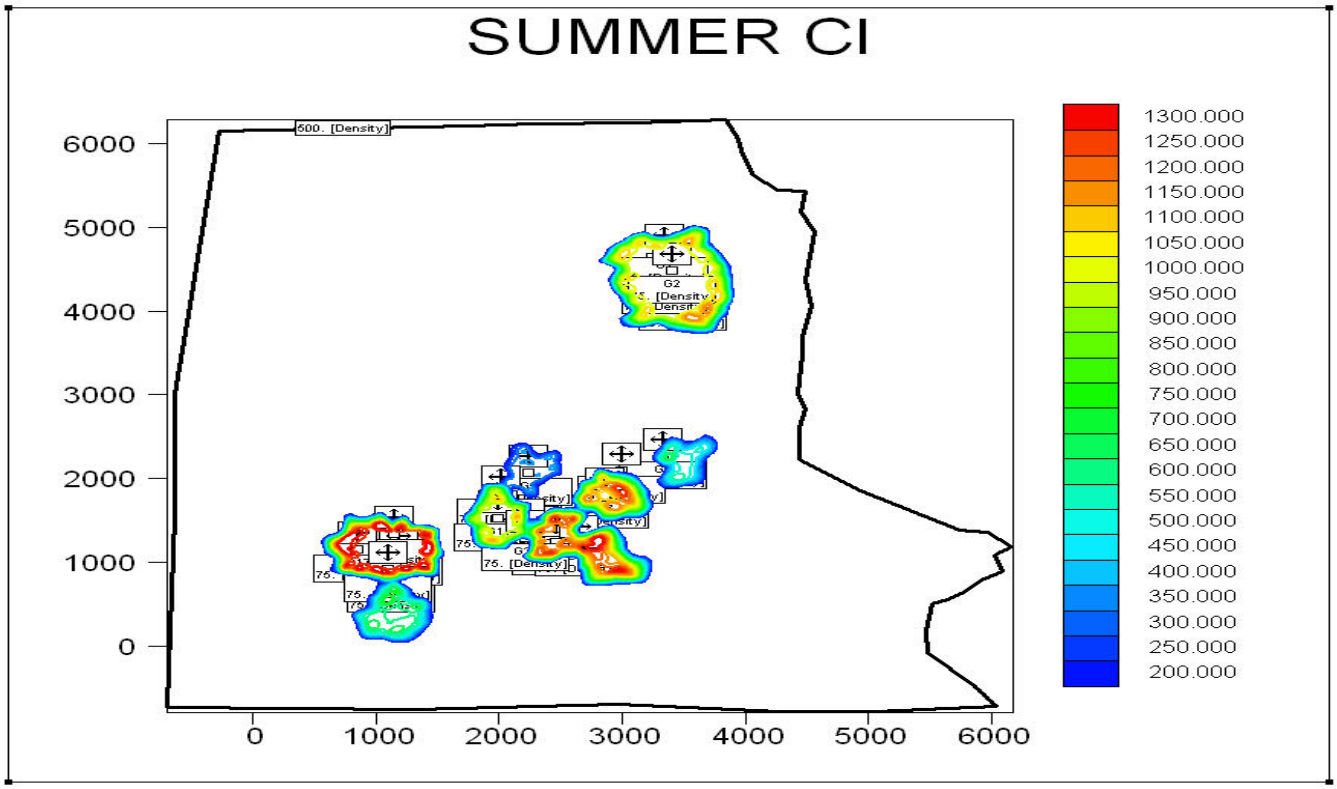
Την περίοδο του χειμώνα υπάρχει μια μετατόπιση του μετώπου προς την ακτή. Οι γεωτρήσεις βρίσκονται εκτός της υφάλμυρης περιοχής εκτός από τις γεωτρήσεις της βορειοανατολικής πλευράς εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με την θερινή περίοδο και τη δυσκολία περιορισμού του φαινομένου. Βελτίωση παρατηρείται και στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα λόγω μικρότερων παροχών άντλησης.



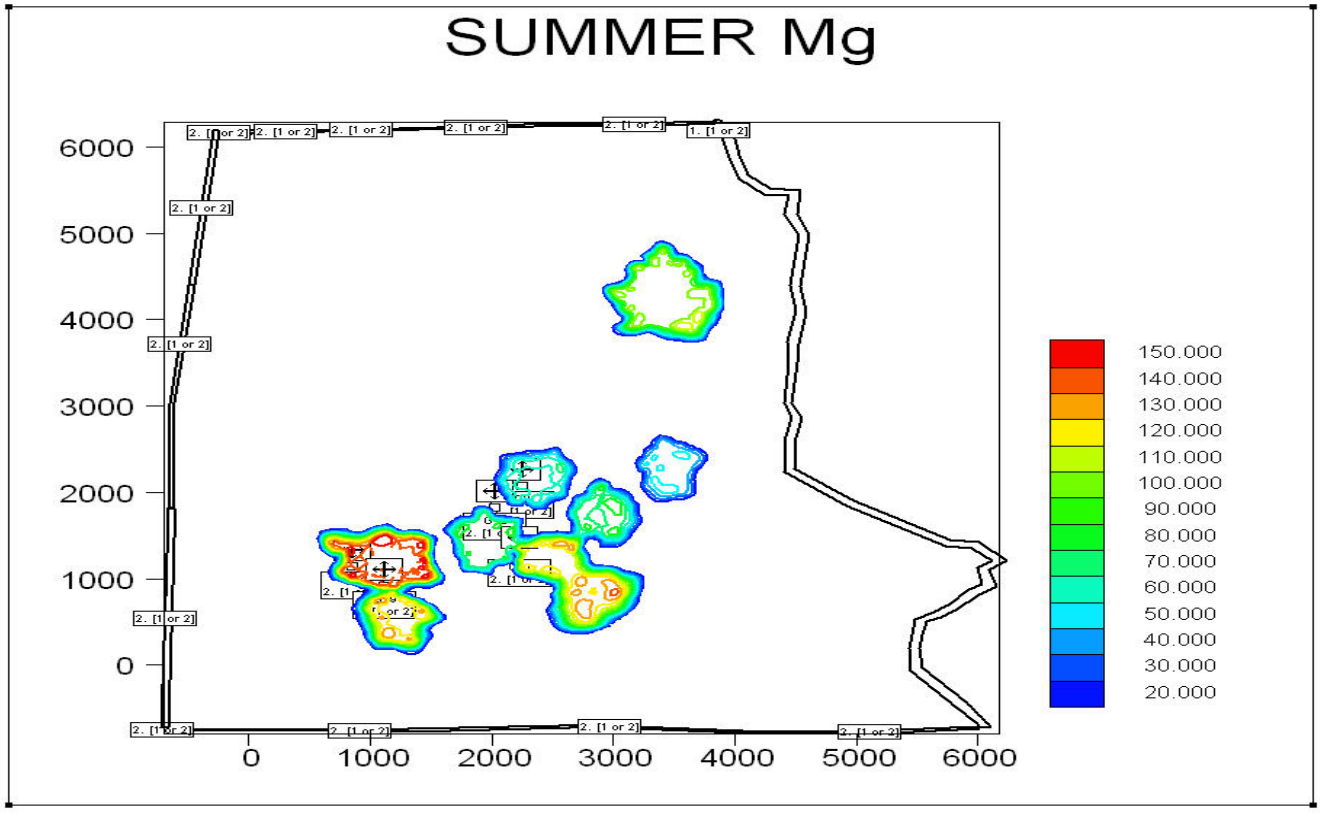

***Σχήμα 8.13*** *: Προφίλ ταχύτητας (m/d) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 1$^{o}$ (-25%)*

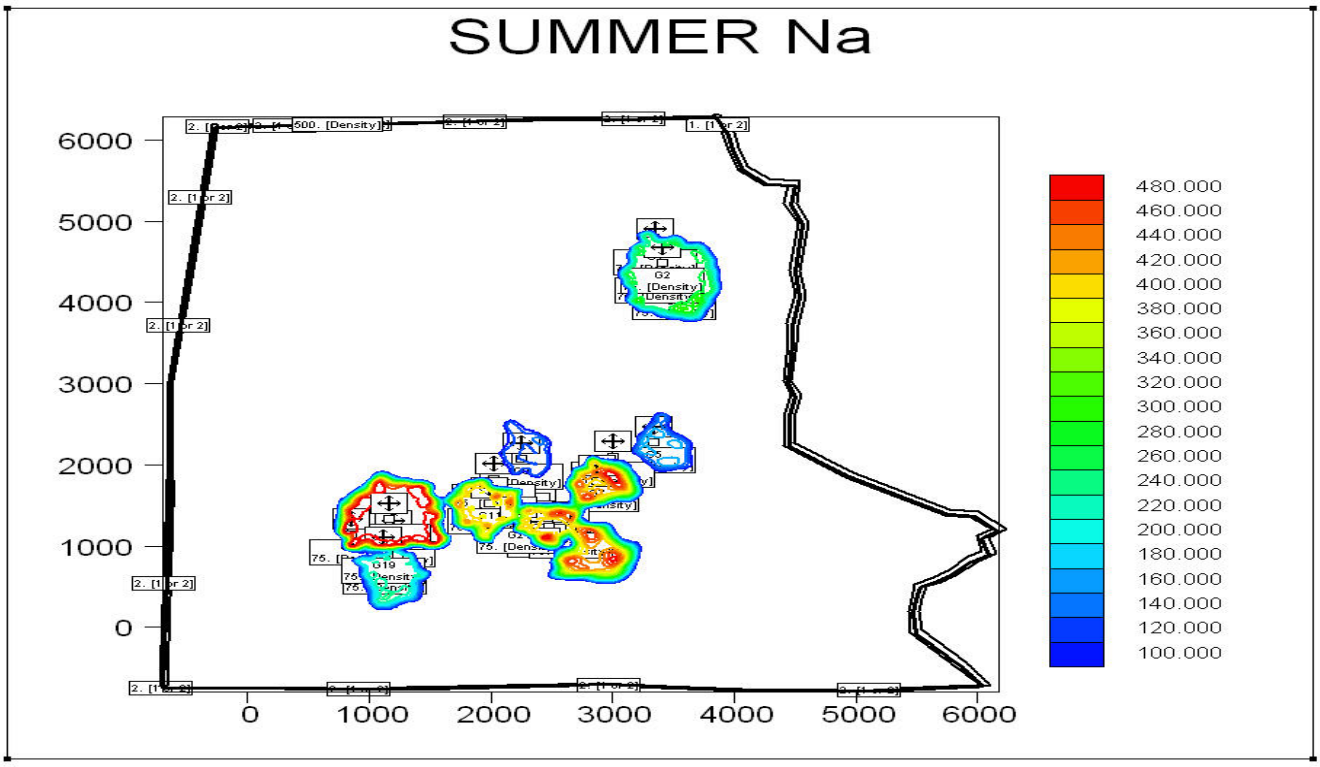
Όσο για τις ταχύτητες υπάρχει μια μείωση αλλά θεωρείται ελάχιστη η διαφορά με τις αρχικές τιμές της τάξης (στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο) και άλλωστε δεν επηρεάζει την ροή του υδροφορέα μας.



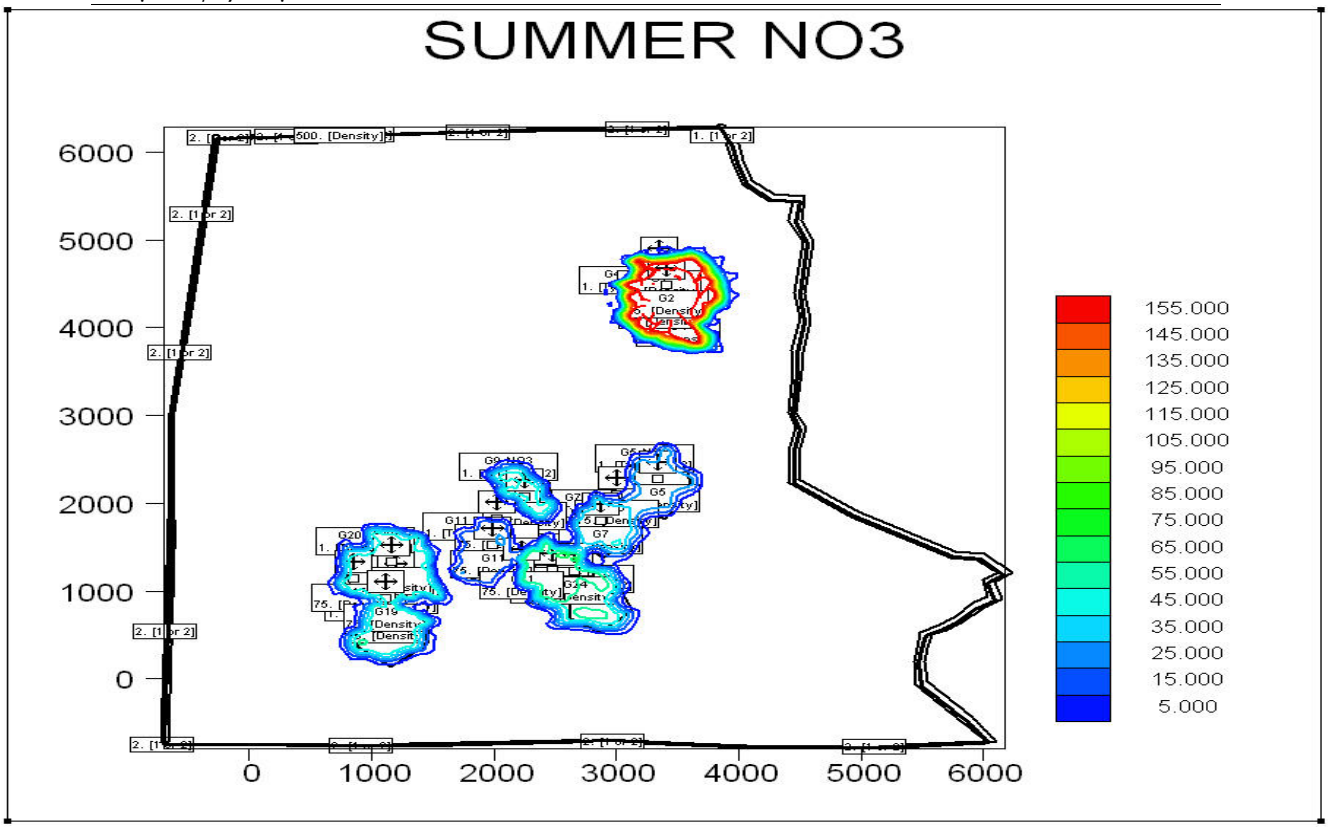



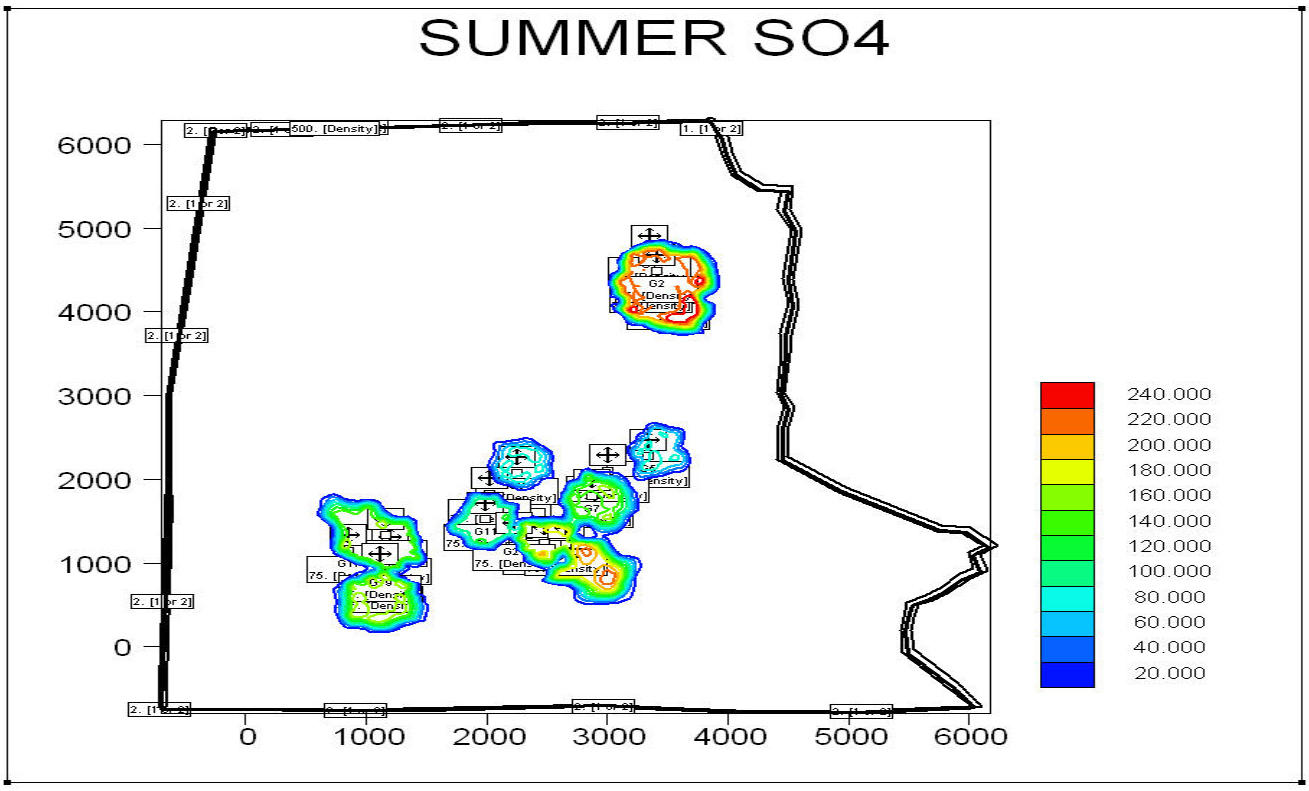

***Σχήμα 8.14*** *: Προφίλ μεταφοράς ασβεστίου και χλωριόντων το καλοκαίρι – Σενάριο 1ο (-25%)*




***Σχήμα 8.15*** *: Προφίλ μεταφοράς μαγνησίου και νατρίου το καλοκαίρι – Σενάριο 1ο (-25%)*



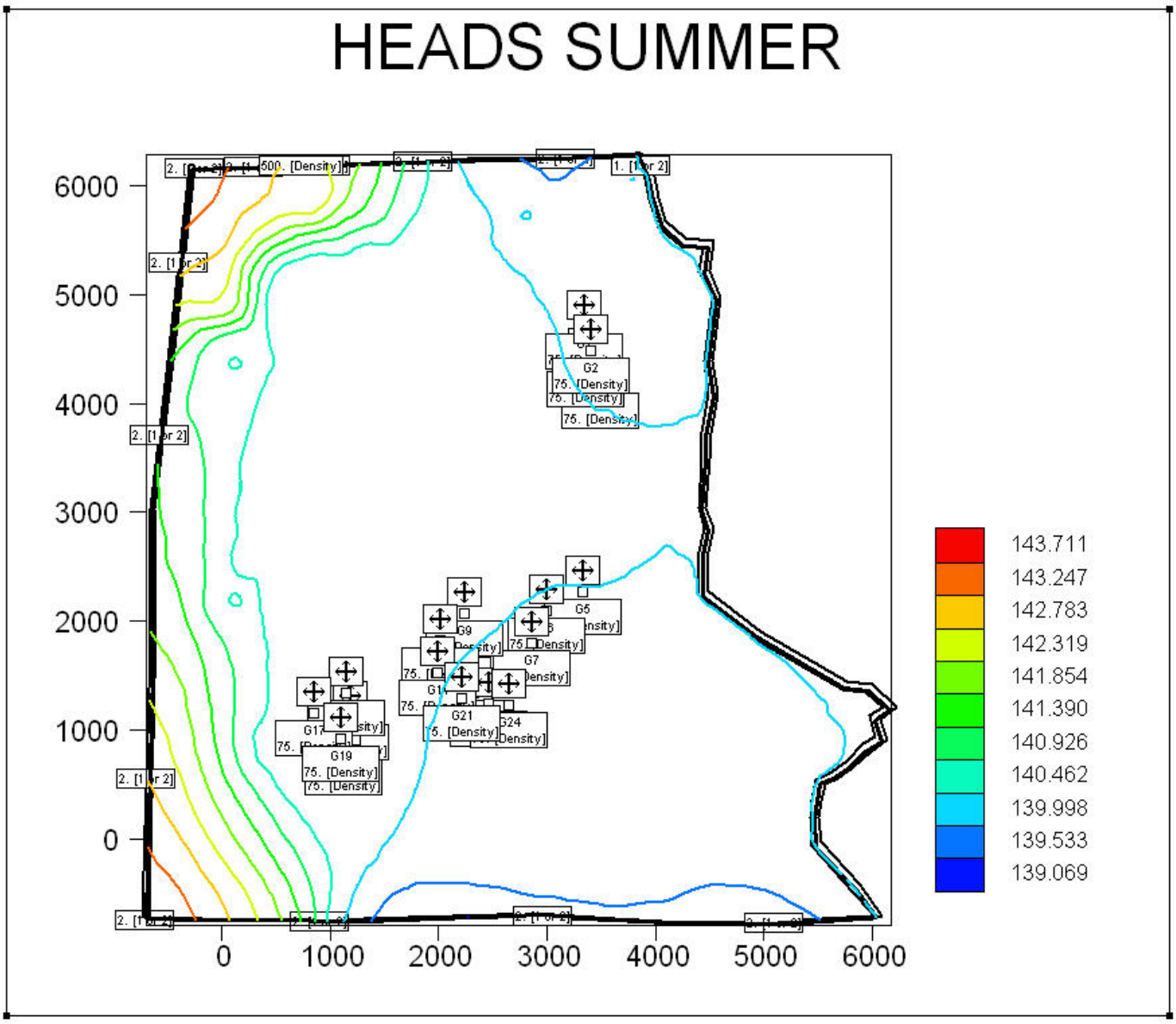




***Σχήμα 8.16*** *: Προφίλ μεταφοράς νιτρικών και θεϊκών το καλοκαίρι – Σενάριο 1ο (-25%)*

## 8.4 ΣΕΝΑΡΙΟ 2$^{O}$ : ΜΕΙΩΣΗ 50% ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

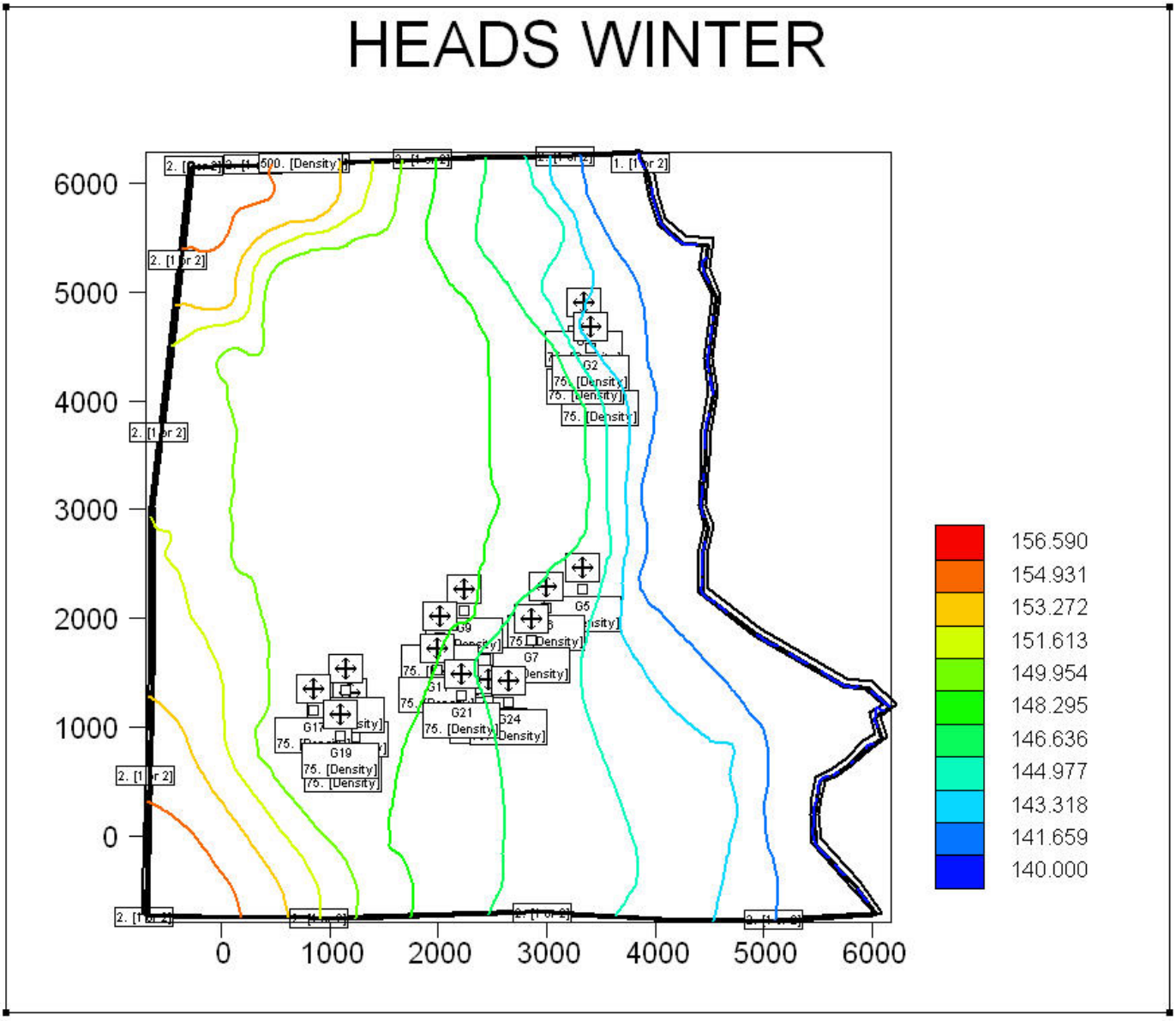
Με τον διπλασιασμό της μείωσης των ρυθμών άντλησης ελπίζουμε πως θα έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Πάλι θα εξετάσουμε μόνο την επίδραση για την καλοκαιρινή περίοδο. Από τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι η περαιτέρω μείωση δεν επέφερε σημαντικές αλλαγές και η περιοχή παραμένει υποβαθμισμένη τόσο λόγω του φαινομένου της υφαλμύρινης όσο και από τις συγκεντρώσεις των χημικών στοιχείων και την διασπορά αυτών. Αν λάβουμε υπόψη ότι δεν έχουμε συμπεριλάβει και όλες τις γεωτρήσεις της περιοχής και το πιθανό σενάριο αλλαγής των ρυθμών άντλησης τότε το επόμενο σενάριο θα πρέπει να είναι πολύ πιο δραστικό.

Πιο αναλυτικά οι συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών παραμένουν πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια που έχουν θεσπίσει η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας και η Ευρωπαϊκή Ένωση και ακόμα καλύπτουν μεγάλο μέρος της υπό μελέτης περιοχή.



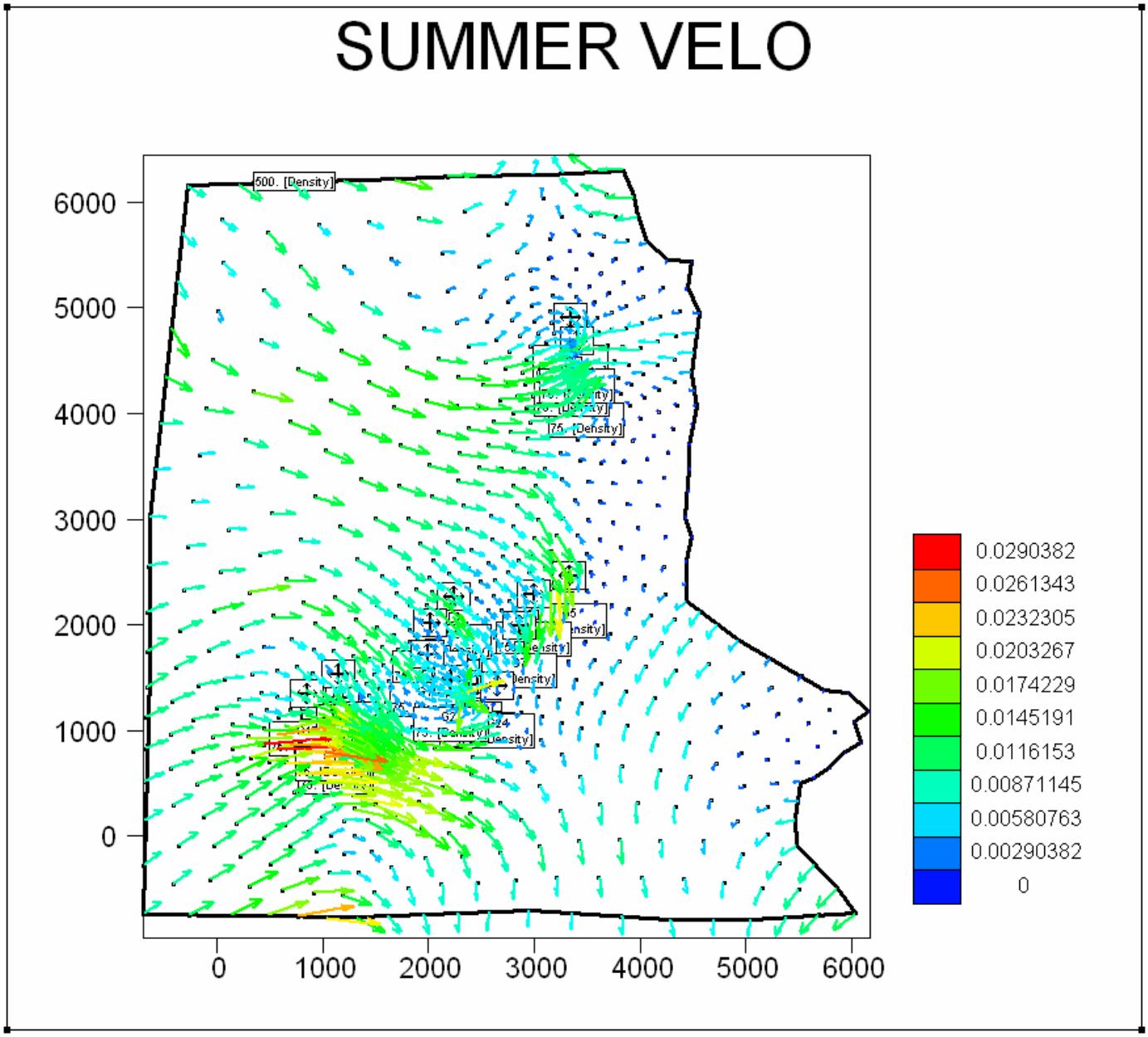

***Σχήμα 8.17*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 2ο (-50 %)*

Πάλι το μέτωπο της υφαλμύρινσης καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του Κάμπου της Χίου. Παρατηρείται βέβαια σημαντική αλλαγή στην διαμόρφωση του μετώπου της υφαλμύρινσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ισοδυναμική γραμμή των 139 μ<140 μ. στάθμη θάλασσας που καταλήγει στην θάλασσα και ταυτόχρονα υπάρχει στο όριο της περιοχής που έχουμε θέσει ως όριο εξόδου δηλαδή το εύρος της ρύπανσης έχει εξαπλωθεί και εκτός της περιοχής μελέτης.



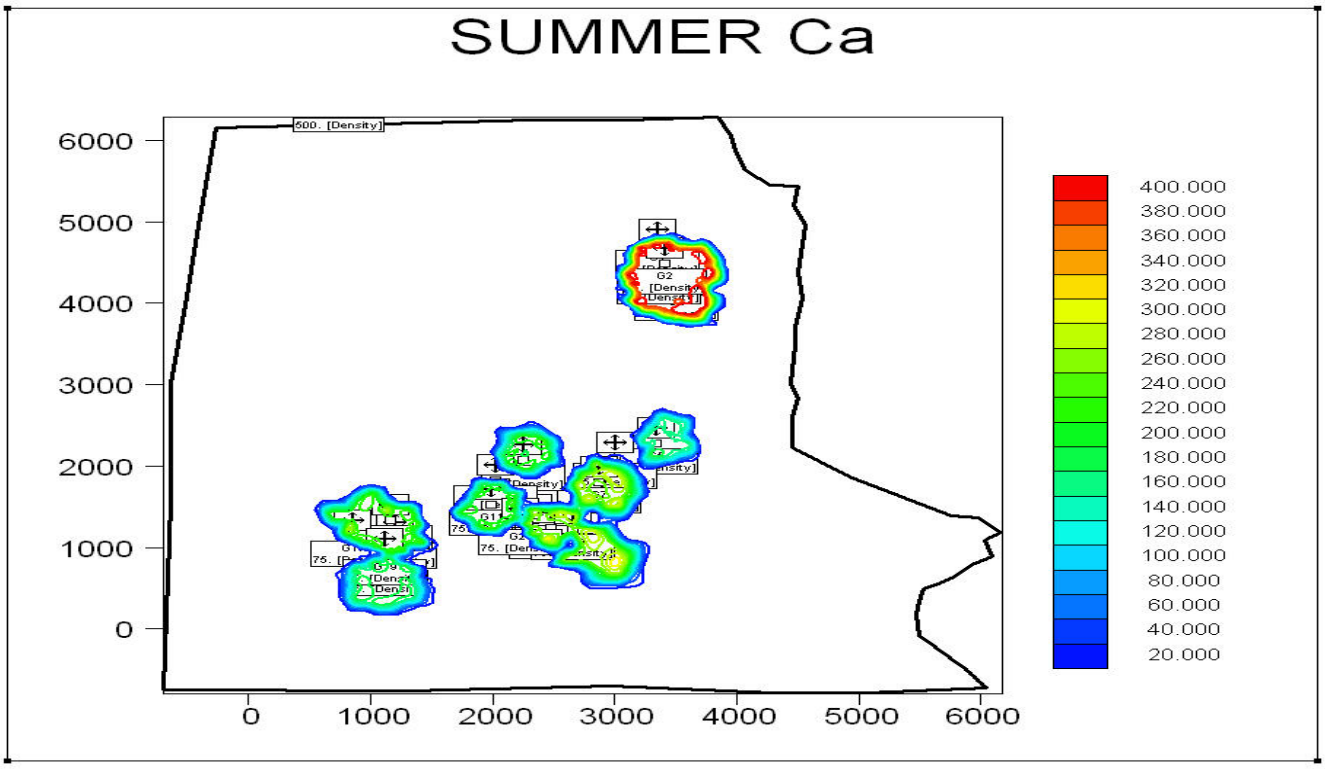

***Σχήμα 8.18*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την χειμερινή περίοδο – Σενάριο 2$^{ο}$ (-50 %)*

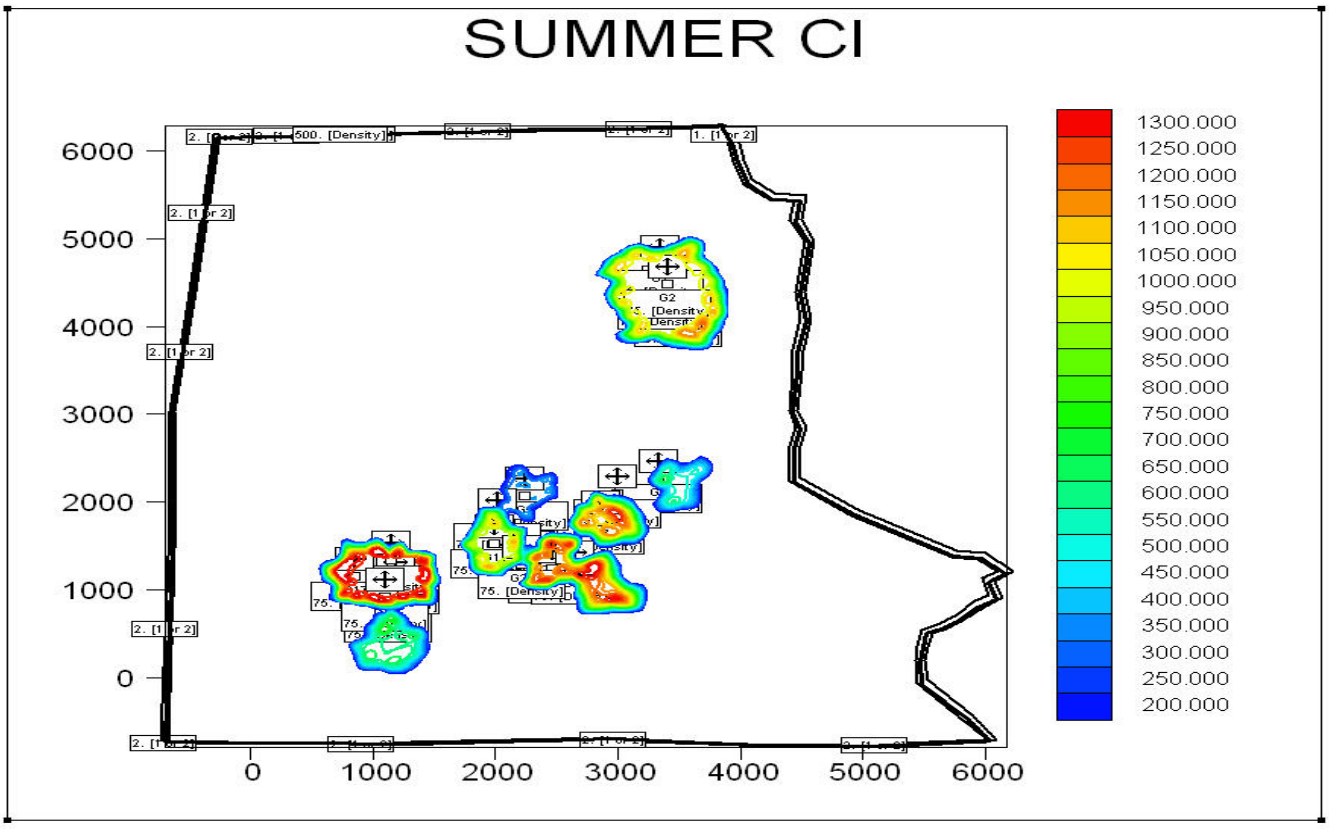
Το χειμώνα παραμένει καλύτερη η κατάσταση παρόλο αυτά όμως πάλι οι γεωτρήσεις βρίσκονται εντός της ζώνης υφαλμύρινσης αν και πιο κοντά στην άκρη του μετώπου υφαλμύρινσης. Τα αστικά και περί- αστικά κέντρα είναι στο όριο της υφάλμυρης περιοχής. Μόνο οι γεωτρήσεις στη νοτιοδυτική πλευρά βρίσκονται εκτός του μετώπου της υφαλμύρινσης. Αν είχαμε μεγαλύτερη τιμή βροχόπτωσης τότε θα μπορούσαμε να μιλάμε για φυσιολογικά επίπεδα υφαλμύρινσης για παράκτια περιοχή.



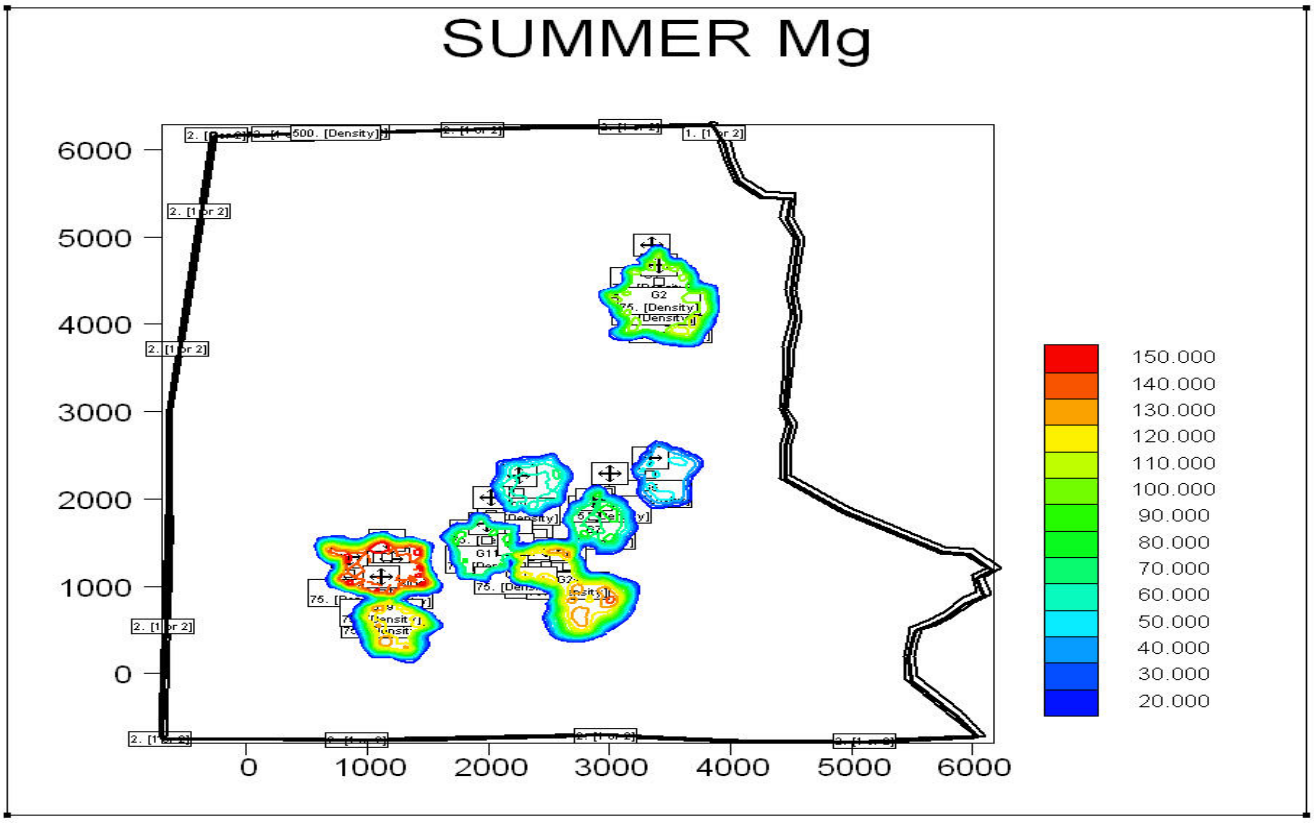

***Σχήμα 8.19*** *: Προφίλ ταχύτητας (m/d) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 2ο (-50 %)*

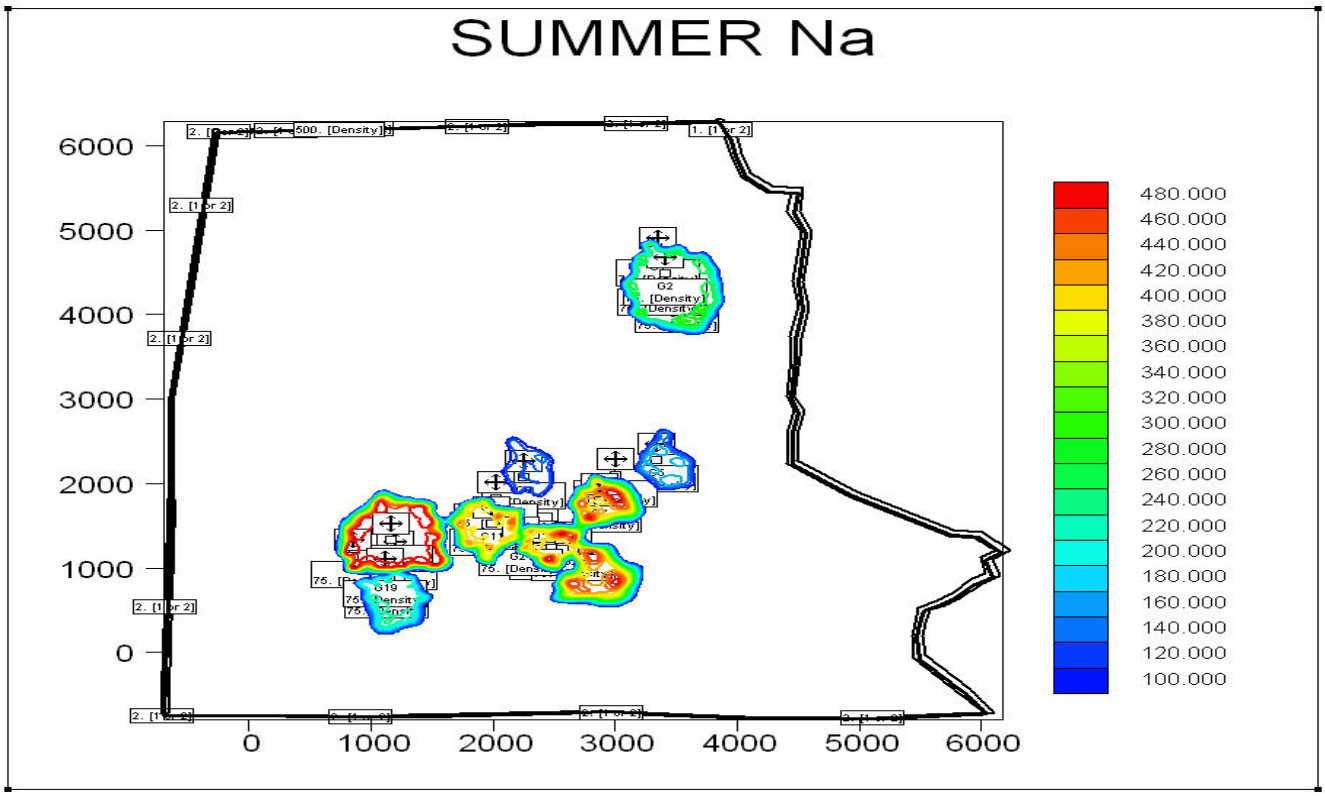
Παρατηρείται βέβαια σημαντική μείωση της ταχύτητας τους καλοκαιρινούς μήνες (0,029<0,039) με αποτέλεσμα τον μεγαλύτερο χρόνο εγκλωβισμού και δέσμευσης χημικών ουσιών είτε από τα πετρώματα είτε από τα νερά που έχουν προέλθει από την υφιστάμενη υφαλμύρινση.



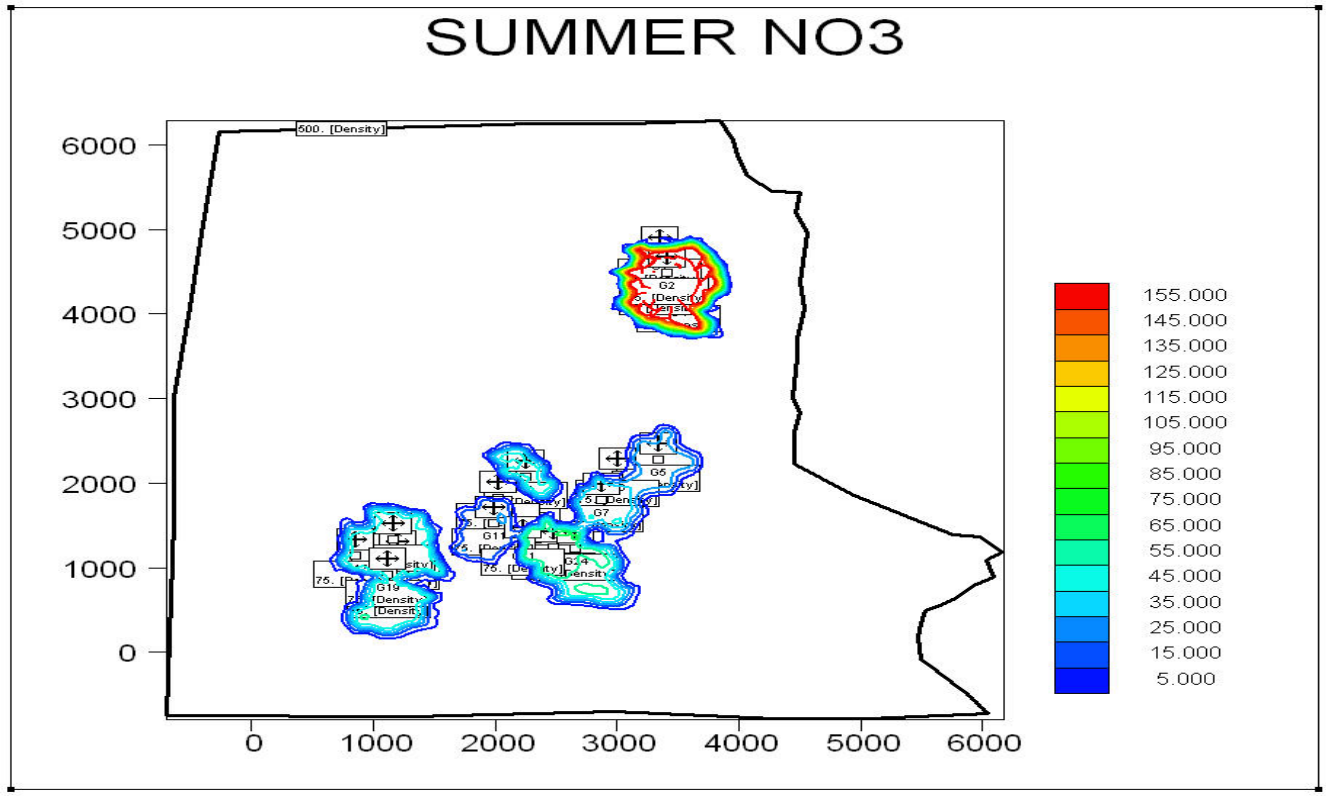



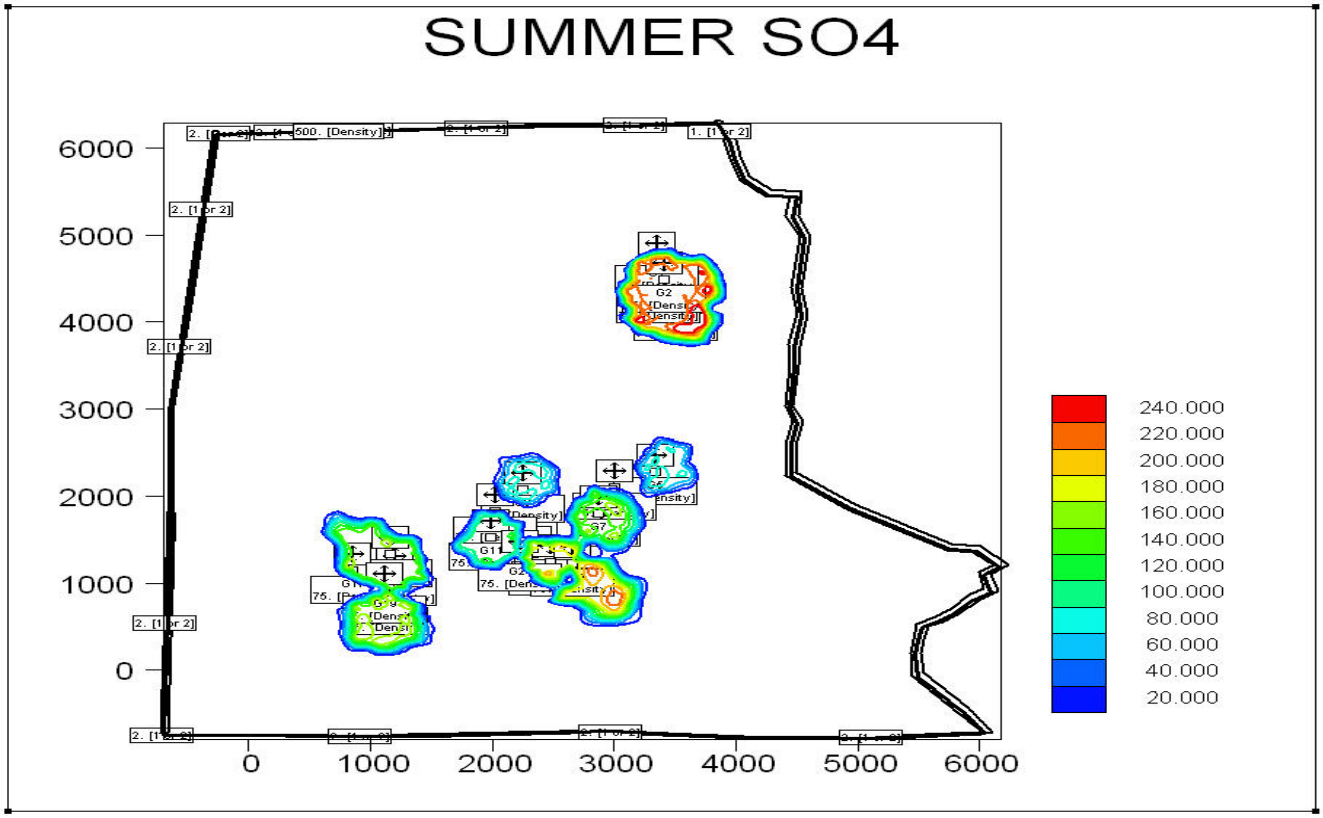

***Σχήμα 8.20*** *: Προφίλ μεταφοράς ασβεστίου και χλωριόντων(mg/l) το καλοκαίρι–Σενάριο2$^{o}$(-50%)*




***Σχήμα 8.21*** *: Προφίλ μεταφοράς μαγνησίου και νατρίου(mg/l) το καλοκαίρι –Σενάριο $2^o$(-50%)*

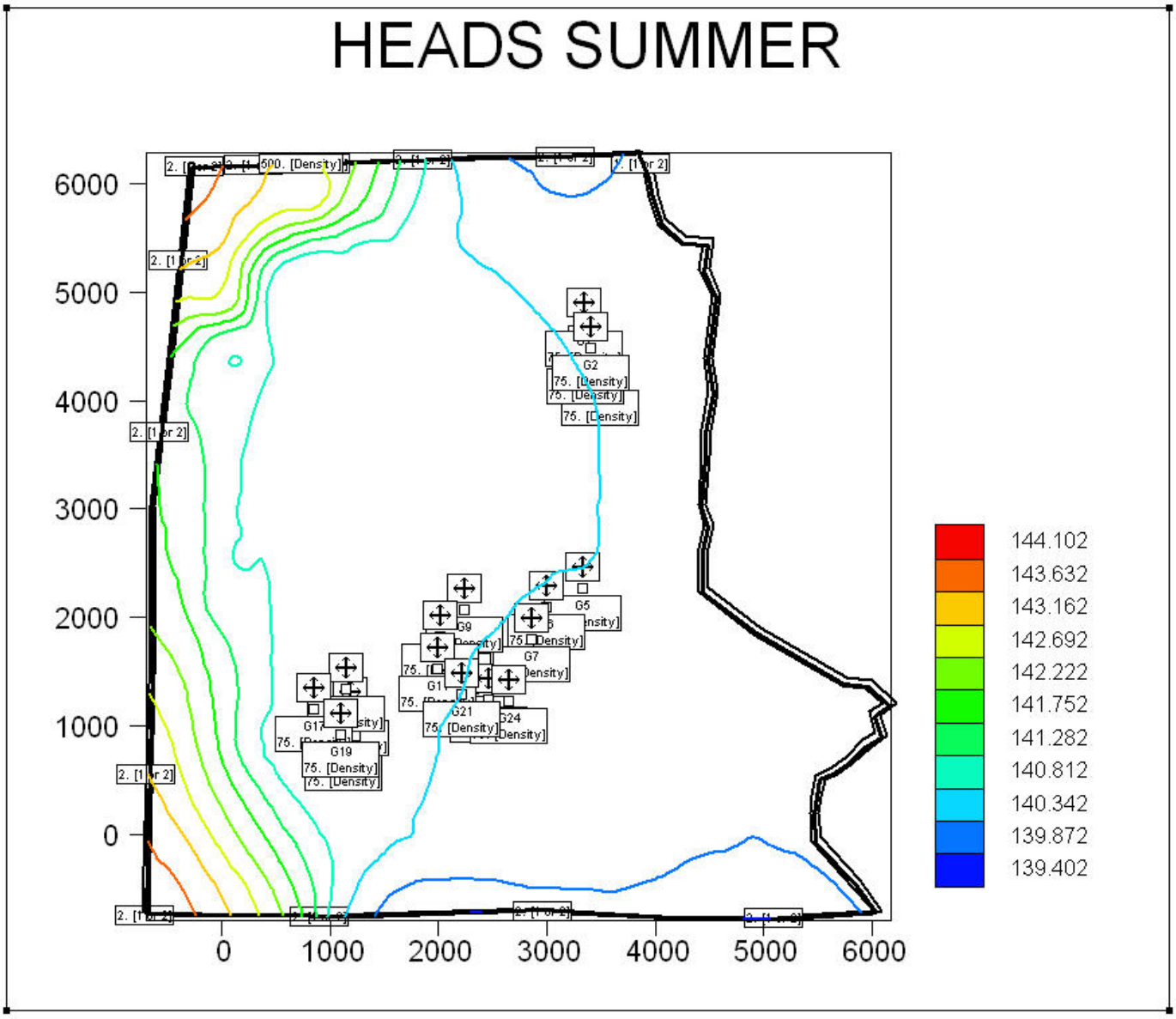



***Σχήμα 8.22*** *: Προφίλ μεταφοράς νιτρικών και θεϊκών(mg/l ) το καλοκαίρι – Σενάριο 2$^o$ (-50%)*

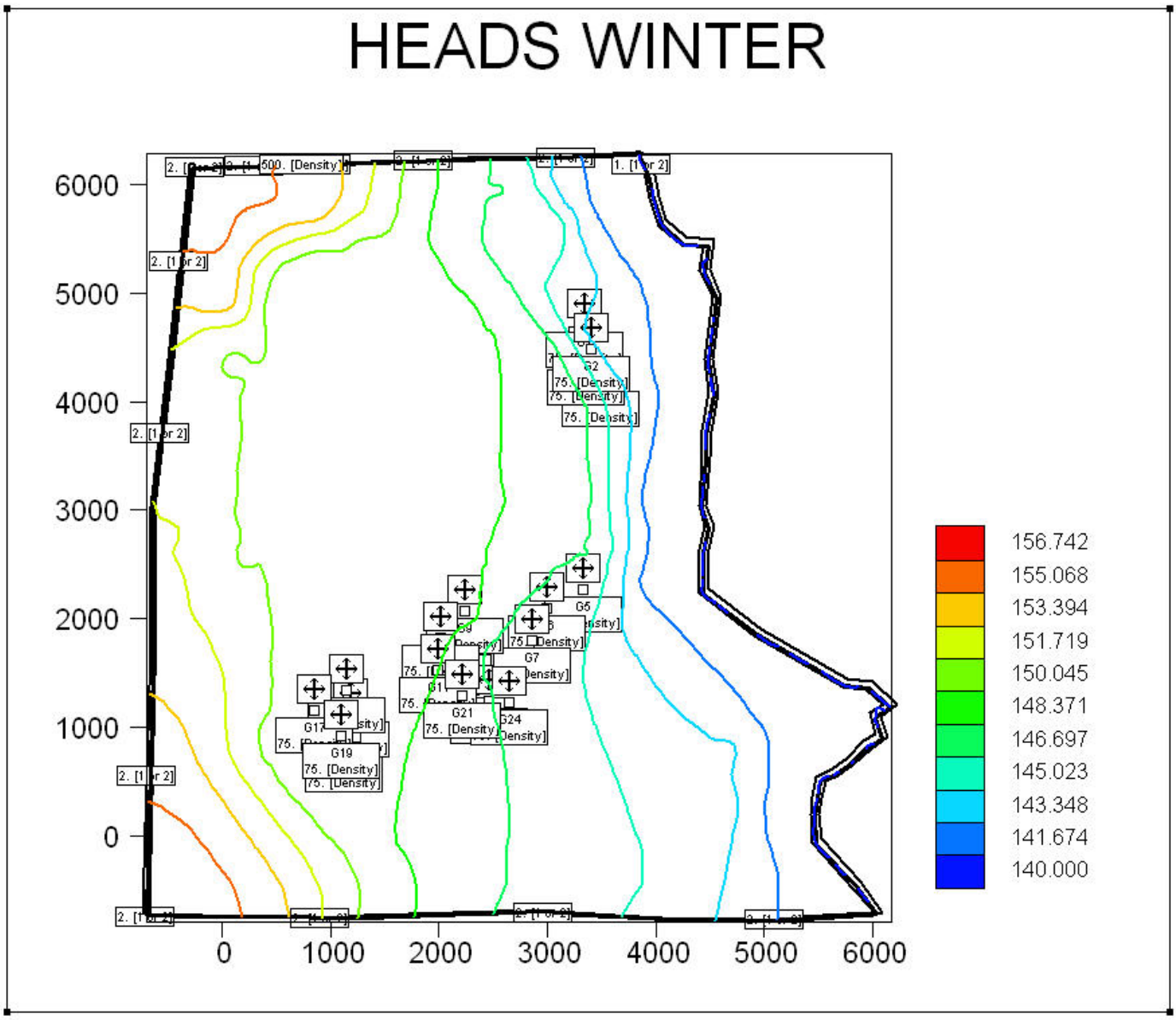
## 8.5 ΣΕΝΑΡΙΟ 3$^{O}$ : ΜΕΙΩΣΗ 100% ΤΩΝ ΡΥΘΜΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Σε αυτό το σενάριο η μείωση γίνεται στους ρυθμούς άντλησης και των δυο περιόδων για τον περιορισμό του φαινομένου της υφαλμύρινσης. Τα αποτελέσματα παρά τα δραστικά μέτρα που πήραμε δεν είναι ενθαρρυντικά και μάλλον θα πρέπει να στραφούμε σε άλλες λύσεις. Και μόνο η εφαρμογή αυτού του σεναρίου δημιουργεί αλλά προβλήματα που η επίλυση τους είναι δύσκολη. Σε αυτό το σενάριο τουλάχιστον έχουμε μείωση της διασπορά των χημικών ουσιών που μελετάμε και η εξάπλωση τους αφορά μικρότερες τιμές συγκέντρωσης. Πάλι όμως το νερό χαρακτηρίζεται κατάλληλο για πόση και κάτω από προϋπόθεσης κατάλληλο για άρδευση. Το γεγονός της μη άντλησης από τις δημόσιες γεωτρήσεις τουλάχιστον χωρίς της ταυτόχρονη εφαρμογή κάποιας μεθόδου εξυγίανσης των υπόγειων νερών απλά θα περιορίσει τα φαινόμενα υποβάθμισης. Θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα και του χειμώνα αφού η μείωση έγινε και στις δυο περιόδους.



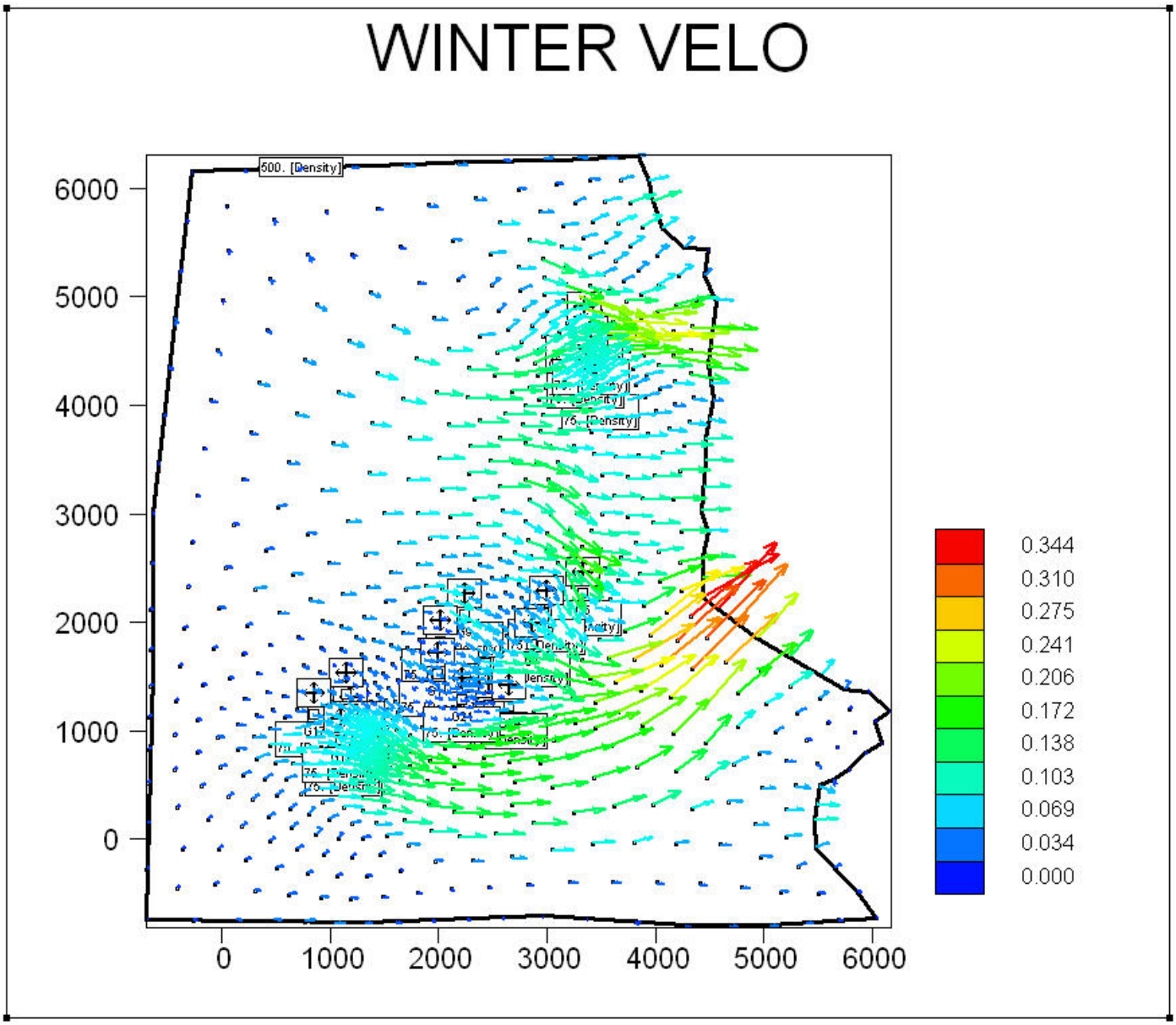

***Σχήμα 8.23*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 3$^{ο}$ (-100 %)*

Οι περιοχές που δεν ανήκουν στην υφάλμυρη περιοχή όπως την έχουμε χαρακτηρίσει σύμφωνα με την θεωρία Ghyben – Herzgerg φαίνονται ξεκάθαρα σε αυτό το σενάριο στα άκρα της περιοχής. Τόσο οι γεωτρήσεις όσο και τα αστικά κέντρα της περιοχής παραμένουν μέσα στη ζώνη υφαλμύρινσης. Πάλι στο νότιο άκρο της περιοχής παρατηρείται το μεγαλύτερο πρόβλημα.



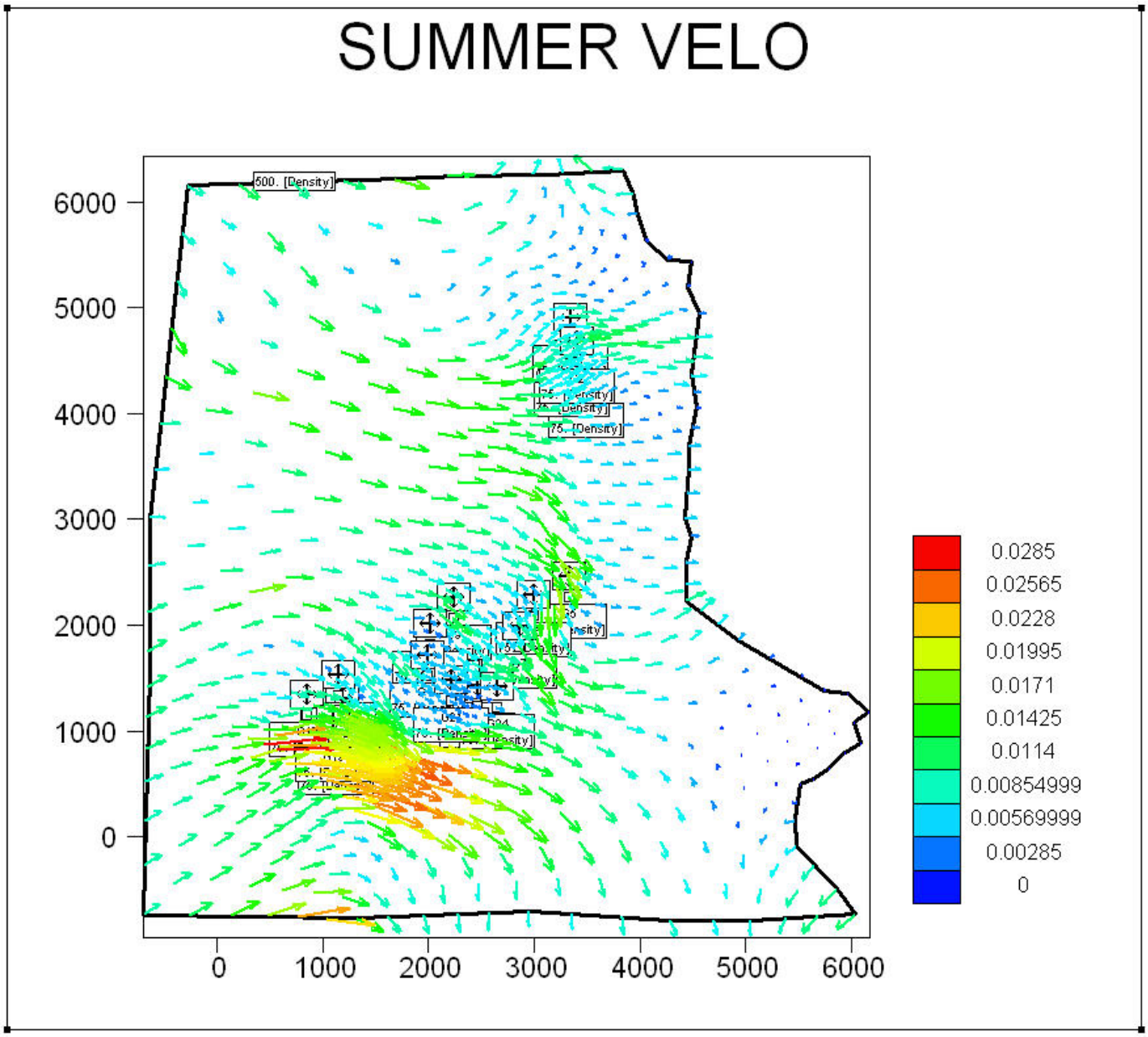

***Σχήμα 8.24*** *: Υδραυλικό ύψος (m) κατά την χειμερινή περίοδο – Σενάριο 3$^{ο}$ (-100 %)*

Στο σενάριο αυτό τον χειμώνα παρατηρούμε ότι τόσο οι γεωτρήσεις που βρίσκονται στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής όσο και τα αστικά και περί-αστικά κέντρα βρίσκονται ξεκάθαρα εντός της ζώνης υφαλμύρινσης. Οι άλλες γεωτρήσεις που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους βρίσκονται εκτός από την υφάλμυρη περιοχή



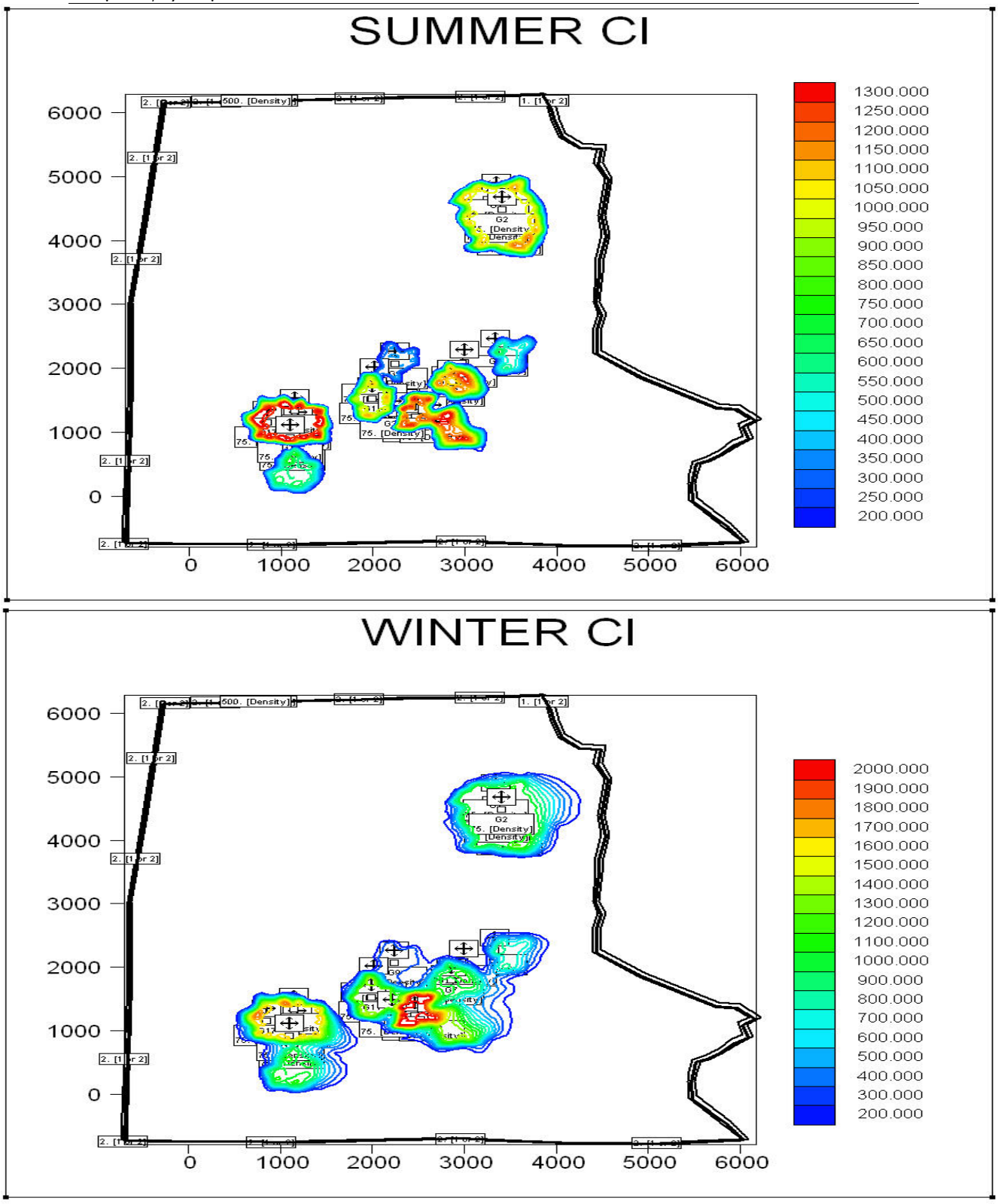

***Σχήμα 8.25*** *: Προφίλ ταχύτητας (m/d) κατά την χειμερινή περίοδο – Σενάριο 3$^{ο}$ (-100 %)*

Η αλλαγή που παρατηρείται δεν επηρεάζει την κατεύθυνση της ροής του υπόγειου υδροφορέα και οι τιμές κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με αυτά των αρχικών συνθηκών.

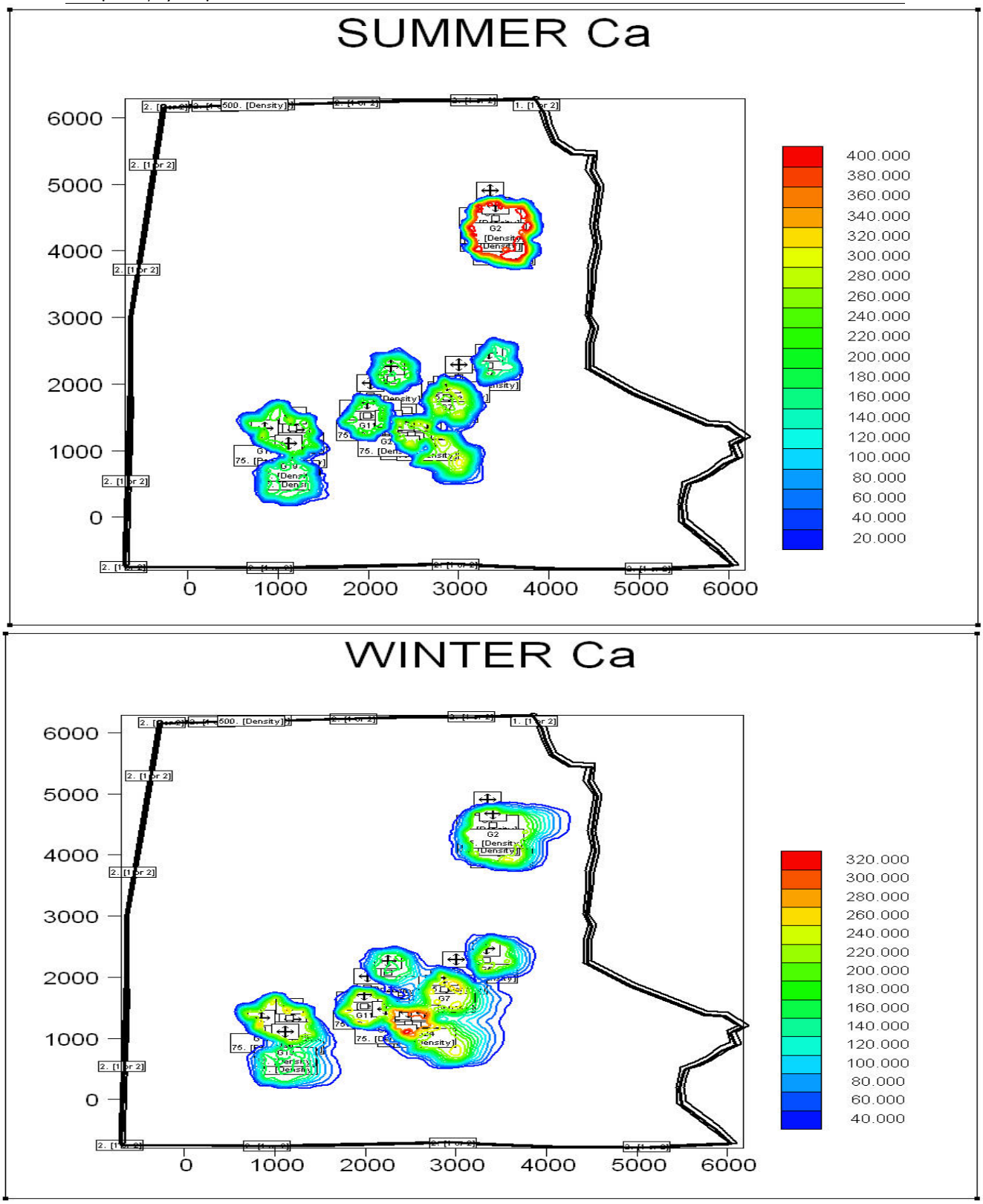



***Σχήμα 8.26*** *: Προφίλ ταχύτητας (m/d) κατά την θερινή περίοδο – Σενάριο 3$^{ο}$ (-100 %)*

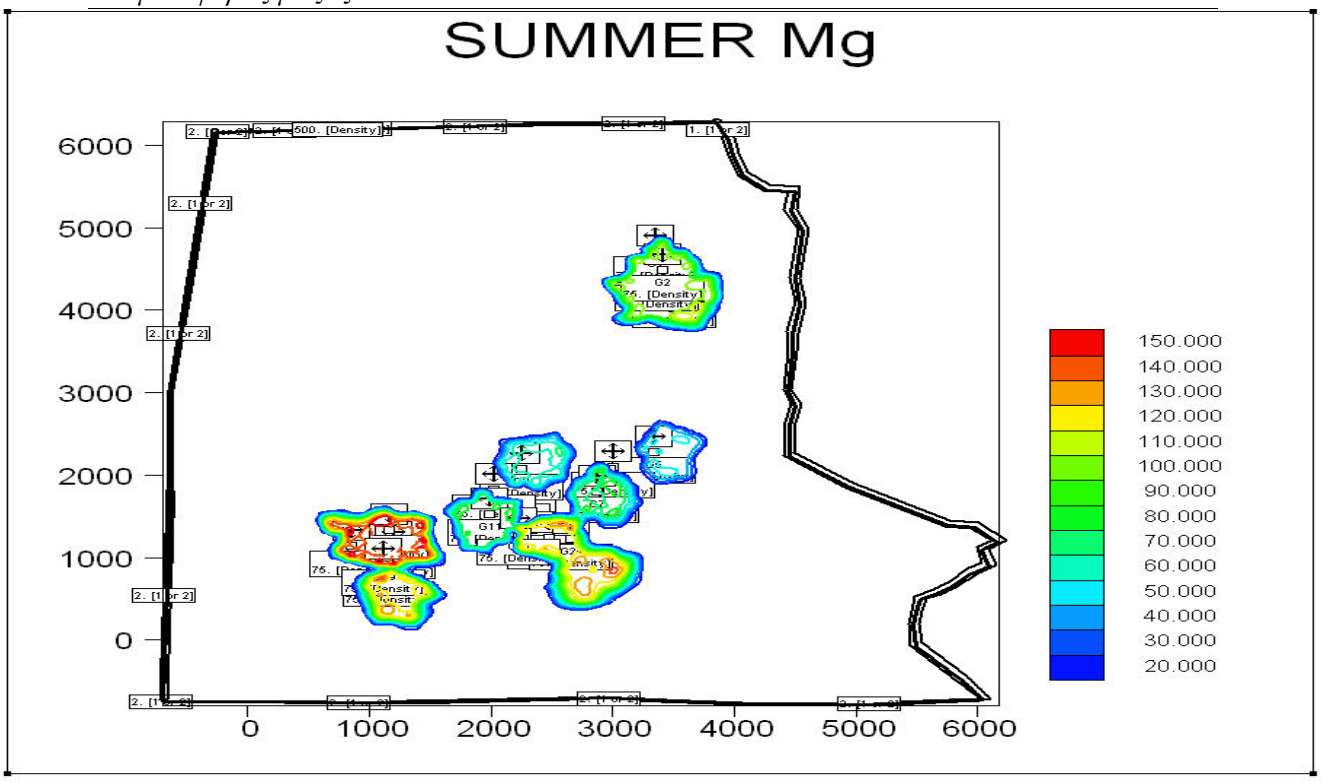
Στις ταχύτητες παρατηρείται μείωση αλλά η κατεύθυνση δεν αλλάζει και έτσι τους καλοκαιρινούς μήνες πάλι δεν έχουμε κατευθύνσεις προς τη θάλασσα το καλοκαίρι παρότι των μηδενικών ρυθμών άντλησης.

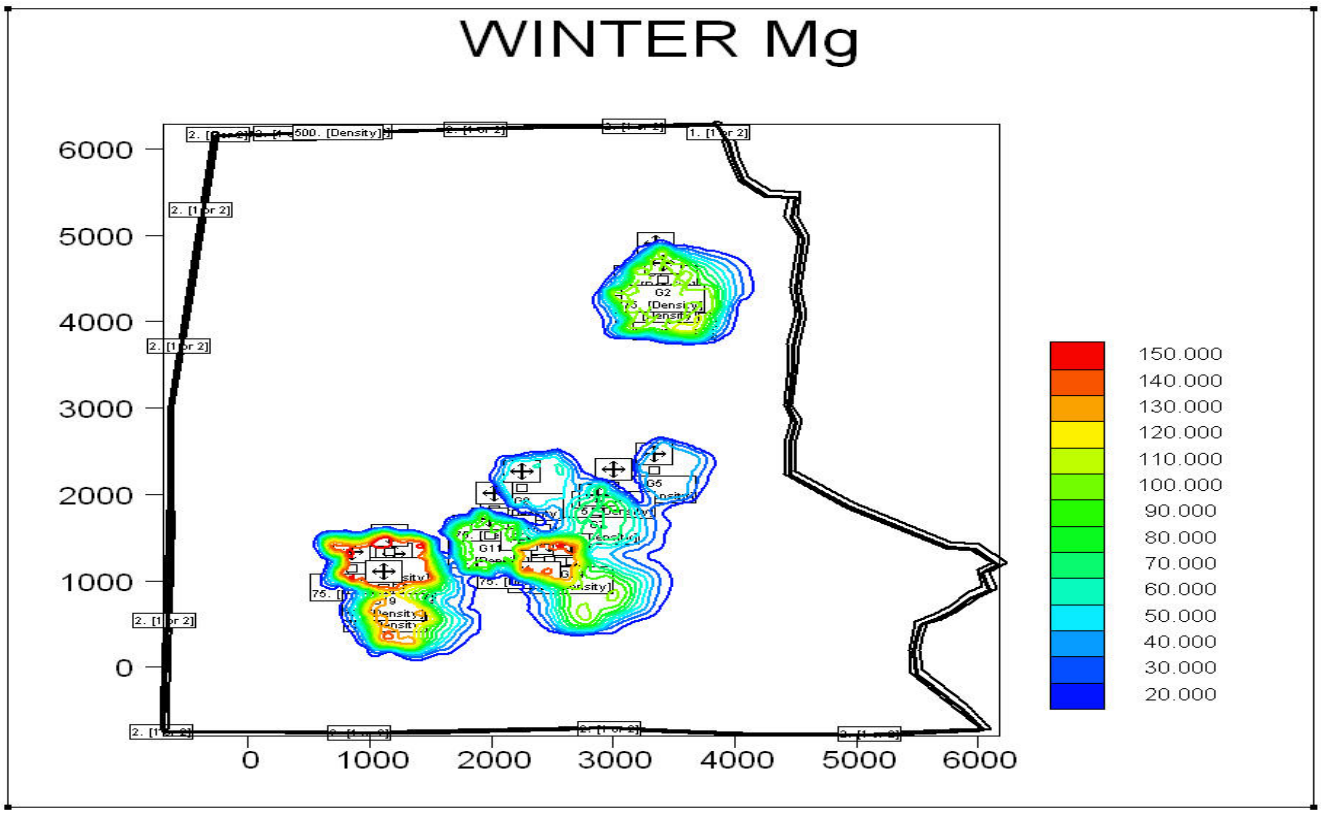



***Σχήμα 8.27*** *: Μεταφορά χλωριόντων (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3ο (-100 %)*

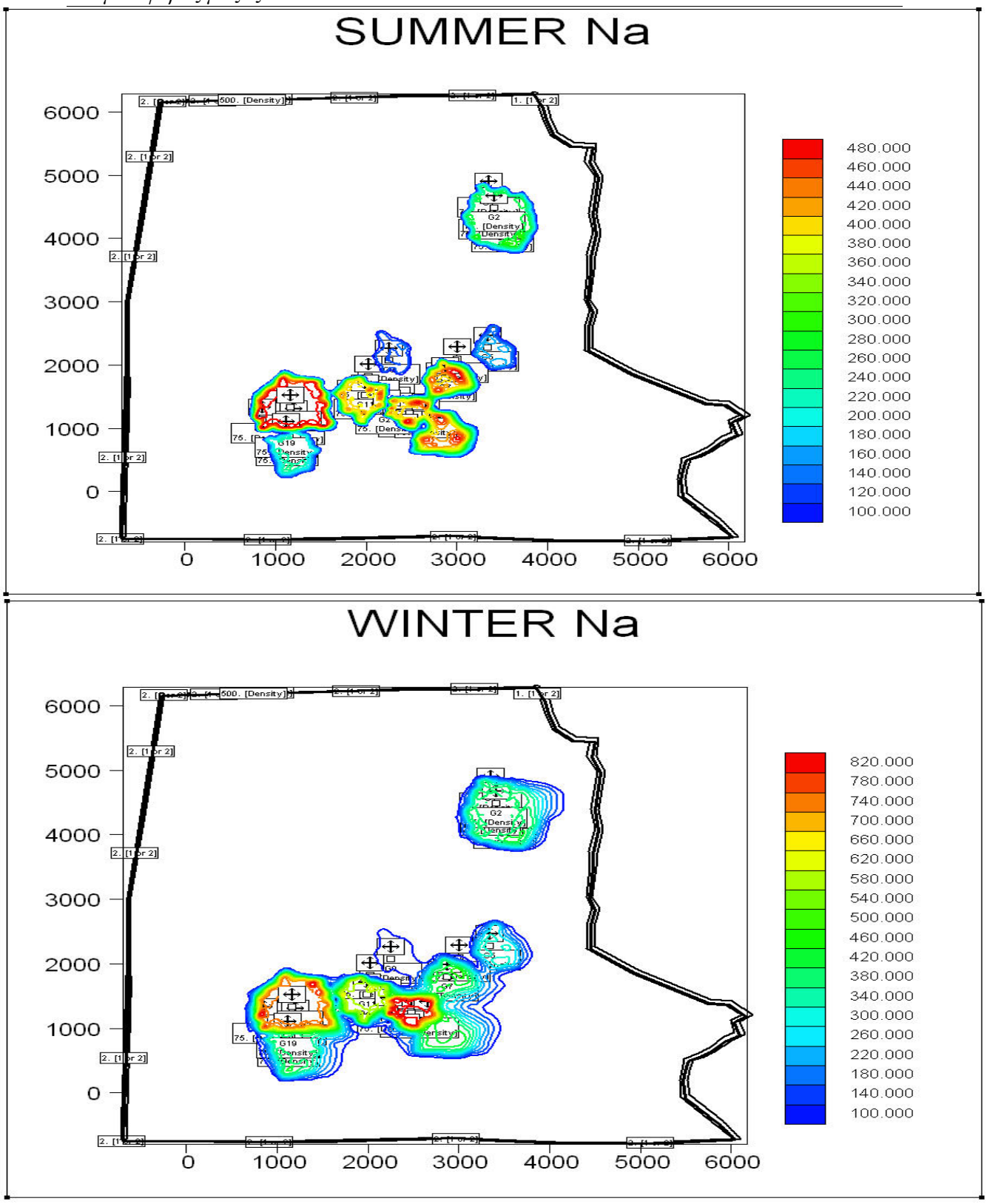



***Σχήμα 8.28*** *: Μεταφορά ασβεστίου (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3$^{o}$ (-100 %)*

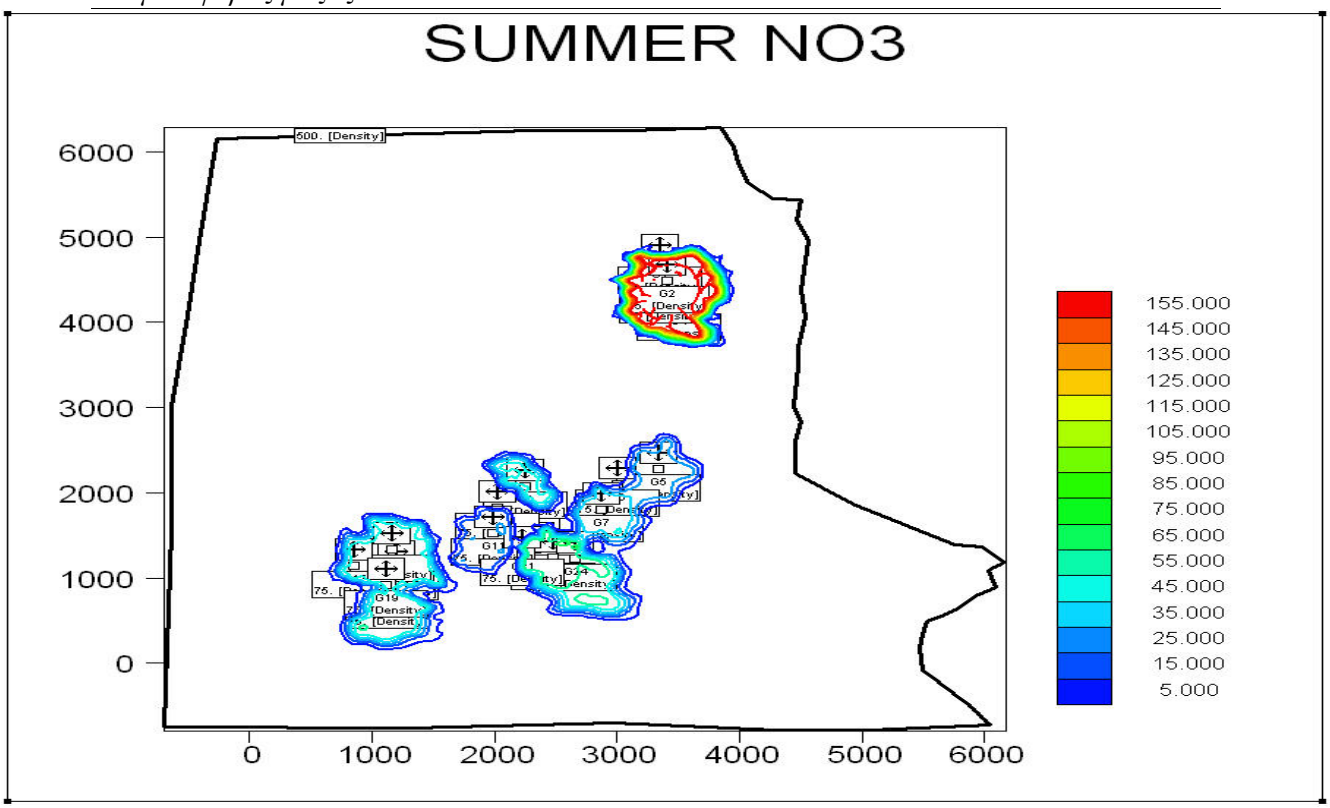


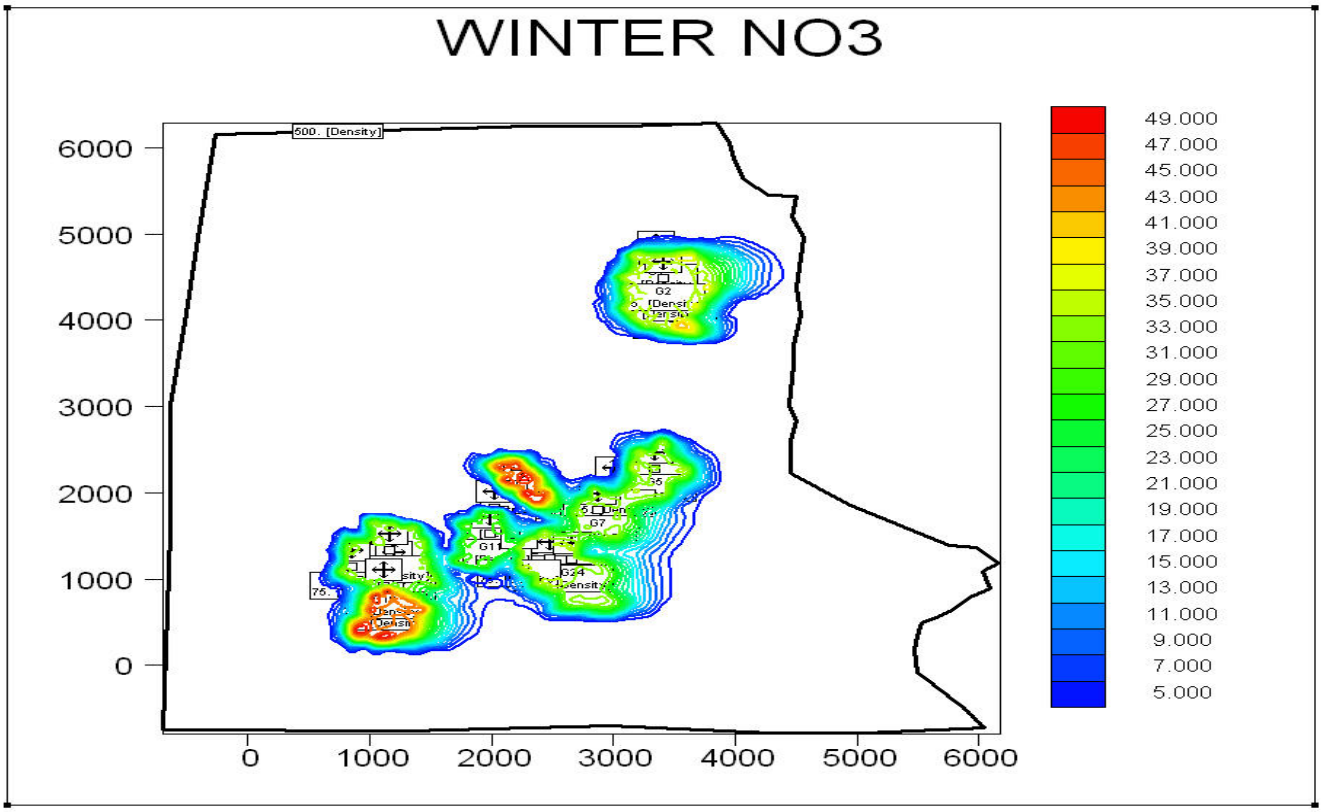




***Σχήμα 8.29*** *: Μεταφορά μαγνησίου (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3$^o$ (-100 %)*

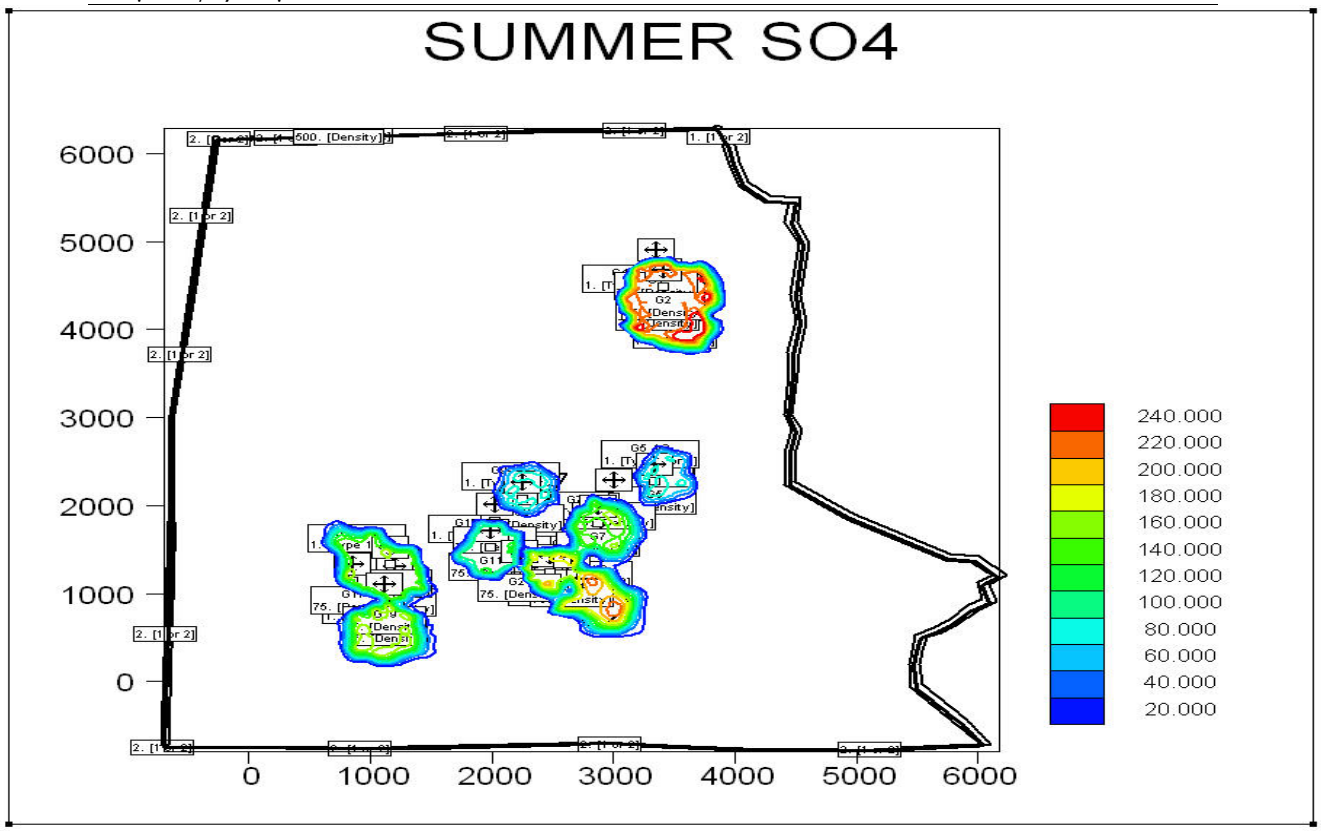


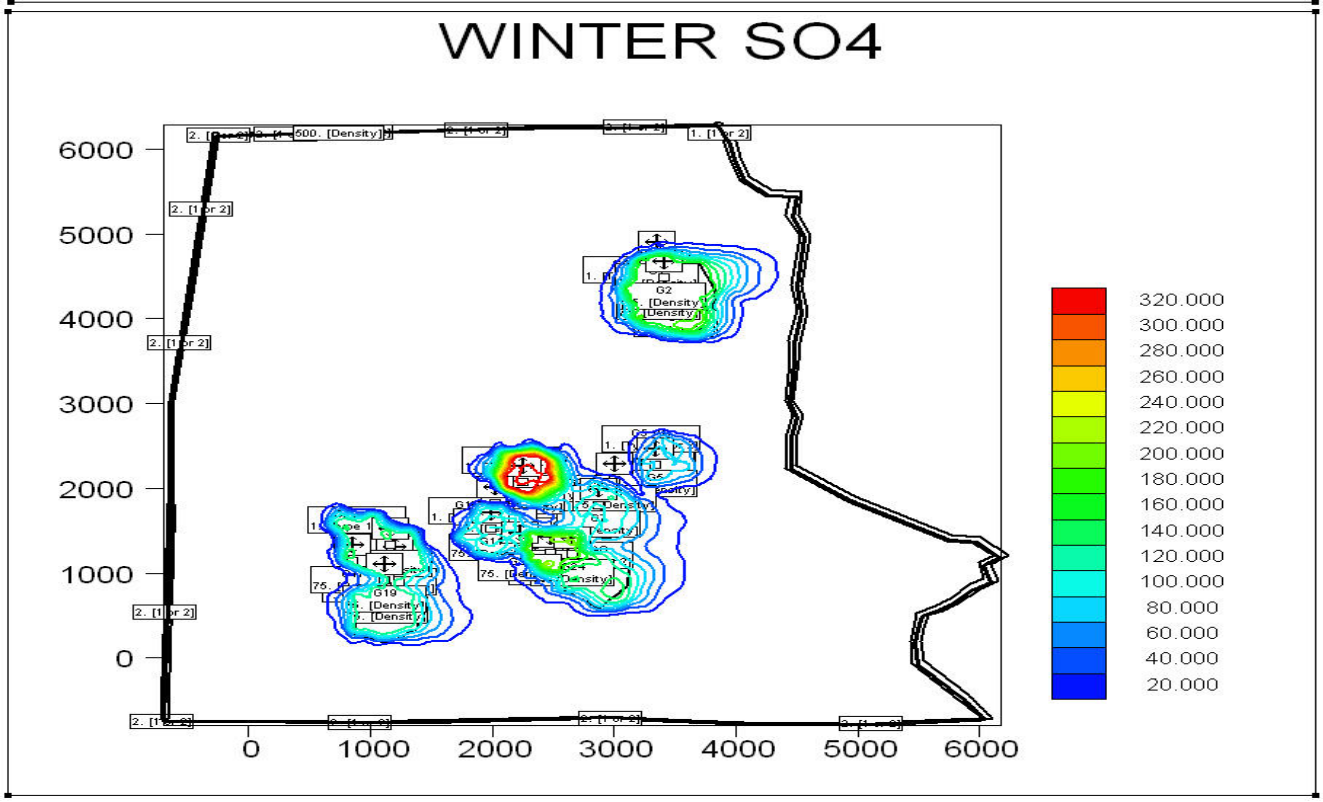

***Σχήμα 8.30*** *: Μεταφορά νατρίου (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3$^{o}$ (-100 %)*




***Σχήμα 8.31*** *: Μεταφορά νιτρικών (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3$^{o}$ (-100 %)*




***Σχήμα 8.31*** *: Μεταφορά θειϊκών (mg/l ) το καλοκαίρι και το χειμώνα - Σενάριο 3$^{ο}$ (-100 %)*

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9$^{ο}$ : Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η λειτουργία των γεωτρήσεων έχει οδηγήσει σε πτώση του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Όλοι οι υπόγειοι υδροφορείς υπόκεινται σε υπέρ –εκμετάλλευση ειδικότερα τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω των αυξανόμενων αναγκών. Το φαινόμενο της υφαλμύρωσης του υδροφορέα εκτείνεται σε όλο το μήκος της παράκτιας ζώνης αλλά και για αρκετά χιλιόμετρα προς την ξηρά με συνέπειες στις καλλιέργειες και τους σωλήνες διανομής. Σε περίπτωση πρόσθετων γεωτρήσεων που προστέθηκαν τελευταία ή αύξηση των ρυθμών άντλησης η υφαλμύρωση θα παρουσιάσει επιδείνωση από την εικόνα που εξαγάγαμε.

Το γεγονός ότι το φαινόμενο της υφαλμύρωσης αποτελεί και φυσικό φαινόμενο δυσχεραίνει τα όποια έργα αντιμετώπισης και αναστροφής του φαινομένου. Ένα πιθανό έργο αντιμετώπισης είναι η εγκατάσταση πηγαδιών εμπλουτισμού κατά μήκος της ακτογραμμής και με τέτοια διάταξη και παροχή ώστε να επέλθει η επιθυμητή κατάσταση αν και πλήρη αναχαίτιση του φαινομένου δεν μπορεί να προέλθει. Μια εναλλακτική πρόταση θα ήταν να χρησιμοποιηθούν οι εκροές του βιολογικού καθαρισμού αλλά είναι απαραίτητη περαιτέρω επεξεργασία τους καθώς η νομοθεσία προβλέπει το εισαγόμενο νερό να ικανοποιεί τα κριτήρια του πόσιμου νερού. Άλλοι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η κατασκευή υποθαλάσσιων φραγμάτων ή οριζόντιων πηγαδιών που θα πρέπει να εξεταστούν ως προς την οικονομική βιωσιμότητα τους. Η μεταφορά νερού για κάλυψη των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών πρέπει να μελετηθεί από περιοχές με θετικό υδατικό ισοζύγιο (περίσσευμα). Η κατασκευή υπέργειων φραγμάτων ίσως να αποτελεί την πιο ιδανική λύση τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από την πλευρά κάλυψης των αναγκών. Τα σενάρια που μελετήσαμε δεν είχαν κανένα αποτέλεσμα ούτε στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης ούτε στην υποβάθμιση της ποιότητας. Ούτως άλλωστε με την μείωση των ρυθμών άντλησης θα έπρεπε να βρούμε τις αναγκαίες ποσότητες για την κάλυψη των αναγκών. Το σίγουρο είναι πως η αναστολή λειτουργίας των γεωτρήσεων από μόνη της δεν έχει αποτελέσματα. Ίσως και μια ανάλυση ευαισθησίας της υδραυλικής αγωγιμότητας να καταδείκνυε καλύτερα τις περιοχές με το μεγαλύτερο πρόβλημα.

Οι γεωργικές δραστηριότητες και η σωστότερη διαχείριση των λυμάτων είναι δύο κατευθύνσεις που πρέπει να δώσουμε έμφαση αν θέλουμε αποτελέσματα όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών. Επειδή το είδος των καλλιεργειών δύσκολα αλλάζει προτείνεται χρήση μη αζωτούχων λιπασμάτων και περιορισμός στην συχνότητα και την ποσότητα άρδευσης. Μία άλλη λύση είναι η προώθηση των βιολογικών μεθόδων καλλιέργειας. Οι συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών που οφείλονται ως επί το πλείστον στην γεωλογική σύσταση της περιοχής θα μειωθούν με την συνεχή ανανέωση του υδροφόρου ορίζοντα γεγονός αλληλένδετο με την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης.

Ένα ενιαίο και ολοκληρωμένο σχέδιο διαχείρισης των υδατικών πόρων της ενότητας των λεκανών Κοκκαλά, Παρθένη και Κορακάρη θα έδινε την βέλτιστη διαχείριση και την πρόβλεψη τέτοιων φαινομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πρόβλημα με τις υψηλές συγκεντρώσεις υδραργύρου που θα είχε περιοριστεί η εξάπλωσης του αν αντιμετωπίζονταν εκ τη γένεσης του και γνωρίζοντας τα ακριβή αίτια. Μια γενική μελέτη των υδατικών πόρων και της υδρογεωλογίας ακόμα και τώρα θα βοηθούσε στη δημιουργία μιας βάσης πάνω στην οποία θα στηρίζαμε τις όποιες ενέργειες κρίναμε κατάλληλες.

Λύσεις που συνοπτικά προτείνονται να υλοποιηθούν είναι οι ακόλουθες:

1. Κατασκευή φραγμάτων και άλλων τεχνικών έργων συλλογής των επιφανειακών απορροών με σκοπό την εκμετάλλευση τους και κατασκευή και λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης
2. Κατασκευή μικρών φραγμάτων ανάσχεσης για την ενίσχυση του υδροφόρου ορίζοντα
3. Επιλογή και εφαρμογή της καλύτερης μεθόδου αντιμετώπισης (περιορισμός) του φαινομένου της υφαλμύρινσης
4. Κατασκευή παραλλήλου δικτύου κατώτερης ποιότητας νερού για χρήσεις στις οποίες δεν απαιτείται άριστης ποιότητας νερό
5. Κατάλληλη πολιτική και ορθολογική διαχείριση της χρήσης – με έμφαση στην γεωργική χρήση – βάση ενιαίου ολοκληρωμένου σχεδίου.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modelling, Academic Press, 1992

2. D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, Chemical Transport by Three – Dimensional Groundwater Flows, 1997.

3. Saltwater Intrusion in Groundwater, Alexander H.-D. Cheng, University of Delaware, U.S.A, 1998

4. Πρακτικά 9ου Πανελλήνιου Συνεδρίου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.

5. Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία, Γ.Α. Καλλέργης, Καθηγητής Υδρογεωλογίας Πανεπιστήμιο Πάτρας, 1986

6. Διπλωματική εργασία κύκλου Μεταπτυχιακών σπουδών ειδίκευσης : «Ρύπανση υπόγειων νερών με νιτρικά», Σμυρνάκη Καλλιόπη & Δασενάκης Δημήτριος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, 2000

7. Οικονομόπουλος Αλέξανδρος, Σημειώσεις Μαθήματος «Χημεία και Έλεγχος Ρύπανσης Αέρα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, 2000

8. Υδρογεωλογική μελέτη Ανατολικής και Κεντρικής Νήσου Χίου, Βασίλειος Παρασχούδης 1981.

9. Μανασσής Μήτρακας, Χημικός Μηχανικός, « Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Επεξεργασία Νερού», Εκδόσεις Τζιόλα, 2001

10. Υδρογεωλογική – Γεωτεχνική αναγνώριση για αξιοποίηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού δήμου Χίου, Ι.Βακόνδιος & Π.Καμμά, Αθήνα, 1999

11. DOMENICO SPREADSHEET ANALYTICAL MODEL MANUAL, Weixing Tong, Ph. D. and Yue Rong, Ph. D. Underground Storage Tank California Regional Water Quality Control Board December 1, 1999

12. www.chios.gr
13. www.wikipedia.org/wiki/nitro