



Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διπλωματική Εργασία

«Χαρακτηρισμός της Υπόγειας Ροής με Προσομοίωση της περιοχής του Ποταμού Ασωπού, Νομού Αττικής»

Συρράκου Χριστίνα

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Καθηγητής Γκέκας Βασίλειος

Χανιά, 2008

Ευχαριστίες

Σε αντό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γιώργο Καρατζά για την πολύτιμη συνεργασία του . Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νίκο Νικολαΐδη αλλά και την Καθηγήτρια του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ κα. Λοϊζίδου Μαρία καθώς και τους εργαστηριακούς βοηθούς αμφοτέρων για την παροχή σημαντικών δεδομένων και πληροφοριών για την περιοχή μελέτης.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία προσπάθεια προσδιορισμού της υπόγειας ροής στην περιοχή του ποταμού Ασωπού στον νομό Αττικής. Για τον προσδιορισμό της υπόγειας ροής έγινε χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code). Αρχικά πραγματοποιήθηκε συλλογή δεδομένων για την ευρύτερη περιοχή όπως για παράδειγμα γεωλογικοί και τοπογραφικοί χάρτες, στοιχεία για τις διάφορες γεωτρήσεις, κλιματολογικά δεδομένα κτλ. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των δεδομένων στο μοντέλο από το οποίο προέκυψαν και τα αποτελέσματα σε μορφή γραφήματος τα οποία προσδιορίζουν τα υδραυλικά ύψη, τις ταχύτητες της υπόγειας ροής αλλά και την μεταφορά μάζας ενός ρύπου που βρίσκεται στον ποταμό Ασωπό.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής γίνεται μία αναφορά στις βασικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την υπόγεια ροή και στην βασική θεωρία της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής μέσω της χρήσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Στη συνέχεια γίνεται μία περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου και εξισώσεων που χρησιμοποιεί το PTC για την προσομοίωση. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή της περιοχής μελέτης καθώς και του ποταμού Ασωπού και στη συνέχεια μία περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής. Η εργασία συνεχίζεται με μία σύντομη περιγραφή της εφαρμογής του GIS που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία χρήσης του μοντέλου. Η διαδικασία συμπεριλαμβάνει την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων (υψόμετρα, υδραυλική αγωγιμότητα, αρχικές και οριακές συνθήκες), την βαθμονόμηση του μοντέλου και τέλος την εκτέλεση του αλγορίθμου για δύο χρονικές περιόδους (θερινή και χειμερινή). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συνοδευμένα από τις αντίστοιχες γραφικές απεικονίσεις και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Από την προσομοίωση της θερινής περιόδου προκύπτει πως η περιοχή παρουσιάζει μικρά υδραυλικά ύψη τα οποία παρουσιάζουν ομαλή διακύμανση εφόσον η άντληση των γεωτρήσεων είναι ελάχιστη ενώ η ροή συσσωρεύται σε 3 περιοχές και παρουσιάζει μέγιστες ταχύτητες στα σημεία απότομης αλλαγής υδραυλικής αγωγιμότητας. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της χειμερινής περιόδου στα οποία έχει εισαχθεί ο ποταμός Ασωπός και η παράμετρος της βροχόπτωσης. Σε αυτήν την περίπτωση είναι φανερός ο εμπλουτισμός του

υδροφορέα από την ροή του ποταμού. Τέλος, από την προσομοίωση που έγινε για τη μεταφορά μάζας προκύπτει πως η ρύπανση του Ασωπού διαχέεται στη γύρω περιοχή και όπως φαίνεται και από την ροή αναμένεται να επηρεάσει της γεωτρήσεις της περιοχής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| Περίληψη | 3 |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 7 |
| 2. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ | 8 |
| 2.1. Γενικά | 8 |
| 2.2. Εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι | 9 |
| 2.2.1. Εξισώσεις | 9 |
| 2.2.2. Αριθμητικές μέθοδοι..... | 13 |
| 2.3. Εννοιολογικό μοντέλο και σχεδιασμός πλέγματος..... | 16 |
| 2.3.1. Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου | 16 |
| 2.3.2. Είδη μοντέλων | 17 |
| 2.3.3. Σχεδιασμός πλέγματος | 19 |
| 2.4. Δεδομένα..... | 22 |
| 2.5. Οριακές συνθήκες | 23 |
| 2.5.1. Είδη ορίων | 23 |
| 2.5.2. Τοποθέτηση ορίων: | 24 |
| 2.5.3. Προσομοιάζοντας τα όρια..... | 25 |
| 2.5.4. Εσωτερικά Όρια..... | 26 |
| 3. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ | 27 |
| 3.1. Γενικά | 27 |
| 3.2. Μοντελοποίηση και κυρίαρχες εξισώσεις | 27 |
| 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PTC..... | 30 |
| 4.1. Θεμελιώδεις εξισώσεις..... | 30 |
| 4.2. Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC | 31 |
| 4.3. Τρισδιάστατη Υπόγεια Ροή | 31 |
| 4.3.1. Θεμελιώδης εξίσωση..... | 31 |
| 4.3.2. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων..... | 32 |
| 4.3.3. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών..... | 33 |
| 4.3.4. Οριακές συνθήκες | 34 |
| 4.3.5. Συνθήκες υδροφορέα: | 36 |
| 4.4. Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων..... | 37 |
| 4.4.1. Κυρίαρχες εξισώσεις | 37 |
| 4.4.2. Οριακές συνθήκες | 39 |
| 5. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ | 40 |
| 5.1. Περιγραφή Οικισμών και Κοινοτήτων | 40 |
| 5.1.1. Γενικά Στοιχεία | 40 |
| 5.1.2. Παραγωγικοί Τομείς | 41 |
| 5.1.3. Δίκτυο Ύδρευσης | 42 |
| 5.1.4. Σεισμικότητα | 42 |
| 5.1.5. Γενικές παρατηρήσεις | 42 |
| 5.2. Περιγραφή Ποταμού Ασωπού | 43 |
| 5.3. Κλιματολογικά Στοιχεία | 45 |
| 5.4. Γεωλογία | 46 |
| 5.5. Υδρογραφία..... | 49 |
| 5.6. Χλωρίδα – Πανίδα..... | 50 |
| 6. ΧΡΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ Arc GIS 9.2 | 51 |
| 7. ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PTC..... | 52 |
| 7.1. Εισαγωγή: | 52 |
| 7.2. Προσομοίωση για τη θερινή περίοδο | 53 |

| | |
|---|----|
| 7.2.1. Αρχική προετοιμασία του μοντέλου | 53 |
| 7.2.2. Εισαγωγή αρχικών συνθηκών | 54 |
| 7.2.3. Εισαγωγή οριακών συνθηκών..... | 54 |
| 7.2.4. Βαθμονόμηση..... | 56 |
| 7.3. Προσομοίωση για τη χειμερινή περίοδο..... | 57 |
| 7.3.1. Βροχοπτώσεις | 57 |
| 7.3.2. Οριακές Συνθήκες..... | 57 |
| 7.4. Προσομοίωση μεταφοράς μάζας..... | 58 |
| 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 59 |
| 8.1. Θερινή Περίοδος..... | 59 |
| 8.1.1. Ταχύτητες..... | 59 |
| 8.1.2. Υδραυλικά όψη..... | 61 |
| 8.2. Χειμερινή περίοδος..... | 61 |
| 8.2.1. Ταχύτητες..... | 62 |
| 8.2.2. Υδραυλικά όψη..... | 63 |
| 8.3. Μεταφορά Μάζας..... | 64 |
| 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... | 66 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ..... | 68 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια ο ποταμός Ασωπός καθώς και η γύρω περιοχή των Ωρωπίων αποτελεί συχνά αντικείμενο μελέτης καθώς σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες μετρήσεις στον υδροφορέα της περιοχής έχει εντοπιστεί ένας σημαντικός αριθμός ρυπογόνων ουσιών ως αποτέλεσμα της βιομηχανικής δραστηριότητας της ευρύτερης περιοχής. Η σοβαρότητα του προβλήματος προστάζει για περισσότερες περιβαλλοντικές μελέτες στην περιοχή αλλά και λήψη μέτρων για την αποκατάσταση του υδροφορέα άμεσα.

Ένα σημαντικό μέσο για την κατανόηση της υπόγειας ροής αποτελούν τα περιβαλλοντικά μοντέλα, όπως για παράδειγμα το PTC που χρησιμοποιείται στην παρούσα περίπτωση, μέσω τον οποίων εκτός από την προσομοίωση της υπόγειας ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί και προσομοίωσης της μεταφοράς ενός ρύπου για διάφορες χρονικές περιόδους και σενάρια. Επομένως, τα μοντέλα μπορούν να αποτελέσουν ταυτόχρονα και ένα μέσο πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης. Κάποια μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση υπόγειας ροής εκτός από το PTC είναι το MODFLOW και το PLASM τα οποία αποτελούν μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και το AQUIFEM-1 το οποίο είναι μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Στην διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε έγινε προσπάθεια για τον προσδιορισμό της υπόγειας ροής στην περιοχή του ποταμού Ασωπού στην Αττική με στόχο την γνώση της παρούσας κατάστασης και τον βαθμό εξάπλωσης ενός ρύπου. Ωστόσο, αν και η εργασία αυτή παρέχει μερική γνώση της κατάστασης καθώς αφορά ένα μικρό τμήμα της περιοχής που διαρρέει ο ποταμός Ασωπός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας οδηγός και μία αφετηρία για μια πιο λεπτομερή μελλοντική μελέτη.

2. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

2.1. Γενικά

Μοντέλο ονομάζεται οποιοδήποτε εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανάλογο μίας κατάστασης πεδίου. Υπάρχουν δύο είδη μοντέλων:

- τα φυσικά μοντέλα στα οποία γίνεται άμεση αναπαράσταση της υπόγειας ροής (π.χ. μία δεξαμενή με άμμο στο εργαστήριο)
- τα μαθηματικά μοντέλα στα οποία γίνεται έμμεση αναπαράσταση της υπόγειας ροής μέσω μαθηματικών εξισώσεων που αφορούν τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα και τις οριακές ή αρχικές συνθήκες.

Το σύνολο των εντολών που χρησιμοποιούνται για τη επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου αποτελούν τον κώδικα του μοντέλου. Ο κώδικας ωστόσο είναι γενικός σε αντίθεση με το μοντέλο το οποίο περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους όπως για παράδειγμα αρχικές και οριακές συνθήκες, παραμέτρους πεδίου, υδρολογικές δυνάμεις κτλ.

Αν και η χρήση μοντέλων έχει κατά καιρούς αμφισβητηθεί κυρίως λόγω της απαίτησης μεγάλης ποσότητας δεδομένων και την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται, έχει διαπιστωθεί πως τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή του μοντέλου αφορούν κυρίως λάθη του χρήστη.

Εκτός από την πρόβλεψη τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την βέλτιστη γνώση των παραμέτρων του πεδίου αλλά και ως μέσω οργάνωσης και καταγραφής των διαφόρων δεδομένων και της δυναμικής του συστήματος.

Το πρώτο βήμα που πρέπει να γίνει πριν την δημιουργία του μοντέλου είναι ο προσδιορισμός του είδους του μοντέλου. Στη συνέχεια αρχίζει ο σχεδιασμός του μοντέλου ο οποίος αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα [1]:

1. Προσδιορισμός σκοπού του μοντέλου
2. Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου
3. Επιλογή της κυρίαρχης εξίσωσης και δημιουργία κώδικα
4. Σχεδιασμός του μοντέλου

5. Βαθμονόμηση
6. Ανάλυση ευαισθησίας βαθμονόμησης
7. Επαλήθευση του μοντέλου
8. Πρόβλεψη
9. Ανάλυση ευαισθησίας πρόβλεψης
10. Παρουσίαση του σχεδιασμού του μοντέλου και αποτελέσματα
11. Μελλοντικός έλεγχος
12. Επανασχεδιασμός μοντέλου (με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν)

2.2. Εξισώσεις και αριθμητικές μέθοδοι

2.2.1. Εξισώσεις

Ένα σύστημα υπόγειας ροής μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω δύο προσεγγίσεων: την προσέγγιση του υδροφορέα (aquifer viewpoint) και την προσέγγιση του συστήματος ροής (flow system viewpoint).

- Προσέγγιση υδροφορέα

Η προσέγγιση του υδροφορέα βασίζεται στην ιδέα του περιορισμένου και ελεύθερου υδροφορέα, χρησιμοποιείται κυρίως για ανάλυση ροής σε πηγάδια άντλησης και είναι βάση για πολλές αναλυτικές μεθόδους όπως του Thiem, του Theis και του Jacob. Η ροή θεωρείται οριζόντια μέσα στον υδροφορέα και κάθετη διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος. Χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει δισδιάστατη οριζόντια ροή σε περιορισμένους ή ελεύθερους υδροφορείς ενώ για περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ημι-τρισδιάστατη προσέγγιση.

Γενική μορφή εξίσωσης από την προσέγγιση του υδροφορέα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (1)$$

$$L = -K_z \frac{h_{source} - h}{b'} \quad (2)$$

Ο αριστερός όρος της εξίσωσης (1) παρουσιάζει την οριζόντια ροή διαμέσου του υδροφορέα, και όπου:

h : το υδραυλικό ύψος,

T_x, T_y : οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στις διευθύνσεις x και y ,

S : ο συντελεστής αποθηκευτικότητας,

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

L : η διαρροή διαμέσου ενός αδιαπέρατου στρώματος

K_z : η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος

b' : το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος

h_{source} : το υψόμετρο της πηγής

Η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης σε έναν ελεύθερο υδροφορέα προϋποθέτει την χρήση των υποθέσεων Dupuit σύμφωνα με τις οπίες:

- ✓ Οι γραμμές της ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες
- ✓ Η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση της ελεύθερης επιφάνειας και αμετάβλητη με το βάθος

Επίσης, από την παραπάνω εξίσωση (1) για την περίπτωση του ελεύθερου υδροφορέα ισχύει πως $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$. Έτσι, με αντικατάσταση στην (1) προκύπτει η μη γραμμική **εξίσωση Boussinesq**:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3)$$

Όπου το L στην εξίσωση (1) είναι ίσο με μηδέν και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S) ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα (S_y).

και στη συνέχεια εφόσον $\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x}$ και $\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y}$ προκύπτει:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (4)$$

- Προσέγγιση συστήματος ροής

Στην προσέγγιση του συστήματος ροής δίνεται βαρύτητα στον προσδιορισμό της τρισδιάστατης κατανομής των υδραυλικών υψών, της υδραυλικής αγωγιμότητας και της αποθηκευτικότητας οπουδήποτε στο σύστημα. Επίσης, η προσέγγιση του συστήματος ροής επιτρέπει την ύπαρξη των οριζοντίων αλλά και κάθετων συνιστωσών της ροής και επομένως η προσέγγιση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αναπαραστήσει δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ροή.

Γενική μορφή εξίσωσης από την προσέγγιση του συστήματος ροής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (5)$$

Όπου:

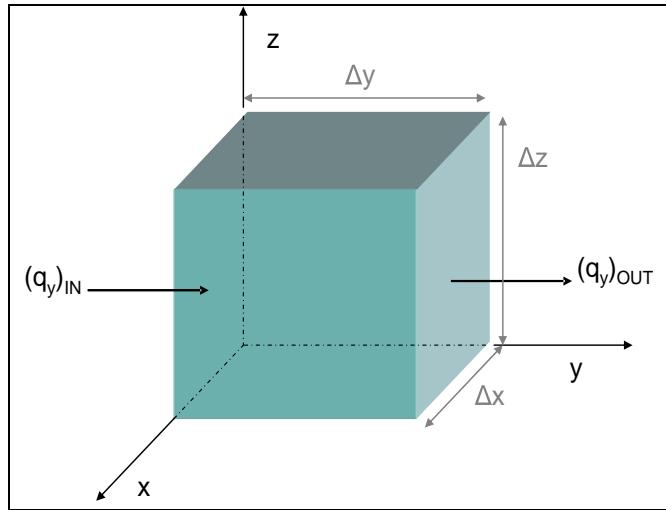
K_x, K_y, K_z : συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας,

S_s : η ειδική αποθηκευτηκότητα,

R^* : ένας γενικός όρος δεξαμενής/πηγής ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού (προσδιορίζει τον όγκο εισροής του νερού στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου) [1].

➤ Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος

Η εξίσωση (5) προκύπτει συνδυάζοντας ένα ισοζύγιο μάζας νερού με το νόμο του Darcy, λαμβάνοντας υπόψη έναν μοναδιαίο κύβο πορώδους υλικού ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες του πορώδους μέσου αλλά ταυτόχρονα και αρκετά μικρός ώστε η αλλαγή του υδραυλικού ύψους μέσα στον όγκο να είναι μικρή. Ο κύβος ονομάζεται αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume - REV).



Σχήμα 1. Ο αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (REV)
Πηγή [1]

Ο όγκος του κύβου ισούται με $\Delta x \Delta y \Delta z$ και η ροή του νερού διαμέσου του REV εκφράζεται μέσω του διανύσματος q το οποίο ισούται με:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (6)$$

Όπου i_x, i_y, i_z είναι μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων x, y, z .

Σύμφωνα με την Αρχή Διατήρησης της Μάζας ή την εξίσωση ισορροπίας για το νερό στον REV ισχύει:

$$\text{Έξοδος- είσοδος} = \text{αλλαγή στην αποθηκευτηκότητα} \quad (7)$$

Αν υποθέσουμε πως q είναι η παροχή εκροής και η εισροή και εκροή στον όγκο ελέγχου γίνεται διαμέσου της επιφάνειας $\Delta x \Delta z$ τότε η ογκομετρικός ρυθμός εισροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εκροής είναι:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z \quad (8)$$

Επίσης, η ολική μεταβολή στο ρυθμό της ροής ισούται με τη αλλαγή στην αποθηκευτηκότητα και εκφράζεται ως:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{αλλαγή στην αποθηκευτικότητα} \quad (9)$$

Η τελική μορφή της εξίσωσης ισορροπίας του νερού είναι:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (10)$$

με R^* θετικό στην περίπτωση εμπλουτισμού [1].

➤ Γενική μορφή υδραυλικής αγωγιμότητας

Στις παραπάνω κυρίαρχες εξισώσεις θεωρείται πως οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι συγραμμικές με τους άξονες x,y και z. Στην περίπτωση που η γεωλογία της περιοχής δεν επιτρέπει την παραδοχή αυτή, στις παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται όλες οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας οι οποίες παρουσιάζονται μέσω του ακόλουθου τανυστή [1].

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.2.2. Αριθμητικές μέθοδοι

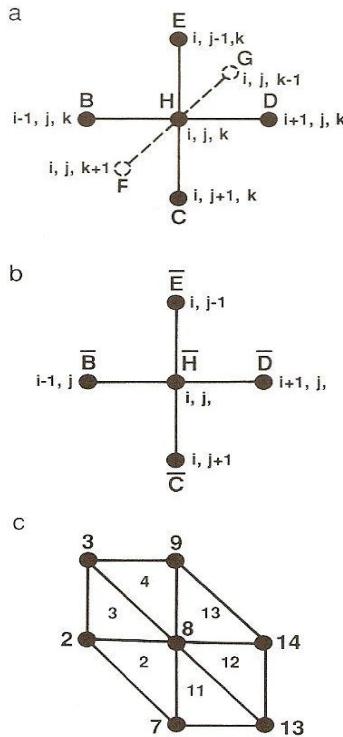
Στην μοντελοποίηση υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται κυρίως πέντε αριθμητικές μέθοδοι:

1. οι πεπερασμένες διαφορές
2. τα πεπερασμένα στοιχεία
3. οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
4. η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης
5. τα αναλυτικά στοιχεία

Ένα πρόγραμμα σε υπολογιστή λύνει ένα σύνολο από αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες προκύπτουν από τις διαφορικές εξισώσεις που ορίζουν το μαθηματικό μοντέλο.

Η επιλογή ανάμεσα στις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και την προτίμηση του χρήστη. Γενικά οι πεπερασμένες διαφορές είναι πιο εύκολες στην κατανόηση και προγραμματισμό και απαιτούν μικρότερη ποσότητα δεδομένων σε σχέση με τα πεπερασμένα στοιχεία. Ωστόσο, τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να προσομοιάσουν καλύτερα πιο πολύπλοκα όρια σε σχέση με τις πεπερασμένες διαφορές και είναι επίσης ευκολότερο να ρυθμίσουν το μέγεθος ενός μεμονωμένου στοιχείου. Τα πεπερασμένα στοιχεία επίσης διαχειρίζονται καλύτερα εσωτερικά όρια και μπορούν να προσομοιάσουν καλύτερα σημειακές πηγές και δεξαμενές, επιφάνειες διαρροής και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες.

Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους είναι πως οι πεπερασμένες διαφορές υπολογίζουν μία τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο η οποία αποτελεί ταυτόχρονα τη μέση τιμή του υδραυλικού ύψους για το κελί που εμπεριέχει τον κόμβο. Δεν γίνεται καμία υπόθεση για τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Τα πεπερασμένα στοιχεία αντίθετα προσδιορίζουν ακριβώς την μεταβολή του υδραυλικού ύψους σε ένα στοιχείο με χρήση συναρτήσεων παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά μπορούν να προσδιοριστούν για όλα τα σημεία χρησιμοποιώντας βασικές συναρτήσεις.



Σχήμα 2. Υπολογιστικά μόρια

- Τρισδιάστατο υπολογιστικό μόριο πεπερασμένων διαφορών
- Δυσδιάστατο υπολογιστικό μόριο πεπερασμένων διαφορών
- Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8

Πηγή [1]

Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (2) γράφεται για το υπολογιστικό μόριο του σχήματος (2.a) ως εξής:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k+1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (12)$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο i, j, k ($h_{i,j,k}$) εμπεριέχει το υδραυλικό ύψος στον κόμβο καθώς και τα υδραυλικά ύψη στους έξι γειτονικούς κόμβους. Κάθε τιμή υδραυλικού ύψους πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή (B, C, D, E, F, G ή H) ο οποίος αποτελεί συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάμεσα στους κόμβους. Ο συντελεστής H αποτελεί επίσης μία συνάρτηση του όρου της αποθηκευτικότητας. Ο όρος $RHS_{i,j,k}$ συμπεριλαμβάνει όρους αποθηκευτικότητας και εμπλουτισμού στο δεξί μέρος της εξίσωσης [1].

2.3. Εννοιολογικό μοντέλο και σχεδιασμός πλέγματος

2.3.1. Κατασκευή εννοιολογικού μοντέλου

Το εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) είναι μία γραφική απεικόνιση του υπογείου συστήματος ροής η οποία καθορίζει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και το σχεδιασμό του πλέγματος. Σκοπός είναι η όσο το δυνατό απλοποίηση του προβλήματος αλλά διατηρώντας ταυτόχρονα μία ικανοποιητική πολυπλοκότητα που αρμόζει στο πεδίο καθώς και η οργάνωση των δεδομένων έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολη η ανάλυση. Όσο πιο καλά προσομοιάζονται οι συνθήκες του πεδίου από το μοντέλο τόσο πιο σωστό είναι και το αριθμητικό μοντέλο που προκύπτει.

Για την δημιουργία του εννοιολογικού μοντέλου αρχικά προσδιορίζεται η υπό εξέταση περιοχή και τα όριά της τα οποία συνήθως ταυτίζονται με τα υδρογεωλογικά όρια της περιοχής. Στη συνέχεια ακολουθούν τα εξής βήματα:

1. Προσδιορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων
2. Προσδιορισμός υδατικού ισοζυγίου
3. Προσδιορισμός του συστήματος ροής

1. Προσδιορισμός υδροστρωματογραφικών μονάδων:

Για τον προσδιορισμό των υδροστρωματογραφικών μονάδων απαιτούνται γεωλογικές πληροφορίες, δεδομένα από γεωτρήσεις καθώς και διάφορα υδρογεωλογικά δεδομένα. Οι μονάδες αυτές αποτελούνται από ένα σύνολο με γεωλογικές μονάδες που έχουν παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες.

Η χρήση υδροστρωματογραφικών μονάδων είναι περισσότερο χρήσιμη στην περίπτωση προσομοίωσης γεωλογικών συστημάτων μίας ευρείας περιοχής. Στην περίπτωση μικρότερων περιοχών ο προσδιορισμός των μονάδων αυτών είναι ιδιαίτερα δύσκολος καθώς απαιτείται λεπτομερής γνώση των ιδιοτήτων του πεδίου όσον αφορά την στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία σπάνια διατίθεται.

2. Προσδιορισμός υδατικού ισοζυγίου

Για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου λαμβάνονται υπόψη οι πηγές του νερού μέσα στο σύστημα, η διεύθυνση της ροής και τα σημεία εξόδου του νερού καθώς και οι εισροές (π.χ. εμπλουτισμός από βροχόπτωση, εισροή από το έδαφος, εμπλουτισμός από επιφανειακά ύδατα) και οι εκροές (εξατμισοδιαπνοή, άντληση κτλ.). Ο προσδιορισμός του υδατικού ισοζυγίου δείχνει τις μεταβολές στα μεγέθη αυτά καθώς και την αλλαγή στην αποθηκευτικότητα. Κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου το υδατικό ισοζύγιο που προκύπτει από τα δεδομένα του πεδίου συγκρίνεται με το υδατικό ισοζύγιο που υπολογίζεται από το μοντέλο.

3. Προσδιορισμός του συστήματος ροής

Για τον προσδιορισμό του συστήματος ροής χρησιμοποιούνται υδρολογικές πληροφορίες που αφορούν την βροχόπτωση, εξάτμιση, και επιφανειακή απορροή καθώς και δεδομένα για τα υδραυλικά ύψη και γεωχημικές πληροφορίες π.χ. συγκεντρώσεις σημαντικών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) και ανιόντων (SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^-), θερμοκρασία και pH [1].

2.3.2. Είδη μοντέλων

Τα μοντέλα υπόγειας ροής μπορεί να είναι μεταβλητά ή σταθερής κατάστασης, περιορισμένα ή μη περιορισμένα, και να αφορούν 1,2 ή 3 χωρικές διαστάσεις. Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τις διαστάσεις τα μοντέλα που υπάρχουν μπορεί να είναι δισδιάστατα χωρικά, δισδιάστατου προφίλ, ημι-τρισδιάστατα και τρισδιάστατα.

1. Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά συμπεριλαμβάνουν 4 είδη υδροφορέων: περιορισμένων, περιορισμένων με διαρροή, ελεύθερων και ανάμεικτων υδροφορέων.

ο Περιορισμένοι υδροφορείς:

Στην περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων οι συντελεστές μεταβιβασιμότητας και αποθηκευτικότητας υπολογίζονται σε κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Αλλαγές στην μεταβιβασιμότητα μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Τιμές μεταβιβασιμότητας και αποθηκευτικότητας μπορούν να υπολογιστούν από βιβλιογραφικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και τιμές του πάχους του υδροφορέα.

ο Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή:

Στους υδροφορείς αυτούς το αδιαπέρατο στρώμα και ο υδροφορέας ο οποίος παρέχει τη διαρροή στο περιοριστικό στρώμα δεν παρουσιάζονται επακριβώς στο μοντέλο αλλά προσδιορίζονται μέσω ενός συντελεστή διαρροής ο οποίος ισούται με την κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του περιοριστικού στρώματος προς το πάχος του περιοριστικού στρώματος.

$$\text{Leakance} = Kz'/b' \quad (13)$$

Η πηγή του νερού στον περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας ή ελεύθερος υδροφορέας ή ακόμη και ένας επιφανειακός όγκος νερού.

ο Ελεύθεροι υδροφορείς:

Όπως προαναφέρθηκε στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι υποθέσεις του Dupuit σύμφωνα με τις οποίες θεωρείται οριζόντια ροή χωρίς αλλαγή στο υδραυλικό ύψος με το βάθος.

Το μοντέλο υπολογίζει τη στάθμη του νερού για κάθε κόμβο. Για την προσομοίωση απαιτούνται πίνακες με στοιχεία για την υδραυλική αγωγιμότητα, το ενεργό πορώδες και το ύψος από ένα επίπεδο αναφοράς (elevation of the datum).

Στην περίπτωση που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υποθέσεις του Dupuit, ένα μοντέλο-προφίλ ή ένα τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του δισδιάστατου χωρικού μοντέλου.

ο Μικτά συστήματα υδροφορέων:

Το σύστημα αυτό αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω τριών συστημάτων. Ένας υδροφορέας μπορεί να αλλάζει χωρικά από περιορισμένο σε μη περιορισμένο ή να αλλάζει λόγω άντλησης.

2. Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα

Το είδος αυτού του μοντέλου προσομοιάζει μία σειρά (συστοιχία) από υδροφορείς με ενδιάμεσα αδιαπέρατα στρώματα. Η επίδραση του αδιαπέρατου στρώματος προσομοιάζεται μέσω του συντελεστή διαρροής ($L_{i,j}$) ο οποίος αναπαριστά την κάθετη ροή ανάμεσα στους δύο υδροφορείς. Απελευθέρωση νερού από την αποθηκευτικότητα δεν θεωρείται πως ισχύει.

3. Τρισδιάστατα μοντέλα και δισδιάστατα μοντέλα προφίλ

Τα τρισδιάστατα μοντέλα, τα οποία ακολουθούν την οπτική γωνία του συστήματος ροής, έχουν περίπου τις ίδιες απαιτήσεις σε δεδομένα όπως τα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα εκτός από το ότι οι παράμετροι προσδιορίζονται για κάθε στρώμα του μοντέλου.

Στα μοντέλα προφίλ, τα οποία αποτελούν ειδική κατηγορία, τα δεδομένα οργανώνονται όπως στα δισδιάστατα χωρικά περιορισμένα μοντέλα ή στα τρισδιάστατα μοντέλα.

Τα τρισδιάστατα και προφίλ μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων όταν οι κάθετες κλίσεις του υδραυλικού ύψους του υδροφορέα είναι σημαντικές [1].

2.3.3. Σχεδιασμός πλέγματος

Σε ένα αριθμητικό μοντέλο, η υπό μελέτη περιοχή καλύπτεται από έναν αριθμό κόμβων και διάφορα συνδεόμενα κελιά πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι δημιουργείται ένα πλέγμα του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από το εννοιολογικό μοντέλο [1].

2.3.3.1. Τύποι πλέγματος

Υπάρχουν δύο είδη πλεγμάτων πεπερασμένων διαφορών:

- τα στοιχειο-κεντρικά (block centered) στα οποία οι οριακές συνθήκες της ροής εφαρμόζονται στην άκρη του στοιχείου και

- τα δικτυο-κεντρικά (mesh centered) στα οποία οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με τον κόμβο.

Τα πεπερασμένα στοιχεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό πλέγματος και αφορούν δισδιάστατα στοιχεία (τρίγωνα ή τετράπλευρα) και τρισδιάστατα στοιχεία (τετράεδρα, εξάεδρα ή πρίσματα). Το είδος της συνάρτησης παρεμβολής που χρησιμοποιείται καθορίζει εάν το στοιχείο είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό [1].

2.3.3.2. Προσανατολισμός πλέγματος

Το πλέγμα πρέπει να τοποθετείται πάνω στο χάρτη έτσι ώστε οι άξονες x και y να ταυτίζονται με τους συντελεστές K_x και K_y και ο κάθετος άξονας του μοντέλου να ευθυγραμμίζεται με τον συντελεστή K_z . Στην περίπτωση που δεν μπορεί να γίνει σωστή ευθυγράμμιση του πλέγματος με τους συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας και η ανισοτροπία του υδροφορέα είναι σημαντική, η γενική εξίσωση πρέπει να εμπεριέχει τα συστατικά της υδραυλικής αγωγιμότητας που δεν συμπεριλαμβάνονται.

Επίσης στην περίπτωση των πεπερασμένων διαφορών το πλέγμα πρέπει να τοποθετείται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των κόμβων που βγαίνουν έξω από το πλέγμα. Αυτοί ονομάζονται ανενεργοί κόμβοι ενώ αυτοί που εμπεριέχονται στο πλέγμα ονομάζονται ενεργοί κόμβοι. Στην περίπτωση των πεπερασμένων στοιχείων δεν υπάρχουν ανενεργοί κόμβοι καθώς τα στοιχεία ταιριάζουν ακριβώς στα όρια.

Επιπλέον, όταν προσδιορίζουμε τις οριακές συνθήκες είναι σημαντικό να τοποθετείται το πλέγμα έτσι ώστε οι κόμβοι να συμπίπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα με τα όρια της περιοχής. Όταν όμως ενδιαφερόμαστε για το εσωτερικό του πλέγματος αυτό δεν είναι απαραίτητο και οι οριακές συνθήκες μπορούν να τοποθετηθούν αρκετά μακριά έτσι ώστε οι δυνάμεις που ασκούνται στο εσωτερικό του συστήματος π.χ. άντληση να μην τις επηρεάζουν.

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχεί κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος είναι η επιλογή των αποστάσεων ανάμεσα στους κόμβους. Οι αποστάσεις αυτές επηρεάζονται από την καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα ή της ποτενσιομετρικής

επιφάνειας (για την οριζόντια διεύθυνση), τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους (για την κάθετη διεύθυνση), την μεταβλητότητα στις ιδιότητες του υδροφορέα, την μεταβλητότητα στην άντληση ή εμπλουτισμό της περιοχής, την επαναφόρτωση ή εκκένωση ποταμών και το γενικό μέγεθος της περιοχής [1].

2.3.3.3. Πλέγματα πεπερασμένων διαφορών

Οι κόμβοι έχουν δείκτες i,j,k οι οποίοι αναφέρονται στη γραμμή, στήλη και στρώμα αντίστοιχα. Στην περίπτωση δισδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιούνται πίνακες τιμών Δ_x και Δ_y για τον οριζόντιο άξονα και για τρισδιάστατο πλέγμα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένας πίνακας τιμών Δ_z . Οι αποστάσεις μπορεί να είναι ορισμένες έτσι ώστε τα Δ_x , Δ_y , Δ_z να θεωρούνται σταθερές αλλά όχι και απαραίτητα ίσα μεταξύ τους. Ωστόσο κάποιες φορές χρειάζεται ένα ανομοιόμορφο πλέγμα. Π.χ. στα ποτάμια και στις περιοχές όπου η υδραυλική κλίση είναι απότομη χρησιμοποιούνται μικρότερες αποστάσεις μεταξύ των κόμβων. Επίσης, κατά τον σχεδιασμό του πλέγματος όταν χρησιμοποιούνται μικρές αποστάσεις στο εσωτερικό συνήθως αυτές αυξάνονται όσο φτάνουμε προς τα όρια του πλέγματος. Ωστόσο, η απόσταση μεταξύ των κόμβων απαιτείται να μην ξεπερνάει την προηγούμενη απόσταση επί 1,5 [1].

2.3.3.4. Πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων

Στην περίπτωση αυτή η εισαγωγή των δεδομένων για την δημιουργία του πλέγματος είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Κάθε κόμβος και στοιχείο πρέπει να αριθμείται και οι συντεταγμένες κάθε κόμβου και ο αριθμός των κόμβων πρέπει να συνδέονται με κάθε στοιχείο που εισάγεται στο μοντέλο. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αντιμετωπίζει κάθε στοιχείο ξεχωριστά και μετά συγκεντρώσει τις εξισώσεις για όλα τα στοιχεία σε μία γενική εξίσωση. Κατά το σχεδιασμό ενός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για ισοτροπικά υλικά κάθε στοιχείο πρέπει να κατασκευάζεται έτσι ώστε ο λόγος του μέγιστου προς το ελάχιστο στοιχείο να είναι κοντά στη μονάδα [1].

2.4. Δεδομένα

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τα μοντέλα της υπόγειας ροής αφορούν δύο γενικές κατηγορίες. Η πρώτη αφορά το φυσικό πλαίσιο το οποίο προσδιορίζει τη γεωμετρία του συστήματος ενώ η δεύτερη αφορά υδρογεωλογικά δεδομένα όπως π.χ. πληροφορίες για τα υδραυλικά ύψη και τις ροές καθώς και διάφορες ιδιότητες του υδροφορέα. Τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από υπάρχουσες αναφορές αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτούνται μετρήσεις πεδίου.

Επίσης, κατά την προσομοίωση ανισοτροπικών μέσων απαιτούνται δεδομένα για τις τρεις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας K_x , K_y και K_z ενώ η ανισοτροπία σε έναν υδροφορέα εκφράζεται μέσω του λόγου του K_x προς το K_y για την οριζόντια διεύθυνση και τον λόγο του K_x προς το K_z για την κάθετη διεύθυνση.

Η μοντελοποίηση ισοτροπικών γεωλογικών μονάδων που βρίσκονται στο πεδίο σε πολύ μικρή κλίμακα είναι αρκετά δύσκολη. Όταν το πάχος του μοντελοποιημένου στρώματος $(B_{i,j})$ είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του ισοτροπικού στρώματος $(b_{i,j})$, οι ισοδύναμες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την οριζόντια και κάθετη διεύθυνση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$(K_x)_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{K_{i,j,k} b_{i,j,k}}{B_{i,j}} \quad (14)$$

$$(K_z)_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{\sum_{k=1}^m b_{i,j,k} / K_{i,j,k}} \quad (15)$$

$$B_{i,j} = \sum_{k=1}^m b_{i,j,k} \quad (16)$$

Ο Hearne παρουσίασε την ακόλουθη εξίσωση η οποία προκύπτει από την εξίσωση Theis και χρησιμοποιείται για την διόρθωση της επίδρασης της στρωματοποίησης κεκλιμένων στρωματογραφικών μονάδων τα οποία σε ένα μοντέλο προσομοιάζονται σαν οριζόντια στρώματα.

$$\frac{K_x}{K_y} = \frac{R}{1 - (1 - R) \cos^2 A} \quad (17)$$

Όπου:

K_x : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση x [L/T]

K_y : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση y [L/T]

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

A : η γωνία της κλίσης

Τέλος, για την μεταφορά δεδομένων στο πλέγμα πρέπει αρχικά να γίνει αντιστοίχηση των τιμών των παραμέτρων στην κλίμακα του μοντέλου και στη συνέχεια εκχώρηση των ιδιοτήτων του υδροφορέα σε κάθε υδροστρωματογραφική μονάδα του εννοιολογικού μοντέλου. Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη σε κάθε κόμβο τα οποία ταυτόχρονα αποτελούν και τη μέση τιμή υδραυλικού ύψους για όλο το κελί. Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ωστόσο, οι ιδιότητες του υδροφορέα μπορούν να εκχωρηθούν είτε στον κόμβο είτε στο στοιχείο [1].

2.5. Οριακές συνθήκες

2.5.1. Είδη ορίων

Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από μία γενική εξίσωση, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εκφράσεις που προσδιορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή ανεξάρτητη (ροή) στα όρια του προβλήματος.

Υπάρχουν δύο είδη ορίων: τα φυσικά όρια (physical boundaries) και τα υδραυλικά όρια (hydraulic boundaries).

Τα φυσικά όρια της υπόγειας ροής ορίζονται από την ύπαρξη ενός αδιαπέρατου υλικού ή μεγάλου όγκου επιφανειακού νερού. Άλλα προκύπτουν ως αποτέλεσμα υδρολογικών καταστάσεων και αποτελούν τα υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια. Τα υδραυλικά όρια είναι δυνατόν να αλλάζουν θέση ή ακόμη και να εξαφανιστούν αν αλλάξουν οι συνθήκες.

Τα υδραυλικά όρια αντιπροσωπεύονται από τους παρακάτω 3 τύπους μαθηματικών συνθηκών:

1. *Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet)* - για τα οποία δίνεται το υδραυλικό ύψος
2. *Οριακές συνθήκες σταθερής ροής (Συνθήκες Newman)* - για τα οποία δίνεται η ροή κατά μήκος του ορίου
3. *Οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος (Οριακές συνθήκες Cauchy)* - για τα οποία υπολογίζεται η ροή κατά μήκος του ορίου με δεδομένη μία τιμή υδραυλικού ύψους στο όριο. Ονομάζονται και μικτές οριακές συνθήκες [1].

2.5.2. Τοποθέτηση ορίων:

Συνήθως είναι καλύτερα να θέτονται σαν όρια τα πραγματικά και φυσικά όρια του συστήματος όπως για παράδειγμα ένα αδιαπέρατο πέτρωμα, ένα στρώμα όπου η υδραυλική αγωγιμότητα ξεπερνά κατά δύο τάξεις την τιμή στο γειτονικό στρώμα κτλ. Ωστόσο, είναι πιθανό να μην μπορεί να σχεδιαστεί ένα πλέγμα το οποίο περιλαμβάνει τα φυσικά όρια του συστήματος αν το σημείο που εξετάζεται απέχει σημαντικά από αυτά. Σε αυτήν την περίπτωση σαν οριακή συνθήκη μπορεί να καθοριστεί ένας τοπικός διαχωρισμός υπόγειας ροής με την μορφή ενός ορίου μηδενικής ροής (no flow boundary) κοντά στην περιοχή. Τέτοιου είδος όρια απαντώνται κοντά σε τοπογραφικά ύψη και μπορούν να σχηματιστούν κάτω από μερικώς διαπερατές μάζες επιφανειακού νερού.

Ένα σύστημα συνήθως εμπεριέχει και οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους αλλά και οριακές συνθήκες σταθερής ροής αλλά κατά την κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου συνήθως λαμβάνονται υπόψη μόνο οι οριακές συνθήκες ροής.

Στην περίπτωση που τα όρια που επιλέγονται δεν συμπίπτουν με τα όρια της περιοχής υπάρχουν δύο πιθανές επιλογές:

A. Απομακρυσμένα όρια (*distant boundaries*).

Τα όρια μπορούν να τοποθετηθούν αυθαίρετα μακριά από το κέντρο του πλέγματος έτσι ώστε οι δυνάμεις του συστήματος να μην τα επηρεάζουν κατά την προσομοίωση. Για παράδειγμα η προσομοίωση πρέπει να σταματήσει πριν ο κώνος πτώσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που δημιουργείται λόγω άντλησης φτάσει

το όριο. Στα απομακρυσμένα όρια, το πλέγμα σχεδιάζεται πολύ πυκνό στην περιοχή μελέτης και πολύ πιο αραιό κοντά στα όρια.

B. Υδραυλικά όρια (hydraulic boundaries).

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιορίσουν την περιοχή του προβλήματος. Είναι όρια σταθερού υδραυλικού ύψους ή όρια σταθερής ροής. Συχνά αυτά τα όρια ονομάζονται και τεχνητά όρια.

Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στη βαθμονόμηση του μοντέλου. Ωστόσο δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περίπτωση πρόβλεψης γιατί το μοντέλο θεωρεί πως οι συνθήκες στα όρια δεν μεταβάλλονται εκτός αν μεταβληθούν από τον χρήστη του μοντέλου [1].

2.5.3. Προσομοιάζοντας τα όρια

Στα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και τα δικτυο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι συμπίπτουν με τις οριακές συνθήκες. Στα στοιχειο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών , τα υδραυλικά ύψη τοποθετούνται πάνω στους κόμβους αλλά τα όρια ροής έξω από αυτούς.

- *Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους:*

Τα όρια αυτά προσομοιάζονται θέτοντας τα υδραυλικά ύψη στους σχετικούς κόμβους ορίων ίσα με μετρούμενες τιμές και σε δισδιάστατα μοντέλα αναπαριστούν πλήρως διαπερατές επιφανειακές μάζες νερού και το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα ενώ σε τρισδιάστατα μοντέλα αναπαριστούν τον υδροφόρο ορίζοντα ή επιφανειακές μάζες νερού.

- *Οριακή συνθήκη σταθερής ροής:*

Οι συνθήκες αυτές χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν ροές σε επιφανειακές μάζες νερού, υπόγειες πηγές και ροές και διήθηση από ή προς αδιαπέρατο στρώμα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα όρια μηδενικής ροής στα οποία η ροή γύρω από το όριο είναι μηδέν. Ένα όριο μηδενικής ροής μπορεί να αναπαριστά έναν αδιαπέρατο βράχο, μία αδιαπέρατη ζώνη, υπόγεια χωρίσματα νερού

κτλ. Επίσης αυτού του είδους τα όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της υφαλμύρηνσης σε έναν υδροφορέα που βρίσκεται κοντά στην ακτή.

- *Οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος:*

Η ροή κατά μήκος αυτού του είδους ορίων εξαρτάται από την διαφορά ανάμεσα στο συγκεκριμένο υδραυλικό ύψος που ορίζεται από τον χρήστη στη μια πλευρά του ορίου και του υδραυλικού ύψους που υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά. Αυτά τα όρια μπορούν να προσομοιάσουν και συνθήκες διαρροής σύμφωνα με τη σχέση :

$$L = Q_L / A = K_z' / b'(h_{source} - h) \quad (18)$$

Όπου:

Q_L : η ογκομετρική ροή

A : η περιοχή του κελιού από την οποία γίνεται η διαρροή

h_{source} : το υδραυλικό ύψος στην πηγή

h : το υδραυλικό ύψος κοντά στην πηγή

K_z' : ο συντελεστής της κάθετης υδραυλικής αγωγιμότητας στην διεπιφάνεια που διαχωρίζει την πηγή από τον υδροφορέα

b' : το πάχος της διεπιφάνειας [1]

2.5.4. Εσωτερικά Όρια

Οι οριακές συνθήκες είναι δυνατόν να εφαρμοστούν και στο εσωτερικό του προβλήματος για την προσομοίωση άντλησης, εμπλουτισμού νερού ή διαφόρων άλλων εσωτερικών ορίων. Η προσομοίωση μπορεί να γίνει με οριακές συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος για την περίπτωση λιμνών και ποταμών αλλά και με οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους για την περίπτωση επιφανειακών μαζών νερού στο εσωτερικό του πλέγματος. Επίσης, εσωτερικές οριακές συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν στην περίπτωση κάποιου αδιαπέρατου πετρώματος ή ρήγματος θέτοντας την τιμή της μεταβιβασιμότητας ή υδραυλικής αγωγιμότητας ίση με μηδέν στους κατάλληλους κόμβους [1].

3. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ

3.1. Γενικά

Οι διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται με τη μεταφορά μάζας στον υπόγειο υδροφορέα είναι οι ακόλουθες [2]:

- Συμμεταφορά (Advection): η διαδικασία αυτή αφορά την κίνηση μίας διαλυμένης ουσίας μαζί με τη ροή του νερού και εξαρτάται από την ταχύτητα διήθησης (seepage velocity) η οποία υπολογίζεται από την ταχύτητα Darcy διαιρεμένη μη το πορώδες.
- Διάχυση και διασπορά (Diffusion and Dispersion): αυτές οι δύο διαδικασίες έχουν παρόμοια αποτελέσματα. Η μοριακή διάχυση πραγματοποιείται όταν μία διαλυμένη ουσία μεταφέρεται από μία περιοχή με υψηλότερη συγκέντρωση σε μία περιοχή με χαμηλότερη συγκέντρωση, ενώ η μηχανική διασπορά οφείλεται σε μεταβολές στην ταχύτητα λόγω της ανομοιογένειας του υδροφορέα σε μακροσκοπική κλίμακα.
- Προσρόφηση (Adsorption) : η διαδικασία της προσρόφησης αφορά τη μεταφορά ρύπου από τη διαλυτή φάση στο προσροφητικό υλικό, σε αυτήν την περίπτωση κάποιο βραχώδες ή εδαφικό υλικό.
- Βιοαποδόμοιση (Biodegradation): πραγματοποιείται όταν κάποιοι οργανικοί διαλύτες αποδομούνται από μικρόβια προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό.
- Υγρά σε μη υδατώδη φάση –NAPLs τα οποία δεν αναμιγνύονται με το νερό και είτε είναι χαμηλότερης πυκνότητας από το νερό και επιπλέον πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα είτε είναι πιο πυκνά και βυθίζονται στον πάτο του υδροφορέα.

3.2. Μοντελοποίηση και κυρίαρχες εξισώσεις

Υπάρχουν δύο τύποι μοντέλων για την προσομοίωση μοντέλων μεταφοράς ρύπου: της απλής συμμεταφοράς και της συμμεταφοράς-διασποράς. Στο μοντέλο της απλής συμμεταφοράς η εξάπλωση του ρύπου εξαρτάται αποκλειστικά από την

υπόγεια ροή ενώ σε αυτό της συμμεταφοράς-διασποράς εξαρτάται από την υδροδυναμική διασπορά σε πορώδες μέσο. Για την προσομοίωση πρέπει να προσδιοριστούν ομοίως με το μοντέλο της ροής διάφορες υδρογεωλογικές παράμετροι καθώς και αρχικές και οριακές συνθήκες [3].

Η εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς σε πορώδες μέσο ή αλλιώς εξίσωση συμμεταφοράς διασποράς (advection-dispersion equation) είναι η εξής:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c v_i) \quad (19)$$

Όπου D_{ij} είναι ο συντελεστής διασποράς
 v_i ίδες οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας
και c η συγκέντρωση

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στην θεώρηση μοναδιαίου στοιχειώδους όγκου (REV) και στην θεώρηση του νόμου του Fick για τη διάχυση σύμφωνα με τον οποίο μία μάζα νερού που υπόκειται σε διάχυση είναι ανάλογη της διαφοράς των συγκεντρώσεων.

Ωστόσο για την μεταφορά ενός ρύπου πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι η προσρόφηση που προαναφέρθηκε η οποία περιγράφεται από έναν παράγοντα επιβράδυνσης R_d καθώς και η υδρόλυση και αποδόμηση που περιγράφονται από μία σταθερά λ . Αυτοί οι όροι περιγράφονται ως εξής:

$$R_d = v / v_c = 1 + K_d (\rho_b / n) \quad (20)$$

$$dc / dt = \lambda c \quad (21)$$

Όπου v η μέση γραμμική ταχύτητα
 v_c η ταχύτητα του ρύπου
 K_d ο συντελεστής κατανομής
 ρ_b είναι η πυκνότητα της μάζας (bulk density) του πορώδους υλικού
και n το πορώδες

“Ετσι, από τα παραπάνω προκύπτει πως η γενική εξίσωση για την μεταφορά μάζας γνωστή και ως εξίσωση συμμεταφοράς-διασποράς μπορεί να γραφεί ως ένα ισοζύγιο μάζας συμπεριλαμβάνοντας την εξίσωση (19) της διασποράς και την εξίσωση (20) των χημικών αντιδράσεων με την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (cv_i) = R_d \frac{\partial c}{\partial t} + \lambda c R_d - \frac{C' W^*}{n_e} \quad (22)$$

Όπου c η συγκέντρωση
 C' μία γνωστή συγκέντρωση πηγής
 v_i οι συνιστώσες του διανύσματος της ταχύτητας
 W^* ένας όρος πηγής-δεξαμενής
 και n_e το ειδικό πορώδες.

Σε ότι αφορά τη μοντελοποίηση, ο κώδικας που γράφεται για ένα μοντέλο μεταφοράς ρύπου αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα μέρος του μοντέλου επιλύει την εξίσωση της ροής και το δεύτερο την εξίσωση της συμμεταφοράς-διασποράς. Η επίλυση της εξίσωσης της ροής δίνει την κατανομή του υδραυλικού ύψους μέσω της οποίας προσδιορίζεται η ταχύτητα. Οι ταχύτητες αποτελούν είσοδο στο μοντέλο της μεταφοράς το οποίο προβλέπει την κατανομή της συγκέντρωσης χρονικά και χωρικά. Για την προσομοίωση μεταφοράς ρύπου υπάρχουν κώδικες πεπερασμένων διαφορών όπως οι: SEFTRAN, CFEST, HST3D και SUTRA καθώς και ένας πιο σύγχρονος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων o FTWORK [1].

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ PTC

4.1. Θεμελιώδεις εξισώσεις

Το PTC για την προσομοίωση της υπόγειας ροής χρησιμοποιεί ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων. Η υπόγεια ροή περιγράφεται από:

-Το υδραυλικό ύψος h (hydraulic head)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (23)$$

-Τις συνιστώσες της ταχύτητας της υπόγειας ροής

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (24)$$

-και από μεταφορά μάζας ρύπου η οποία με τη σειρά της περιγράφεται από τη συγκέντρωση c

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Για την επίλυσή τους αρχικά υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος από την εξίσωση (23), στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας του Darcy V_x , V_y , V_z από την (24) και τέλος επιλύεται η (25) ως προς τη συγκέντρωση του ρύπου c [4].

4.2. Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων για περίπλοκα φυσικά συστήματα απαιτεί τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων πεδίου απαιτείται μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC μέσω του οποίου ελαχιστοποιείται η υπολογιστική αυτή προσπάθεια.

Η χρήση του αλγόριθμου περιλαμβάνει το διαχωρισμό του υπό εξέταση τομέα σε παράλληλα οριζόντια στρώματα. Μέσα σε κάθε στρώμα χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων η οποία επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση μη ομαλών τομέων ενώ τα στρώματα συνδέονται μεταξύ τους κάθετα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων επιτρέπει στον αλγόριθμο τον διαχωρισμό των υπολογισμών σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιλύονται όλες οι εξισώσεις που αφορούν τα πεπερασμένα στοιχεία μέσα στο στρώμα και στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι εξισώσεων των πεπερασμένων διαφορών που συνδέουν τα στρώματα κάθετα μεταξύ τους [4].

4.3. Τρισδιάστατη Υπόγεια Ροή

4.3.1. Θεμελιώδης εξίσωση

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος λύνοντας ως προς το υδραυλικό ύψος μέσω της ακόλουθης διαφορικής εξίσωσης:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} \\ & + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Όπου:

h : το υδραυλικό ύψος [L]

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την διεύθυνση x, y και z αντίστοιχα [LT^{-1}]

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

Q_i : ο όρος της πηγής/δεξαμενής στη θέση i [$L^3 T^{-1}$] (αν είναι θετικός δείχνει εμπλουτισμό)

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

r : ο αριθμός των σημείων πηγών/δεξαμενών

Σημείωση: Για ευκολία ο τελευταίος όρος της εξίσωσης θα συμβολίζεται με Q .

Η κυρίαρχη εξίσωση λύνεται αριθμητικά μέσω του PTC χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών [4].

4.3.2. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η διαδικασία που ακολουθεί το PTC για να επιλύσει την κυρίαρχη εξίσωση (26) περιλαμβάνει την προσέγγιση των όρων της εξίσωσης που εμπεριέχουν x και y μεταβλητές χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει ένα άθροισμα εξισώσεων το οποίο αναπαριστά επακριβώς τη μερική διαφορική εξίσωση της υπόγεια ροής. Μια πεπερασμένη προσεγγιστική μορφή της σειράς είναι:

$$h(x, y, z, t) \approx \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (27)$$

Όπου:

h : το υδραυλικό ύψος [L]

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

h_i : ένας μη καθορισμένος συντελεστής [L]

w_i : είναι μία βασική (ή παρεμβολική) συνάρτηση (αδιάστατη) και

N : ο αριθμός των κόμβων στον κάναβο των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσέγγιση της σειράς δίνει μία ακριβή αναπαράσταση όσο το N προσεγγίζει το άπειρο. Με μία προσεκτική επιλογή της βασικής συνάρτησης w_i , οι μη καθορισμένοι συντελεστές h_i γίνονται οι τιμές των υδραυλικών υψών στους κόμβους

με συντεταγμένες (x, y, z). Μία παράμετρος η οποία αυξάνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι πως γίνεται χρήση τμηματικών συνεχών βασικών εξισώσεων οι οποίες είναι μη μηδενικές γύρω μόνο από ένα μικρό μέρος της ευρύτερης περιοχής. Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύπου βασικών εξισώσεων, το PTC χρησιμοποιεί τμηματικές γραμμικές βασικές εξισώσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων πεπερασμένων στοιχείων.

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρατηρείται ότι αν και ο διαφορικός τελεστής L που περιέχει το h είναι ίσος με το μηδέν, όταν ο τελεστής περιέχει την προσεγγιστική εξίσωση παρουσιάζεται ένα σφάλμα. Η εξίσωση μαθηματικά ξαναγράφεται ως εξής:

$$L(h) = 0 \text{ ótan } L(h) = R \text{ ópoú } R \text{ to upoloemmatikó sfálmma}$$

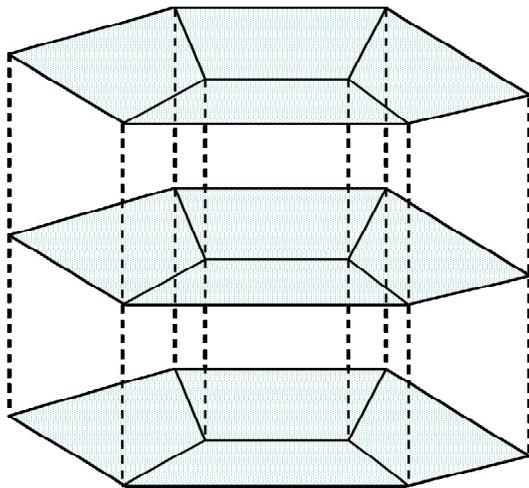
Για την επίλυση της εξίσωσης (27) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του υπολειμματικού σφάλματος R [4].

Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά λαμβάνοντας υπόψη ένα ολοκληρωμένο σύνολο εξισώσεων w_j . Υποχρεώνοντας το σφάλμα R να είναι ορθογωνικό σε όλες τις πιθανές τιμές του w_j , το R υποχρεώνεται να προσεγγίσει το μηδέν και λαμβάνεται η λύση της εξίσωσης (27). Έτσι:

$$L(h)=L(h) \text{ ótan } R=0.$$

4.3.3. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών

Ο κώδικας επομένως για την αριθμητική επίλυση της βασικής εξίσωσης κάνει χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τις διευθύνσεις x και y όπως περιγράφθηκε παραπάνω. Ωστόσο κατά την κάθετη διεύθυνση z θεωρείται πως το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων επαναλαμβάνεται σε στρώματα με κόμβους οι οποίοι στοιβάζονται ο ένας κάτω από τον άλλο όπως φαίνεται στο σχήμα (3). Έτσι κατά την διεύθυνση z ο κώδικας κάνει χρήση μίας μονοδιάστατης εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών [4].



Σχήμα 3 Απεικόνιση οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων στοιβαγμένα το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας την τρισδιάστατη κατανομή Πηγή [4]

4.3.4. Οριακές συνθήκες

Το PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής. Οι τρεις αυτοί τύποι είναι:

- *1^{ος} τύπος οριακών συνθηκών ή συνθήκες Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους)*
- *2^{ος} τύπος οριακών συνθηκών ή συνθήκες Newman (σταθερής ροής)*
- *3^{ος} τύπος οριακών συνθηκών (διαρροή)*

Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη κατά τη διάρκεια μίας προσομοίωσης. Ωστόσο η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι της σταθερής ροής. Αυτό προϋποθέτει έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο πυθμένα και πλευρές. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες μέσα στον τομέα ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες.

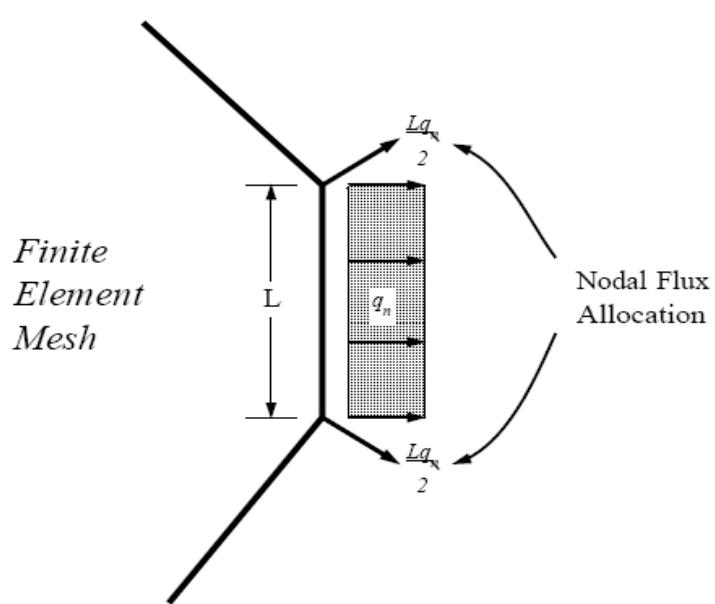
- Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους

Αυτού του είδους οι συνθήκες καθορίζονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τα αντίστοιχά τους υδραυλικά ύψη. Ο κώδικας αυτομάτως ταξινομεί τις γραμμές

και τις στήλες στο μητρώο (πίνακα) συντελεστών που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Έτσι, εφόσον απαλείφονται οι κόμβοι σταθερών υδραυλικών υψών από το μητρώο των συντελεστών θα παραμείνουν ($N \times M - N_c$) εξισώσεις με ($N \times M - N_c$) αγνώστους με το N_c να είναι το συνολικό νούμερο των κόμβων οριακών συνθηκών σταθερού υδραυλικού ύψους μέσα στην περιοχή ροής.

- Οριακές συνθήκες σταθερής ροής

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ απλό μέσο για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών σταθερής ροής. Μέσω του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου με q_n την κανονική ροή κατά μήκος μίας μονάδας επιφανείας (μήκος x ύψος) του κάθετου ορίου σ. Όταν η ροή q_n θεωρείται σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας ενός στοιχείου μήκους L η ολοκλήρωση της σχετικής εξίσωσης θα δώσει την κομβική κατανομή που φαίνεται στο σχήμα (4). Έτσι, ο χρήστης χρειάζεται μόνο να προσδιορίσει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο έτσι ώστε να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Παροχές λόγω άντλησης μπορούν να παρουσιαστούν μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 4. Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος στοιχείου μήκους L .
Πηγή [4]

- Οριακές συνθήκες τρίτου τύπου

Οριακές συνθήκες διαρροής προκύπτουν με αντικατάσταση στην εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών ενός όρου υδραυλικής αγωγιμότητας διαρροής k_L . Ο όρος αυτός μπορεί να ολοκληρωθεί επιφανειακά και έτσι αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Ωστόσο, με τον κατάλληλο προσδιορισμό του k_L από τον χρήστη μπορεί να προσδιοριστεί η διαρροή προς όλες τις κατευθύνσεις [4].

4.3.5. Συνθήκες υδροφορέα:

Η επιβολή οριακών συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή για τον μη περιορισμένο υδροφορέα απαιτεί την ύπαρξη δύο οριακών συνθηκών οι οποίες εφαρμόζονται στον υδροφόρο ορίζοντα του ανώτερου στρώματος. Το σχήμα που παρουσιάζεται παρακάτω αφορά ένα υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος υπόκειται σε εμπλουτισμό. Το υδραυλικό ύψος του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση $z = z_{M+1}(x, y, z)$ και το πραγματικό υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα δίνεται από τη σχέση $z = z_{WT}(x, y, z)$.

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το πάχος του ανώτερου στρώματος $(z_{WT} - z_M)$ προσδιορίζεται από ύψος του νερού στο στρώμα αυτό (h_M) . Επίσης για κάθε κόμβο ισχύει: $(z_{WT})_i = (h_M)_i$. Να σημειωθεί μία από τις βασικές υποθέσεις κατά την προσομοίωση είναι πως το ύψος του νερού βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα. Επομένως το PTC ελέγχει σε κάθε στιγμή αν οι τιμές που δίνονται από το χρήστη για το υδραυλικό ύψος h_M ικανοποιούν τη συνθήκη $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$ και στην αντίθετη περίπτωση παρέχει ένα προειδοποιητικό μήνυμα.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την επίδραση της άντλησης στον υδροφόρο ορίζοντα. Η εξίσωση που περιγράφει την συνθήκη αυτή είναι η ακόλουθη.

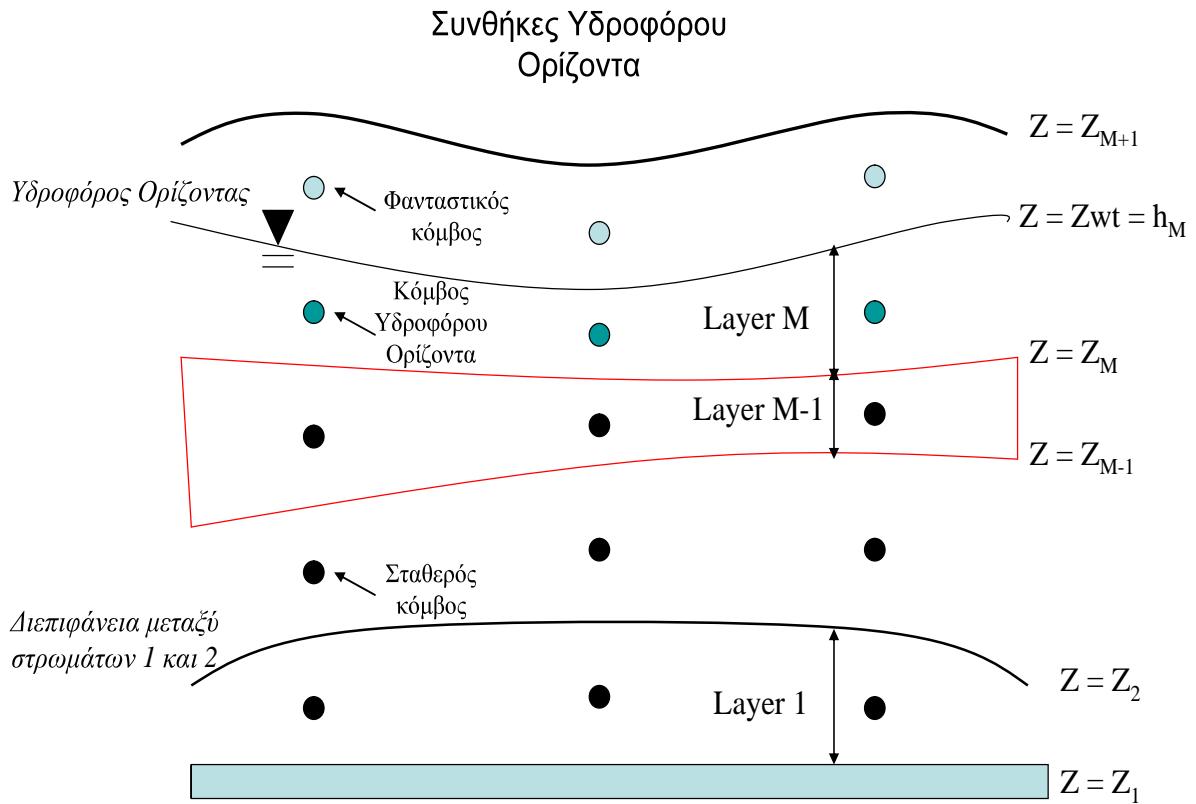
$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (28)$$

Όπου:

S_y : το ενεργό πορώδες στη στάθμη του νερού

R : το μέγεθος της άντλησης

[4]



Σχήμα 5. Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο όριο. Οι επιφάνειες που δηλώνονται από τις σχέσεις $z = z_1$, $z = z_2$ είναι σταθερά όρια στο χώρο και καθορίζουν τα στρώματα. Ο μη σταθερός υδροφόρος ορίζοντας πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη $z \leq z_{WT} \leq z_{M+1}$. Πηγή [4]

4.4. Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων

4.4.1. Κυρίαρχες εξισώσεις

Η εξίσωση μεταφοράς είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

Η όροι της διασποράς στην παραπάνω εξίσωση δίνονται από τις σχέσεις:

$$D_{xx} = (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \quad (30)$$

$$D_{yy} = (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \quad (31)$$

$$D_{zz} = (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M \quad (32)$$

$$D_{yx} = D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \quad (33)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \quad (34)$$

$$D_{zx} = D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V \quad (35)$$

Όπου:

D_M : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, συνήθως μικρός [L^2/T],

a_L : ο συντελεστής διαμήκους διασποράς [L],

a_T : ο συντελεστής οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς [L],

a_V : ο συντελεστής κάθετης εγκάρσιας διασποράς [L],

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

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

θ : το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο),

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

Q : η ισχύς της άντλησης [$1/T$], ($Q \equiv Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$)

Q_i : ο ρυθμός ογκομετρικής έγχυσης/εκκένωσης [L^3/T] στο σημείο (x_i, y_i, z_i)

c^w : η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού στο σημείο (x_i, y_i, z_i)

δ : η συνάρτηση δέλτα του Dirac

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ($Q_i \leq 0$), υποθέτουμε πως η συγκέντρωση του αντλούμενου υγρού (νερού) c^w στην αντλία ισούται με τη συγκέντρωση του περιβάλλοντος νερού. Έτσι για όλες τις περιπτώσεις άντλησης ο όρος $Q(c^w - c)$ στην (29) θεωρείται ίσος με μηδέν. Έτσι ο χρησιμοποιούμενος κώδικας διατηρεί όλους τους όρους με Q στην (29) μόνο όταν έχουμε εμπλουτισμό του υδροφορέα ($Q_i > 0$), με τη συγκέντρωση c^w να αναπαριστά την συγκέντρωση του εγχεόμενου ρευστού [4].

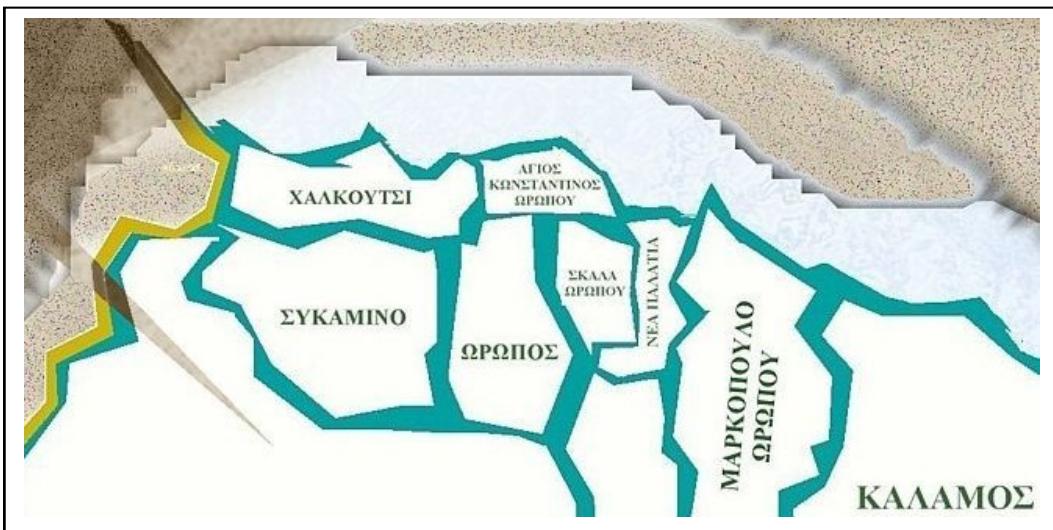
4.4.2. Οριακές συνθήκες

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί δύο τύπους οριακών συνθηκών για την εξίσωση μεταφοράς μάζας: σταθερής συγκέντρωσης στους κόμβους (specified nodal concentration) η οποία ορίζεται από το χρήστη του μοντέλου και σταθερής μεταφορικής ροής (specified convective flux) η οποία σχετίζεται με την ογκομετρική ροή που εισάγεται στο μοντέλο [4].

5. ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

5.1. Περιγραφή Οικισμών και Κοινοτήτων

Η υπό εξέταση περιοχή εμπεριέχεται στο ευρύτερο πολεοδομικό συγκρότημα του Ωρωπού το οποίο περιλαμβάνει τις κοινότητες: Συκάμινο, Ωρωπός, Σκάλα Ωρωπού, Νέα Παλάτια και Μαρκόπουλο Ωρωπού και τους οικισμούς: Άγιος Κωνσταντίνος Ωρωπού και Χαλκούτσι. Επίσης την περιοχή διαρρέει τμήμα του χειμάρρου Ασωπού.



Σχήμα 6. Τμήμα χάρτη δήμων βορειοδυτικής Αττικής. Πηγή [12]

5.1.1. Γενικά Στοιχεία

Ο **Ωρωπός** αποτελεί μία παραθεριστική περιοχή η οποία βρίσκεται στην Βορειοανατολική Αττική σε απόσταση 54 km από την Αθήνα. Η σύνδεση της περιοχής με την Αθήνα γίνεται μέσω της Εθνικής Οδού Αθηνών Λαμίας και της σιδηροδρομικής γραμμής Θεσσαλονίκης – Αθηνών ενώ στο μέλλον αναμένεται να γίνει σύνδεση της περιοχής με την Αθήνα μέσω του προαστιακού σιδηροδρόμου και της γραμμής Χαλκίδα – Αθήνα.

Η **Σκάλα Ωρωπού** είναι μία παραθεριστική κοινότητα η οποία βρίσκεται στις ακτές του ευβοϊκού κόλπου. Στην Σκάλα Ωρωπού υπάγεται και ο οικισμός Χαλκούτσι.

Το **Συκάμινο** βρίσκεται 2 km δυτικά του Ωρωπού στην αριστερή όχθη του Ασωπού. Αποτελεί μία αγροτική περιοχή η οποία ωστόσο τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μεγάλη οικιστική ανάπτυξη.

Το **Μαρκόπουλο Ωρωπού** είναι ένα παραθεριστικό χωριό το οποίο στο μεγαλύτερο τμήμα του αποτελείται από βιομηχανική ζώνη στην οποία απασχολείται και το μεγαλύτερο μέρος των κατοίκων στης περιοχής.

Τα **Νέα Παλάτια** είναι μία παραθεριστική κοινότητα του συγκροτήματος των Ωρωπίων η οποία αποσπάστηκα από τη σκάλα Ωρωπού. Στα όριά της συμπεριλαμβάνεται και ο οικισμός του Αγίου Κωνσταντίνου.

Το **Χαλκούτσι** αποτελεί το βορειότερο παραθαλάσσιο χωριό της βορειοανατολικής Αττικής και διοικητικά υπάγεται στην κοινότητα της Σκάλας Ωρωπού. Στον όρμο του Χαλκούτσιου βρίσκονται οι εκβολές του ποταμού Ασωπού γεγονός που καθιστά την παραθαλάσσια περιοχή ακατάλληλη για κολύμβηση μετά τις πρόσφατες μελέτες που παρουσιάζουν τα υψηλά ποσοστά ρύπανσης του ποταμού [12].

5.1.2. Παραγωγικοί Τομείς

Όσον αφορά τον **πρωτογενή τομέα παραγωγής** ενδεικτικά αναφέρεται πως στην Σκάλα Ωρωπού παρατηρείται μία μεγάλη ποσότητα αροτριαίων καλλιεργειών όπως για παράδειγμα σιτάρι και κριθάρι καθώς και μία μικρή ποσότητα δενδρωδών καλλιεργειών αλλά και αμπέλων.

Επίσης, η κτηνοτροφία της περιοχής στον Ωρωπό και στην Σκάλα Ωρωπού αφορά κυρίως προβατοειδή και πουλερικά ενώ ταυτόχρονα αναφέρεται και η θαλάσσια αλιεία η οποία εξυπηρετεί την τοπική αγορά.

Στον **δευτερογενή τομέα παραγωγής** αν και η ευρύτερη περιοχή της βορειοδυτικής Αττικής χαρακτηρίζεται από συνεχή βιομηχανική ανάπτυξη που οφείλεται κυρίως στην μικρή απόσταση από την Αθήνα, η περιοχή του Ωρωπού, της Σκάλας Ωρωπού και της Συκάμινου παρουσιάζει περιορισμένο αριθμό βιομηχανιών. Ο μεγαλύτερος αριθμός βιομηχανιών βρίσκεται στους γειτονικούς δήμους Οινοφύτων καθώς και Αυλώνας.

Για τον **τριτογενή τομέα παραγωγής** αξίζει να αναφερθεί πως στην Σκάλα Ωρωπού συγκεντρώνεται μεγάλος αριθμός καταστημάτων που αφορούν εμπόριο και υπηρεσίες, κυρίως λόγω της μεγάλης παραθεριστικής κίνησης. Επίσης η συγκεκριμένη κοινότητα λειτουργεί ως κέντρο εξυπηρέτησης και ζήτησης που εκδηλώνεται κυρίως για τις διοικητικές υπηρεσίες που δεν υπάρχουν στις υπόλοιπες κοινότητες.

Επιπλέον, η περιοχή της Σκάλας Ωρωπού μαζί με την παραλιακή οικιστική ζώνη παρουσιάζει αξιόλογη τουριστική ανάπτυξη. Συγκεκριμένα η παραλιακή οικιστική ζώνη εξελίσσεται σε περιοχή παραθεριστικής κατοικίας [5].

5.1.3. Δίκτυο Ύδρευσης

Η υδροδότηση του Ωρωπού, του Χαλκούτσιου και του Συκαμίνου μέχρι πρόσφατα γινόταν μέσω δικτύου με νερό από γεωτρήσεις. Ωστόσο, προσφάτως μετά από ειδικές μελέτες το νερό κάποιων γεωτρήσεων κρίθηκε ακατάλληλο για πόση και η περιοχή τροφοδοτείται με πόσιμο νερό από γεώτρηση στην περιοχή της Μαυροσουβάλας [14].

5.1.4. Σεισμικότητα

Η υπό μελέτη περιοχή παρουσιάζει έντονη σεισμική δράση η οποία οφείλεται στη ύπαρξη της μεγάλης ρηξιγενούς ζώνης Μήλεσι - Ωρωπού και εντοπίζεται κυρίως στον υποθαλλάσιο χώρο του Ν. Ευβοϊκού. Τα τελευταία εκατό χρόνια σημειώθηκαν σημαντικές σεισμικές δονήσεις στην περιοχή μεταξύ 5.6 και 6.6 βαθμών της κλίμακας Richter [5].

5.1.5. Γενικές παρατηρήσεις

Η ευρύτερη περιοχή αποτελούσε ένα από τα πιο γνωστά παραθεριστικά κέντρα του νομού Αττικής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες οι οποίες δείχνουν ένα σημαντικό ποσοστό ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα με ουσίες όπως ιόντα χρωμίου, νιτρικών, μολύβδου και χλωρίου τα οποία προέρχονται από τις βιομηχανίες του γειτονικού δήμου Οινοφύτων. Λόγω αυτού του φαινομένου τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία μείωση στην τουριστική εξέλιξη της περιοχής και μία γενικότερη αναταραχή του τοπικού πληθυσμού.

5.2. Περιγραφή Ποταμού Ασωπού

Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Ασωπού έχει συνολική έκταση περίπου 790 km^2 , διεύθυνση ανάπτυξης περίπου Α-Δ, οριοθετείται νότια από το ορεινό σύστημα Πάρνηθας – Κιθαιρώνα και βόρεια συνορεύει με τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού κατά μήκος μιας ημιορεινής λοφώδους περιοχής. Ο κύριος κλάδος του Ασωπού εκβάλλει στο νότιο Ευβοϊκό και συγκεκριμένα στον όρμο του Χαλκουτσίου και χαρακτηρίζεται από μία μέση διεύθυνση ανάπτυξης Α-Δ, η οποία γίνεται προσωρινά ΒΑ-ΝΔ σε δύο κύρια σημεία βόρεια του Αγίου Θωμά και δυτικά του Ωρωπού όπου και εκβάλλει. Στην ανατολική διεύθυνση της λεκάνης του Ασωπού παρατηρείται μία ασύμμετρη ανάπτυξης της επιφανειακής απορροής σχεδόν αποκλειστικά νότια του κυρίου κλάδου του Ασωπού με την ανάπτυξη των παραποτάμων Μπιθοσακούλι και Κούκιστρα [6].

Ο χείμαρρος Ασωπός είναι ο κύριος κλάδος του υδρογραφικού δικτύου και αποτελεί τον κεντρικό συλλέκτη των απορροών και των υπογείων υδάτων της περιοχής. Η κύρια πηγή τροφοδοσίας του Ασωπού με νερό είναι οι βροχοπτώσεις. Κατά μήκος του χειμάρρου Ασωπού σχηματίζεται μικρή πεδινή έκταση η οποία ακολουθεί τον ποταμό κατά μήκος του μέχρι τις εκβολές του. Η ένταση της ροής του χειμάρρου μεταβάλλεται κατά την διαδρομή του ανάλογα με τη γεωλογική δομή και την διαπερατότητα των γεωλογικών σχηματισμών που διατρέχει [5].

Ο Ασωπός χαρακτηρίστηκε σύμφωνα με ένα διάταγμα του 1969 ως «αγωγός παροχέτευσης επεξεργασμένων λυμάτων εργοστασίων» γεγονός που ισχύει μέχρι και σήμερα [13]. Ο ποταμός λειτουργεί ως αποδέκτης βιομηχανικών αποβλήτων από περίπου 300 βιομηχανίες που έχουν έδρα στην ευρύτερη περιοχή. Αν και οι περισσότερες από τις βιομηχανίες διαθέτουν συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, ο Ασωπός δέχεται μεγάλο ρυπογόνο φορτίο. Τα είδη των βιομηχανιών που παρέχουν τα λύματά τους συμπεριλαμβάνουν κλωστοϋφαντουργεία, βαφεία, βιομηχανίες επεξεργασίας μετάλλων, παραγωγής ειδών διατροφής, παραγωγής απορρυπαντικών, παραγωγής χημικών προϊόντων, παραγωγής λιπασμάτων, φαρμάκων, χρωμάτων και βυρσοδεψεία [7].

Σύμφωνα με τη μελέτη της Μ. Λοϊζίδου (1998) «Ιδρυση και λειτουργία κεντρικής μονάδας επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων της περιοχής Ασωπού και των αστικών λυμάτων Δήμου Αυλώνα» αναφέρεται πως η ημερήσια

ποσότητα των υγρών αποβλήτων από τις βιομηχανίες αυτές φτάνει τα 9.495 m^3 . Οι ρύποι που έχουν ανιχνευθεί είναι αρκετοί με πιο επικίνδυνο το εξασθενές χρώμιο. Ποσότητες εξασθενούς χρωμάτου έχουν ανιχνευθεί σε γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία της περιοχής [5].

Εκτός από το εξασθενές χρώμιο έχουν ανιχνευθεί ποσότητες καδμίου, χαλκού, νικελίου και ψευδαργύρου. Η παρουσία ωστόσο χρωμάτου και νικελίου ενισχύεται και από την παρουσία οφιολιτών στην λεκάνη απορροής του ποταμού [7].

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Βοιωτικού Ασωπού

| Εκβολή | N. Ευβοϊκός |
|---|--|
| Έκταση Δέλτα (km^2) | 7 |
| Έκταση Λεκάνης Απορροής (km^2) | 796 |
| Μήκος Ποταμού (km) | 60 |
| Προβλήματα-Απειλές-Χρήσεις | Τεχνητή μεταβολή κοίτης, Επέκταση καλλιεργειών και οικισμών, Ρύπανση |

Πηγή [9]

5.3. Κλιματολογικά Στοιχεία

Για την μελέτη του κλίματος της περιοχής μελέτης θα χρησιμοποιηθούν στοιχεία που προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό της Τανάγρας, ο οποίος είναι και ο κοντινότερος σταθμός στην περιοχή, και αναφέρονται στη χρονική περίοδο 1986-1992, αλλά και από τον μετεωρολογικό σταθμό της Χαλκίδας για την πιο πρόσφατη χρονική περίοδο 2006-2007.

Πίνακας 2. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Τανάγρας για τη χρονική περίοδο 1986-1992.

| Μήνες | Μέση θερμοκρασία (°C) | Σχετική Υγρασία (%) | Συνολικό ύψος βροχής (mm) |
|-------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| Ιανουάριος | 7.4 | 77 | 64.5 |
| Φεβρουάριος | 8.2 | 74.5 | 49.9 |
| Μάρτιος | 10.3 | 72.7 | 49.2 |
| Απρίλιος | 14.6 | 66.3 | 27.9 |
| Μάιος | 19.9 | 58.9 | 21.7 |
| Ιούνιος | 25.1 | 49.4 | 12.8 |
| Ιούλιος | 27.3 | 47.5 | 6.9 |
| Αύγουστος | 26.6 | 49.3 | 10.3 |
| Σεπτέμβρης | 22.3 | 58.7 | 20.4 |
| Οκτώβρης | 17.2 | 68.7 | 50.5 |
| Νοέμβρης | 12.9 | 75.7 | 58.8 |
| Δεκέμβρης | 9.4 | 77.5 | 74.9 |
| | | | 447.8 |

Πηγή [5]

Πίνακας 3. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Χαλκίδας για τη χρονική περίοδο 2006-2007.

| Μήνες | Μέση θερμοκρασία (°C) | Σχετική Υγρασία (%) | Συνολικό ύψος βροχής (mm) |
|-------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|
| Ιανουάριος | 10.15 | 72.5 | 31.5 |
| Φεβρουάριος | 10.5 | 69.5 | 59.8 |
| Μάρτιος | 13.35 | 63.5 | 86.6 |
| Απρίλιος | 16.85 | 60 | 20.2 |
| Μάιος | 21.55 | 58 | 55.8 |
| Ιούνιος | 27.35 | 54 | 25 |
| Ιούλιος | 28.4 | 49.5 | 22.2 |
| Αύγουστος | 29.35 | 51.5 | 3.05 |
| Σεπτέμβρης | 23.95 | 57 | 40.85 |
| Οκτώβρης | 19.6 | 68.5 | 80.3 |
| Νοέμβρης | 13.95 | 70.5 | 58.8 |
| Δεκέμβρης | 10.6 | 73 | 27.55 |
| | | | 511.65 |

Πηγή [11]

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει πως η μέγιστη μέση θερμοκρασία παρατηρείται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ενώ η ελάχιστη μέση θερμοκρασία παρατηρείται τον μήνα Ιανουάριο. Επίσης, η βροχόπτωση φαίνεται να παρουσιάζει μία διακύμανση καθώς σημαντικές τιμές βροχόπτωσης παρουσιάζονται και κατά τον χειμώνα αλλά και το φθινόπωρο. Ωστόσο, οι ελάχιστες τιμές βροχόπτωσης παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον μήνα Αύγουστο.

Για την εκτέλεση του μοντέλου, λόγω απουσίας δεδομένων για την ενδιάμεση χρονική περίοδο, ως συνολικό ύψος βροχόπτωσης θα ληφθεί ο μέσος όρος των δύο τιμών που προκύπτουν από τους δύο σταθμούς ίσος με 500 mm.

5.4. Γεωλογία

Η περιοχή μελέτης καλύπτεται στο μεγαλύτερο τμήμα της από ποταμοχερσαίες αποθέσεις οι οποίες αποτελούνται από κροκαλοπαγή. Σε μικρότερο βαθμό αποτελείται από αλλούβιακές αποθέσεις οι οποίες ακολουθούν τον ποταμό Ασωπό κατά μήκος αλλά και μάργες που εκτείνονται στο νότιο τμήμα της περιοχής. Τέλος, στις ακτές της περιοχής συναντάμε άμμο και κροκάλες ενώ μία μικρή περιοχή του νοτίου τμήματος αποτελείται από ασβεστόλιθο.

Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης βρίσκονται οι ακόλουθοι γεωλογικοί σχηματισμοί:

1. Ποταμοχερσαίες αποθέσεις περιοχής Δήλεσι-Παραλία Αυλίδος

Καλύπτουν το βορειο-δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης δηλαδή το μεγαλύτερο τμήμα της κοινότητας του Συκαμίνου και τον οικισμό Χαλκούτσι καθώς και ένα μικρό μέρος της κοινότητας του Ωρωπού. Αποτελούνται κυρίως από κροκαλοπαγή μικρής και μεγάλης συνεκτικότητας που εναλλάσσονται με ψαμμίτες και καστανέρυθρους πηλούς και αργίλους.

Οι κροκάλες έχουν ποικίλο μέγεθος και το συνδετικό υλικό είναι ψαμμιτικό, αργιλοψαμμιτικό ή κροκαλοψαμμιτικό και προέρχονται από το προνεογενές υπόβαθρο της Πάρνηθας (ανθρακικές, ψαμμιτικές του παλαιοζωικού και του φλύσχη, από μεταμορφωμένα πετρώματα καθώς και από τα βαθύτερα μέλι των νεογενών (μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι).

2. Κροκαλοπαγή Μαρκόπουλον-Ωρωπού

Καταλαμβάνουν σχεδόν εξ ολοκλήρου την περιοχή Μαρκόπουλου-Σκάλας Ωρωπού και Ωρωπού και συνεχίζονται προς τα δυτικά στην περιοχή Χαλκουτσίου και Δήλεσι. Αποτελούνται συνήθως από ψαμμιτικό υλικό και κροκάλες ποικίλης λιθολογικής σύστασης και ποικίλου μεγέθους μέχρι και 50 cm και σε μερικές περιπτώσεις μέχρι και 1 m μέτριας συνεκτικότητας.

3. Μάργες περιοχής Συκάμινου

Οι μάργες καλύπτουν μέρος του νοτίου τμήματος της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα απαντώνται στην κοινότητα του Ωρωπού. Τα βαθύτερα μέλη αποτελούνται από λευκές έως τεφρόλευκες, υποκίτρινες εύθρυπτες έως πολύ σκληρές μάργες, κατακερματισμένες με καλή στρώση, λεπτοπλακώδεις και μικρή σχετικά κλίση. Προς τα πάνω μεταβαίνουν σε μαργαϊκά υλικά που φέρουν διαστρώσεις από φυλλώδεις μάργες. Τα ανώτερα μέλη αποτελούνται από τραβερτίνες που εναλλάσσονται με μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.

4. Ποταμοχερσαίες αποθέσεις

Είναι καστανόχρωμα ιζήματα που καταλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης και συνεχίζονται καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος της περιοχής Σχηματαρίου – Οινοφύτων όπου αποτελούνται από μη συνεκτικά κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται με ενστρώσεις καστανόχρωμων άμμων και πηλών των οποίων το πάχος μεταβάλλεται από θέση σε θέση.

5. Άλλουβιακές αποθέσεις

Οι αλλούβιακές αποθέσεις καλύπτουν όλη την περιοχή κατά μήκος του ποταμού Ασωπού μέχρι τις εκβολές του καθώς και ένα μεγάλο τμήμα της κοινότητας του Ωρωπού, της Σκάλας Ωρωπού και τον οικισμό του Αγίου Κωνσταντίνου. Οι αποθέσεις αυτές συνήθως συναντώνται σε ποταμοκοιλάδες και πεδινές περιοχές ανοικτές προς τη θάλασσα ή σε μικρές εσωτερικές λεκάνες. Αποτελούνται από ασύνδετα αργιλοαμμώδη υλικά με διάσπαρτες κροκαλολατύπες στις κοίτες των χειμάρρων καθώς και υλικά χειμάρριων αναβαθμίδων, μικρού ύψους. Συχνά

απαντώνται και ερυθροί πηλοί, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τούβλων και κεραμιδιών.

6. Ιλός τεναγών, άμμοι και κροκάλες αυτών

Καλύπτουν το βορειότερο μέρος της περιοχής μελέτης δηλαδή την περιοχή γύρω από την ακτογραμμή στους οικισμούς Χαλκούτσι και Άγιος Κωνσταντίνος Ωρωπού.

7. Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες

Τεφροί έως λευκότεροι, μέσο- έως παχυστρωματώδεις, κατά θέσεις άστρωτοι συνήθως μικροκρυσταλλικοί και έντονα τεκτονισμένοι. Συναντώνται στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα στο νότιο μέρος των κοινοτήτων Συκαμίνου και Ωρωπού.

8. Ασβεστόλιθοι Ασπροχωρίου

Μέσο- έως παχυστρωματώδεις και κατά θέσεις άστρωτοι, ανοικτότεφροι έως σκουρότεφροι και τοπικά ροδόχρωμοι ή υποκίτρινοι, μικροκρυσταλλικοί έντονα καρστικοί με πολλές παρεμβολές δολομιτών ή δολομιτικών ασβεστόλιθων.

Παρακάτω παρατίθεται συνοπτικός πίνακας με τα γεωλογικά πετρώματα και τις αντίστοιχες υδραυλικές αγωγιμότητες.

| ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ | ΣΥΜΒΟΛΟ | Υδραυλική αγωγιμότητα (m/sec) | Υδραυλική αγωγιμότητα (m/d) |
|---|--|-------------------------------|-----------------------------|
| <i>Ποταμοχερσαίες αποθέσεις περιοχής Δήλεσι-Παραλία Ανδίδος</i> | M _{s,t} | $1*10^{-4}$ | 8.64 |
| <i>Κροκαλοπαγή Μαρκόπουλον-Ωρωπού</i> | M _s . ft.c | $2*10^{-4}$ | 17.28 |
| <i>Μάργες περιοχής Συκαμίνου</i> | M _{s,m} | $1*10^{-6}$ | 0.0864 |
| <i>Ποταμοχερσαίες αποθέσεις</i> | Pt | $1*10^{-4}$ | 8.64 |
| <i>Άλλουβιακές αποθέσεις</i> | H.al | $5*10^{-4}$ | 43.2 |
| <i>Ιλύς τεναγών, άμμοι και κροκάλες αυτών</i> | H.sl,s | $1*10^{-4}$ | 8.64 |
| <i>Ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες</i> | T _m -J _i .k | $1*10^{-5}$ | 0.864 |
| <i>Ασβεστόλιθοι Ασπροχωρίου</i> | T _m -J _i .k ₁ | $1*10^{-5}$ | 0.864 |

5.5. Υδρογραφία

Γενικά το επιφανειακό υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης θεωρείται ασήμαντο καθώς παρατηρούνται μικροί χείμαρροι οι οποίοι ωστόσο δεν διατηρούν τη ροή του νερού για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο κύριος κλάδος του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής είναι ο χείμαρρος Ασωπός ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό συλλέκτη των απορροών και των υπογείων υδάτων της περιοχής. Ο Ασωπός κυρίως τροφοδοτείται από τις βροχοπτώσεις γι' αυτό εξάλλου και αναφέρεται πως κατά τη θερινή περίοδο στερεύει ενώ κατά την χειμερινή όπου και εντείνονται οι βροχοπτώσεις παρουσιάζει και την μέγιστη ροή του. Η ένταση του χειμάρρου εκτός από τις βροχοπτώσεις επηρεάζεται και από την γεωλογική δομή και την περατότητα των σχηματισμών που διατρέχει [5].

5.6. Χλωρίδα – Πανίδα

- *Xλωρίδα*

Στην περιοχή παρατηρείται έντονα το θυμάρι (*coridothymous capitatus*) το οποίο ευδοκιμεί σε περιοχές από συμπαγείς διαβρωμένους ασβεστόλιθους με έδαφος ουσιαστικά ανύπαρκτο μεταξύ των κοιλοτήτων των βράχων. Η βλάστηση στις όχθες του ποταμού Ασωπού αποτελείται αγριοκάλαμα (*Phragmites australis*) ενώ στις εκβολές του ποταμού στο Χαλκούτσι απαντώνται πλατάνια (*platanus orientalis*) τα οποία ωστόσο έχουν μειωθεί αρκετά λόγω των εκχερσώσεων στην περιοχή για την επέκταση των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Επίσης, αναφέρεται και η ύπαρξη πεύκων καθώς και νιτρόφιλη βλάστηση στις άκρες των δρόμων και στις άκρες της κοίτης του ποταμού. [5]

- *Πανίδα*

Στην περιοχή μελέτης υπάρχουν κάποια είδη αμφιβίων όπως ο νεροβάτραχος (*Rana ridibunda*) και ο πρασινόφρυνος (*Bufo viridis*) τα οποία ζουν στους καλαμιώνες των οχθών του Ασωπού ενώ στην ευρύτερη περιοχή τα είδη που απαντώνται είναι: σκαντζόχοιρος, ασβός, νυφίτσα, νυχτερίδα, αλεπού και κουνάβι. Επίσης, στον Ασωπό αναφέρεται ως αυτόχθονο είδος ο κέφαλος ενώ έχουν εμπλουτιστεί και κάποια τμήματα του ποταμού με κυπρίνους και πέστροφες [5].

6. ΧΡΗΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ Arc GIS 9.2

Το Arc GIS είναι μία εφαρμογή μέσω της οποίας μπορεί να γίνει σύνθεση και ανάλυση χαρτών, διαχείριση των δεδομένων που εξάγονται από τους χάρτες, προγραμματισμός εξειδικευμένων εντολών, τρισδιάστατη απεικόνιση μίας περιοχής καθώς και διάφορες άλλες λειτουργίες.

Το GIS χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα φάση για να γίνει γραφική απεικόνιση πάνω στο χάρτη των ορίων της υπό εξέταση περιοχής, των γεωτρήσεων καθώς και του ποταμού Ασωπού.

Αρχικά έγινε εισαγωγή στο GIS του τοπογραφικού χάρτη της περιοχής και γεωαναφορά αυτού μέσω της εργαλειοθήκης Georeferencing. Έπειτα ακολούθησε η δημιουργία των shapefiles για τα όρια της περιοχής μελέτης, τις ισοϋψείς, τις γεωτρήσεις και τον ποταμό. Η δημιουργία των Shapefiles έγινε μέσω της εντολής Create Future Class στην εργαλειοθήκη Data Management Tools. Για τη δημιουργία του shapefile των ορίων της περιοχής επιλέχθηκε χάραξη μέσω κλειστού πολυγώνου ενώ για τον ποταμό και τις ισοϋψείς ανοιχτή γραμμή. Τέλος, το shapefile των γεωτρήσεων έγινε με σημείωση των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συντεταγμένες που είχαν προσδιοριστεί στο πεδίο.

7. ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PTC

7.1. Εισαγωγή:

Το λογισμικό PTC (Princeton Transport Code) αποτελεί ένα εργαλείο μέσω του οποίου είναι δυνατή η προσομοίωση ενός τρισδιάστατου συστήματος υπόγειας ροής καθώς και η μεταφορά μάζας ενός ρύπου. Το PTC έχει γραφτεί σε γλώσσα Fortran γεγονός που καθιστά τη χρήση του και εγκατάστασή του εύκολη.

Γενικά, τα βήματα που ακολουθούνται είναι η εισαγωγή των διαφόρων δεδομένων, η βαθμονόμηση και τέλος η εκτέλεση του αλγορίθμου για τα επιθυμητά σενάρια. Από την εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να προκύψει ένας χάρτης ισοδυναμικών γραμμών (contour map) που παρουσιάζει είτε τα υδραυλικά ύψη του υπογείου νερού στην περιοχή μελέτης είτε την συγκέντρωση ενός ρύπου καθώς και χάρτης με τις γραμμές ροής. Στη συνέχεια από τη μελέτη του εξαγόμενου χάρτη μπορούν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την κατεύθυνση της υπόγειας ροής και την εξάπλωση του ρύπου.

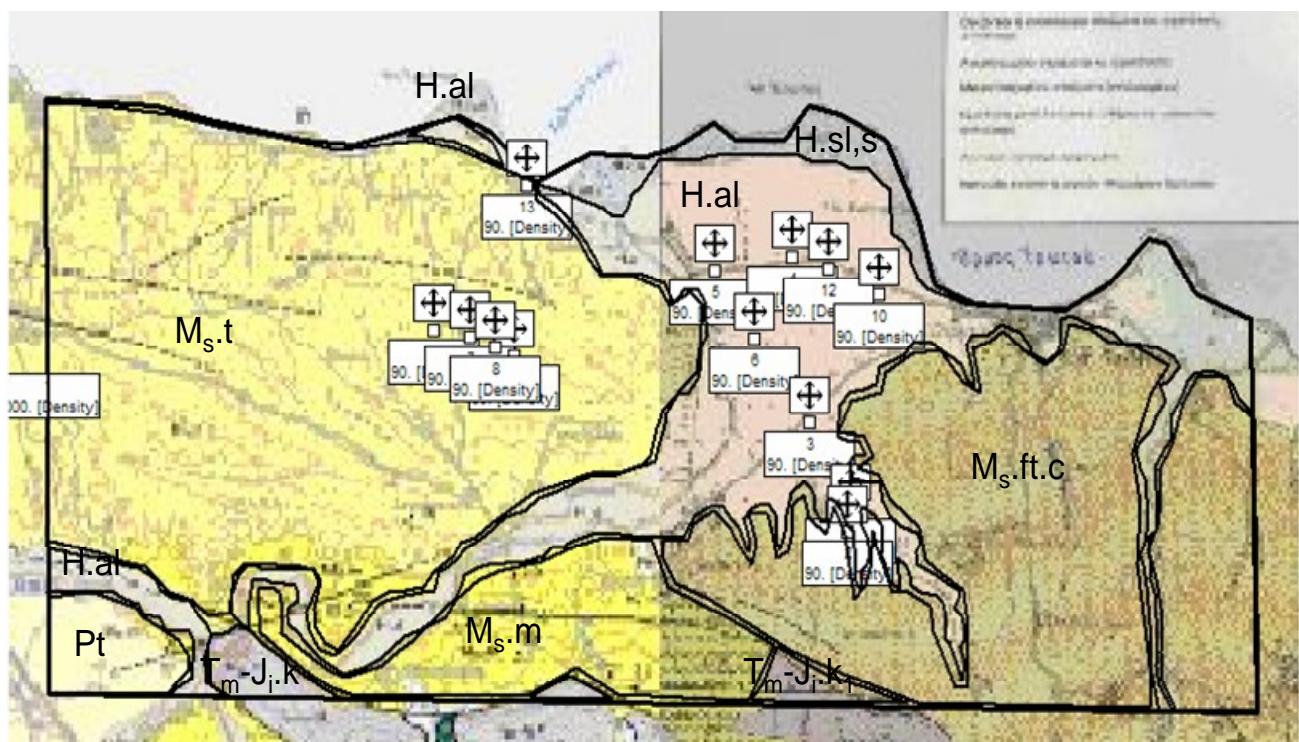
Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους οι οποίες διαρκούν 6 μήνες η κάθε μία. Την θερινή (Μάρτιος-Αύγουστος) που υπάρχει χαμηλό ποσοστό βροχοπτώσεων και ο χείμαρρος Ασωπός δεν διαθέτει νερό και την χειμερινή (Σεπτέμβριος-Φλεβάριος) όπου οι βροχοπτώσεις είναι σημαντικές και ο χείμαρρος Ασωπός διαθέτει νερό.

7.2. Προσομοίωση για τη θερινή περίοδο

7.2.1. Αρχική προετοιμασία του μοντέλου

Αρχικά έγινε οριοθέτηση της περιοχής μελέτης και έπειτα εισαγωγή στο PTC του shapefile το οποίο έχει δημιουργηθεί στο GIS και περιλαμβάνει τις ισοϋψεις γραμμές ενώ μέσω γραμμικής παρεμβολής προσδιορίστηκε το υψόμετρο σε όλα τα σημεία της περιοχής.

Στην συνέχεια έγινε εισαγωγή των shapefiles που επίσης προέρχονται από το GIS και περιλαμβάνουν τις γεωτρήσεις καθώς και τον ποταμό Ασωπό. Ακολούθησε η εισαγωγή στο PTC του γεωλογικού χάρτη της περιοχής μελέτης. Μέσω του χάρτη αυτού σημειώθηκαν τα διάφορα γεωλογικά στρώματα και τοποθετήθηκαν οι κατάλληλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας όπως αυτές έχουν αναλυθεί προηγουμένως.



Σχήμα 7. Γεωλογικός χάρτης περιοχής μελέτης με σημειωμένα τα γεωλογικά στρώματα και τις γεωτρήσεις

7.2.2. Εισαγωγή αρχικών συνθηκών

Στη συνέχεια εφόσον τοποθετήθηκαν οι κατάλληλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας σε κάθε στρώμα έγινε εισαγωγή των τιμών του αρχικού υδραυλικού ύψους – initial heads. Για τον υπολογισμό του αρχικού υδραυλικού ύψους σε κάθε γεώτρηση αφαιρέθηκε από το υψόμετρο της γεώτρησης η στάθμη του νερού δηλαδή το βάθος στο οποίο βρέθηκε νερό κατά τη δειγματοληψία. Η τιμή που προέκυψε αποτελεί το αρχικό υδραυλικό ύψος – initial head- της γεώτρησης. Αρχικές συνθήκες ορίσθηκαν και για την ακτογραμμή της περιοχής. Συγκεκριμένα κατά μήκος της ακτογραμμής ορίσθηκε πως το υδραυλικό ύψος είναι 180 m, το οποίο αποτελεί το ύψος του υδροφορέα που συμπίπτει με το επίπεδο της θάλασσας.

7.2.3. Εισαγωγή οριακών συνθηκών

Έπειτα από την εισαγωγή αρχικών συνθηκών ορίσθηκαν και οι οριακές συνθήκες της περιοχής. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να είναι συνθήκες τύπου 1-σταθερού υδραυλικού ύψους (specified head) ή συνθήκες τύπου 2 – σταθερής ροής (specified flow).

Οι γεωτρήσεις τοποθετήθηκαν ως οριακές συνθήκες τύπου 2 στο μοντέλο και δόθηκαν τιμές παροχής.

Η περιοχή μελέτης συμπεριλαμβάνει 13 γεωτρήσεις από τις οποίες ενεργές την παρούσα φάση είναι η Γ1 και Γ2. Ωστόσο λόγω απουσίας δεδομένων κατά την προσομοίωση έγινε η παραδοχή πως αντλούν όλες με μικρή παροχή (100 m/d).

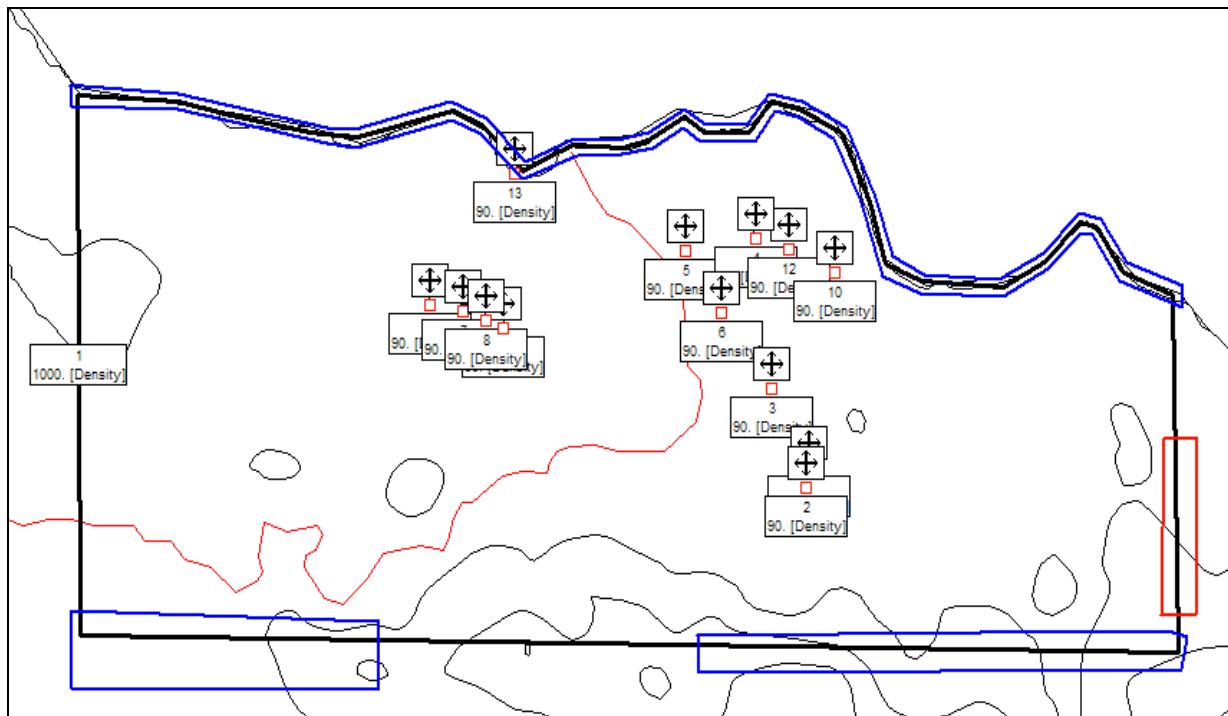
Πίνακας 4. Στοιχεία γεωτρήσεων περιοχής μελέτης

| Γεωτρήσεις | Στάθμη (m) | Longitude | Latitude | Υψόμετρο (m) | Βάθος (m) |
|------------|------------|-----------|----------|--------------|-----------|
| Γ1 | 29.65 | 479944 | 4239364 | 35 | 200 |
| Γ2 | 29.65 | 479897 | 4239136 | 44 | 150 |
| Γ3 | 30 | 479531 | 4240190 | 23 | 85-90 |
| Γ4 | 2.95 | 479326 | 4241799 | - | - |
| Γ5 | - | 478519 | 4241639 | - | - |
| Γ6 | 7.5 | 478948 | 4240994 | - | 28 |
| Γ7 | 50-60 | 476011 | 4241050 | - | - |
| Γ8 | 50-60 | 476268 | 4240896 | - | - |
| Γ9 | 50-60 | 476466 | 4240827 | - | - |
| Γ10 | 5-6 | 480196 | 4241427 | - | - |
| Γ12 | - | 479703 | 4241669 | - | - |
| Γ13 | 5 | 476580 | 4242454 | - | - |
| Γ14 | - | 475614 | 4241086 | - | - |

Σημείωση: Κατά την προσομοίωση έγινε η παραδοχή πως όλες οι γεωτρήσεις αντλούν από στρώμα, γι' αυτό εξάλλου και η περιοχή μελέτης συμπεριλαμβάνει μόνο ένα layer. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τα βάθη των γεωτρήσεων $\Gamma 1$ και $\Gamma 2$ που είναι και οι κύριες γεωτρήσεις καθώς μόνο αυτές είναι ενεργές στην πραγματικότητα, θεωρήθηκε πως όλες οι γεωτρήσεις έχουν βάθος 180 m τιμή που αποτελεί ταυτόχρονα και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης.

Επίσης, κατά μήκος της ακτογραμμής ορίσθηκε οριακή συνθήκη τύπου 1 και δηλώνει πως κατά μήκος της ακτής το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι 180 m όσο δηλαδή και το υψόμετρο της θάλασσας.

Τέλος, ορίσθηκαν ακόμη 3 οριακές συνθήκες οι οποίες βρίσκονται στο ανατολικό και νότιο κομμάτι της περιοχής και προσδιορίσθηκαν κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου.



Σχήμα 8. Χάρτης περιοχής μελέτης όπου διακρίνεται το domain outline και οι οριακές συνθήκες για τη θερινή περίοδο. Οι οριακές συνθήκες τύπου 1 - σταθερού υδραυλικού ύψους παρουσιάζονται με μπλε χρώμα και οριακές συνθήκες τύπου 2 - σταθερής ροής με κόκκινο.

7.2.4. Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση αποτελεί μία διαδικασία κατά την οποία γίνεται προσπάθεια έτσι ώστε τα δεδομένα που προκύπτουν από το μοντέλο να προσομοιάσουν όσον το δυνατόν καλύτερα τα δεδομένα που υπάρχουν στο πεδίο.

Επομένως οι οριακές συνθήκες ορίσθηκαν έτσι ώστε τα υδραυλικά ύψη (οι γραμμές ροής) που προκύπτουν μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου να ταυτίζονται όσον το δυνατόν καλύτερα με τις τιμές του αρχικού υδραυλικού ύψους για κάθε γεωτρηση που έχουν μετρηθεί στο πεδίο και έχουν έπειτα τοποθετηθεί στο μοντέλο.

Συγκεκριμένα μετά από παρατήρηση των δεδομένων παρατηρήθηκε πως η αρχική τιμή του υδραυλικού ύψους του νερού στις γεωτρήσεις παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της στη γεωτρηση Γ2 ενώ παρουσιάζει μία σταδιακή μείωση όσο προχωράμε προς τις γεωτρήσεις της βόρειας περιοχής. Επίσης στις γεωτρήσεις Γ7, Γ8, Γ9, Γ10 και Γ14 το ύψος του νερού σχεδόν ταυτίζεται με το ύψος του υδροφορέα. Γι' αυτό το λόγο τοποθετήθηκαν επιπλέον 3 οριακές συνθήκες, όπως προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα τοποθετήθηκε μία οριακή συνθήκη τύπου 2 στο ανατολικό τμήμα της περιοχής και δύο συνθήκες τύπου 1 στο νότιο κομμάτι της περιοχής έτσι ώστε να παρέχεται μία ποσότητα ύδατος στην περιοχή η οποία να αιτιολογεί τις μετρούμενες τιμές.

7.3. Προσομοίωση για τη χειμερινή περίοδο

Για την προσομοίωση κατά την χειμερινή περίοδο έγινε εισαγωγή της παραμέτρου των βροχοπτώσεων καθώς και των οριακών συνθηκών που αφορούν τον χείμαρρο Ασωπό.

7.3.1. Βροχοπτώσεις

Για τον προσδιορισμό της ποσότητας των βροχοπτώσεων στην περιοχή έχουν ληφθεί βροχομετρικά δεδομένα από δύο σταθμούς. Από τον σταθμό της Τανάγρας για την χρονική περίοδο 1986-1992 και από τον σταθμό της Χαλκίδας για τα έτη 2006-2007. Σύμφωνα με τον σταθμό της Τανάγρας το συνολικό ποσοστό βροχόπτωσης φτάνει τα 447,8 mm ενώ ο σταθμός της Χαλκίδας για τα τελευταία έτη παρουσιάζει συνολικό ποσοστό βροχόπτωσης κατά μέσω όρο 511,65 mm. Η ποσότητα της βροχόπτωσης λόγω έλλειψης δεδομένων για την ενδιάμεση χρονικά περίοδο θα προσδιορισθεί κατά προσέγγιση στα 500 mm.

Υποθέτουμε πως πραγματοποιείται διήθηση του 30% του ποσοστού των υδάτων της βροχόπτωσης ενώ το υπόλοιπο 70% εξατμίζεται ή γίνεται επιφανειακή απορροή. Έτσι η ποσότητα του ύδατος που καταλήγει στον υπόγειο υδροφορέα είναι:

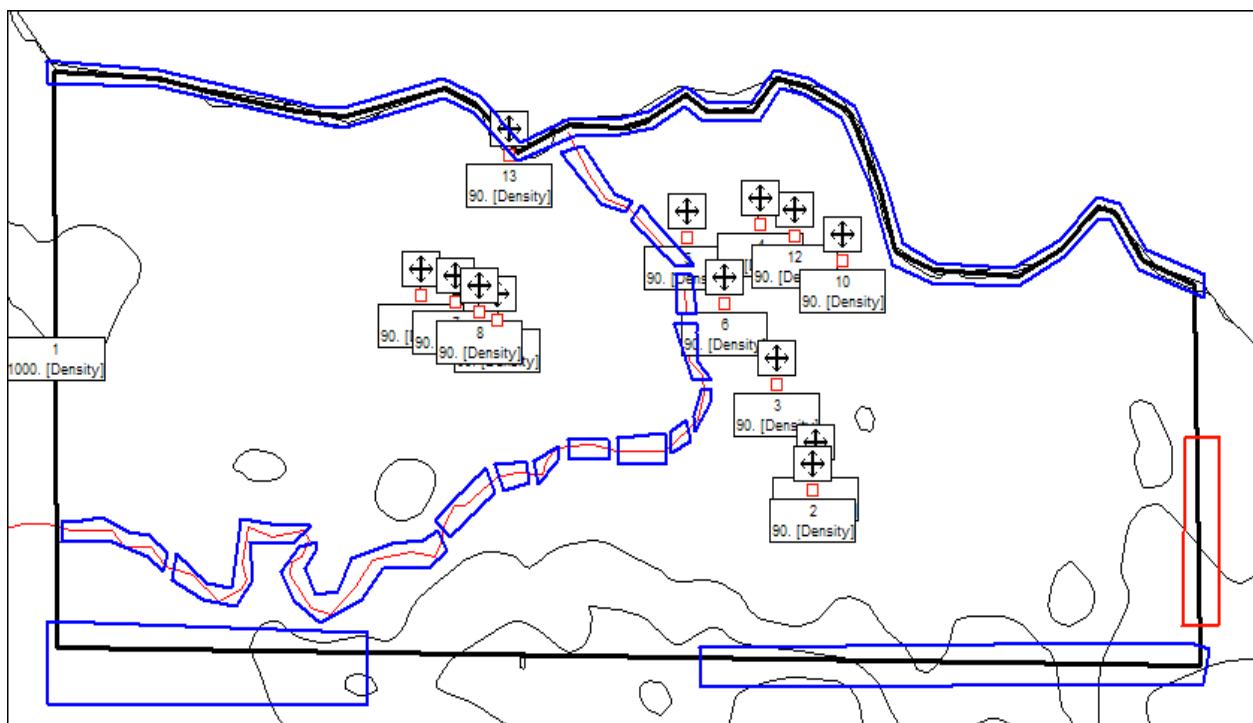
$$0,5m \cdot 0,3 = 0,15m \text{ νερού}$$

$$0,15m / 180d = 0,00083m / d \text{ η παροχή του νερού λόγω βροχοπτώσεων}$$

7.3.2. Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που αφορούν την περιοχή καθώς και οι οριακές συνθήκες που αφορούν τις γεωτρήσεις παραμένουν οι ίδιες. Ωστόσο, κατά την προσομοίωση για την χειμερινή περίοδο πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο ποταμός Ασωπός. Σύμφωνα με δεδομένα που προέρχονται από τους τοπικούς φορείς το ύψος του νερού στο ποτάμι κυμαίνεται στα 40-50 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ενώ αυτό το ύψος νερού διαφοροποιείται κατά μήκος του ποταμού ανάλογα με τη μορφολογία του εδάφους. Επομένως για την τοποθέτηση των οριακών συνθηκών το

ποτάμι χωρίσθηκε σε μικρά μέρη στα οποία το υψόμετρο παραμένει περίπου σταθερό έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μία ομαλή κλίση του ποταμού και σε κάθε κομμάτι αφαιρέθηκε μία τιμή υδραυλικού ύψους του νερού του ποταμού που κυμαίνεται στα 40-50 cm. Συνεπώς η οριακή συνθήκη για το ποτάμι είναι συνθήκη τύπου 1.



Σχήμα 9. Χάρτης περιοχής μελέτης όπου διακρίνεται το domain outline και οι οριακές συνθήκες για τη χειμερινή περίοδο. Ομοίως, οι οριακές συνθήκες τύπου 1 παρουσιάζονται με μπλε χρώμα και οι οριακές συνθήκες τύπου 2 με κόκκινο.

7.4. Προσομοίωση μεταφοράς μάζας

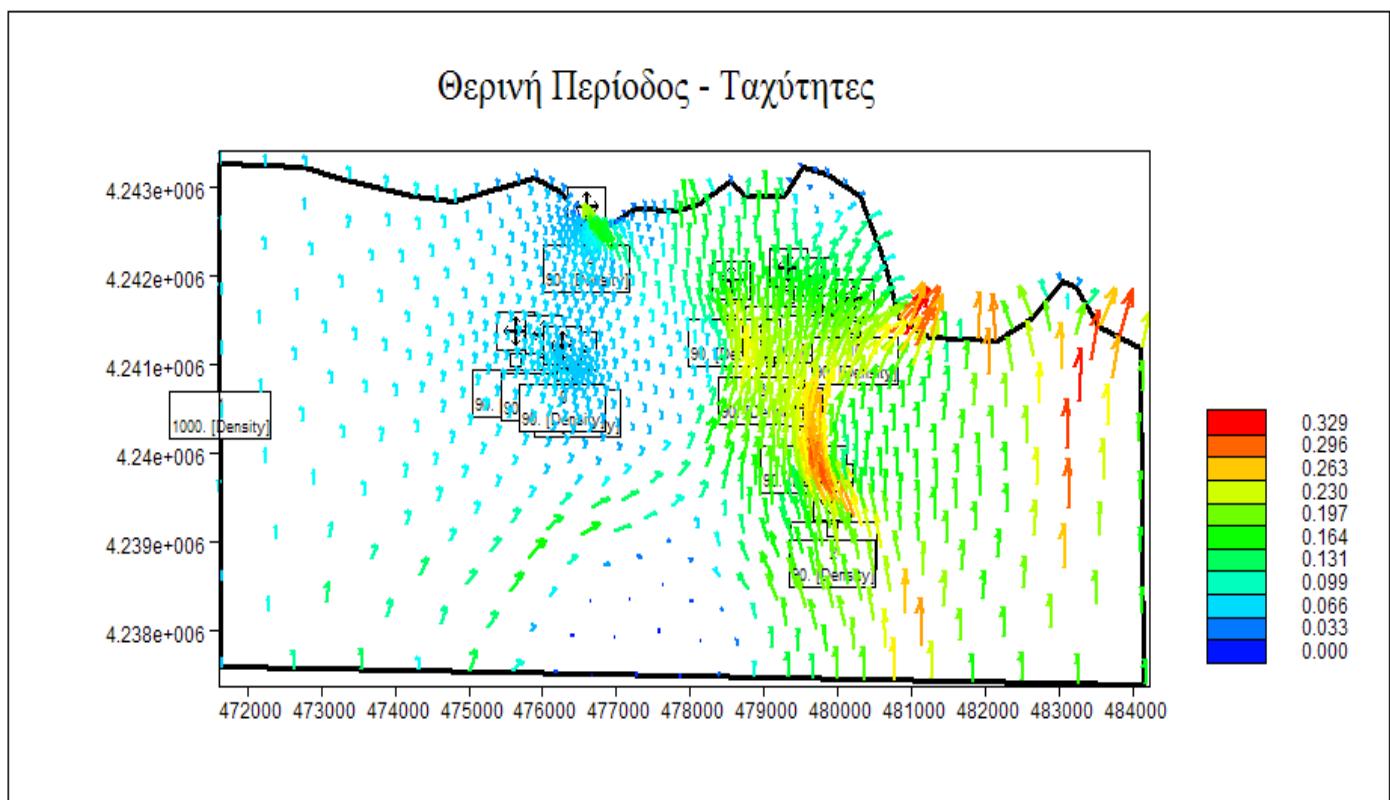
Η προσομοίωση για τη μεταφορά μάζας θα πραγματοποιηθεί με τα δεδομένα της χειμερινής περιόδου στην οποία εξάλλου εμφανίζεται ο χείμαρρος Ασωπός ο οποίος αποτελεί την πηγή της ρύπανσης. Λόγω απουσίας συγκεκριμένων τιμών συγκέντρωσης στα διάφορα σημεία του ποταμού θα γίνει κανονικοποίηση της συγκέντρωσης. Έτσι, για η συγκέντρωση εισάγεται ως οριακή συνθήκη τύπου 1 με τιμή 1. Επίσης στο μοντέλο εισάγεται και μία τιμή διασποράς η οποία ισούται επίσης με τη μονάδα και είναι ίδια προς όλες τις διευθύνσεις.

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1. Θερινή Περίοδος

Η προσομοίωση της θερινής περιόδου αποτελεί το πρώτο μέρος της εκτέλεσης του μοντέλου και παρουσιάζει τα υδραυλικά ύψη και την υπόγεια ροή με την επίδραση μόνο της γεωλογίας της περιοχής και της ελάχιστης άντλησης των γεωτρήσεων.

8.1.1. Ταχύτητες



Σχήμα 10. Προσομοίωση ταχυτήτων για τη θερινή περίοδο

Από το γράφημα που προκύπτει κατά την προσομοίωση της θερινής περιόδου παρατηρούμε πως η υπόγεια ροή συσσωρεύεται σε τρεις περιοχές.

Η πρώτη περιοχή βρίσκεται στην δυτική πλευρά της ευρύτερης περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα στις γεωτρήσεις Γ7, Γ8, Γ9 και Γ14. Σε αυτήν την περιοχή παρατηρούνται πολύ χαμηλές ταχύτητες της τάξης των 0.033 m/d.

Η δεύτερη περιοχή στην οποία παρατηρείται συσσώρευση νερού βρίσκεται βορειοδυτικά της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα στον κόλπο του Χαλκούτσιου.

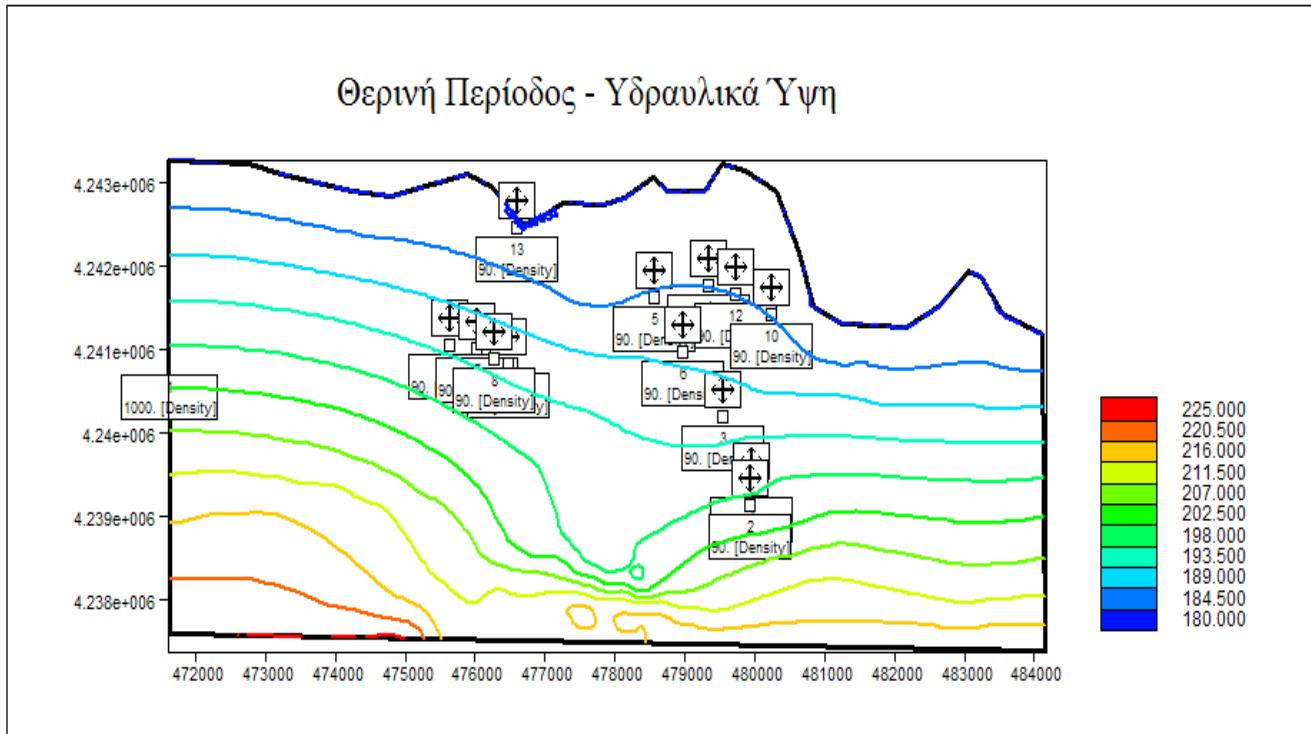
Εδώ παρατηρούνται και μικρές αλλά και μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας με μέγιστη τιμή τα 0.197 m/d.

Ωστόσο, η περιοχή στην οποία παρατηρείται και η μεγαλύτερη συσσώρευση νερού είναι η κεντρική περιοχή στην οποία παρουσιάζονται και οι μέγιστες ταχύτητες ροής οι οποίες φτάνουν τα 0.329 m/d. Ο λόγος που αυτή η περιοχή παρουσιάζει τις μέγιστες ταχύτητες είναι γιατί η ροή οδηγείται από μία περιοχή χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας (ποταμοχερσαίες αποθέσεις) σε μία στενή περιοχή υψηλότερης υδραυλικής αγωγιμότητας (αλλού βιακές αποθέσεις) με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο χώρος που μπορεί να κατανεμηθεί η ροή και άρα να επιταχύνεται. Να σημειωθεί πως μεγάλες ταχύτητες παρατηρούνται και στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής (κόλπος Ωρωπού) οι οποίες φαίνονται επίσης να επηρεάζονται από έναν συνδυασμό αλλαγής στην υδραυλική αγωγιμότητα και στενής περιοχής ανάπτυξης ροής.

Σε όλη την περιοχή παρατηρείται μία κατεύθυνση ροής από το νότιο τμήμα προς τις ακτές. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί πως ο υδροφορέας εμπλουτίζεται από το νότιο τμήμα.

Περιοχή ιδιαίτερης σημαντικότητας που παρατηρείται μία αλλαγή στην κατεύθυνση της ταχύτητας είναι στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης εκεί όπου βρίσκονται οι μάργες οι οποίες ως αδιαπέρατα πετρώματα εμποδίζουν την ροή στην περιοχή με αποτέλεσμα οι ταχύτητες να είναι μηδαμινές. Έτσι, η ροή σε αυτήν την περιοχή χωρίζεται σε δύο ρεύματα τα οποία ρέουν γύρω από τις μάργες και συνενώνονται στο τέλος του πετρώματος συνεχίζοντας με βόρεια κατεύθυνση.

8.1.2. Υδραυλικά ύψη



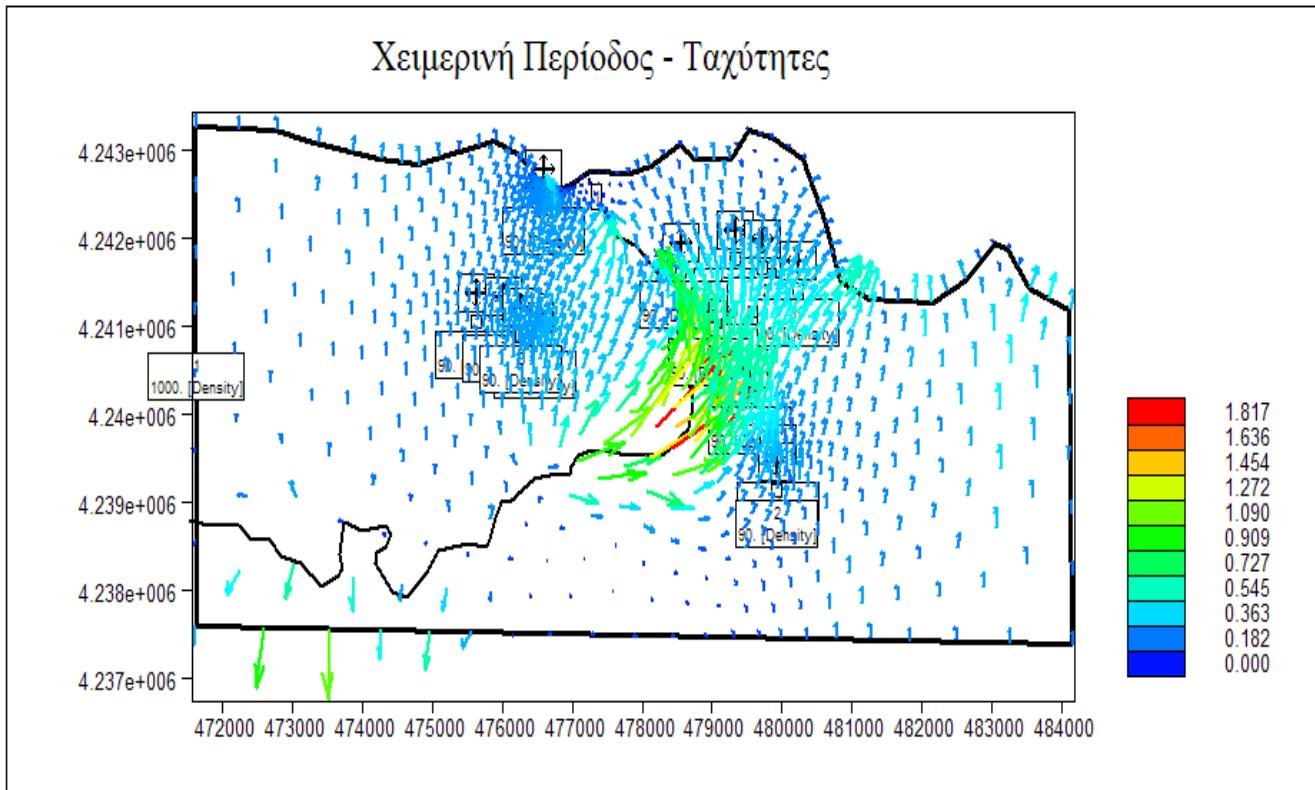
Σχήμα 11. Προσομοίωση υδραυλικών υψών για τη θερινή περίοδο

Τα υδραυλικά ύψη στην περιοχή μελέτης παρουσιάζουν μία ομαλή μείωση με τις μέγιστες τιμές στο νότιο τμήμα και τις ελάχιστες στο βόρειο. Η ομαλή αυτή μείωση οφείλεται στο ότι η άντληση από τις γεωτρήσεις είναι ελάχιστη με αποτέλεσμα το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα στα διάφορα σημεία να επηρεάζεται μόνο από τις αλλαγές στο υψόμετρο και την υδραυλική αγωγιμότητα. Γενικά οι τιμές των υδραυλικών υψών που παρατηρούνται κυμαίνονται στα 220-180 m όπου βρίσκεται και το επίπεδο της θάλασσας. Οι τιμές αυτές είναι σχετικά χαμηλές τιμές. Από την κατανομή των υδραυλικών υψών εξάγεται το συμπέρασμα πως ο υδροφορέας τροφοδοτείται με νερό από την νότια περιοχή.

8.2. Χειμερινή περίοδος

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της χειμερινής περιόδου διαφέρουν σε κάποιο βαθμό από αυτά της θερινής. Οι καινούριες παράμετροι που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο αφορούν την βροχόπτωση και την οριακή συνθήκη του ποταμού Ασωπού.

8.2.1. Ταχύτητες



Σχήμα 12. Προσομοίωση ταχυτήτων για τη χειμερινή περίοδο

Από τη γραφική απεικόνιση των ταχυτήτων παρατηρούμε πως κατά την χειμερινή περίοδο έχουμε μία συσσώρευση νερού στα ίδια περίπου σημεία με την θερινή περίοδο. Δηλαδή η συσσώρευση παρουσιάζεται στην κεντρική-δυτική περιοχή, στην βορειοδυτική περιοχή στις ακτές του Χαλκούτσιου και στην κεντρική περιοχή όπου συσσωρεύεται και η μεγαλύτερη ποσότητα νερού.

Ωστόσο, από τη γραφική απεικόνιση που προκύπτει, γίνεται φανερό πως το μέγεθος των ταχυτήτων έχει αυξηθεί γεγονός που δικαιολογείται από τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα λόγω των βροχοπτώσεων αλλά και της ύπαρξης του ποταμού. Συγκεκριμένα οι ταχύτητες κυμαίνονται τώρα από 0,182 έως 1,817 m/d με τη μέγιστη τιμή να παρατηρείται στην κεντρική περιοχή με κατεύθυνση βορειοανατολική και την ελάχιστη στην περιοχή των μαργαϊκών πετρωμάτων και κοντά στις εκβολές του ποταμού.

Η σημαντική ωστόσο διαφοροποίηση αυτής της περιόδου είναι πως ο ποταμός φαίνεται να εμπλουτίζει τον υδροφορέα με αποτέλεσμα η ροή να τον ακολουθεί κατά μήκος και να εξαπλώνεται με κατεύθυνση από τον ποταμό προς τη γύρω περιοχή. Οι περιοχές που φαίνονται να επηρεάζονται πιο άμεσα είναι αυτές που βρίσκονται σε

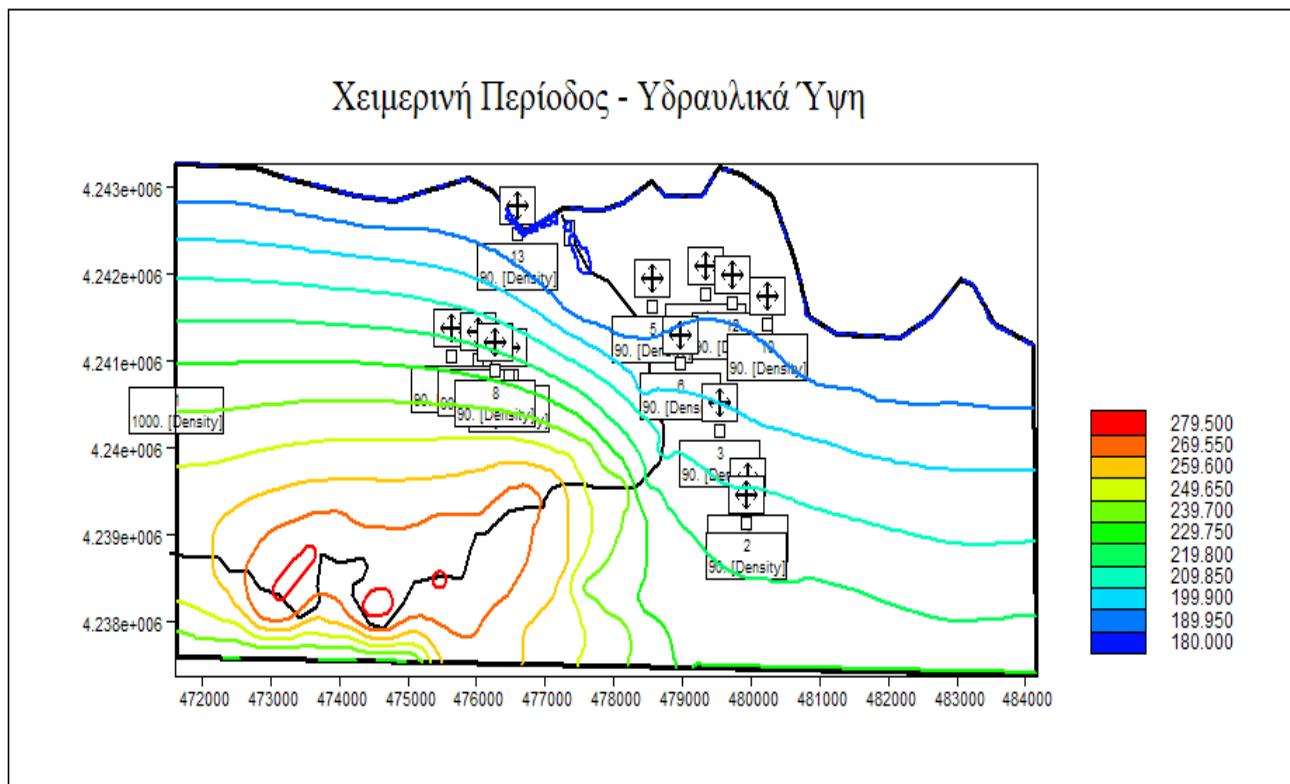
άμεση επαφή με τον ποταμό ενώ το φαινόμενο εξασθενεί προς τα όρια της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με την προσομοίωση της θερινής περιόδου, παρατηρούμε την ροή να κατευθύνεται προς τα νότια της περιοχής στο νοτιοδυτικό τμήμα ενώ στο κεντρικό τμήμα να κατευθύνεται προς τα ανατολικά από τη μία πλευρά του ποταμού και προς τα βόρεια από την άλλη ακολουθώντας την φυσική αλλαγή στην πορεία του ποταμού στο σημείο αυτό.

Επίσης, αλλαγή στην κατεύθυνση των ταχυτήτων παρατηρείται και κοντά στο σημείο εκβολής του ποταμού όπου η ροή φαίνεται να συγκλίνει. Αυτό δείχνει πως στην περιοχή κοντά στις εκβολές του, ο ποταμός παύει να εμπλουτίζει τον υδροφορέα με νερό καθώς ο υπόγειος υδροφορέας στο σημείο αυτό αρχίζει να ταυτίζεται με το επίπεδο της θάλασσας.

Ένα σημείο το οποίο δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη μεταβολή σε σχέση με την προσομοίωση της θερινής περιόδου είναι στα νότια της περιοχής μελέτης στο σημείο το οποίο βρίσκονται οι μάργες. Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται μία περιορισμένη ροή καθώς και η ελάχιστη ταχύτητα όπως προαναφέρθηκε.

8.2.2. Υδραυλικά ύψη

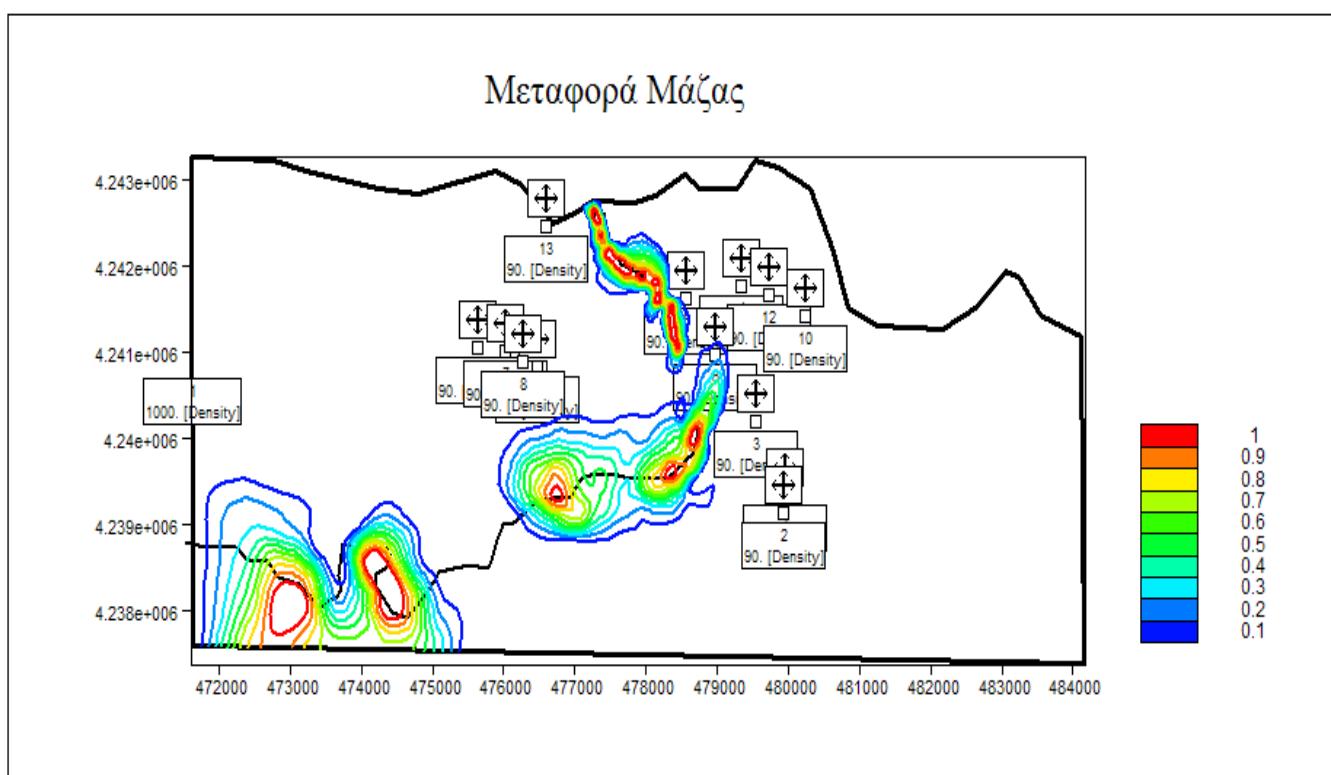


Σχήμα 13. Προσομοίωση υδραυλικών ύψων για τη χειμερινή περίοδο.

Φανερή είναι και σε αυτήν την περίπτωση η επίδραση του ποταμού Ασωπού. Τα μέγιστα υδραυλικά ύψη παρατηρούνται ομοίως με τη θερινή περίοδο στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Ωστόσο παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή (279,5 m) ακριβώς στην περιοχή του ποταμού και στη συνέχεια μειώνονται σταδιακά όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν την περιοχή παίρνοντας την ελάχιστη τιμή τους στις ακτές της περιοχής (180 m). Η διαφοροποίηση σε σχέση με τη θερινή περίοδο φαίνεται έντονα στο κεντρικό τμήμα της περιοχής (αλλούβιακές αποθέσεις) όπου η μείωση των υδραυλικών υψών ακολουθεί τη ροή του ποταμού με κατεύθυνση από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοανατολικά της περιοχής.

Τα υδραυλικά ύψη στην χειμερινή προσομοίωση παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από ότι στην θερινή γεγονός που καταδεικνύει για μία ακόμη φορά τον εμπλουτισμό του υδροφορέα από τις βροχοπτώσεις και τον ποταμό.

8.3. Μεταφορά Μάζας



Σχήμα 14. Προσομοίωση μεταφοράς μάζας με πηγή τον ποταμό Ασωπό.

Από το γράφημα που προκύπτει φαίνεται πως η ρύπανση, για το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, με αφετηρία το ποτάμι έχει εξαπλωθεί και στην γύρω περιοχή. Τα πιο σημαντικά μέτωπα ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή τα μέτωπα αυτά που η ζώνη ρύπανσης παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα βρίσκονται στο νοτιοδυτικό και κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Σε αυτά τα σημεία η ρύπανση φαίνεται να έχει εξαπλωθεί αρκετά γεγονός που ενισχύεται από την ύπαρξη διαπερατών πετρωμάτων, στη συγκεκριμένη περίπτωση ποταμοχερσαίων αποθέσεων και αλλουβιακών πετρωμάτων. Ιδιαίτερα το νοτιοδυτικό τμήμα τείνει να εξαπλωθεί πέρα από τα όρια της περιοχής μελέτης.

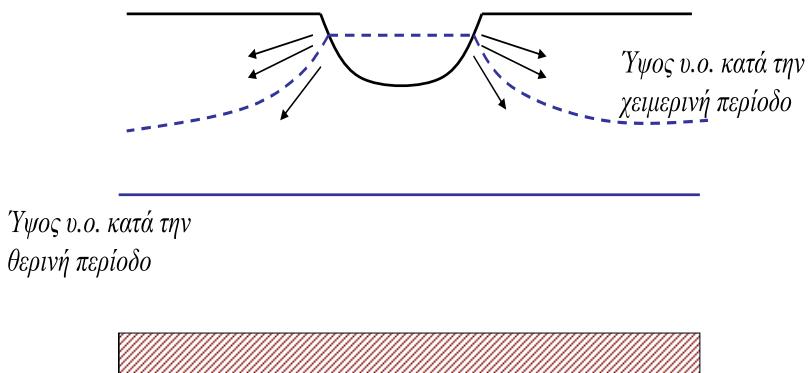
Η ρύπανση είναι φανερή και στο τελικό τμήμα του ποταμού κοντά στις εκβολές του. Ωστόσο αν και ο ρύπος δεν έχει εξαπλωθεί σημαντικά αποτελεί σημείο μεγάλης προσοχής καθώς διανύει μια αρκετά πυκνοκατοικημένη και τουριστική περιοχή.

Από τη ρύπανση φαίνεται να επηρεάζονται άμεσα οι γεωτρήσεις Γ5 και Γ6. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε ο ποταμός εμπλουτίζει τον υδροφορέα. Επομένως η υπόγεια ροή ακολουθεί μία πορεία με αφετηρία τον ποταμό προχωρώντας προς την γύρω περιοχή όπου βρίσκονται και οι υπόλοιπες γεωτρήσεις. Κατά συνέπεια, η ρύπανση ακολουθώντας την υπόγεια ροή αναμένεται να φτάσει και τις υπόλοιπες γεωτρήσεις.

Σημείωση: Ο λόγος που κάποια τμήματα του ποταμού φαίνονται να μην παρουσιάζουν επίπεδα ρύπανσης είναι πως τα συγκεκριμένα τμήματα δεν συμπίπτουν με κάποιον κόμβο του πλέγματος με αποτέλεσμα να εμφανίζονται αυτά τα χαρακτηριστικά κενά και όχι μία ενιαία ζώνη ρύπανσης.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

- Η προσομοίωση του μοντέλου για την περιοχή μελέτης είναι ικανοποιητική.
- Κατά την θερινή περίοδο η κατεύθυνση της υπόγειας ροής πραγματοποιείται από το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης προς το βόρειο τμήμα.
- Κατά την χειμερινή περίοδο ο Ασωπός ποταμός φαίνεται να ελέγχει την κατεύθυνση της ροής εμπλουτίζοντας τον υπόγειο υδροφορέα με ελάχιστη συμβολή από το νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Ο τελικός αποδέκτης της ροής είναι πάλι το βόρειο τμήμα. Σχηματικά η επίδραση του ποταμού στον υπόγειο υδροφορέα είναι η εξής:

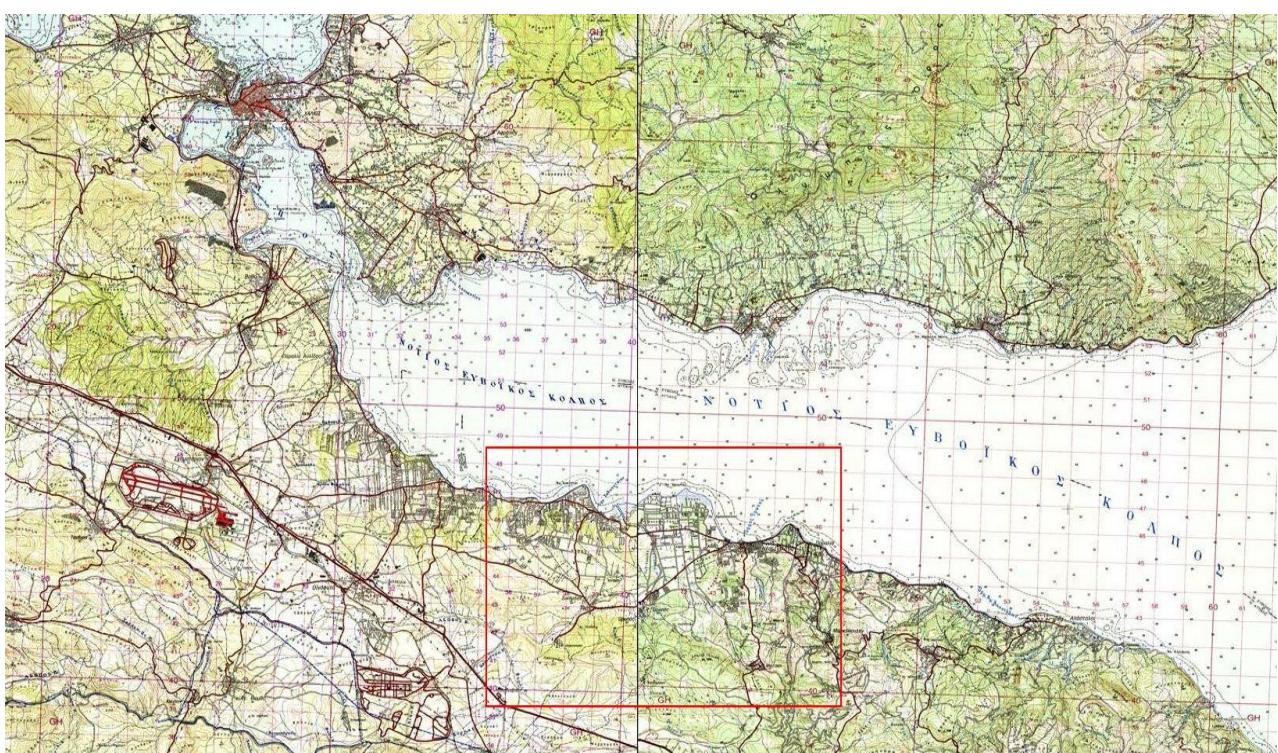
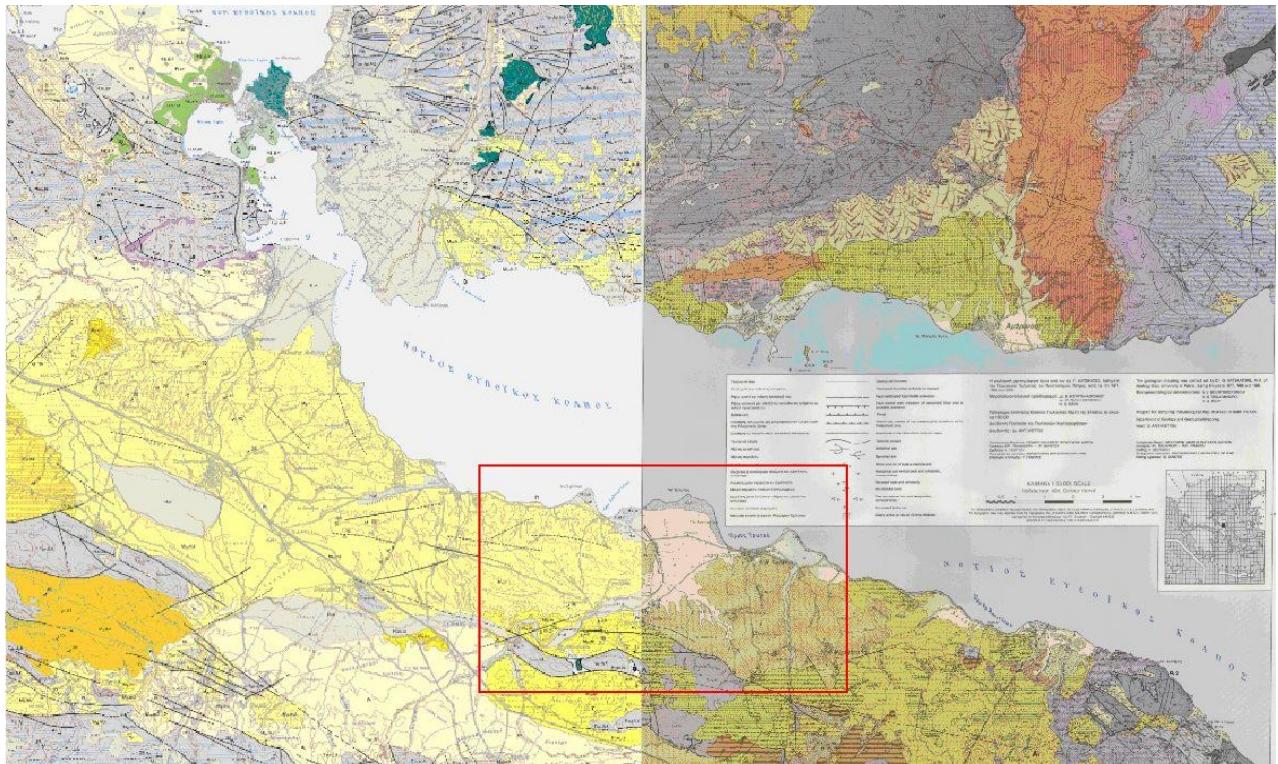


- Οι οριακές συνθήκες της ανατολικής και δυτικής πλευράς της περιοχής μελέτης δεν επηρεάζουν την υπόγεια ροή της.
- Ο Ασωπός ποταμός αποτελεί πηγή ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα και επηρεάζει της γεωτρήσεις της περιοχής.
- Η ρύπανση του ποταμού Ασωπού αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα και απαιτείται η εκπόνηση μελετών ευρύτερης κλίμακας.

- Για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι αποκατάστασης υπογείων υδάτων. Αν και στην συγκεκριμένη προσδομοίωση δεν έχει προσδιοριστεί το είδος του ρύπου που μελετάται οι μέθοδοι που ακολουθούν έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής ενώ η χρήση τους ενδείκνυται και για το εξασθενές χρώμιο.
 - Μία τέτοια μέθοδος, αρκετά χρονοβόρα ωστόσο, είναι το **pump and treat** το οποίο είναι μία ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία εδώ και πολλά χρόνια κατά την οποία το ρυπασμένο νερό μεταφέρεται μέσω άντλησης στην επιφάνεια, στη συνέχεια επεξεργάζεται και τέλος επανατοποθετείται στο έδαφος [8].
 - Μία επιπλέον μέθοδος αποτελεί η χρήση **διαπερατών αντιδρώντων φραγμάτων** (Permeable Reactive Barriers) κατά την οποία τοποθετούνται κατάντη της πηγής ρύπανσης κάθετοι «τοίχοι» οι οποίοι λειτουργούν ως φίλτρα εξουδετερώνοντας ή μετασχηματίζοντας τους ρύπους που διέρχονται μαζί με την ροή του νερού [8].
 - Μία ακόμη μέθοδος η οποία ωστόσο βρίσκεται υπό ανάπτυξη είναι η **φυτοεξυγίανση** μέσω της οποίας χρησιμοποιούνται οι φυσικές ιδιότητες κάποιων φυτών για την διάσπαση οργανικών και ανόργανων συστατικών που βρίσκονται στο έδαφος [10].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρατίθενται ο γεωλογικός χάρτης και τοπογραφικός χάρτης των περιοχών Χαλκίδας και Ερέτριας με σημειωμένη την περιοχή μελέτης.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, ‘Applied Groundwater Modeling’, Academic Press, 1992.
2. K.R.Rushton, ‘Groundwater Hydrology - Conceptual and Computational Models’, Wiley, 2003
3. Ne-Zheng, Sun, ‘Mathematical Modeling of Groundwater Pollution’, Springer, 1996
4. D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, ‘Chemical Transport By Three-Dimensional Groundwater Flows’, 1997.

Δημοσιεύσεις

5. Μ. Λοϊζίδου, Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων για το έργο: ‘Ιδρυση και λειτουργία κεντρικής μονάδας επεξεργασίας των βιομηχανικών αποβλήτων της περιοχής Ασωπού και των αστικών λυμάτων Δήμου Αυλώνα’, 1998
6. Θ. Χατούπης, I. Φουντούλης, ‘Νεοτεκτονική Παραμόρφωση Της Βόρειας Πάρνηθας’, 2004.
7. M. O. Angelidis, M. Aloupi, ‘Geochemical Study of Coastal Sediments Influenced by River-Transported Pollution : Southern Evoikos Gulf’, Greece, 2000.
8. M. Αϊβαλιώτη, E. Γιδαράκος, ‘Τεχνολογίες Αποκατάστασης εδαφών από Επικίνδυνους Ρύπους’, Ζυγός, 2005.
9. Θ. Σ. Κουσουρής, ‘Υδατικοί πόροι. Προέλευση, Ταξινόμηση, Κατανομή, Αποθέματα, Υγρότοποι, Αξιοποίηση, Διαχείριση’
10. EPA, ’In Situ Treatment of Soil and Groundwater Contaminated with Chromium-Technical Resource Guide’, Ohio, 2000

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

11. www.metar.gr
12. www.wikipedia.com
13. www.kathimerini.gr
14. www.asoposss.gr

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.