

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:**

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ  
ΜΟΙΡΩΝ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ, ΚΡΗΤΗΣ**

**ΘΩΜΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)**

**ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΒΑΡΟΥΧΑΚΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ**

**ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2017**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τη βοήθεια τους τον καθηγητή κ. Γιώργο Καρατζά και τον Δρ. Εμμανουήλ Βαρουχάκη. Επίσης για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Νικόλαο Νικολαΐδη.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	7
1.1. Εξισώσεις του συστήματος.....	7
1.1.1. Θεώρηση υδροφορέα και θεώρηση συστήματος ροής.....	7
Εξίσωση Boussinesq.....	10
1.1.2. Παραγωγή των Εξισώσεων του Συστήματος.....	11
1.1.3. Αριθμητικές Μέθοδοι.....	16
1.2. Οριακές Συνθήκες.....	19
1.3. Προσομοίωση ακόρεστης ζώνης.....	19
1.4. Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών.....	20
1.5. Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.....	21
1.6. Διαρροή.....	21
1.7. Το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code).....	23
1.7.1. Οι Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου PTC.....	23
1.7.2. Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC.....	24
1.7.3. Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων.....	24
1.7.3.1. Βασική Εξίσωση.....	24
1.7.3.2. Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων.....	25
1.7.3.3. Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών.....	27
1.7.3.3.1. Η Κάθετη Παράγωγος.....	27
1.7.3.3.2. Η Παράγωγος του Χρόνου.....	27
1.7.3.4. Οριακές Συνθήκες.....	28
1.7.3.4.1. Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος.....	29

1.7.3.4.2. Καθορισμένη Ροή.....	29
1.7.3.4.3. Τρίτου Τύπου.....	29
1.7.3.5. Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα.....	30
1.7.4. Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπου.....	32
1.7.4.1 Εξισώσεις του Συστήματος.....	32
1.7.4.2. Οριακές Συνθήκες.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ.....	35
2.1. Γενικά.....	35
2.2. Μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία .....	35
2.2.1. Γενικά για το κλίμα της Κρήτης.....	35
2.2.2. Κατακρημνίσεις.....	36
2.2.3. Άνεμοι.....	36
2.3. Γεωλογία.....	36
2.3.1. Γενικά για τη γεωλογία της Κρήτης.....	36
2.3.2. Υδρογεωλογία της περιοχής.....	37
2.3.3. Σεισμικότητα της περιοχής.....	38
2.4. Φυσικό Περιβάλλον.....	39
2.4.1. Χλωρίδα.....	39
2.4.2. Βλάστηση.....	39
2.4.3. Πανίδα.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΡΤΣ ΣΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	40
ΣΕΝΑΡΙΑ.....	55
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η εργασία αυτή εξετάζει τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα διάφορα μοντέλα κατά την προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου υδροφορέα και τη μεταφορά ρύπων μέσα σε αυτόν. Στο θεωρητικό τμήμα της εργασίας περιγράφονται οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες που διέπουν ένα τέτοιου είδους σύστημα υπόγειας ροής και γίνεται ανάλυση των δύο επικρατέστερων μεθόδων, εκείνης των πεπερασμένων στοιχείων και εκείνης των πεπερασμένων διαφορών. Κατόπιν, γίνεται αναφορά στο μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, το PTC (Princeton Transport Code), και περιγράφονται αναλυτικά οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες που το διέπουν.

Στο δεύτερο τμήμα της εργασίας γίνεται σύντομη περιγραφή της περιοχής μελέτης (Μοίρες, Ηράκλειο Κρήτης) με μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία (κατακρημνίσεις, άνεμοι), αλλά και στοιχεία για τη γεωλογία και το φυσικό περιβάλλον της περιοχής. Ακολουθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου, βάσει των δεδομένων που είναι διαθέσιμα για την περιοχή. Αφού η διαδικασία περιγραφεί αναλυτικά σε βήματα, γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα του μοντέλου και εξακρίβωση του κατά πόσον το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση της ροής των υπογείων υδάτων του υδροφορέα της περιοχής των Μοιρών.

Τέλος, εξετάζονται δύο σενάρια: στο μεν πρώτο προτείνεται αύξηση της ποσότητας νερού που αντλούν τα πηγάδια κατά 10% και μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%, ενώ στο δεύτερο αύξηση της ποσότητας νερού που αντλούν τα πηγάδια κατά 20% και μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%.

## **SUMMARY**

This paper examines the methods used in various models in order to simulate the movement of the underground aquifer and the transfer of pollutants within it. The theoretical part of the paper describes the equations and boundary conditions governing such a system of underground flow and analyzes the two most prevalent methods, that of finite elements and that of finite differences. Then the model used in the present study, the PTC (Princeton Transport Code), is mentioned, and the equations and boundary conditions governing it are described in detail.

In the second part of this paper, a brief description of the study area (Mires, Heraklion, Crete) is presented with meteorological and climatic data (rain, wind data), as well as data on geology and the natural environment of the area. The calibration of the model follows, based on the data available for the region. The process is described in steps. Then reference is made to the results of the model and to the verification of whether the model satisfactorily represents the actual condition of the groundwater flow of the Mires aquifer.

Finally, two scenarios are examined, the first proposes increase in quantity of the extracted water from the pumping wells by 10% and the reduction of rainfall by 10%, while the second proposes increase in quantity of the extracted water from the pumping wells by 20% and the reduction of rainfall by 20%.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το νερό αποτελεί βασικό και αναντικατάστατο παράγοντα για την ύπαρξη κάθε μορφής ζωής. Η ποσότητα με την οποία βρίσκεται στη γη φαίνεται να είναι πολύ μεγάλη και ουσιαστικά ανεξάντλητη, γρήγορα όμως γίνεται αντιληπτό πως κάτι τέτοιο δεν είναι αλήθεια. Από τη συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στη γη (περίπου  $1370 \times 10^{15} m^3$ ), το 97.3% είναι αλμυρό νερό, συνεπώς δεν είναι πόσιμο, ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, αγροτική ή βιομηχανική χρήση, το 2.1% βρίσκεται με τη μορφή χιονιού ή πάγου, ενώ υπάρχει και ένα πολύ μικρό ποσοστό που βρίσκεται με τη μορφή υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Προκύπτει λοιπόν πως το πόσιμο νερό που υπάρχει διαθέσιμο είναι μόλις το 0.6% της συνολικής ποσότητας του νερού (περίπου  $8.3 \times 10^{15} m^3$ ). Από το νερό αυτό το 98% είναι υπόγεια ύδατα, ενώ τα επιφανειακά ύδατα αποτελούν μόλις το 2%. Επειδή λοιπόν τα αποθέματα νερού στους υπόγειους υδροφορείς αποτελούν τον κύριο όγκο διαθέσιμου γλυκού νερού, η διαχείρισή τους, κρίνεται μεγάλης σπουδαιότητας.

Τις τελευταίες δεκαετίες μάλιστα, εξαιτίας της πληθυσμιακής αλλά και της βιομηχανικής ανάπτυξης, οι ανάγκες σε νερό έχουν αυξηθεί σε παγκόσμια κλίμακα, καθιστώντας ολοένα και πιο επιτακτική την ανάγκη για την ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδροφορέων. Πλέον, κρίνονται απαραίτητες μελέτες που να προσομοιώνουν τους υπόγειους υδροφορείς και να κάνουν προβλέψεις για τη μελλοντική τους κατάσταση. Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται μοντέλα όπως το MODFLOW, το AQUIFEM, το PTC και άλλα. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση των υπόγειων υδάτων, αλλά και να δώσουν προβλέψεις για τη διασπορά ενός ρύπου μέσα στον υπόγειο υδροφόρα.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο PTC για την προσομοίωση της κίνησης των υπόγειων υδάτων στην περιοχή της λεκάνης των Μοιρών, στο νομό Ηρακλείου. Η περιοχή είχε γνωρίσει τα τελευταία χρόνια μεγάλη αγροτική ανάπτυξη, με τις ανάγκες σε άρδευση να καλύπτονται από τα υπόγεια ύδατα της περιοχής. Η αλόγιστη όμως εκμετάλλευσή τους, είχε σαν αποτέλεσμα τη δραματική μείωση της στάθμης του υδροφορέα (πάνω από 35m) τα τελευταία 30 χρόνια.

Μετά τη βαθμονόμηση του, το μοντέλο PTC, προσομοιώνει την κίνηση των υπόγειων υδάτων της περιοχής, παρέχοντας πληροφορίες όσον αφορά το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα και την ταχύτητα του νερού στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

### **1.1 Εξισώσεις του συστήματος**

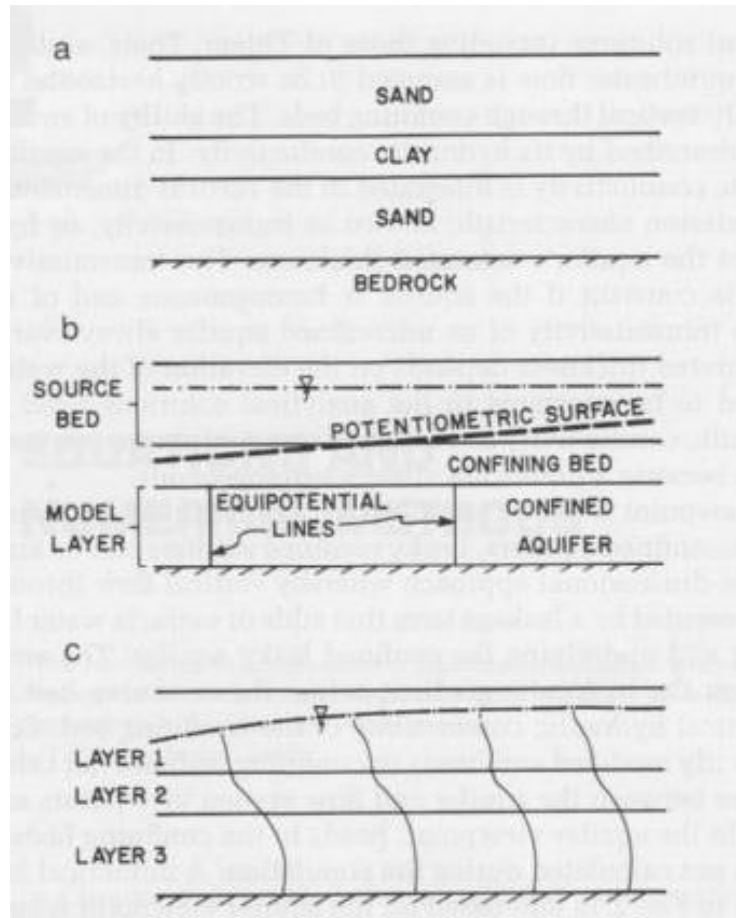
Η πλήρης μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου προϋποθέτει την εξίσωση που το διέπει, τις οριακές συνθήκες καθώς και τις αρχικές συνθήκες, εφόσον το πρόβλημα εξαρτάται από το χρόνο.

#### **1.1.1 Θεώρηση υδροφορέα και θεώρηση συστήματος ροής**

Πριν τη εξαγωγή μιας εξίσωσης που διέπει ένα σύστημα υπόγειας ροής, κρίνεται απαραίτητη η επιλογή μίας θεώρησης για το σύστημα αυτό. Για τα συστήματα υπογείων υδάτων, υπάρχουν δύο θεωρήσεις, η θεώρηση υδροφορέα και η θεώρηση συστήματος ροής.

Η θεώρηση υδροφορέα βασίζεται στη λογική των περιορισμένων και των ελεύθερων υδροφορέων. Ο υδροφορέας αποτελείται από πορώδες υλικό και έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων ύδατος σε πηγάδια. Ο περιορισμένος υδροφορέας καλύπτεται από ένα περιοριστικό στρώμα πορώδους υλικού, που καθυστερεί την κίνηση του ύδατος, ενώ ο ελεύθερος υδροφορέας έχει ως άνω όριό του τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτή η θεώρηση βρίσκει εξαιρετική εφαρμογή στην περίπτωση ανάλυσης της ροής προς πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις όπως εκείνες των Thiem, Theis και Jacob. Σε αυτή τη θεώρηση, η ροή του υπόγειου ύδατος θεωρείται αυστηρά οριζόντια μεταξύ των υδροφορέων και αυστηρά κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων. Η ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει ύδωρ περιγράφεται από την υδραυλική διαπερατότητά του. Η θεώρηση υδροφορέα υπολογίζει, από το ολοκλήρωμα της διαπερατότητας στην κατακόρυφη διάσταση, ένα χαρακτηριστικό μέγεθος γνωστό ως μεταβιβασιμότητα, που ισούται με το γινόμενο της διαπερατότητας επί το πάχος της κορεσμένης ζώνης. Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου, ομογενούς και με σταθερό πάχος υδροφορέα είναι σταθερή, ενώ εκείνη ενός ελεύθερου υδροφορέα είναι πάντα μεταβλητή χωρικά, δεδομένου ότι το πάχος της κορεσμένης ζώνης εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Βέβαια, αν και στις αναλυτικές λύσεις, τόσο η διαπερατότητα, όσο και η μεταβιβασιμότητα θεωρούνται σταθερές, στην πράξη είναι μεταβλητές χωρικά, αφού οι υδροφορείς που συναντώνται στο πεδίο είναι πάντα ετερογενείς.





Σχήμα 1.1: Θεωρήσεις συστημάτων υπογείων υδάτων

(a) Γεωλογικό σύστημα

(b) Θεώρηση υδροφορέα

(c) Θεώρηση συστήματος ροής

(M. Anderson, W. Woessner)

Με χρήση αυτής της θεώρησης, προσομοιώνονται συστήματα δισδιάστατης ροής σε περιορισμένους και σε ελεύθερους υδροφορείς.

Οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή μπορούν να προσομοιωθούν με μία ψευδο-τριδιάστατη προσέγγιση, στην οποία η κάθετη ροή μέσα από τα περιοριστικά στρώματα αντιπροσωπεύεται από έναν όρο διαρροής που προσθέτει ή αφαιρεί ποσότητα ύδατος από τους υποκείμενους ή υπερκείμενους υδροφορείς του περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή. Η ποσότητα της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση του περιορισμένου υδροφορέα καθώς και από το πάχος και την κάθετη διαπερατότητα του περιοριστικού στρώματος. Τα

περιοριστικά στρώματα δεν είναι σαφώς προσομοιωμένα και η οριζόντια ροή σε αυτά δεν υπολογίζεται.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι:

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

όπου

$$L = -K'_z \frac{h_{source} - h}{b'}$$

Οι όροι στο αριστερό μέρος της εξίσωσης (1.1) αντιπροσωπεύουν οριζόντια ροή μέσω του υδροφορέα, όπου  $h$  είναι το υδραυλικό ύψος και  $T_x$  και  $T_y$  είναι οι συνιστώσες της μεταβιβασιμότητας. Η χρήση των όρων  $T_x$  και  $T_y$  μέσα στα μερικά διαφορικά επιτρέπει την χωρική μεταβολή τους, ενώ οι διαφορετικοί δείκτες για τις δύο διευθύνσεις επιτρέπουν την εφαρμογή της εξίσωσης σε ανισότροπους υδροφορείς, όπου  $T_x \neq T_y$ . Το  $S$  δηλώνει το συντελεστή αποθηκευτικότητας, το  $R$  είναι ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης, που στην εξίσωση θεωρείται θετικό (εμπλουτισμός). Αν συμβαίνει άντληση με ρυθμό  $W$ , τότε στην εξίσωση πρέπει να τεθεί  $R = -W$ . Ο τελευταίος όρος στο δεξί μέρος της εξίσωσης ( $L$ ) δηλώνει διαρροή από ένα περιοριστικό στρώμα, όπου  $K'_z$  είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητά του,  $b'$  το πάχος του και  $h_{source}$  το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος.

Κατά την εφαρμογή της (1.1) σε ελεύθερο υδροφορέα γίνονται οι παραδοχές Dupuit και συγκεκριμένα:

- (1) οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες και
- (2) η υδραυλική κλίση είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους.

Είναι γνωστό ότι  $T_x = K_x h$  και  $T_y = K_y h$ , όπου  $h$  είναι η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα από τον πυθμένα του υδροφορέα, δηλαδή το κορεσμένο πάχος, και μπορεί να μεταβάλλεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Το  $S$  είναι η ειδική απόδοση ενώ ο όρος της διαρροής συνήθως είναι μηδενικός, εκτός εάν υπάρχει διαρροή από ή προς κάποιο στρώμα κάτω από τον ελεύθερο υδροφορέα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από την εξίσωση (1.1) απουσιάζει η συνιστώσα της μεταβιβασιμότητας στη διεύθυνση  $z$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η μεταβιβασιμότητα στρογγυλοποιείται στο μέσο όρο στην κάθετη διεύθυνση, αφού έχει θεωρηθεί ότι περιγράφεται η διδιάστατη οριζόντια ροή σε έναν υδροφορέα και έτσι δεν ορίζεται η

μεταβιβασιμότητα στην διεύθυνση z. Η υδραυλική διαπερατότητα ωστόσο περιγράφει τις ιδιότητες της μεταβίβασης σε ένα σημείο του υδροφορέα και για το λόγο αυτό έχει συνιστώσες και στις τρεις διευθύνσεις.

Στην περίπτωση της θεώρησης συστήματος ροής, δε χρειάζεται η ταυτοποίηση καθ'αυτών των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων αλλά η κατασκευή της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τόσο οριζόντιες, όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα και έτσι επιτρέπει το χειρισμό της ροής είτε σε δύο, είτε σε τρεις διαστάσεις.

Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι:

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

όπου  $K_x$ ,  $K_y$  και  $K_z$  είναι οι συνιστώσες της υδραυλικής διαπερατότητας,  $S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα,  $R^*$  είναι ένας γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικό (εμπλουτισμός) και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση άντλησης  $R^* = -W$ . (M. Anderson, W. Woessner)

### **Εξίσωση Boussinesq**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν η εξίσωση (1.1) χρησιμοποιείται για προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων, θεωρείται  $T_x = K_x h$  και  $T_y = K_y h$  όπου  $h$  είναι το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (1.1) προκύπτει η μη γραμμική εξίσωση Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (1.3)$$

όπου το  $L$  είναι ίσο με μηδέν και ο συντελεστής αποθήκευσης ( $S$ ) είναι ίσος με την ειδική αποθηκευτικότητα ( $S_y$ ).

Επειδή όμως ισχύει και ότι:

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

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

Η εξίσωση (1.3) γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} - 2R \quad (1.4)$$

Η εξίσωση (1.4) είναι μη γραμμική επειδή ο όρος  $h$  είναι υψωμένος στη δεύτερη δύναμη στο αριστερό μέλος της εξίσωσης, ενώ είναι στην πρώτη δύναμη στο δεξί. Αν και έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι για τη λύση της μη γραμμικής εξίσωσης, υπάρχει πιο εύκολος τρόπος να λυθεί το πρόβλημα. Αν είναι γνωστή μια τιμή του κορεσμένου πάχους του υδροφορέα, η εξίσωση μπορεί να γραμμικοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα αριθμητικό μοντέλο. (M. Anderson, W. Woessner)

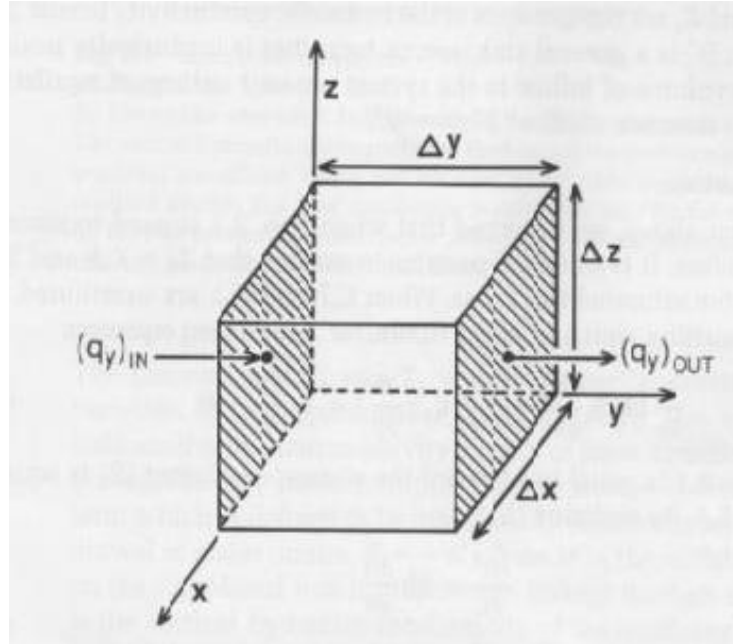
#### 1.1.2 Παραγωγή των Εξισώσεων του Συστήματος

Η Εξίσωση (1.2) παραγωγίζεται από τη μαθηματική σύνδεση ενός υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy. Η παραγωγή γίνεται συνήθως με τη χρήση ενός κύβου αναφοράς από πορώδες υλικό, το οποίο είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου, ενώ ταυτόχρονα είναι και αρκετά μικρό ώστε η αλλαγή του ρεύματος μέσα στον όγκο ελέγχου να είναι πολύ μικρή.

Αυτός ο κύβος από πορώδες υλικό είναι γνωστός ως μοναδιαίος όγκος του πορώδους υλικού (Representative Elementary Volume – REV). Ο όγκος του ισούται με  $\Delta_x \Delta_y \Delta_z$ . Η ροή του ύδατος μέσα από τον όγκο ελέγχου εκφράζεται από το ρυθμό άντλησης ( $q$ ), όπου  $q$  είναι ένα διάνυσμα που μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών του  $q_x$ ,  $q_y$  και  $q_z$ . Άρα:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (1.5)$$

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



Σχήμα 1.2: Ο μοναδιαίος όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή των εξισώσεων του συστήματος. (M. Anderson, W. Woessner)

Το υδατικό ισοζύγιο (αρχή διατήρησης της μάζας) δηλώνει ότι:

$$\text{Έξοδος} - \text{Είσοδος} = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση} \quad (1.6)$$

Θεωρώντας τη ροή κατά μήκος του άξονα  $y$  του όγκου ελέγχου, η εισροή διέρχεται από επιφάνεια  $\Delta_x \Delta_z$  και ισούται με  $(q_y)_{IN}$ , ενώ η εκροή ισούται με  $(q_y)_{OUT}$ . Ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής ισούται με:

$$\left[ (q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN} \right] \Delta_x \Delta_z \quad (1.7)$$

Η (1.7) μπορεί να γραφεί και ως:

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta_y} (\Delta_x \Delta_y \Delta_z) \quad (1.8)$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική, η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα  $y$  είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y}(\Delta_x \Delta_y \Delta_z) \quad (1.9)$$

Αντίστοιχες είναι και οι εξισώσεις της αλλαγής του ρυθμού ροής κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $z$ . Η ολική μεταβολή του ρυθμού ροής ισούται με την αλλαγή στην αποθήκευση και εκφράζεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta_x \Delta_y \Delta_z = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση} \quad (1.10)$$

Για να επιτραπεί επίσης η ύπαρξη μιας καταβόθρας (πηγάδι άντλησης) ή μιας πηγής (πηγάδι εμπλουτισμού) μέσα στον όγκο ελέγχου, προστίθεται και ο όρος  $R^* \Delta_x \Delta_y \Delta_z$ . Ο όρος αυτός θεωρείται θετικός όταν πρόκειται για πηγή, γι' αυτό και αφαιρείται από το αριστερό μέλος της εξίσωσης (1.10).

Άρα:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta_x \Delta_y \Delta_z = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση} \quad (1.11)$$

Από το δεξί μέλος της (1.6) η αλλαγή στην αποθήκευση ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα ( $S_s$ ), η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta_x \Delta_y \Delta_z} \quad (1.12)$$

Η παραδοχή που γίνεται είναι ότι το  $\Delta V$  είναι θετικό όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό, ή αλλιώς ότι νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός αλλαγής της αποθήκευσης στον όγκο ελέγχου είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta_x \Delta_y \Delta_z \quad (1.13)$$

Από το συνδυασμό των (1.11) και (1.13) και διαίρεση τους δια  $\Delta_x \Delta_y \Delta_z$  προκύπτει η τελική μορφή του ισοζυγίου μάζας του νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} + R^* \quad (1.14)$$

Η εξίσωση όμως αυτή έχει πολύ περιορισμένη χρήση, αφού το  $q$  δεν είναι άμεσα μετρήσιμο. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήσιμου νόμου του Darcy, ο οποίος δίνει μια σχέση μεταξύ των  $q$  και  $h$ , όπου το υδραυλικό ύψος  $h$  είναι άμεσα μετρήσιμο. Για τις τρεις διαστάσεις, ο νόμος του Darcy γράφεται:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.15)$$

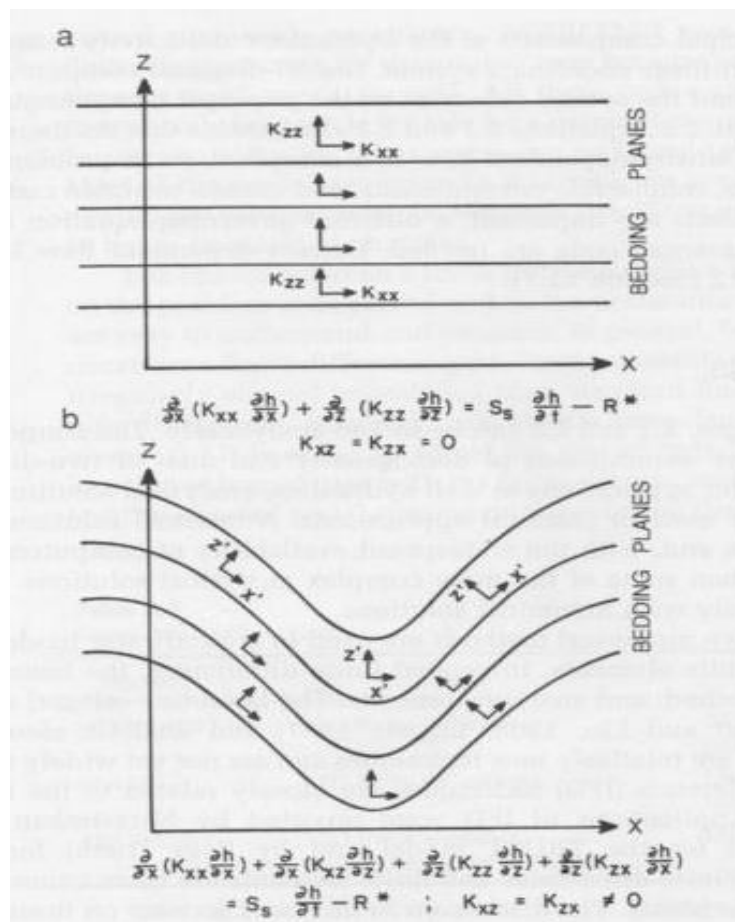
Όταν οι εξισώσεις (1.15) αντικατασταθούν στην (1.14) προκύπτει η εξίσωση (1.2). Η εξίσωση (1.1) παράγεται από την (1.2) θέτοντας  $\partial h / \partial z = 0$ , πολλαπλασιάζοντας με το  $b$ , προσθέτοντας τον όρο της διαρροής ( $L$ ) και θέτοντας  $bS_s = S$  και  $bR^* = R$ .

Στις εξισώσεις (1.1) και (1.2) θεωρείται ότι τα  $K_x$ ,  $K_y$  και  $K_z$  (ή  $T_x$ ,  $T_y$ ) είναι συγγραμμικά με τους άξονες  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Εάν η γεωλογία είναι τέτοια που να μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $\bar{K}$ ). Ο πίνακας αυτός γράφεται ως εξής:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου.

Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος. Στα τοπικά συστήματα, τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Μέσω της στροφής των συντεταγμένων, είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα, σε αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο καθολικό σύστημα.



Σχήμα 1.3: Προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων.

(a) Οι άξονες x και z είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας.

(b) Ορίζεται ένα καθολικό σύστημα (x-z) και τα τοπικά συστήματα (x'-z') ευθυγραμμίζονται με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας.

(M. Anderson, W. Woessner)



Όταν τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι συγγραμμικά με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, τα στοιχεία εκτός διαγωνίου είναι μηδενικά και ο δεύτερος δείκτης μπορεί να παραλειφθεί όπως στην εξίσωση (1.2). Οι εξισώσεις (1.1) και (1.2) υποθέτουν επίσης ότι η πυκνότητα είναι σταθερή. Η ροή που εξαρτάται από την πυκνότητα είναι περίπλοκη σε προβλήματα που περιλαμβάνουν αλμυρό νερό, τέτοιου είδους είναι και το πρόβλημα της υφαλμύρισης. Εάν τα φαινόμενα της πυκνότητας είναι σημαντικά χρειάζεται μια διαφορετική εξίσωση του συστήματος και ένας αριθμητικός κώδικας ειδικός για την περίπτωση. (M. Anderson, W. Woessner)

### 1.1.3 Αριθμητικές Μέθοδοι

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

Στην προσομοίωση υπόγειων υδροφορέων χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω πέντε κατηγορίες μοντέλων: i) πεπερασμένων διαφορών, ii) πεπερασμένων στοιχείων, iii) ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών, iv) η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και v) η μέθοδος αναλυτικών στοιχείων. Από αυτές, οι δύο τελευταίες είναι σχετικά νέες τεχνικές και δεν είναι ευρέως διαδεδομένες. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη των πεπερασμένων στοιχείων. Οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για επίλυση προβλημάτων ροής.

Ένα πρόγραμμα υπολογιστή, επιλύει μία ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται από προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Τεχνικές προσέγγισης, όπως είναι οι πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία, ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που να μπορεί να επιλυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με τον τρόπο αυτό μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση πινάκων.

Η επιλογή ανάμεσα σε ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών ή ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το προς επίλυση πρόβλημα και την προτίμηση του χρήστη. Οι πεπερασμένες διαφορές είναι εύκολες στην κατανόηση και τον προγραμματισμό. Επιπλέον, απαιτούν λιγότερα στοιχεία για την κατασκευή του πλέγματος. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα στην προσέγγιση ορίων ακανόνιστου σχήματος από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. (Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές όμως μπορούν να διαχειριστούν τα ακανόνιστα όρια εξίσου καλά με τα πεπερασμένα στοιχεία). Είναι

ευκολότερο να προσαρμοστεί το μέγεθος των μεμονωμένων στοιχείων, όπως και η τοποθεσία των ορίων, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, διευκολύνοντας τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει στη λύση η διάταξη στο χώρο των κόμβων. Τα πεπερασμένα στοιχεία διαχειρίζονται επίσης καλύτερα τα εσωτερικά όρια, όπως οι ελαττωματικές ζώνες, και μπορούν να προσομοιώσουν καλύτερα σημειακές πηγές ή καταβόθρες, επιφάνειες με διαρροή και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες από ότι οι πεπερασμένες διαφορές. Για άλλους τύπους προβλημάτων, η επιλογή μιας μεθόδου προσέγγισης βασίζεται συνήθως στην προτίμηση του χρήστη. Αν και κατά καιρούς έχουν υπάρξει άρθρα που υποστηρίζουν ως καλύτερη τη μία ή την άλλη μέθοδο, προκύπτει πως οι κρίσεις τους δεν είναι αντικειμενικές και πιο σωστή μοιάζει η γνώμη του Gray (1984) ότι «κάθε μέθοδος έχει ειδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να είναι επιθυμητά για μια συγκεκριμένη εφαρμογή».

Αν και έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων – αν το πρόβλημα έχει κόμβους ανά ίσα διαστήματα, οι παραγόμενες από τις δύο μεθόδους αλγεβρικές εξισώσεις είναι οι ίδιες – οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν διαφορές. Κυριότερη είναι η θεμελιώδης διαφορά φιλοσοφίας. Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών υπολογίζουν μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο, που είναι επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Δεν γίνεται καμία υπόθεση για τον τρόπο που μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζουν επακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο, με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών (βασικών) συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων.

Η γενική μορφή της έκφρασης των πεπερασμένων διαφορών για την εξίσωση (1.2) γράφεται για το υπολογιστικό στοιχείο του σχήματος 1.4.a ως εξής:

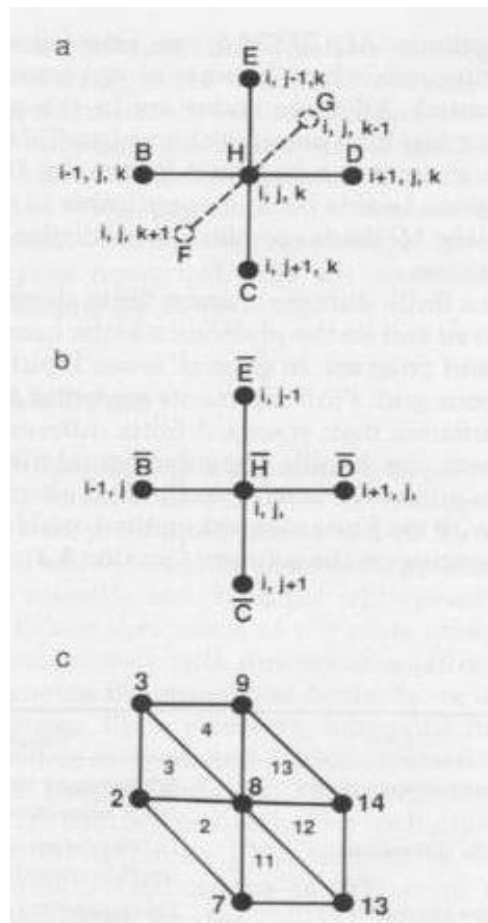
$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k} \quad (1.17)$$

Η εξίσωση για το υδραυλικό ύψος στον κόμβο  $i, j, k$  ( $h_{i,j,k}$ ) εμπεριέχει το υδραυλικό ύψος στον ίδιο τον κόμβο καθώς και τα υδραυλικά ύψη στους έξι γειτονικούς κόμβους. Κάθε υδραυλικό ύψος πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (B, C, D, E, F, G ή H) ο οποίος είναι μια συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των κόμβων. Ο συντελεστής H είναι επίσης συνάρτηση του όρου της αποθήκευσης. Ο όρος  $RHS_{i,j,k}$  περιλαμβάνει την αποθήκευση και τους όρους εμπλουτισμού στο δεξί μέλος της εξίσωσης.

Η εξίσωση δισδιάστατης ροής για το σχήμα 1.4.b γράφεται:

$$\bar{B}h_{i-1,j} + \bar{C}h_{i,j+1} + \bar{D}h_{i+1,j} + \bar{E}h_{i,j-1} + \bar{H}h_{i,j} = RHS_{i,j} \quad (1.18)$$

όπου τα  $\bar{B}$ ,  $\bar{C}$ ,  $\bar{D}$ ,  $\bar{E}$  και  $\bar{H}$  είναι συντελεστές. Και οι δύο παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξισώσεις πινάκων υπό την μορφή  $[A]\{h\} = \{f\}$ , όπου  $[A]$  ο πίνακας συντελεστών,  $\{h\}$  το διάνυσμα των αγνώστων υδραυλικών υψών και  $\{f\}$  το διάνυσμα των όρων του δεξιού μέλους (RHS) της εξίσωσης. (M. Anderson, W. Woessner)



Σχήμα 1.4:Υπολογιστικά στοιχεία

- (a) Τρισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών
  - (b) Δισδιάστατο στοιχείο πεπερασμένων διαφορών
  - (c) Κομμάτι με έξι πεπερασμένα στοιχεία γύρω από τον κόμβο 8.
- (M. Anderson, W. Woessner)

## **1.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ**

Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούνται από τις εξισώσεις του συστήματος, τις οριακές συνθήκες και τις αρχικές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες είναι η μαθηματική δήλωση που καθορίζει την εξαρτημένη μεταβλητή (στάθμη-head) ή την παράγωγο αυτής (ροή-flux) στα όρια της περιοχής του προβλήματος.

Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι ένα κρίσιμο στάδιο στην κατασκευή του μοντέλου. Σε προσομοιώσεις σταθερής κατάστασης (steady-state), τα όρια καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη μορφή της ροής. Σύμφωνα με τον Franke et al.(1987), η επιλογή των οριακών συνθηκών είναι το βήμα της προσομοίωσης που υπόκειται στα σοβαρότερα σφάλματα.

Τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων σχηματίζονται από τη φυσική παρουσία ενός αδιαπέρατου στρώματος βράχου ή από ένα στρώμα επιφανειακού ύδατος. Άλλα όρια σχηματίζονται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών. Αυτά τα αόρατα όρια είναι υδραυλικά όρια που περιλαμβάνουν υπόγεια χωρίσματα και ποτάμια.

Τα υδρογεωλογικά όρια εκφράζονται από τους ακόλουθους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών.

Τύπος 1: Όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους (Συνθήκες Dirichlet) για τα οποία το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.

Τύπος 2: Όρια καθορισμένης ροής (Συνθήκες Neumann) για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου είναι δεδομένη. Μια οριακή συνθήκη μηδενικής ροής (αδιαπέρατου φράγματος) δίνεται τοποθετώντας τη σταθερή ροή ίση με το μηδέν.

Τύπος 3: Όρια εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος ροής (Συνθήκες Cauchy ή μικτού ορίου) για τα οποία η ροή κατά μήκος του ορίου υπολογίζεται με δεδομένη μια τιμή του υδραυλικού ύψους στο όριο. Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης καλείται μερικές φορές συνθήκη μικτού ορίου, επειδή συσχετίζει τις οριακές τιμές της στάθμης με τη ροή. Υπάρχουν αρκετοί τύποι ορίων ροής εξαρτημένης από το υδραυλικό ύψος.

Η τοποθέτηση μιας οριακής συνθήκης στο πλέγμα εξαρτάται από το εάν το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. (M. Anderson, W. Woessner)

## **1.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΚΟΡΕΣΤΗΣ ΖΩΝΗΣ**

Ένας τρόπος για να προσομοιωθεί εμπλουτισμός, είναι η χρήση ενός μοντέλου ροής στην ακόρεστη ζώνη, ώστε να καθοριστεί η πορεία του ύδατος που διηθείται προς τον υπόγειο υδροφόρο. Τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης είναι θεωρητικά πιο πολύπλοκα και χρειάζονται περισσότερες παραμέτρους πεδίου από τα μοντέλα κορεσμένης ζώνης. Ακόμα, η διήθηση που εισάγεται στο άνω όριο του μοντέλου ακόρεστης ζώνης θα φτάσει τελικά στον υδροφόρο

ορίζοντα ως εμπλουτισμός, εκτός εάν προσομοιωθεί η εξατμισοδιαπνοή. Συνεπώς, τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης προϋποθέτουν γνώση του ρυθμού εμπλουτισμού, για να καθορίσουν την άνω οριακή συνθήκη. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης δε χρησιμοποιούνται, εκτός εάν υφίστανται λόγοι που να δικαιολογούν την πρόσθετη πολυπλοκότητα που εμπεριέχεται σε αυτό το είδος μοντελοποίησης.

Κάποιοι ερευνητές χρησιμοποίησαν τα μοντέλα ακόρεστης ζώνης για να προσομοιώσουν τον χρονισμό της άφιξης του εμπλουτισμού στον υδροφόρο ορίζοντα. Η έξοδος ενός τέτοιου μοντέλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εμπλουτισμός σε ένα μοντέλο κορεσμένης ζώνης. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα μοντέλα για κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη είναι αποσυνδεδεμένα. Δηλαδή, το πλάτος της ακόρεστης ζώνης δεν μπορεί να μεταβάλλεται ως συνέπεια της μεταβατικής κίνησης του υδροφόρου ορίζοντα.

Εναλλακτικά ένα μοντέλο που περιλαμβάνει και την κορεσμένη και την ακόρεστη ζώνη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απόκρισης του υδροφορέα στον εμπλουτισμό. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου μοντέλου είναι, ότι το πεδίο ροής μεταξύ των δύο ζωνών είναι συνεχές και ο υδροφόρος ορίζοντας υπολογίζεται σαν επιφάνεια μηδενικής πίεσης ύδατος. Το μειονέκτημα χρήσης του συγκεκριμένου, ή και οποιουδήποτε άλλου τύπου μοντέλου που περιέχει την ακόρεστη ζώνη, είναι η εισαγωγή σημαντικού βαθμού επιπλέον πολυπλοκότητας. (M. Anderson, W. Woessner)

#### **1.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ**

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών οι ροές κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα αντιπροσωπεύουν έναν όγκο ύδατος που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Το μοντέλο μπορεί να έχει ένα χωριστό πίνακα, όπου να καταχωρεί τον εμπλουτισμό, ή μπορεί ο εμπλουτισμός να προσομοιώνεται με πηγάδια. Στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις ο εμπλουτισμός είναι πιο εύκολο να γίνει διαχειρίσιμος, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας αναμένεται να βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου. Τότε το ανώτερο στρώμα ορίζεται ως μη περιορισμένο και ένας πίνακας με τους ρυθμούς εμπλουτισμού ή άντλησης καθορίζεται για αυτό. Όταν ο υδροφόρος ορίζοντας περνάει από περισσότερα στρώματα, είναι απαραίτητη η χρήση μιας διαφορετικής προσέγγισης. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η τοποθέτηση ενός κόμβου εμπλουτισμού (φρέαρ εμπλουτισμού) σε κάθε κόμβο του υδροφόρου ορίζοντα. Μπορεί να προκύψουν όμως προβλήματα επειδή τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών δεν επιβεβαιώνουν ότι το ύψος του ύδατος ισούται με το υδραυλικό ύψος λόγω πίεσης συν το υδραυλικό ύψος λόγω θέσης ( $h = z$ ) στον υδροφόρο ορίζοντα. Για παράδειγμα αν ο χρήστης ορίσει τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, το μοντέλο θα συνεχίσει να εφαρμόζει τον εμπλουτισμό στους καθορισμένους κόμβους του υδροφόρου ορίζοντα, ακόμα και αν αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το υδραυλικό ύψος να υπερβεί την κορυφή του στρώματος. Ως προς την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, αναπτύσσονται διάφορα «πακέτα» που μπορούν να ακολουθήσουν τις

μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω. (M. Anderson, W. Woessner)

### **1.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Τα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν στο χρήστη να προσδιορίσει μια κατανεμημένη πηγή ως εμπλουτισμό σε ένα στοιχείο, ενώ σημειακές πηγές και καταβόθρες δίνονται σε κάποιο κόμβο. Όμως, η συναρμολόγηση της εξίσωσης του πίνακα μέσα στον κώδικα, απαιτεί την αναδιανομή των κατανεμημένων πηγών και καταβοθρών σε κόμβους. Ο κώδικας πολλαπλασιάζει τη ροή για κάθε στοιχείο που δίνει ο χρήστης επί την επιφάνεια του στοιχείου και έπειτα ακολουθεί η διανομή του ύδατος αναλογικά σε κάθε κόμβο του στοιχείου.

Κάποιοι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνουν ένα μεταβλητό υδροφόρο ορίζοντα με παραμόρφωση των ανώτερων στοιχείων του πλέγματος, ώστε να εξασφαλιστεί ότι  $h(x,y) = z(x,y)$  στους κόμβους του υδροφόρου ορίζοντα. Βέβαια, ο χρήστης πρέπει να προσέξει κατά τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (έχοντας υπ' όψιν την κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα), ώστε η παραμόρφωση να μην αυξήσει το λόγο των δύο διαστάσεων πέρα από το συνιστώμενο όριο του. (M. Anderson, W. Woessner)

### **1.6 ΔΙΑΡΡΟΗ**

Η διαρροή αναφέρεται σε κίνηση ύδατος διαμέσου ενός στρώματος υλικού του οποίου η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα είναι μικρότερη από αυτήν του υδροφορέα. Η διαρροή μπορεί να εισέρχεται ή να εξέρχεται από τον υδροφορέα, ανάλογα με τη σχετική διαφορά υδραυλικού ύψους μεταξύ του υδροφορέα και της πηγής που βρίσκεται από την άλλη πλευρά του διαρρέοντος στρώματος. Επιπλέον, η κατεύθυνση και ο όγκος της διαρροής μπορεί να αλλάζει κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα δεν μένει σταθερό. Η πηγή της διαρροής μπορεί να είναι ένας ελεύθερος υδροφορέας, μια λίμνη ή ένα ποτάμι.

Η διαρροή είναι ένα είδος ορίου εξαρτημένου από το υδραυλικό ύψος. Σε δισδιάστατες προσομοιώσεις, η διαρροή μέσα από περιοριστικά στρώματα προσομοιώνεται με έναν όρο διαρροής. Η χρήση αυτού του όρου είναι επίσης ένας βολικός τρόπος προσομοίωσης της μερικής διείσδυσης από λίμνες και ποτάμια σε δισδιάστατα εμβαδικά μοντέλα. Σε μια προσομοίωση που χρησιμοποιεί την επιλογή της διαρροής, η πηγή της διαρροής δεν εμφανίζεται σαφώς στο πλέγμα. Ο όγκος ύδατος που διαρρέει προστίθεται ή αφαιρείται από τον κόμβο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πηγή της διαρροής. Εάν το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι μεγαλύτερο από εκείνο της πηγής, αφαιρείται ύδωρ από το μοντέλο. Στην αντίθετη περίπτωση προστίθεται ύδωρ μέσω διαρροής. Σε κάθε περίπτωση πάντως, ο όγκος της διαρροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q_L^* = -K'_z \left( \frac{h_{source} - h}{b'} \right) w \cdot l$$

όπου  $K'_z$  είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος από το οποίο γίνεται η διαρροή και  $b'$  είναι το πάχος του. Ο λόγος  $K'_z/b'$ , ορίζεται ως leakage. Οι παράμετροι  $w$  και  $l$  είναι το πλάτος και το μήκος αντίστοιχα της πηγής,  $h_{source}$  το υδραυλικό της ύψος και  $h$  το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο. Ο χρήστης δίνει τις τιμές στα  $K'_z$ ,  $b'$ ,  $h_{source}$ ,  $w$  και  $l$ .

Ο ογκομετρικός ρυθμός διαρροής ( $Q_L^*$ ) πρέπει να μετατραπεί σε επιφανειακό ρυθμό διαρροής εφαρμοσμένο στην κορυφή του κελιού. Και εδώ παρουσιάζεται το πρόβλημα όταν η πηγή (η λίμνη ή το ποτάμι) είναι στενότερη από τα κελιά ή στοιχεία του μοντέλου. Τότε ο επιφανειακός ρυθμός διαρροής ( $L$ ) θα πρέπει να προσαρμοστεί, ούτως ώστε ο όγκος που πηγάζει από επιφάνεια  $w \cdot l$  να είναι ίσος με τον όγκο που εφαρμόζεται στο κελί ή στοιχείο ( $\Delta_x \Delta_y$ ).

Δηλαδή:

$$Q_L^* = L \Delta_x \Delta_y$$

ή

$$L = Q_L^* / \Delta_x \Delta_y$$

Σε αυτή την περίπτωση, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει στο μοντέλο τον παρακάτω τροποποιημένο λόγο:

$$\left( \frac{K'_z}{b'} \right)_m = \frac{K'_z}{b'} \frac{w \cdot l}{\Delta_x \Delta_y}$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι διαρροές προς υπονόμους, με τη μόνη διαφορά ότι οι υπόνομοι λειτουργούν μόνο σαν καταβόθρες. Δηλαδή δεν υπάρχει διαρροή από αυτούς προς τον υδροφορέα, ακόμα κι αν το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα είναι μικρότερο από αυτό των υπονόμων. Μπορεί να θεωρηθεί γενικότερα, ότι οι υπόνομοι αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία απομάκρυνσης ύδατος των ορυχείων, λατομείων, αγροτικών αποχετευτικών αγωγών και αγωγών γύρω από χωματερές. (M. Anderson, W. Woessner)

## **1.7 Το μοντέλο PTC (Princeton Transport Code)**

### **1.7.1 Οι Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου PTC**

Το PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαραστήσει ροή υπογείων υδάτων με υδραυλικό ύψος  $h$ ,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1.1)$$

στοιχεία ταχύτητας,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.2)$$

και μεταφορά ρύπων που περιγράφεται από τη συγκέντρωση  $c$ ,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ & + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Αυτές οι εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy. Η λύση τους ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: πρώτα υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη  $h$  από την (1.1), κατόπιν οι ταχύτητες του Darcy  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  από την (1.2) και τελικά λύνεται η (1.3) για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου  $c$ . (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)



### 1.7.2 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Η επίλυση των εξισώσεων (1.1)–(1.3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα, συνήθως απαιτεί την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα σε κλίμακα πεδίου, η υπολογιστική προσπάθεια που σχετίζεται με την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι πολύ μεγάλη. Το μοντέλο PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για να επιλύει τις πλήρεις τρισδιάστατες εξισώσεις και ο οποίος μειώνει το υπολογιστικό φορτίο σημαντικά.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει το διαχωρισμό της περιοχής σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα. Μέσα σε αυτά γίνεται μια διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, με σκοπό να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με μια διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών. Αυτό το υβρίδιο, που συνδυάζει μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης συγκεκριμένου χρόνου, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα, ενώ στο δεύτερο βήμα επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

### 1.7.3 Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων

#### 1.7.3.1 Βασική Εξίσωση

Το PTC προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος βρίσκοντας το υδραυλικό ύψος από την μερική διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.1)$$

όπου,

$h$  το υδραυλικό ύψος  $[L]$ ,

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

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

$K_{zz}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην  $z$  (κάθετη) διεύθυνση  $[LT^{-1}]$ ,

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

$Q_i$  ένας όρος πηγής/καταβόθρας στη θέση  $i$  [ $L^3T^{-1}$ ] (π.χ. αντλία – θετικές τιμές υποδηλώνουν εμπλουτισμό),

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

$r$  ο αριθμός των σημείων που έχουν πηγή ή καταβόθρα.

Χάριν ευκολίας, ο τελευταίος όρος της (2.1) γράφεται συντετμημένα ως  $Q$ . Η εξίσωση του συστήματος (2.1) λύνεται αριθμητικά από το PTC με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι μέθοδοι και εφαρμόζονται στην (2.1). (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

### 1.7.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Το διαχωριστικό πλάνο ενεργειών που χρησιμοποιεί το PTC για την επίλυση της (2.1) περιλαμβάνει προσέγγιση των όρων της, που περιέχουν παραγώγους του  $x$  και του  $y$  με χρήση μιας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία έχουν ευρεία χρήση σε οριζόντια επίπεδα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει ένα άπειρο άθροισμα συναρτήσεων, το οποίο θα αντιπροσωπεύει ακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη ροή του υπόγειου ύδατος. Μια πεπερασμένη προσέγγιση αυτής της σειράς είναι:

$$h(x, y, z, t) \approx \tilde{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (2.2)$$

όπου,

$h$  το υδραυλικό ύψος [ $L$ ],

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

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

$w_i$  μια βασική συνάρτηση (αδιάστατη) και

$N$  ο αριθμός των κόμβων του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.

Η προσεγγιστική σειρά (2.2) δίνει μια ακριβή έκφραση όσο το  $N$  τείνει στο άπειρο (το  $\tilde{h}$  τείνει στο  $h$ ). Με μια προσεκτική επιλογή των συναρτήσεων  $w_i$ , οι μη καθορισμένοι συντελεστές  $h_i$  γίνονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους στους κόμβους με συντεταγμένες

$(x, y, z)$ . Σημαντική στην υπολογιστική αποτελεσματικότητα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, είναι η χρήση συνεχών βασικών συναρτήσεων με ξεχωριστά βήματα, οι οποίες είναι μη μηδενικές μόνο πάνω από ένα μικρό κομμάτι ολόκληρης της περιοχής μελέτης. Αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι βασικών συναρτήσεων, το PTC χρησιμοποιεί γραμμικές βασικές συναρτήσεις με ξεχωριστά βήματα ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συνεχίζει με την επισήμανση ότι, αν και ο διαφορικός τελεστής  $L$  (π.χ. εξίσωση 2.1) που λειτουργεί στο  $h$  ισούται με μηδέν, όταν το  $L$  λειτουργεί στην προσεγγιστική συνάρτηση εισάγεται ένα σφάλμα. Έτσι, με μαθηματικούς τύπους η (2.1) γράφεται ως:

$$L(h) = 0 \quad (2.3)$$

ενώ

$$L(\tilde{h}) = R \quad (2.4)$$

όπου  $R$  το υπολειμματικό σφάλμα.

Για την επίλυση της (2.2) με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων επιχειρείται η ελαχιστοποίηση του υπολειμματικού  $R$ .

Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με τη θεώρηση μιας ολόκληρης ομάδας συναρτήσεων  $w_j$ . Αν τώρα εξαναγκαστεί το υπολειμματικό  $R$  να γίνει ορθογώνιο για κάθε πιθανή τιμή του  $w_j$  ουσιαστικά εξαναγκάζεται να μηδενιστεί και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια λύση της (2.2). Διαφορετικά αυτό μπορεί να εκφραστεί ως:

$$L(\tilde{h}) = L(h) \quad \text{όταν } R = 0 \quad (2.5)$$

Το PTC χρησιμοποιεί την ίδια ομάδα συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βάρους  $w_j$  όπως και για τις βασικές συναρτήσεις  $w_i$ . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος Galerkin. Επομένως, τα  $w_i$  και  $w_j$  χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

### 1.7.3.3 Εφαρμογή της Μεθόδου Πεπερασμένων Διαφορών

Μετά από μαθηματική διαδικασία, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f \quad (2.6)$$

όπου τα κεφαλαία γράμματα αναπαριστούν τετραγωνικούς πίνακες (τα  $A$  και  $B$  έχουν διαστάσεις  $N \times N$ ) και τα πεζά γράμματα αναπαριστούν διανύσματα (τα  $h, \partial h / \partial t, v$  και  $f$  είναι διανύσματα μήκους  $N$ ). Τα στοιχεία των  $A, B, v$  και  $f$  δίνονται από τύπους ενώ το  $f$  περιλαμβάνει, όπως προαναφέρθηκε, τις γνωστές οριακές συνθήκες.

(D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.3.1 Η Κάθετη Παράγωγος

Το κεντρικό στοιχείο αυτού του κώδικα είναι η χρήση ενός κεντρικού σχεδίου διαχωρισμού των χωρικών παραγώγων στην κατεύθυνση  $z$ . Ο κάθετος διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την απαίτηση, ότι τα οριζόντια πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να επαναλαμβάνονται σε στρώματα με κόμβους διαστρωμένους ο ένας πάνω στον άλλο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5. Αυτό σημαίνει, ότι στην κάθετη διεύθυνση, μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει το  $v$ .

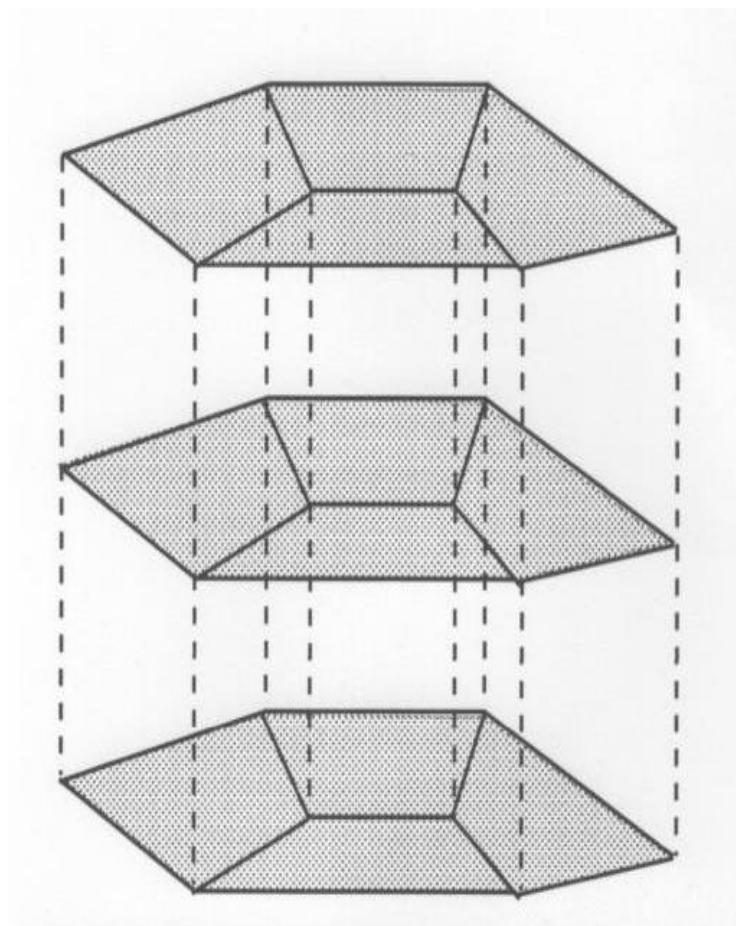
(D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.3.2 Η Παράγωγος του Χρόνου

Η εμπειρία δείχνει ότι η μέθοδος προσέγγισης πεπερασμένων διαφορών με προς τα πίσω διαφορά της χρονικής παραγώγου, εξασφαλίζει για δεδομένο προϋπολογισμό, την ακριβέστερη λύση για το πρόβλημα της υπόγειας ροής.

Στην αναπαράσταση της μεθόδου χρησιμοποιείται ένα σύστημα διόρθωσης πρώτης τάξης για να προσεγγισθεί η παράγωγος του χρόνου και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται για το νέο επίπεδο χρόνου.

Εφαρμόζοντας αυτό το σύστημα για κάθε επίπεδο, παράγεται ένας πλήρης διαχωρισμός της (2.1), και λαμβάνεται ένα σύστημα  $M \times N$  εξισώσεων με  $N$  αγνώστους στην (2.2) για κάθε ένα από τα  $M$  επίπεδα. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)



Σχήμα 1.5: Σχέδιο των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στρώσεις το ένα πάνω στο άλλο, παράγοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.4 Οριακές Συνθήκες

Το PTC δέχεται τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της ροής. Οι τρεις αυτοί τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και τρίτου τύπου (διαρροή).

Οι οριακές συνθήκες μπορεί να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενικής ροής. Αυτό υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα κάτω και γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.4.1 Καθορισμένο Υδραυλικό Ύψος

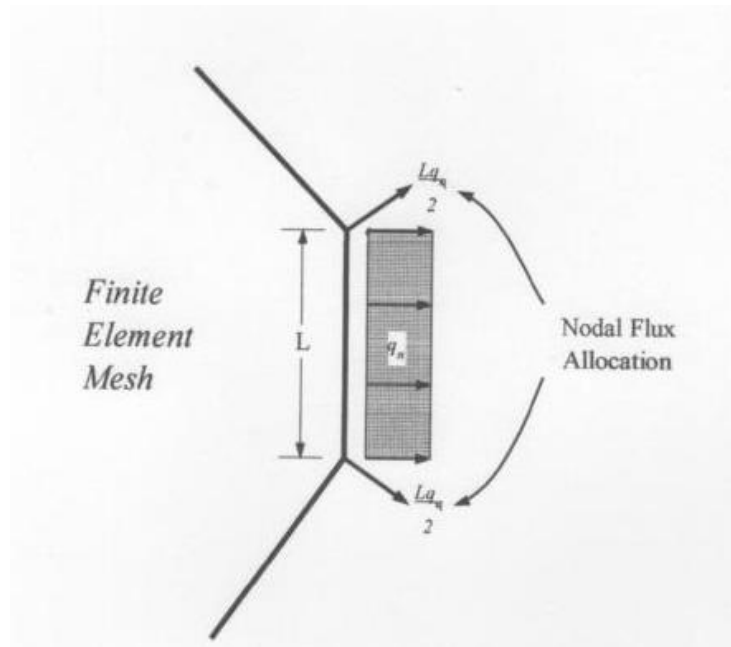
Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθένα από αυτούς. Το πρόγραμμα αυτόματα ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Αφού οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος ουσιαστικά απαλείφονται από την εξίσωση του πίνακα, τότε μένουν  $(N \times M - N_c)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_c)$  αγνώστους, όπου  $N_c$  ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή μελέτης. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.4.2 Καθορισμένη Ροή

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας οριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ , η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές (όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.6). Έτσι, ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Επίσης, η ροή λόγω άντλησης εισάγεται μαθηματικά με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε ένα κόμβο. Για διευκόλυνση της εισαγωγής ομοιόμορφης διήθησης, το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.4.3 Τρίτου Τύπου

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Έτσι εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Με τον κατάλληλο ορισμό της παραμέτρου που δηλώνεται από τον χρήστη,  $k_L$ , μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)



Σχήμα 1.6: Κατανομή στους κόμβους της παροχής  $q$  κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ . Για γραμμικά στοιχεία κάθε κόμβος έχει τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.3.5 Συνθήκες Υδροφόρου Ορίζοντα

Η επιβολή του υδροφόρου ορίζοντα ή οριακών συνθηκών ελεύθερου υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή των δύο οριακών συνθηκών, που εφαρμόζονται στο επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα.

Μια σχηματική αναπαράσταση της κατάστασης που περιέχει έναν κινούμενο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος υπόκειται σε διήθηση μέτρου  $R(x, y, t)$ , φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Η σταθερή ανύψωση του άνω ορίου της περιοχής ροής δίνεται από τη σχέση  $z = z_{M+1}(x, y, t)$  και η πραγματική ανύψωση δηλώνεται από τη σχέση  $z = z_{WT}(x, y, t)$ .

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα ( $h_M$ ) ορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα ( $z_{WT} - z_M$ ). Σύμφωνα με αυτό σε κάθε κόμβο απαιτείται:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (2.7)$$

Θεωρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα ( $k = M$ ). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει αν οι τιμές του  $h_M$  στους κόμβους είναι μέσα στα περιθώρια ανύψωσης που δίνει η εξίσωση:

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (2.8)$$

Το PTC δίνει ένα μήνυμα εάν παραβιάζεται η παραπάνω συνθήκη. Τυπώνει τη θέση του κόμβου, το μέγιστο πάχος κ.α. σχετικά με αυτή την παραβίαση, και σταματά την εκτέλεση του προγράμματος. Εξάλλου η (2.8) πρέπει να ικανοποιείται και από τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού ύψους. Αφού το  $z_{WT}$  ορίζει το πάχος του ανώτερου στρώματος, το οποίο βρίσκεται μέσα στους πίνακες των συντελεστών, η (2.7) εισάγει μη γραμμικότητα στη λύση του συστήματος των εξισώσεων ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα εξομαλύνεται με την επανάληψη του δεύτερου βήματος του χωριστικού αλγορίθμου. Οι επαναλήψεις γίνονται σε ένα συγκεκριμένο βήμα χρόνου. Όταν το  $h$  μεταβάλλεται λιγότερο από το EPSILN, μια δεδομένη τιμή αντοχής, οι επαναλήψεις σταματούν και οι υπολογισμοί προχωρούν στο επόμενο βήμα.

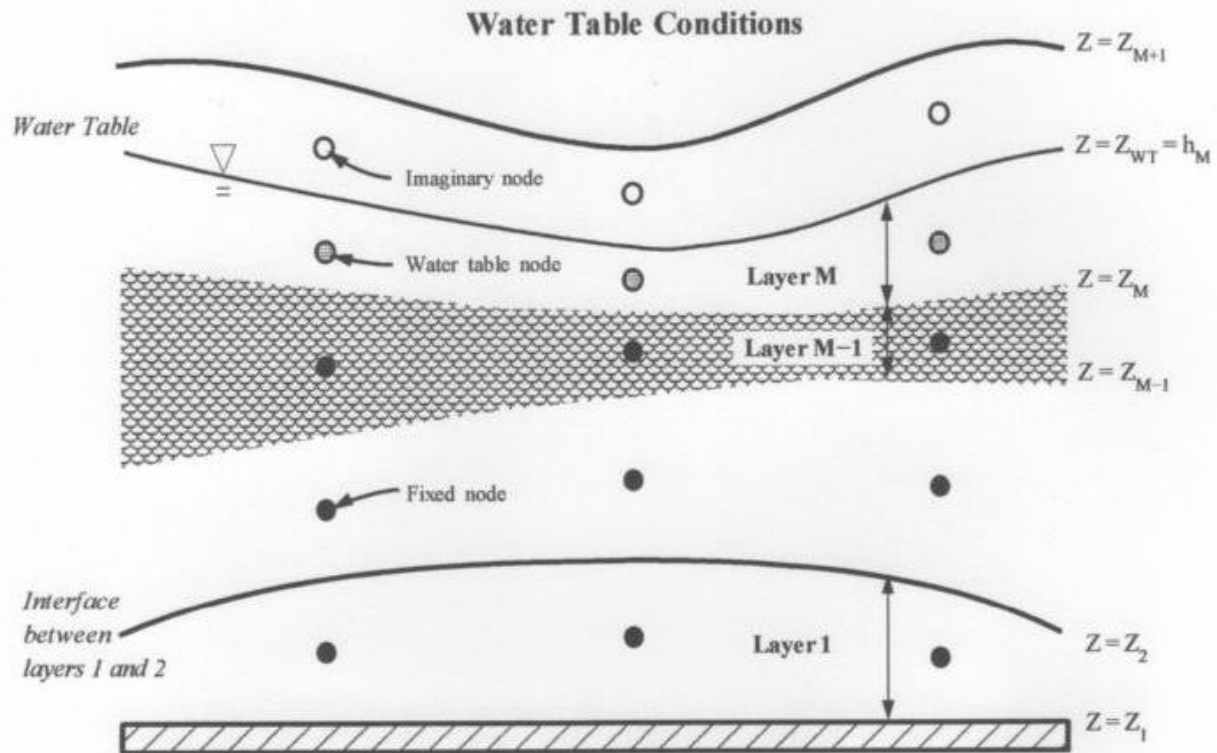
Η δεύτερη οριακή συνθήκη υδροφόρου ορίζοντα περιγράφει τη μη μόνιμη απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στον εμπλουτισμό. Αν θεωρηθεί ότι το  $S_y$  είναι η ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, τότε οι σχετικές με την κατάσταση εξισώσεις δίνονται από την:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (2.9)$$

Χρησιμοποιώντας τους φανταστικούς κόμβους του στρώματος πάνω από το ανώτερο στρώμα ( $M + 1$ ), η παραπάνω εξίσωση γράφεται με μορφή πεπερασμένων διαφορών, όπου για κάθε κόμβο  $i$  του ανώτερου στρώματος ( $k = M$ ),  $S_{yi}$  είναι το πορώδες του υδροφορέα,  $R_i$  είναι η καθαρή κάθετη διήθηση,  $\Delta z_i$  είναι το πάχος του στρώματος και  $(K_z)_i$  είναι η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα.

Η εξίσωση που προκύπτει χρησιμοποιείται ως οριακή συνθήκη για τις τελικές εξισώσεις του μοντέλου, όταν αυτό επιλύει το ανώτερο στρώμα  $k = M$ . Οι όροι που περιέχουν παραγώγους του χρόνου εισάγονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές (άγνωστοι) στις τελικές εξισώσεις του συστήματος μόνο για το ανώτερο στρώμα. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)





Σχήμα 1.7: Συνθήκες υδροφόρου ορίζοντα και βροχόπτωσης στο ανώτερο στρώμα. Οι επιφάνειες σημασμένες με  $z = z_1, z = z_2$ , κλπ., είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και ορίζουν τα στρώματα. Σημείωση: ο κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας  $z = z_{WT}$  πρέπει να ικανοποιεί την  $z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$ . (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.4 Τρισδιάστατη Μεταφορά Ρύπου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε περιγραφή σε κάποιο βαθμό της διαδικασίας υπολογισμού των μεταβατικών υδραυλικών υψών  $h(x, y, z, t)$  με την επίλυση της εξίσωσης ροής (1.1). Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται σύντομα οι ανάλογες διαδικασίες για την εξίσωση μεταφοράς ρύπων (1.3). (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

##### 1.7.4.1 Εξισώσεις του Συστήματος

Οι ταχύτητες του Darcy  $V_x, V_y$  και  $V_z$  υπολογίζονται ως ποσότητες στρογγυλευμένες στο μέσο όρο των στοιχείων. Η εξίσωση μεταφοράς (1.3) είναι:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left( V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\
& + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.1)
\end{aligned}$$

Οι όροι διασποράς στην (3.1) δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\
D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2)/V + D_M \\
D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2)/V + D_M \quad (3.2) \\
D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\
D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \\
D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V
\end{aligned}$$

και οι υπόλοιποι όροι είναι

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

$a_L$  ο συντελεστής κατά μήκους διασποράς  $[L]$ ,

$a_T$  ο συντελεστής εγκάρσιας οριζόντιας διασποράς  $[L]$ ,

$a_V$  ο συντελεστής εγκάρσιας κάθετης διασποράς  $[L]$ ,

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

$c$  η συγκέντρωση στο σημείο  $(x, y, z)$  σε χρόνο  $t[M/L^3]$ ,

$\theta$  το πορώδες του υδροφορέα [αδιάστατο],

$E(c)$  η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης,

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

$Q_i$  ο ογκομετρικός ρυθμός άντλησης / εμπλουτισμού [ $L^3/T$ ] στο σημείο  $(x_i, y_i, z_i)$ ,

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

$\delta()$  είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ( $Q_i \leq 0$ ), θεωρείται ότι η συγκέντρωση του νερού που αντλείται  $c^w$  ισούται με τη συγκέντρωση του νερού στο περιβάλλον γύρω από το σημείο αυτό  $c$ . Έτσι, σε όλες τις αντλίες ο όρος  $Q(c^w - c) \equiv 0$  στην (3.1). Το πρόγραμμα λοιπόν συγκρατεί τους όρους με το  $Q$  στην (3.1), μόνο όταν η αντλία εμπλουτίζει τον υδροφορέα ( $Q_i > 0$ ) με συγκέντρωση του νερού που εισέρχεται στον υδροφορέα  $c^w$ . (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

#### 1.7.4.2 Οριακές Συνθήκες

Το PTC δέχεται δύο τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση μεταφοράς, την καθορισμένη συγκέντρωση σε κάποιο κόμβο και την καθορισμένη ροή συµμεταφοράς. Οι οριακές συνθήκες είναι μηδενική ροή από διασπορά στα κάθετα όρια και μηδενική ολική ροή ρύπου στα άνω και κάτω όρια.

Οι καθορισμένες συγκεντρώσεις κόμβων δίνονται απευθείας από το χρήστη, ενώ οι καθορισμένες ροές συµμεταφοράς δίνονται μέσω δήλωσης μιας συγκέντρωσης συσχετισμένης με τις ογκομετρικές ροές υγρών στα δεδομένα του προγράμματος. Ομοίως, έµμεσα η καθορισμένη ροή συµμεταφοράς εισάγεται μέσω της συγκέντρωσης που σχετίζεται με το διαρρέον υγρό στην οριακή συνθήκη ροής τρίτου τύπου. (D. Badu, G. Pinder, A. Niemi, D. Ahlfeld, S. Stothoff)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ**

### **2.1 Γενικά**

Η λεκάνη των Μοιρών καλύπτει μία έκταση  $50.3 \text{ km}^2$ , μήκους περίπου  $14 \text{ km}$  και πλάτους περίπου  $3 \text{ km}$ . Πρόκειται για πεδινή έκταση, με υψόμετρο μικρότερο των  $300 \text{ m}$ , μεταξύ των ορεινών όγκων του Ψηλορείτη στα βόρεια και των Αστερουσίων στα νότια. Βρίσκεται στο κεντρικό και νοτιότερο τμήμα της Κρήτης, περίπου  $50 \text{ km}$  νότια της πόλης του Ηρακλείου.

Πρόκειται για αγροτική περιοχή με περιορισμένο σχετικά πληθυσμό. Οι ανάγκες της σε ύδρευση και άρδευση καλύπτονται από τον υπόγειο υδροφορέα, μέσω της άντλησης ύδατος από πηγάδια. Στην περιοχή, ήδη από το 1984, έχει κατασκευασθεί ένα εκτεταμένο σύστημα πηγαδιών άντλησης για την άρδευση των καλλιεργειών, επιφέροντας μεγάλη αγροτική ανάπτυξη.

Όμως, μια συνέπεια της μεγάλης αγροτικής ανάπτυξης που σημειώνεται είναι η ανησυχητική πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα. Τα αίτια εντοπίζονται στην αλόγιστη εκμετάλλευση του υδροφορέα τα τελευταία 30 χρόνια, που οδήγησε στην δραματική μείωση της στάθμης του (πάνω από  $35 \text{ m}$ ).

Η αλόγιστη εκμετάλλευση του υδροφορέα έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των αποθεμάτων αλλά και την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, επηρεάζοντας έτσι τη βιωσιμότητα των πηγών, του περιβάλλοντος και της βιοποικιλότητας.

Ακόμα, η ύπαρξη αγνώστου αριθμού μη καταγεγραμμένων και παράνομων πηγαδιών, η ενδεχόμενη μελλοντική αλλαγή του κλίματος στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, η αύξηση του πληθυσμού και συνεπώς των αναγκών σε νερό, καθώς και η διατήρηση της εκτεταμένης γεωργικής δραστηριότητας, εγκυμονούν τον κίνδυνο της ερημοποίησης της περιοχής. Συνεπάγεται ότι πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα για τον περιορισμό των αρνητικών ανθρώπινων δραστηριοτήτων, αλλά και για την αποκατάσταση του οικοσυστήματος της λεκάνης. (Ε. Βαρουχάκης- Ι. Τσάνης, Α. Κουτρούλης, Ι. Δαλιακόπουλος)

### **2.2 Μετεωρολογικά και κλιματικά στοιχεία**

#### **2.2.1 Γενικά για το κλίμα της Κρήτης**

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται ως εύκρατο μεσογειακό, με εξαίρεση τους ορεινούς όγκους της όπου τείνει προς το ηπειρωτικό. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ  $14^{\circ}$ - $15^{\circ}\text{C}$ . Ο χειμώνας είναι ήπιος με ψυχρότερους μήνες τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο. Η πεδινή Κρήτη, και ιδιαίτερα οι νοτιοανατολικές περιοχές, είναι από τις θερμότερες της Ελλάδας. Η ηλιοφάνεια διαρκεί όλους τους μήνες του έτους, ενώ οι θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, αν και, λόγω της θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων, το καλοκαίρι είναι σχετικά δροσερό. Η εμφάνιση νεφώσεων είναι μικρή και μειώνεται από τα

ανατολικά προς τα δυτικά. Οι βροχές αυξάνονται από τα ανατολικά στα δυτικά και από τα παράλια προς την ηπειρωτική χώρα. (Ι. Τσάνης, Α. Κουτρούλης, Ι. Δαλιακόπουλος)

### 2.2.2. Κατακρημνίσεις

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 947 *mm* για το 2008 και 803 *mm* για το 2009. Υπολογίζεται ότι, από τις παραπάνω ποσότητες, το 82% απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής και μόλις το 18% κατεισδύει στον υδροφορέα, καθώς οι επιφανειακές απορροές θεωρούνται αμελητέες. Επίσης έχει υπολογιστεί, ότι από τις ποσότητες αυτές, το 90% συναντάται κατά τη χειμερινή περίοδο (240 μέρες) και μόλις το 10% κατά τη θερινή (120 μέρες). Η εμφάνιση των βροχοπτώσεων παρουσιάζει μέγιστο του μήνες Δεκέμβριο (135 *mm*) και Ιανουάριο (130 *mm*) και ελάχιστο τους μήνες Ιούνιο έως Αύγουστο (αμελητέα). Οι χιονοπτώσεις στην περιοχή είναι σπάνιο φαινόμενο. (Ε. Βαρουχάκης)

### 2.2.3. Άνεμοι

Στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, οι άνεμοι πνέουν κυρίως δυτικοί-βορειοδυτικοί. Τους καλοκαιρινούς μήνες, οι βόρειοι άνεμοι προκαλούν πολύ ξηρές συνθήκες, οι οποίες γίνονται ακόμα πιο αισθητές λόγω της απουσίας χαμηλού βαρομετρικού στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Μόνη διακοπή αποτελούν μερικές τοπικές τροπικές καταιγίδες. Στις πεδιάδες, τα κύματα καύσωνα, έχουν συχνά μεγάλη διάρκεια, ενώ σε αυτό βοηθάνε και οι νότιοι άνεμοι που έρχονται από την Αφρική. (Ι. Τσάνης, Α. Κουτρούλης, Ι. Δαλιακόπουλος)

## 2.3 Γεωλογία

### 2.3.1 Γενικά για τη γεωλογία της Κρήτης

Η γεωλογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται από μια αλληλουχία φάσεων διαφορετικής ηλικίας και σχηματισμών που συμμετέχουν στη δομή της νήσου.

Η Κρήτη αποτελείται από ένα αυτόχθονο έως παραυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων που περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστολίθων και τους υποκείμενους ασβεστολίθους, δολομίτες, με παρεμβολές σχιστολίθων (Ιόνιος Ζώνη) ένα αλλόχθονο σύστημα, με επιμέρους καλύμματα, επωθημένο πάνω στο αυτόχθονο και από τα νεότερα ιζήματα του Νεογενούς και του Τεταρτογενούς.

Το αλλόχθονο σύστημα αποτελείται από αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα, επωθημένα το ένα πάνω στο άλλο, με την ακόλουθη σειρά (από το κατώτερο προς το ανώτερο) :

- Ανθρακικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου. Περιλαμβάνει ανακρυσταλλωμένους ασβεστολίθους έως μάρμαρα, δολομίτες, δολομιτικούς ασβεστολίθους, ραουβάκες και ανθρακικά κροκαλολατυποπαγή
- Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών. Περιλαμβάνει φυλλίτες, μεταψαμμίτες, χαλαζίτες και σχιστολίθους, κροκαλοπαγή, ποικίλης σύστασης
- Ζώνη Τρίπολης. Περιλαμβάνει τους σχηματισμούς του φλύσχη, μεσο-παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους και δολομίτες.
- Ζώνη Πίνδου. Περιλαμβάνει τους σχηματισμούς του φλύσχη, λεπτοστρωματώδεις ασβεστολίθους και στρώματα κερατολίθων.
- Οφιολιθικό κάλυμμα. Αποτελεί ένα σύνθετο πολύμεικτο τεκτονικό κάλυμμα με ποικιλία λιθολογικών σχηματισμών (οφιόλιθοι, γνεύσιοι, αμφιβολίτες, φλυσχοειδή ιζήματα, γρανίτες κ.α.)

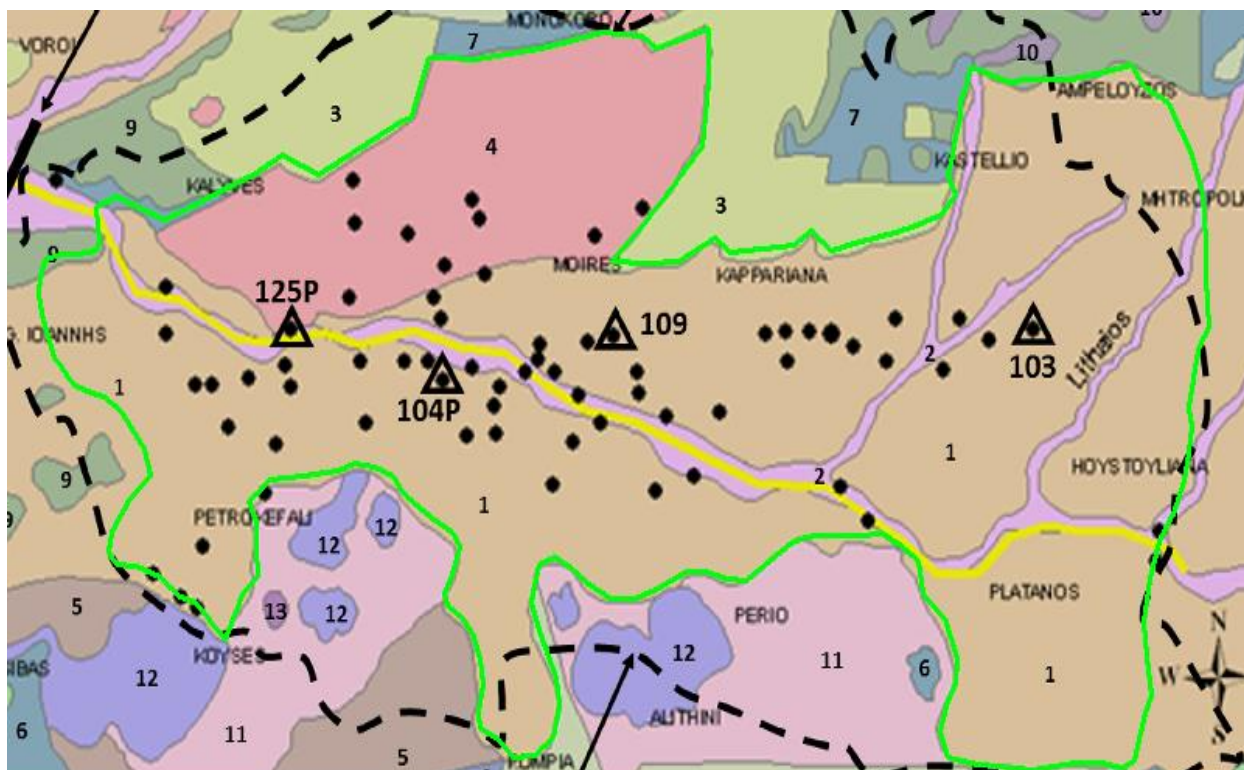
Τα νεογενή και πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις. Αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, ποτάμιας, υφάλμυρης και θαλάσσιας φάσης.

Τα τεταρτογενή ιζήματα είναι τοποθετημένα πάνω σε όλους τους σχηματισμούς, τόσο του αλπικού υποβάθρου, όσο και των νεογενών αποθέσεων, και αποτελούνται από χερσαίες, θαλάσσιες έως λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, άμμων, κροκαλών, αργίλων και χαλίκων ασύνδετων έως ελαφρά συγκολλημένων. (Β. Περγέρης, Δ. Παπαμαστοράκης, Μ. Κριτωτάκης, Ε. Δρακοπούλου, Α. Παναγόπουλος)

### 2.3.2 Υδρογεωλογία της περιοχής

Στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης των Μοιρών επικρατούν Τεταρτογενή ιζήματα (κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, άμμοι, άργιλοι). Μόνο στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης επικρατούν πλειοκαινικές αποθέσεις (κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, άμμοι, άργιλοι με παρεμβολές λιμναίων μαργαϊκών ασβεστολίθων) (βλέπε Εικόνα 2.1). Συνεπώς το επιφανειακό στρώμα αποτελείται από άμμο, χαλίκια και άργιλο, ευνοώντας έτσι την κατείσδυση των βρόχινων υδάτων.

Επιφανειακές απορροές, από το βόρειο και νότιο τμήμα, καταλήγουν στο εσωτερικό της λεκάνης, απ' όπου ένα σημαντικό ποσοστό κατεisdύει και τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφορέα. Ο υδροφορέας επίσης τροφοδεύεται, κατά την χειμερινή περίοδο, από το Γεροποτάμο που διασχίζει τη λεκάνη, αλλά και από το μικρότερο ποτάμι Λίθαιος που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης. Ως κύρια πηγή τροφοδοσίας θεωρούνται οι πλευρικές υπόγειες εισροές από τη λεκάνη Βαγιονιά, που βρίσκεται ανατολικά της λεκάνης των Μοιρών.



Εικόνα 2.1: Γεωλογική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης όπου με ανοιχτό καφέ χρώμα αναπαρίστανται τα Τεταρτογενή ιζήματα και με έντονο ροζ οι πλειοκαινικές αποθέσεις. (Ε. Βαρουχάκης)

Ο αλλουβιακός υδροφορέας της λεκάνης των Μοιρών είναι ο σημαντικότερος της υδρολογικής λεκάνης της Μεσσαράς. Χαρακτηρίζεται ως ελεύθερος υδροφορέας, αν και λόγω της ετερογένειας των πετρωμάτων μπορεί να είναι τοπικά περιορισμένος, εν τούτοις θεωρείται ελεύθερος στο σύνολο του. Το πάχος του μειώνεται από το κεντρική περιοχή της λεκάνης προς το βόρειο και νότιο τμήμα, ενώ το μεγαλύτερο σε πάχος τμήμα βρίσκεται ανατολικά στην περιοχή, όπου το ποτάμι Λίθαιος τέμνει τον Γεροπόταμο. (Ε. Βαρουχάκης)

### 2.3.3 Σεισμικότητα της περιοχής

Η Κρήτη, λόγω της γεωγραφικής της θέσης, κατατάσσεται από απόψεως σεισμικής επικινδυνότητας στην κατηγορία III, σε σύνολο τεσσάρων για όλη την χώρα. (Ι. Τριχάκης)

## **2.4 Φυσικό Περιβάλλον**

### **2.4.1.Χλωρίδα**

Η χλωρίδα της Κρήτης είναι ενδιαφέρουσα, πλούσια και σημαντική. Αποτελείται από 1.706 φυτά (αυτοφυή) εκ των οποίων 178 θεωρούνται αποκλειστικά ενδημικά της περιοχής και επιπλέον, 38 από αυτά ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή Κρήτης-Καρπάθου, δηλαδή δε βρίσκονται πουθενά αλλού στον πλανήτη. Αν και η Κρητική χλωρίδα θεωρείται μία από τις πιο μελετημένες της περιοχής της Μεσογείου, είναι σίγουρο ότι επιφυλάσσει εκπλήξεις στους νέους ερευνητές. Το ανάγλυφο της περιοχής, δύσβατες ορεινές περιοχές και φαράγγια που ακόμα δεν έχουν ερευνηθεί ανατρέπουν τα δεδομένα για τον αριθμό και την κατανομή των φυτικών ειδών στο νησί. Ο πλούτος της χλωρίδας της Κρήτης γίνεται περισσότερο αντιληπτός αν ληφθεί υπόψη ότι σε μία έκταση  $8.306\text{km}^2$ , που αντιπροσωπεύει περίπου το 6% της συνολικής έκτασης του ελληνικού χώρου, απαντάται το 28% περίπου του συνόλου των γνωστών φυτών της ελληνικής χλωρίδας. Ο πλούτος αυτός αποδίδεται στη γεωγραφική θέση, στη γεωλογική ιστορία και στη ποικιλία των βιοτόπων (οικοτόπων) του νησιού. Κάποια από τα ενδημικά φυτά της Κρήτης είναι το δίκταμο, ο έβενος και η αμπελιτσιά. (Α. Πουντουράκης)

### **2.4.2.Βλάστηση**

Το έδαφος της περιοχής είναι πεδινό και αποτελεί τμήμα της ευρύτερης πεδιάδας της Μεσσαράς, η οποία είναι η μεγαλύτερη και πιο παραγωγική πεδιάδα του νησιού. Η κατανομή των καλλιεργούμενων φυτών έχει ως εξής: 75% ελαιόδεντρα, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή και 13% λαχανικά (κυρίως ελεύθερης καλλιέργειας, αλλά και μερικά θερμοκήπια). Τα ελαιόδεντρα καταλαμβάνουν την πλειοψηφία των εκμεταλλεύσιμων πεδινών εκτάσεων, ενώ τα λιγότερο διαδεδομένα αμπέλια, βρίσκονται κυρίως στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης των Μοιρών, αλλά και στο βορειοανατολικό της ευρύτερης πεδιάδας της Μεσσαράς. (Ε. Βαρουχάκης)

### **2.4.3.Πανίδα**

Στην περιοχή γύρω από τη λεκάνη των Μοιρών, και συγκεκριμένα στους ορεινούς όγκους του Ψηλορείτη και των Αστερουσίων, οι πολλοί και διαφορετικοί οικοτόποι που συναντώνται δημιουργούν ιδανικές συνθήκες (απομονωμένα φαράγγια με ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες, απότομες ορεινές πλαγιές με μηδαμινή την ανθρώπινη επίδραση) για την εμφάνιση ενδημικών ειδών, όπως ο ακανθοπόντικος, ο κρητικός ασβός, το κρητικό κουνάβι, η κρητική νυφίτσα ή καλογιαννού και το κρητικό αγριοκούνελο. (Α. Πουντουράκης)



### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΡΤC ΣΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑ**

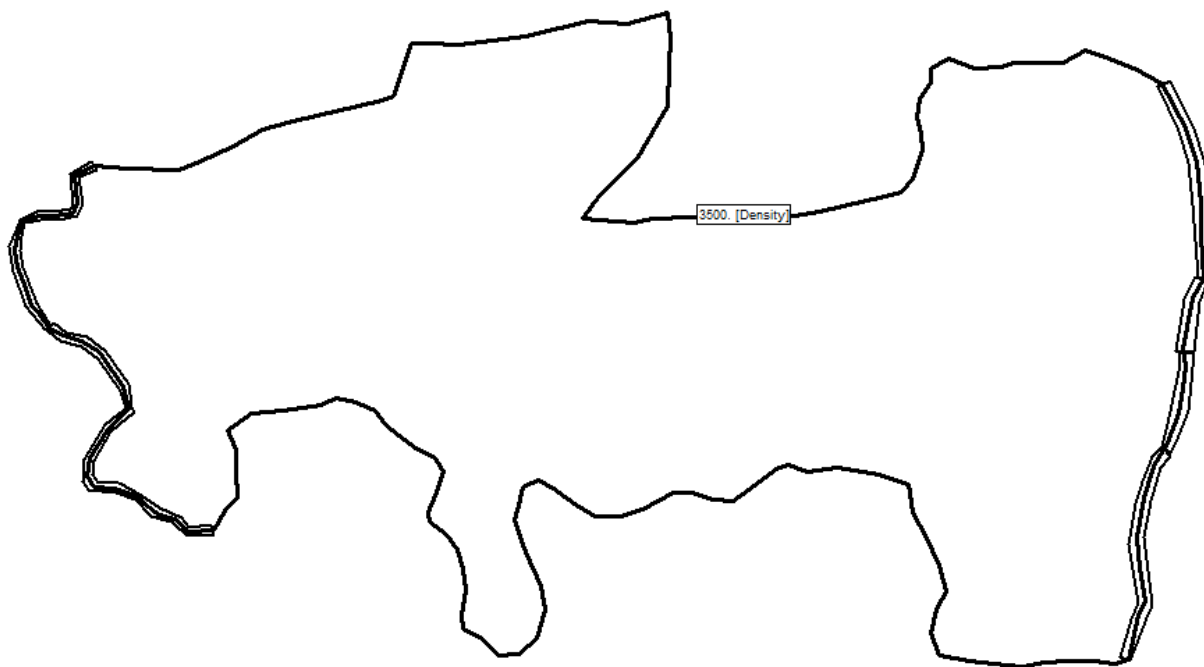
Το μοντέλο ΡΤC απαιτεί κάποια αρχικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης προκειμένου να γίνει η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα. Τα στοιχεία αυτά αφορούν στις υδραυλικές αγωγιμότητες, στα υψόμετρα της περιοχής, στις αρχικές και οριακές συνθήκες, στη βροχόπτωση, στις θέσεις των πηγαδιών άντλησης και στους ρυθμούς άντλησης, στη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης κ.α

Το μοντέλο υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη του υπόγειου υδροφορέα σε όλα τα σημεία της περιοχής, καθώς και την ταχύτητα του νερού στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να εισάγει και την παράμετρο της ρύπανσης του υδροφορέα, προσομοιώνοντας τη διάδοση του ρύπου μετά από ορισμένο χρόνο, λόγω της μεταφοράς του από το νερό.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν, ώστε να γίνει η προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή μελέτης με τη χρήση του μοντέλου ΡΤC, την χρονική περίοδο 2008-2009, είναι τα εξής:

1. Αρχικά δημιουργείται ένα νέο αρχείο ΡΤC στο οποίο καθορίζεται τριγωνικός τύπος κανάβου και ο αριθμός των επιπέδων εργασίας (layers). Ανάμεσα στους δύο τύπους κανάβου (τριγωνικό και ορθογωνικό) προτιμάται ο πρώτος, γιατί καλύπτει με μεγαλύτερη ακρίβεια την εκάστοτε περιοχή, ειδικά σε περιπτώσεις με έντονη μορφολογία.
2. Καθορίζονται οι παράμετροι μελέτης (π.χ. ροή, ταχύτητα κ.λπ.), καθώς και ειδικές χρονικές παράμετροι. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για 2 έτη, καθένα από τα οποία διαιρείται σε δύο περιόδους (χειμερινή- θερινή). Η χειμερινή περίοδος θεωρείται ότι έχει διάρκεια 240 ημερών, ενώ η θερινή 120. Ορίζονται 120 χρονικά βήματα για την κάθε περίοδο.
3. Εισάγεται ο γεωαναφερμένος από το πρόγραμμα GIS, γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης καθώς και ο χάρτης με τις ισουψείς καμπύλες, με τρόπον ώστε να αλληλοεπικαλύπτονται. Επειδή το μοντέλο λειτουργεί με επίπεδα (layers), πρέπει να δοθεί προσοχή στην ταύτιση των αντίστοιχων σημείων βάσει συντεταγμένων.
4. Η περιοχή μελέτης ψηφιοποιείται με βάση τον γεωλογικό χάρτη, ώστε τελικά να προκύψει μια κλειστή γραμμή που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει τον «όγκο ελέγχου» του μοντέλου (domain outline), και ταυτόχρονα καθορίζεται η πυκνότητα του κανάβου (που τίθεται ίση με 3500).





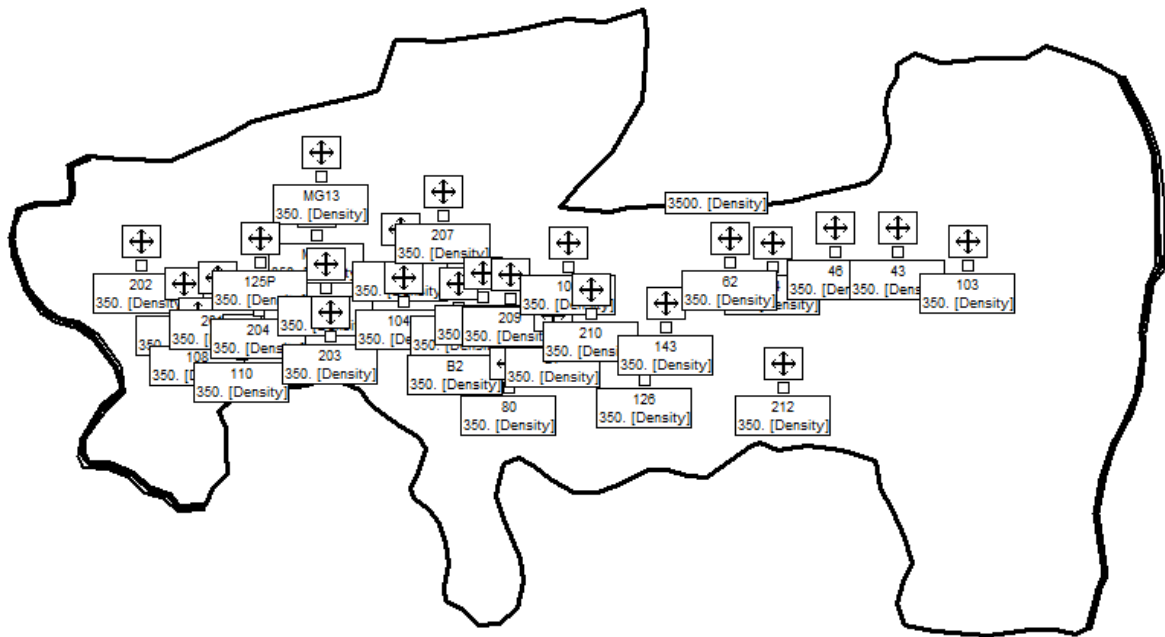
Εικόνα 3.2: Screenshot από το πρόγραμμα PTC, όπου φαίνονται τα τμήματα στα οποία εισήχθησαν οριακές συνθήκες 1<sup>ου</sup> τύπου.

Οι τιμές που εισάγονται στις οριακές συνθήκες προσδιορίζονται από τα υδραυλικά ύψη στις κοντινότερες γεωτρήσεις. Οι τιμές αυτές διαφέρουν ανάλογα με την χρονική περίοδο, καθώς το χειμώνα τα υδραυλικά ύψη είναι μεγαλύτερα (λιώσιμο του χιονιού από τα βουνά, μεγαλύτερη βροχόπτωση, μικρότερες τιμές άντλησης).

6. Εισάγονται οι αρχικές συνθήκες. Το αρχικό υδραυλικό ύψος στην επιφάνεια της θάλασσας τίθεται 150 *m*. Από το χάρτη των ισοϋψών, δόθηκαν στο μοντέλο τα στοιχεία των υψομέτρων στην περιοχή και δημιουργήθηκε το ανάγλυφο της με τη μέθοδο της παρεμβολής. Στα απόλυτα υψόμετρα που ελήφθησαν από το χάρτη προστέθηκαν ακόμα 150 μέτρα, καθώς το επίπεδο αναφοράς έχει τεθεί 150 *m* κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

7. Εισάγονται ψηφιακά τα πηγάδια άντλησης. Από στοιχεία των αρμόδιων υπηρεσιών, βρέθηκαν οι συντεταγμένες των πηγαδιών άντλησης καθώς και οι παροχές με τις οποίες αντλούν νερό. Έτσι εισάγονται στο μοντέλο ως οριακές συνθήκες 2<sup>ου</sup> τύπου. Τα πηγάδια που εισάγονται στο μοντέλο είναι αυτά που έχουν δηλωθεί επίσημα και λειτουργούν νόμιμα. Βέβαια, εκτός από αυτά, στην περιοχή υπάρχει πλήθος ιδιωτικών πηγαδιών για τα οποία δεν υπάρχουν στοιχεία. Τα πηγάδια τα οποία εισήχθησαν στο μοντέλο με τις αντίστοιχες παροχές, παρουσιάζονται στον Πίνακα Δεδομένων του Παραρτήματος.

Τα παραπάνω 58 πηγάδια άντλησης ομαδοποιήθηκαν σε 30 με τον εξής τρόπο: Σε περιπτώσεις πηγαδιών σε πολύ κοντινή απόσταση, λήφθηκε υπόψη το πηγάδι με τη μεγαλύτερη παροχή άντλησης, ενώ αθροίστηκαν σε αυτήν και οι παροχές των γειτονικών πηγαδιών που αφαιρέθηκαν με την ομαδοποίηση. Σκοπός της ομαδοποίησης είναι, κατά τη δημιουργία του κανάβου, ο αριθμός πεπερασμένων στοιχείων να είναι μικρότερος από 2000, καθώς το PTC στο student version όπου και έγινε το μοντέλο, δεν «τρέχει» για αριθμό στοιχείων μεγαλύτερο από 2000.

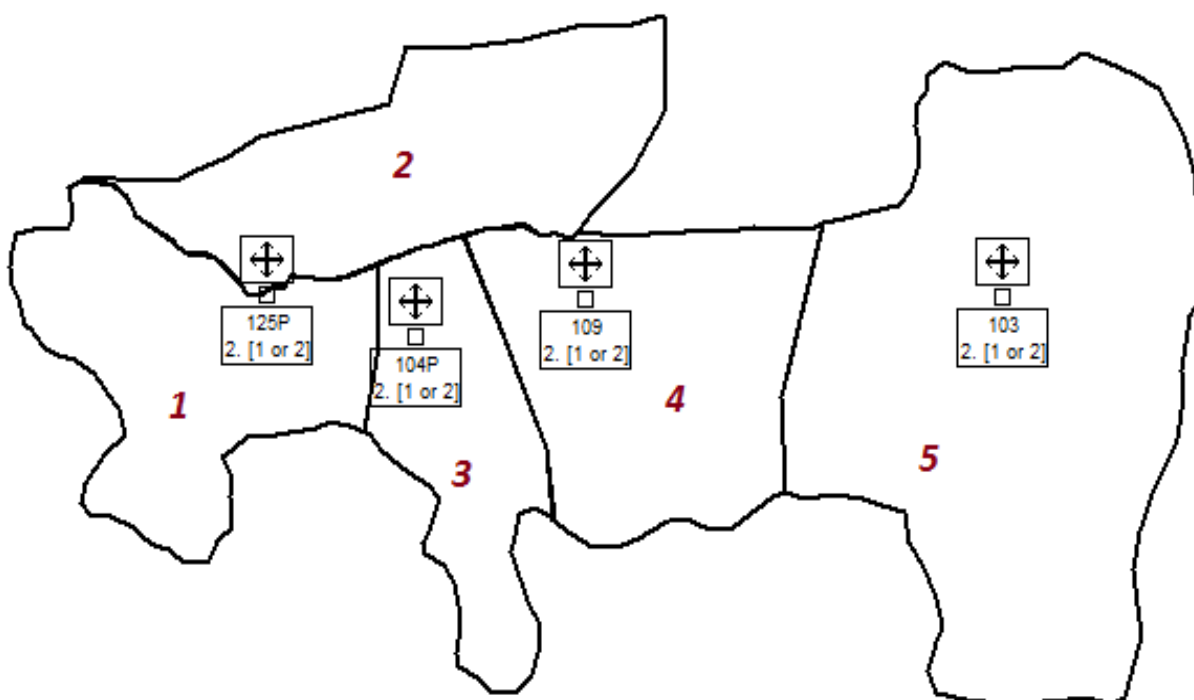


8. Εισάγεται η υδραυλική αγωγιμότητα. Στα πηγάδια 125P, 104P, 109 και 103 έχουν γίνει τεστ άντλησης και είναι γνωστές οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η περιοχή μελέτης χωρίζεται σε πέντε υποπεριοχές. Η υδραυλική αγωγιμότητα κάθε υποπεριοχής λήφθηκε από το αντίστοιχο πηγάδι που βρίσκεται εντός της. Στην περιοχή 2, όπου δεν είναι γνωστή η υδραυλική αγωγιμότητα σε κάποιο πηγάδι, θα γίνει υπόθεση πως είναι ίση με  $8.68 \text{ m/day}$ .

δηλαδή μία τάξη μεγέθους μικρότερη από την περιοχή 1. Η υπόθεση αυτή γίνεται διότι η περιοχή 2 αποτελείται από πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιοχές που αποτελούνται από αλλουβιακές Τεταρτογενείς αποθέσεις, στις οποίες αναπτύσσονται κατά θέσεις αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. (βλέπε Εικόνα 3.1)

περιοχή	πηγάδι	Υδραυλική αγωγιμότητα ( $m/d$ )
1	125P	86.8
2	-	8.68
3	104P	64.2
4	109	94.2
5	103	44

Πίνακας 3.1: Πίνακας με τις γνωστές υδραυλικές αγωγιμότητες ανά περιοχή.



Εικόνα 3.4: Screenshot από το πρόγραμμα PTC, όπου φαίνονται οι υποπεριοχές στις οποίες χωρίζεται η περιοχή μελέτης με βάση της γνωστές υδραυλικές αγωγιμότητες.

9. Εισάγεται η παράμετρος της βροχόπτωσης για τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο του 2008 και 2009. Η βροχόπτωση επηρεάζει άμεσα τα υπόγεια ύδατα, καθώς το κατακρημνιζόμενο νερό καταλήγει στους υδροφορείς με τη διεργασία της διήθησης. Σύμφωνα με υδρογεωλογική μελέτη, που αφορά την περιοχή της λεκάνης των Μοιρών, το ποσοστό του όγκου της βροχόπτωσης που απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής είναι της τάξης του 82%, οπότε μόλις το 18% κατεισδύει στον υδροφορέα, καθώς οι επιφανειακές απορροές θεωρούνται αμελητέες. Επίσης, έχει υπολογιστεί ότι από τη συνολική ετήσια βροχόπτωση, το 90% πέφτει κατά τη χειμερινή περίοδο(240 μέρες) και μόλις το 10% κατά τη θερινή(120 μέρες). Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 947 *mm* για το 2008 και 803 *mm* για το 2009. Επομένως, η διήθηση θα είναι :

Χειμώνας 2008 :

$$\frac{90}{100} * 947 \frac{\text{mm}}{240\text{days}} * \frac{18}{100} = 0.000639 \frac{\text{m}}{\text{day}}$$

Καλοκαίρι 2008 :

$$\frac{10}{100} * 947 \frac{\text{mm}}{120\text{days}} * \frac{18}{100} = 0.000142 \frac{\text{m}}{\text{day}}$$

Χειμώνας 2009 :

$$\frac{90}{100} * 803 \frac{\text{mm}}{240\text{days}} * \frac{18}{100} = 0.000542 \frac{\text{m}}{\text{day}}$$

Καλοκαίρι 2008 :

$$\frac{10}{100} * 803 \frac{\text{mm}}{120\text{days}} * \frac{18}{100} = 0.000120 \frac{\text{m}}{\text{day}}$$

10. Εισάγεται το πορώδες της περιοχής. Υπολογίζεται ανάμεσα σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 0.05 και 0.12. Επιλέγεται η τιμή 0.1.

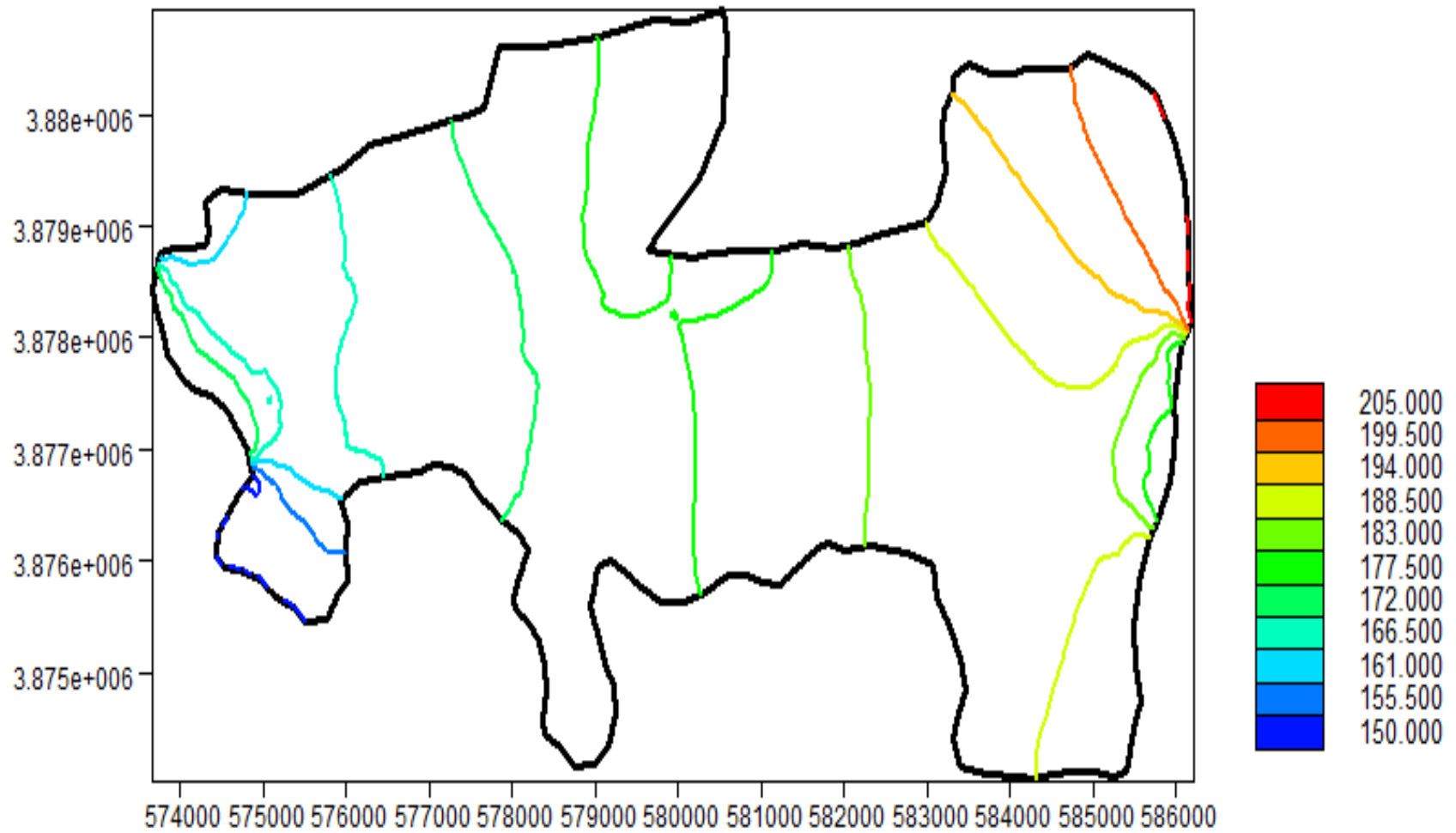
11. Δημιουργείται ο κানাβος, που διαιρεί την περιοχή σε τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία. Στην κορυφή του κάθε τριγώνου υπάρχει ένας κόμβος. Στη προκειμένη περίπτωση με την υπάρχουσα δομή του μοντέλου κατασκευάστηκε κানাβος αποτελούμενος από 1999 στοιχεία και 1106 κόμβους.

12. «Τρέχει» το μοντέλο.

13. Ακολουθεί το “καλιμπράρισμα” (calibration) του μοντέλου. Αρχικά γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρήσεις πεδίου που έχουμε ως δεδομένα σε συγκεκριμένα πηγάδια παρατήρησης. Στη συνέχεια γίνονται τροποποιήσεις στις οριακές συνθήκες του μοντέλου, καθώς και στις υδραυλικές αγωγιμότητες, ώστε οι αποκλείσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των δεδομένων, να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Έπειτα «τρέχουμε» ξανά το μοντέλο και συγκρίνουμε τα νέα αποτελέσματα με τα δεδομένα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έως ότου τα αποτελέσματα του μοντέλου να είναι παρόμοια με εκείνα των δεδομένων.

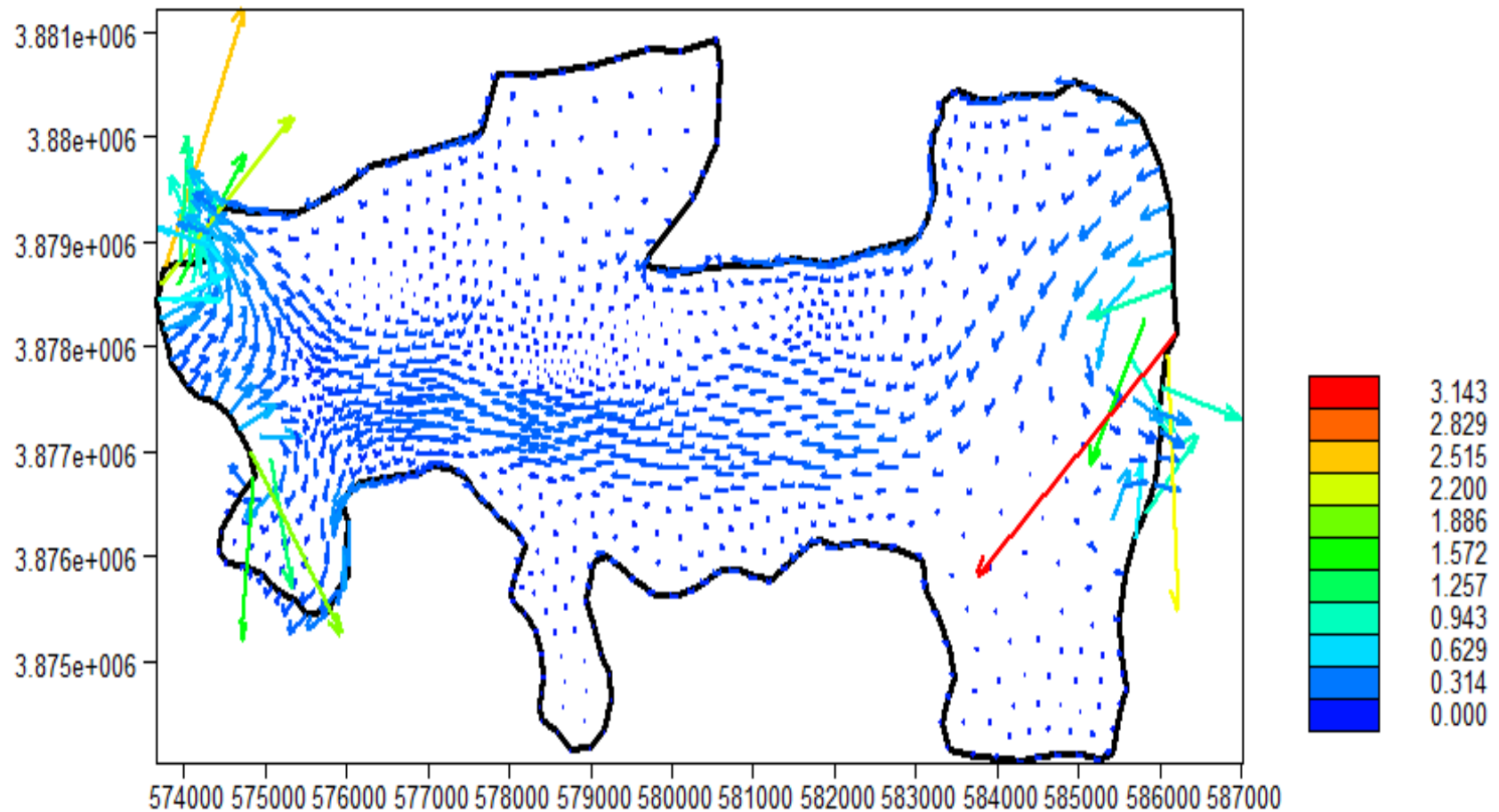
Παρατηρώντας τα παρακάτω απεικονιστικά Διαγράμματα (Εικόνα 3.5 και Εικόνα 3.6) που προέκυψαν από το μοντέλο, όσον αφορά τα υδραυλικά ύψη και τις ταχύτητες ροής στη λεκάνη των Μοιρών, συμπεραίνουμε πως η ροή των υπόγειων υδάτων της περιοχής έχει κατεύθυνση από τα ανατολικά προς τα δυτικά (από τα μεγαλύτερα υδραυλικά ύψη στα μικρότερα). Επίσης παρατηρείται πως η ροή είναι συγκεντρωμένη κεντρικά της λεκάνης, με την ταχύτητα ροής να κυμαίνεται μεταξύ  $0.3 - 0.6 \text{ m/day}$ , ενώ περιμετρικά δεν υπάρχει ροή ή είναι αμελητέα.





Εικόνα 3.5: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών ( $m$ ) της περιοχής, όπως αυτά προέκυψαν από τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC.





Εικόνα 3.6: Τα βέλη αναπαριστούν την ταχύτητα ροής του υπόγειου υδροφορέα στο εκάστοτε σημείο ( $m/day$ ), όπως αυτή προέκυψε από τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC. Τα βέλη που αναπαριστούν ταχύτητες μεγαλύτερες από  $1.257 m/day$  δε λαμβάνονται υπόψιν καθώς είναι αποτέλεσμα των οριακών συνθηκών.

14. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για την τέταρτη περίοδο (καλοκαίρι 2009) στις εξής δύο περιπτώσεις:

- Στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι τα πηγάδια άντλησης, αντλούν κανονικά σύμφωνα με τις παροχές των δεδομένων.
- Στην δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε πως τα πηγάδια άντλησης είναι κλειστά, έχουν δηλαδή μηδενικές παροχές.

#### 1<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ- ΑΝΟΙΧΤΑ ΠΗΓΑΔΙΑ

w/w	Πηγάδι παρατήρησης	Υδραυλικό ύψος πηγαδιού παρατήρησης	Υδραυλικό ύψος από αποτελέσμα τα μοντέλου	Διαφορά
1	M4	162.5	163.4	0.9
2	M5	169.4	166.1	-3.3
3	M12	164.8	166.9	2.1
4	B5	162.8	172.1	9.3
5	M3	171.8	174	2.2
6	M-A2	182.6	179.3	-3.3
7	M1	178.6	180.5	1.9
8	M6	169.3	170.4	1.1
9	M11	185.2	183.4	-1.8
10	99	188.9	188.6	-0.3
11	M7	177.5	178	0.5
12	M8	204.9	205	0.1

Πίνακας 3.2: Πίνακας για το calibration σύμφωνα με τη θεώρηση πως τα πηγάδια άντλησης, αντλούν κανονικά.

Από τον Πίνακα 3.2 κατασκευάζεται το Διάγραμμα 3.1. Στον άξονα  $x$ , βρίσκεται το Υδραυλικό ύψος των πηγαδιών παρατήρησης και στον άξονα  $y$ , το αντίστοιχο Υδραυλικό ύψος από τα αποτελέσματα του μοντέλου. Στη συνέχεια με βάση τα σημεία, σχεδιάζεται η βέλτιστη ευθεία και σημειώνεται η εξίσωση της και το  $R^2$ . Οι διαφορές ανάμεσα στα Υδραυλικά ύψη των πηγαδιών παρατήρησης και τα αντίστοιχα Υδραυλικά ύψη από τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σχετικά καλές, εκτός από μία περίπτωση, εκείνη του πηγαδιού παρατήρησης B5(9.3m). Κατασκευάζεται το Διάγραμμα 3.2 όπως ακριβώς και το Διάγραμμα 3.1, αλλά χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το πηγάδι B5.

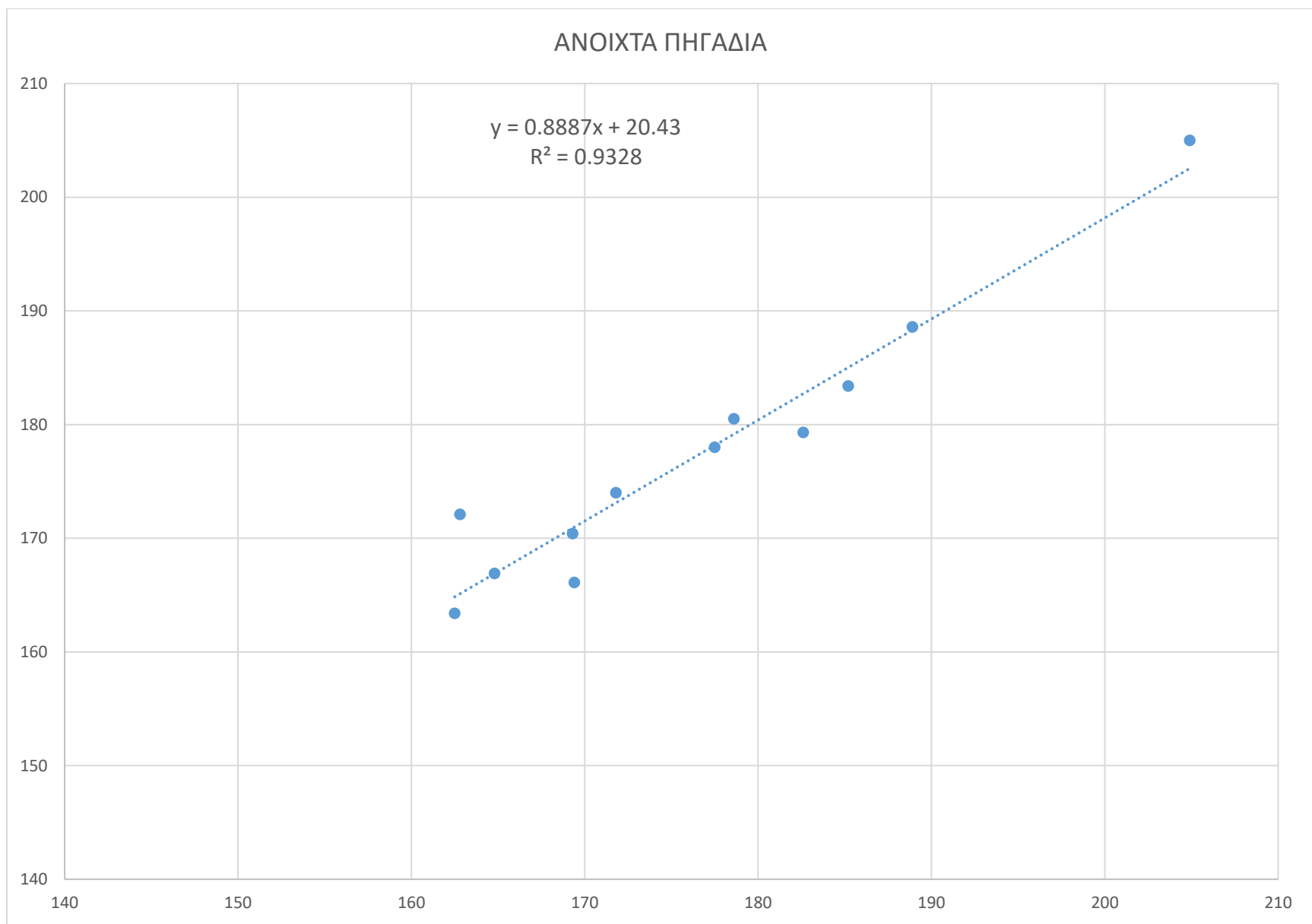
## 2<sup>η</sup> ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ- ΚΛΕΙΣΤΑ ΠΗΓΑΔΙΑ

w/w	Πηγάδι παρατήρησης	Υδραυλικό ύψος πηγαδιού παρατήρησης	Υδραυλικό ύψος από αποτελέσματα μοντέλου	Διαφορά
1	M4	162.5	164.6	2.1
2	M5	169.4	167.3	-2.1
3	M12	164.8	168.2	3.4
4	B5	162.8	174.7	11.9
5	M3	171.8	177.5	5.7
6	M-A2	182.6	181.7	-0.9
7	M1	178.6	182.8	4.2
8	M6	169.3	180.1	10.8
9	M11	185.2	185	-0.2
10	99	188.9	188.7	-0.2
11	M7	177.5	178.1	0.6
12	M8	204.9	205	0.1

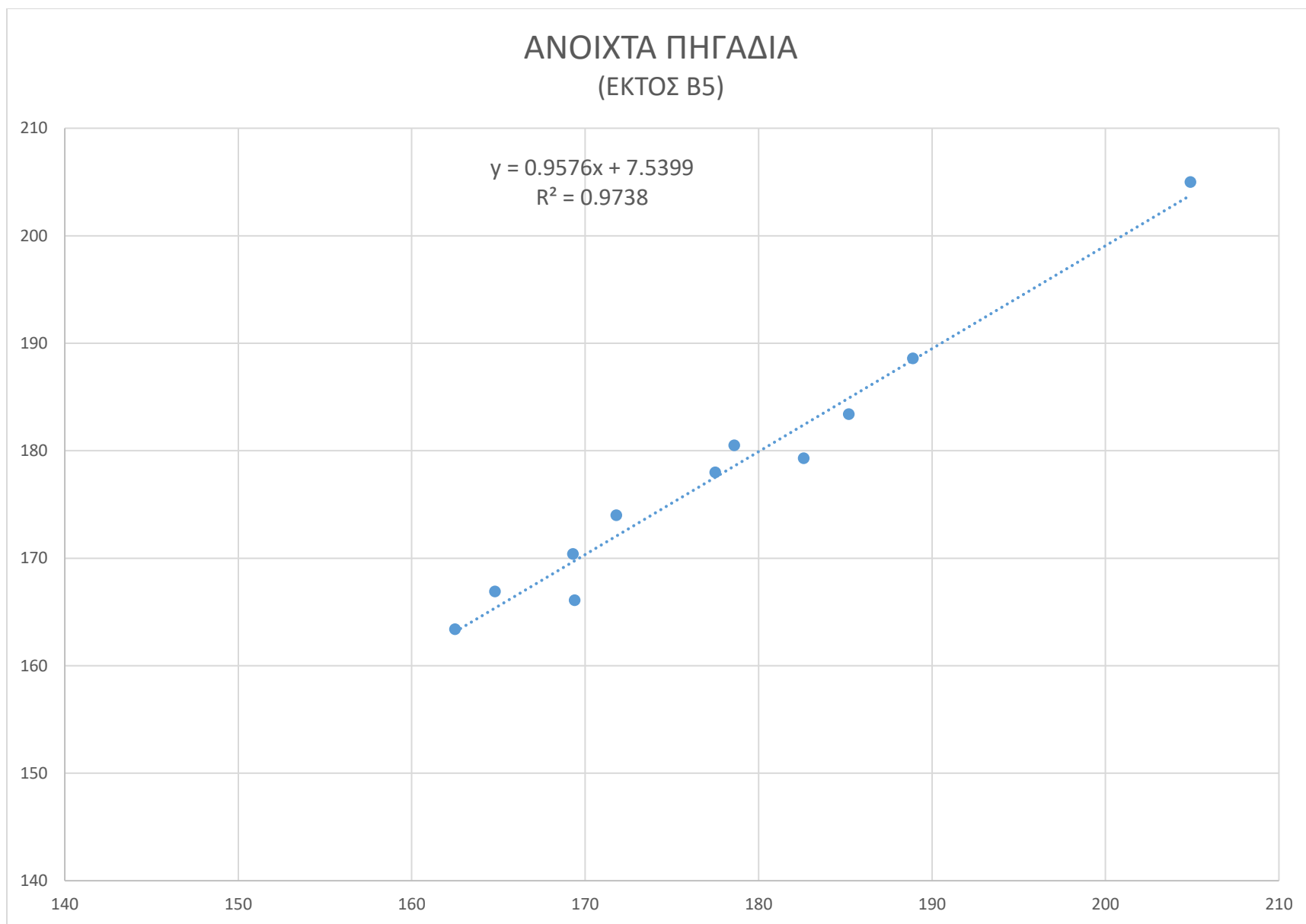
Πίνακας 3.3: Πίνακας για το calibration σύμφωνα με τη θεώρηση πως τα πηγάδια άντλησης είναι κλειστά (μηδενικές παροχές).

Με αντίστοιχο τρόπο, από τον Πίνακα 3.3 κατασκευάζεται το Διάγραμμα 3.3. Οι διαφορές ανάμεσα στα Υδραυλικά ύψη των πηγαδιών παρατήρησης και τα αντίστοιχα Υδραυλικά ύψη από τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι σχετικά καλές στην πλειοψηφία τους, αλλά αυξημένες σε σχέση με την 1<sup>η</sup> Περίπτωση. Το πηγάδι παρατήρησης B5 εξακολουθεί να έχει μεγάλη απόκλιση (11.9m), αλλά και το M6 εμφανίζει μεγάλη απόκλιση (10.8m). Κατασκευάζεται το Διάγραμμα 3.4 όπως ακριβώς και το Διάγραμμα 3.3, αλλά χωρίς να συμπεριλαμβάνονται τα πηγάδια B5 και M6.

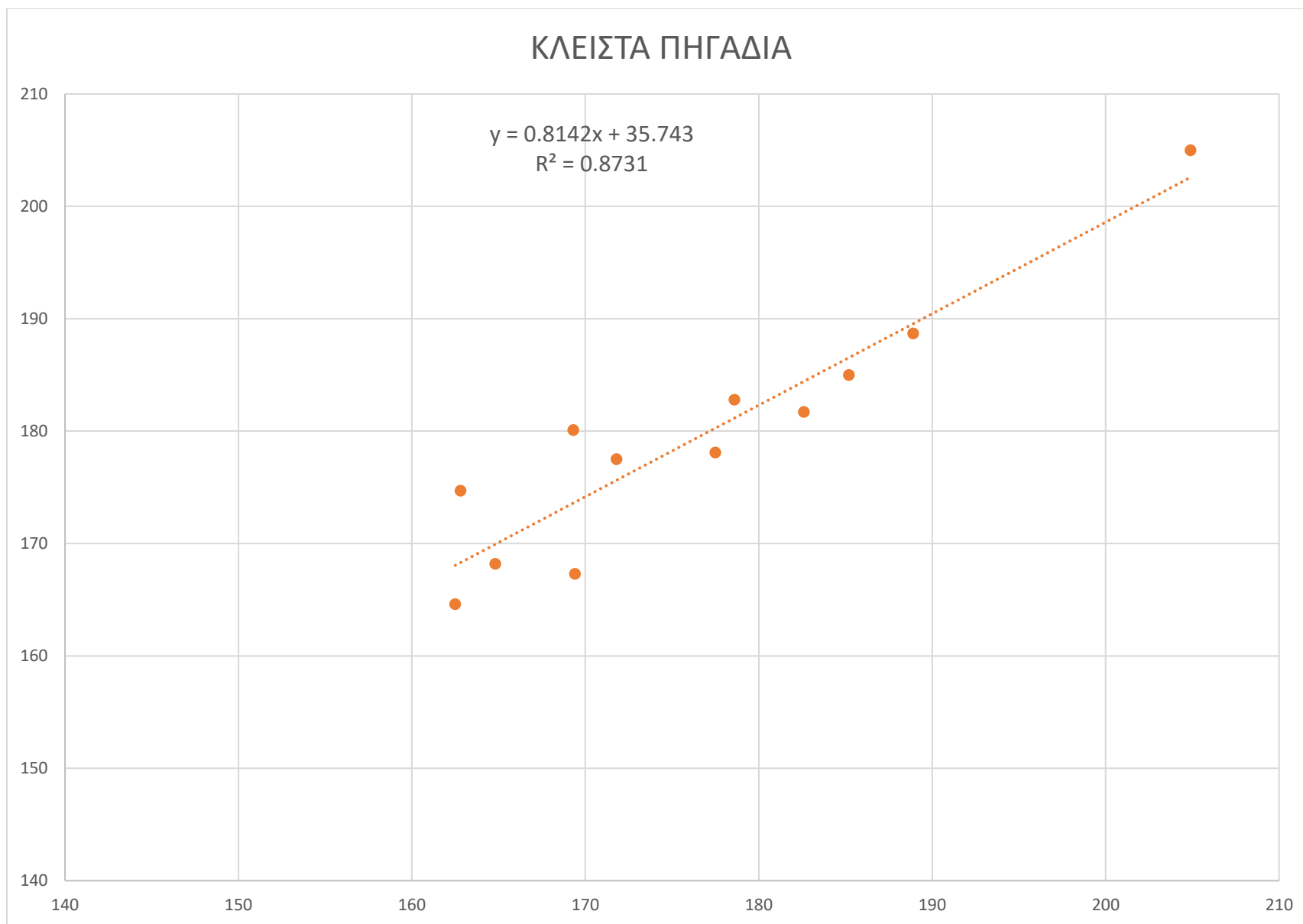
**Δεδομένου ότι οι τιμές του  $R^2$ , που προέκυψαν από τα διαγράμματα είναι ικανοποιητικές, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το μοντέλο αναπαριστά ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση της ροής των υπογείων υδάτων του υδροφορέα της περιοχής των Μοιρών.**



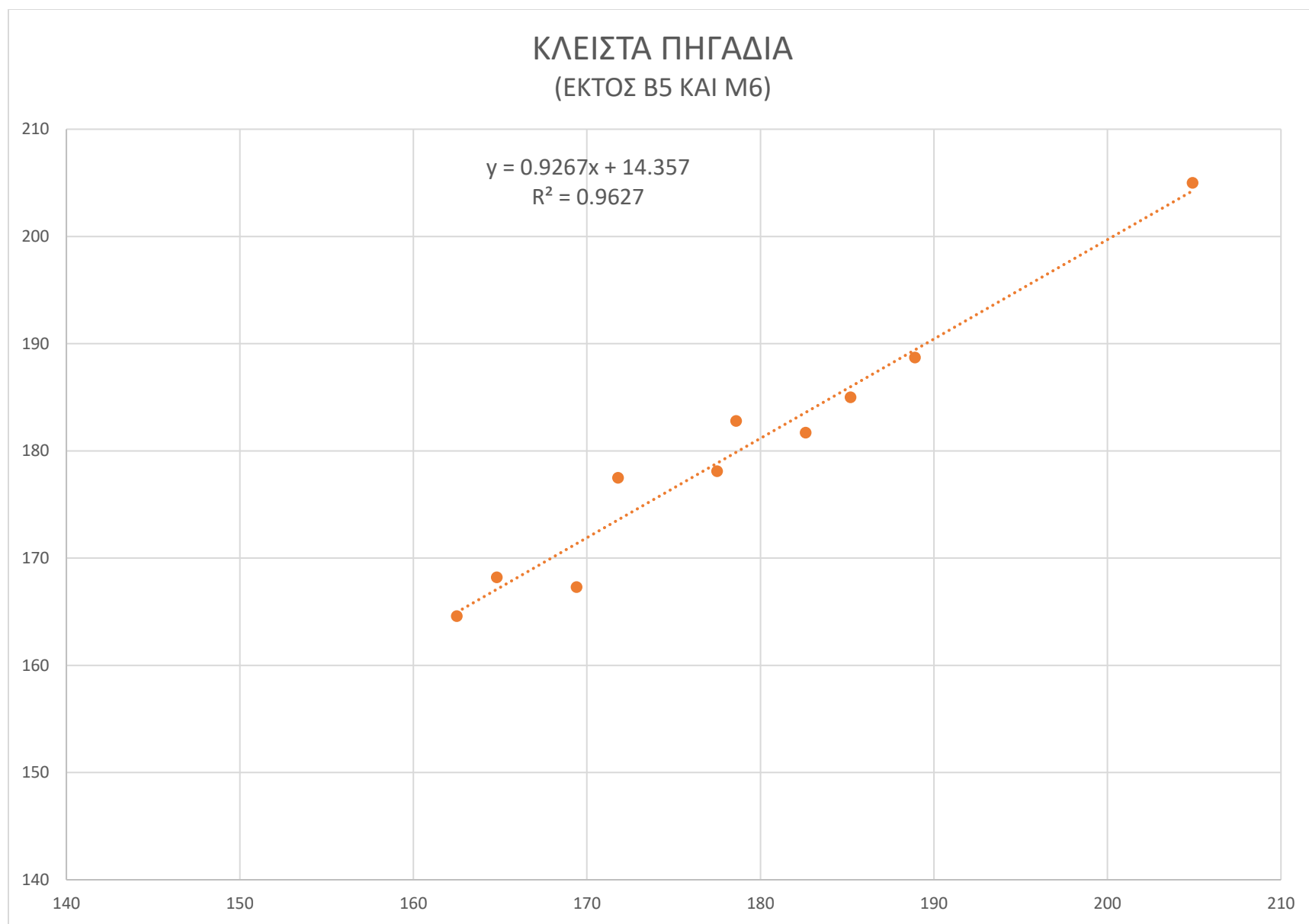
**Διάγραμμα 3.1:** Περιλαμβάνονται όλα τα πηγάδια παρατήρησης, με τη θεώρηση ότι τα πηγάδια άντλησης αντλούν κανονικά.



Διάγραμμα 3.2: Δεν έχει συμπεριληφθεί το πηγάδι Β5. Ισχύει η θεώρηση ότι τα πηγάδια άντλησης αντλούν κανονικά.



Διάγραμμα 3.3: Περιλαμβάνονται όλα τα πηγάδια παρατήρησης, με τη θεώρηση ότι τα πηγάδια άντλησης είναι κλειστά (μηδενικές παροχές).



**Διάγραμμα 3.4:** Δεν έχουν συμπεριληφθεί τα πηγάδια Β5 και Μ6. Ισχύει η θεώρηση ότι τα πηγάδια άντλησης είναι κλειστά (μηδενικές παροχές).

## **ΣΕΝΑΡΙΑ**

Στη συνέχεια εξετάζονται δύο σενάρια αύξησης της ποσότητας νερού που αντλείται από τα πηγάδια με παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης.

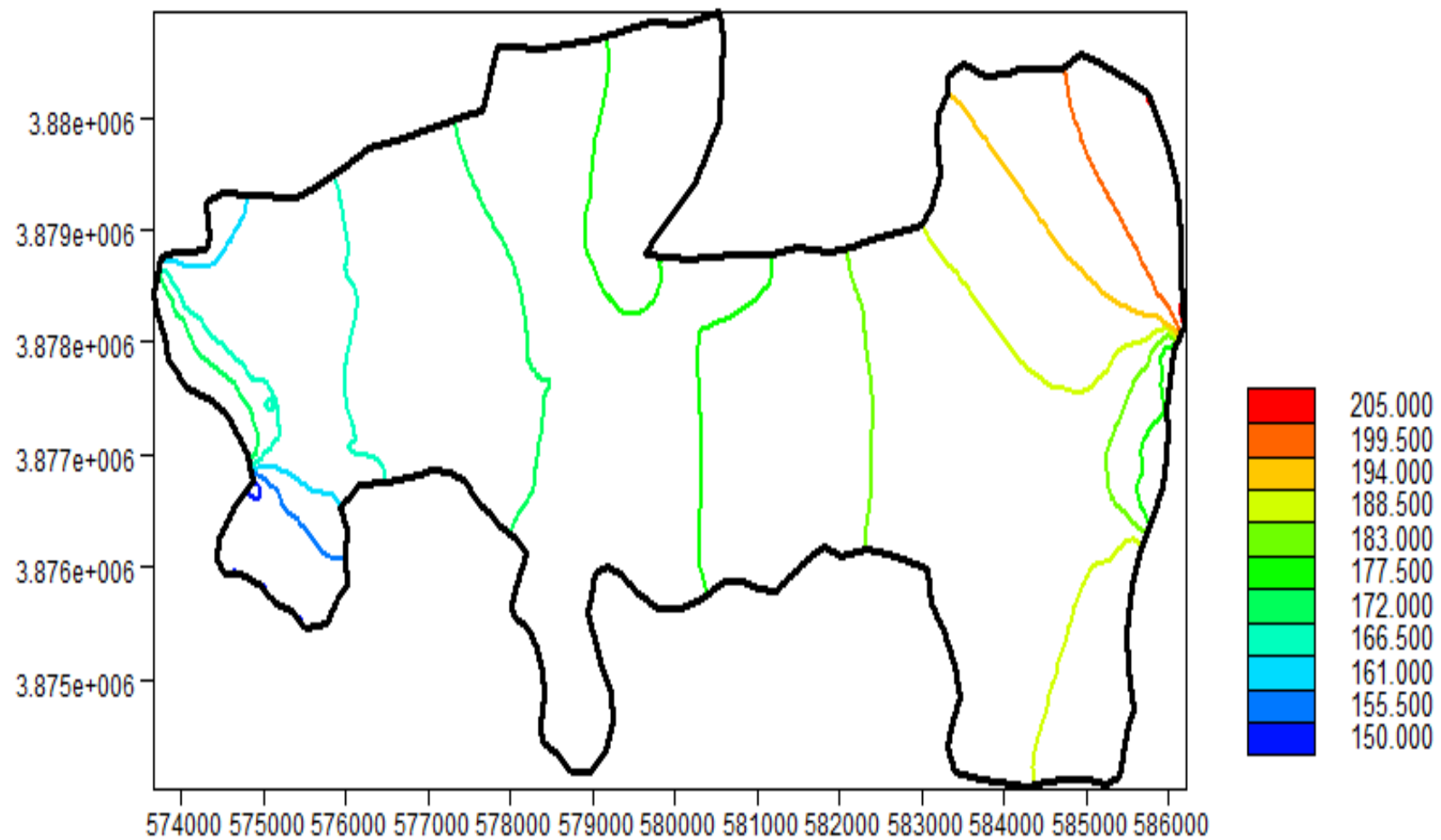
### **Σενάριο 1**

Στο σενάριο αυτό προτείνεται αύξηση των αντλήσεων από τα πηγάδια άντλησης κατά 10% με παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης κατά 10%. Στις εικόνες 3.7 και 3.8 παρατίθενται η απεικόνιση των υδραυλικών υψών και η αναπαράσταση της ταχύτητας ροής του υπόγειου υδροφορέα αντίστοιχα, όπως αυτές προέκυψαν από το PTC. Στην εικόνα 3.9 γίνεται σύγκριση των υδραυλικών υψών της περιοχής μεταξύ της αρχικής κατάστασης και του Σεναρίου 1. Αποτέλεσμα της συνδυασμένης αύξησης των αντλήσεων και της μείωσης της βροχόπτωσης είναι μία μικρή πτώση των υδραυλικών υψών, η οποία εκφράζεται με μια μετατόπιση των καμπυλών του υδραυλικού ύψους προς τα δεξιά. Όσον αφορά τις ταχύτητες ροής του υπόγειου υδροφορέα στα διάφορα σημεία της περιοχής, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές.

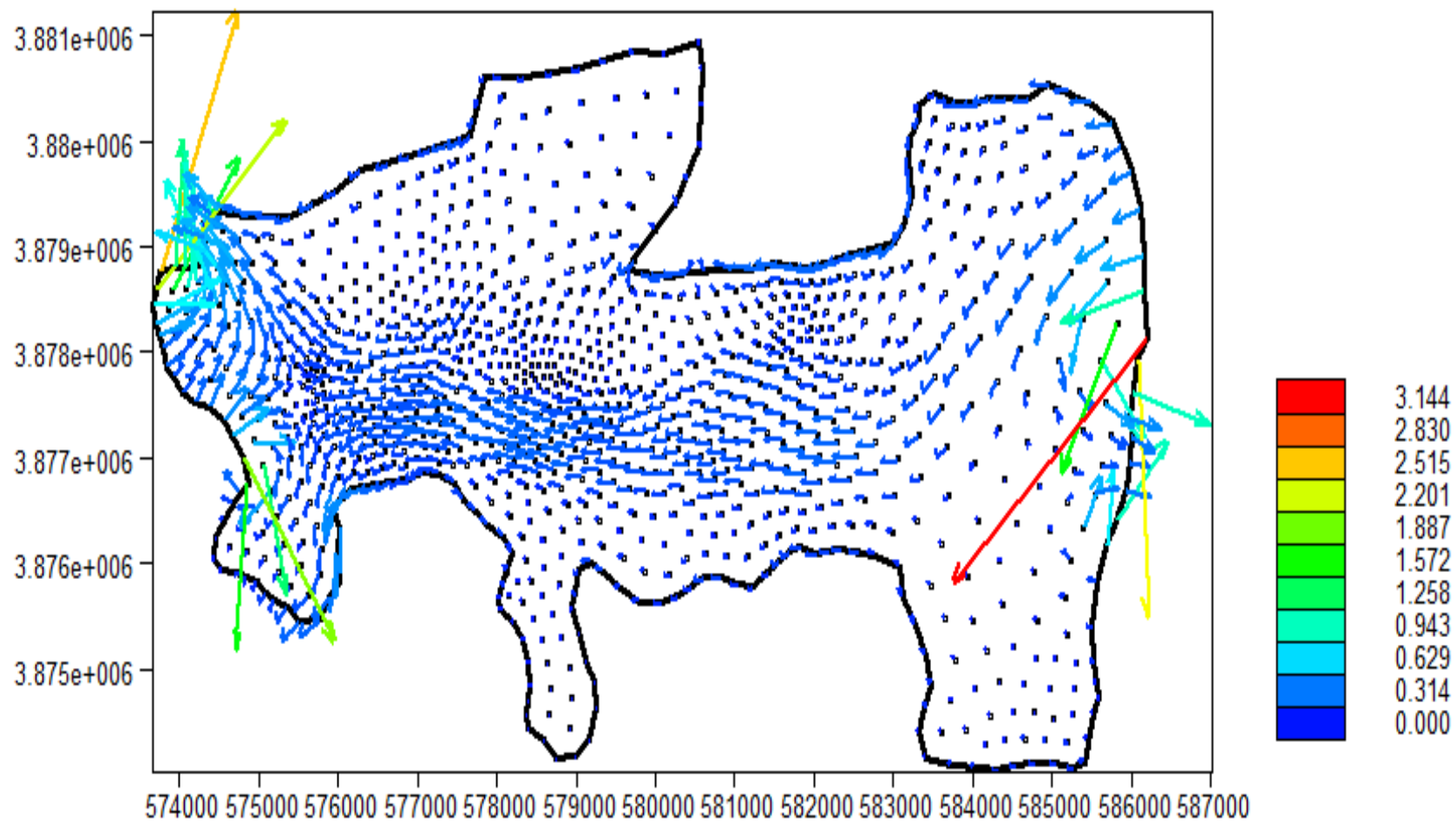
### **Σενάριο 2**

Στο σενάριο αυτό προτείνεται αύξηση των αντλήσεων από τα πηγάδια άντλησης κατά 20% με παράλληλη μείωση της βροχόπτωσης κατά 20%. Στις εικόνες 3.10 και 3.11 παρατίθενται η απεικόνιση των υδραυλικών υψών και η αναπαράσταση της ταχύτητας ροής του υπόγειου υδροφορέα αντίστοιχα, όπως αυτές προέκυψαν από το PTC. Στην εικόνα 3.12 γίνεται σύγκριση των υδραυλικών υψών της περιοχής μεταξύ της αρχικής κατάστασης και του Σεναρίου 2. Όπως και προηγουμένως, αποτέλεσμα της συνδυασμένης αύξησης των αντλήσεων και της μείωσης της βροχόπτωσης είναι η πτώση των υδραυλικών υψών, η οποία εκφράζεται με μια μετατόπιση των καμπυλών του υδραυλικού ύψους προς τα δεξιά. Όπως είναι αναμενόμενο, αυτή τη φορά η πτώση είναι μεγαλύτερη, συνεπώς και η μετατόπιση προς τα δεξιά. Όσον αφορά και πάλι τις ταχύτητες ροής του υπόγειου υδροφορέα στα διάφορα σημεία της περιοχής, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές.

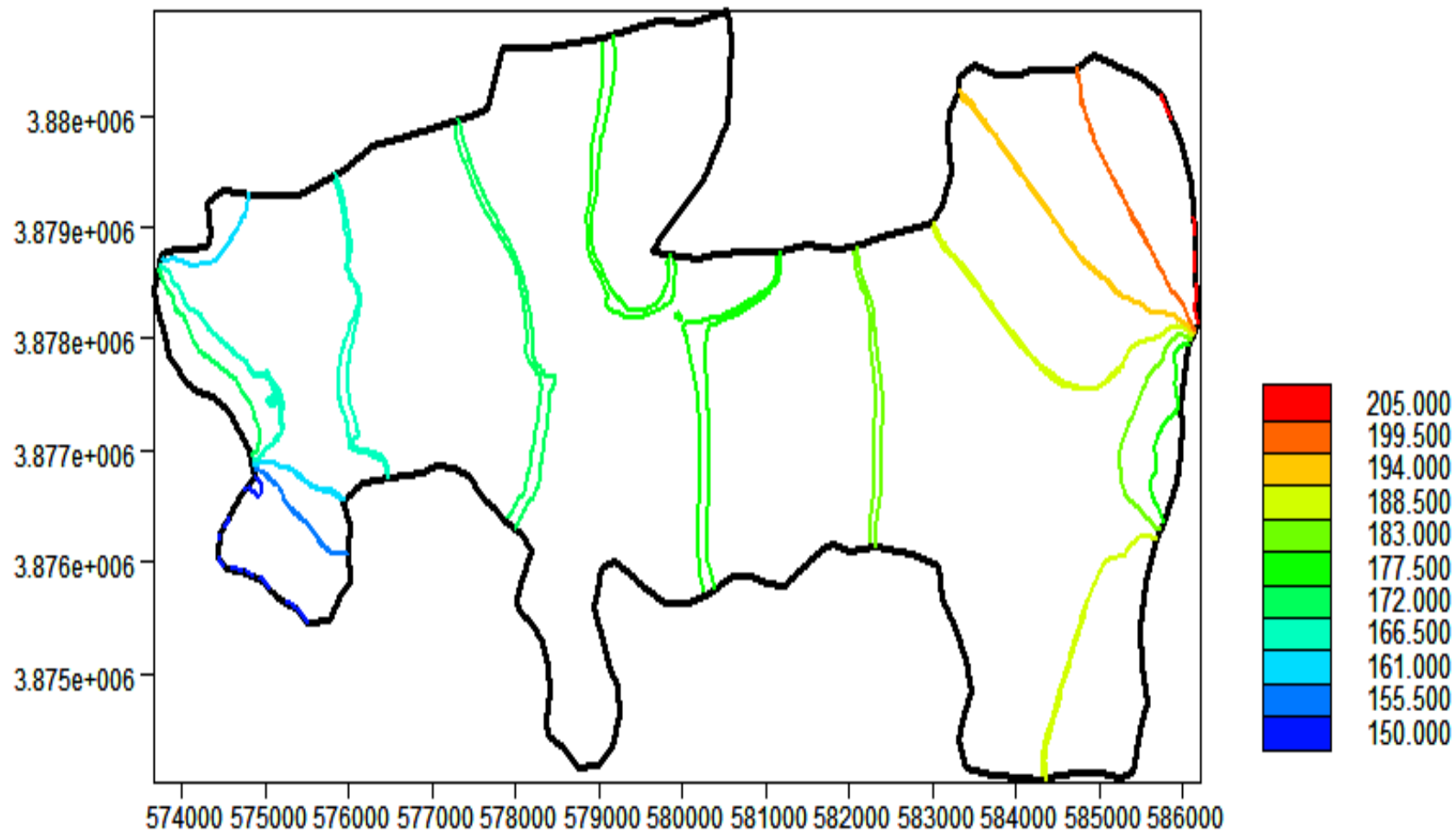




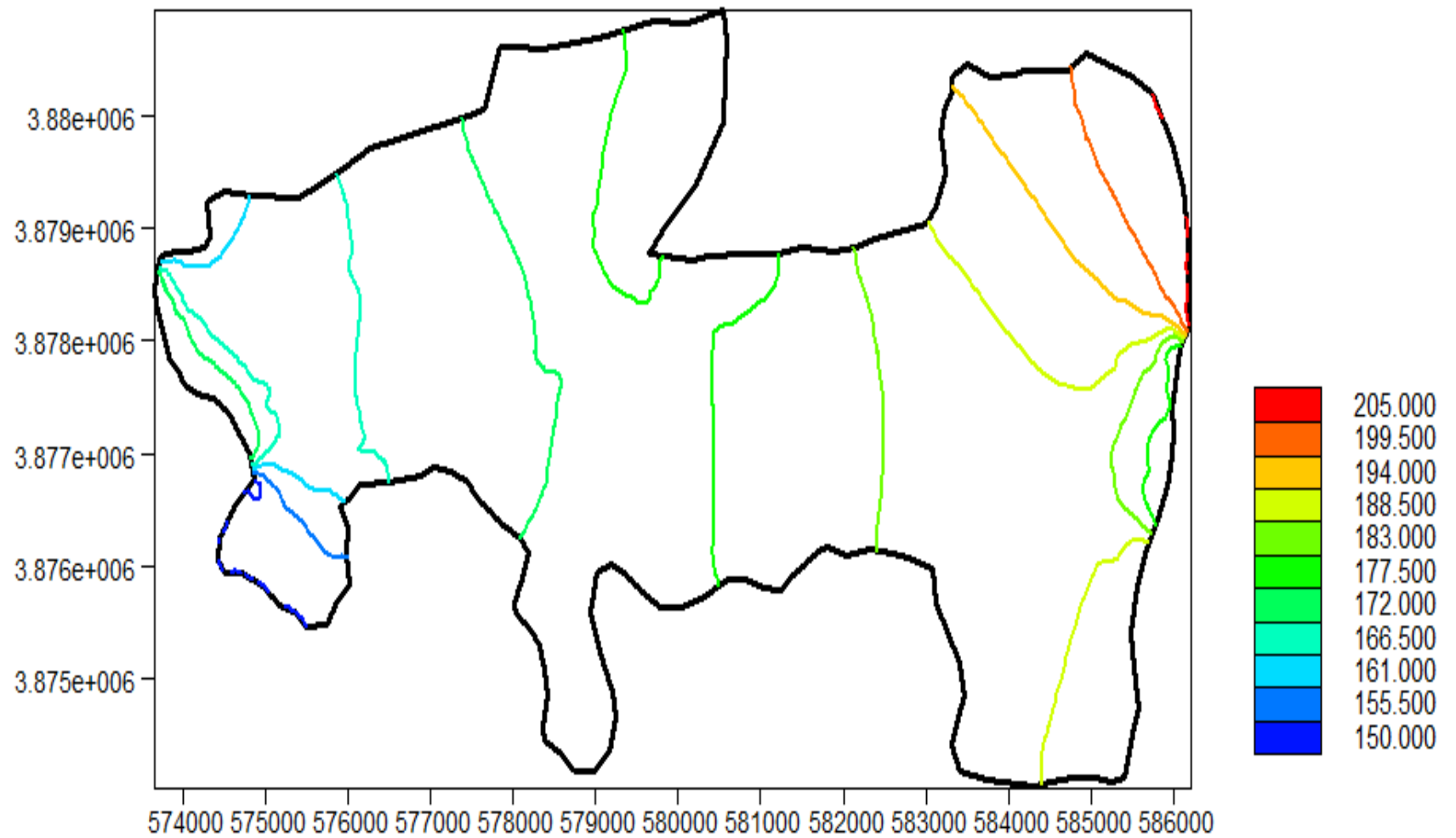
Εικόνα 3.7: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών ( $m$ ) της περιοχής για μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% και αύξηση των αντλήσεων κατά 10%.



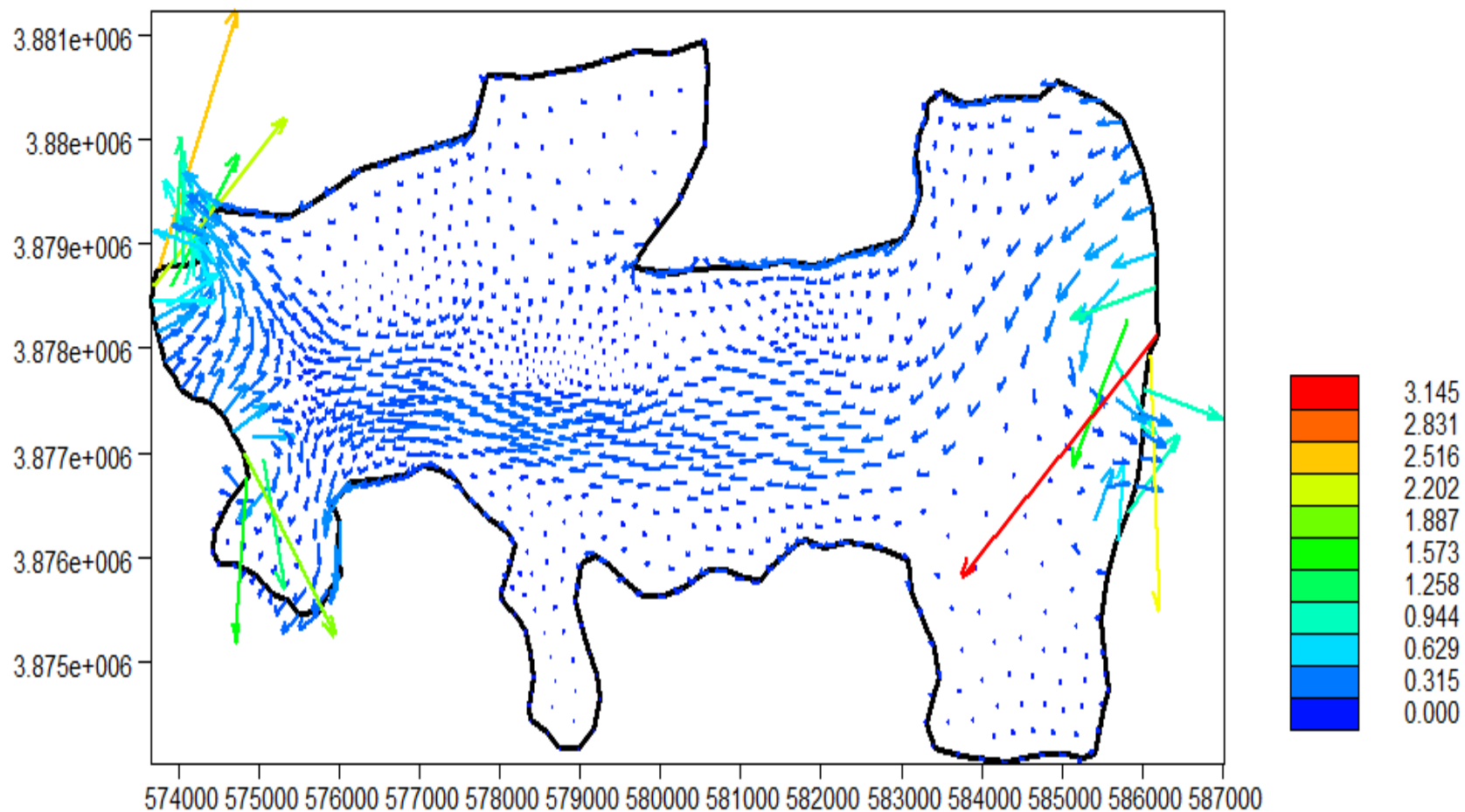
Εικόνα 3.8: Αναπαράσταση της ταχύτητας ροής του υπόγειου υδροφορέα στο εκάστοτε σημείο ( $m/day$ ), για μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% και αύξηση των αντλήσεων κατά 10%. Τα βέλη που αναπαριστούν ταχύτητες μεγαλύτερες από  $1.258 m/day$  δε λαμβάνονται υπόψιν καθώς είναι αποτέλεσμα των οριακών συνθηκών.



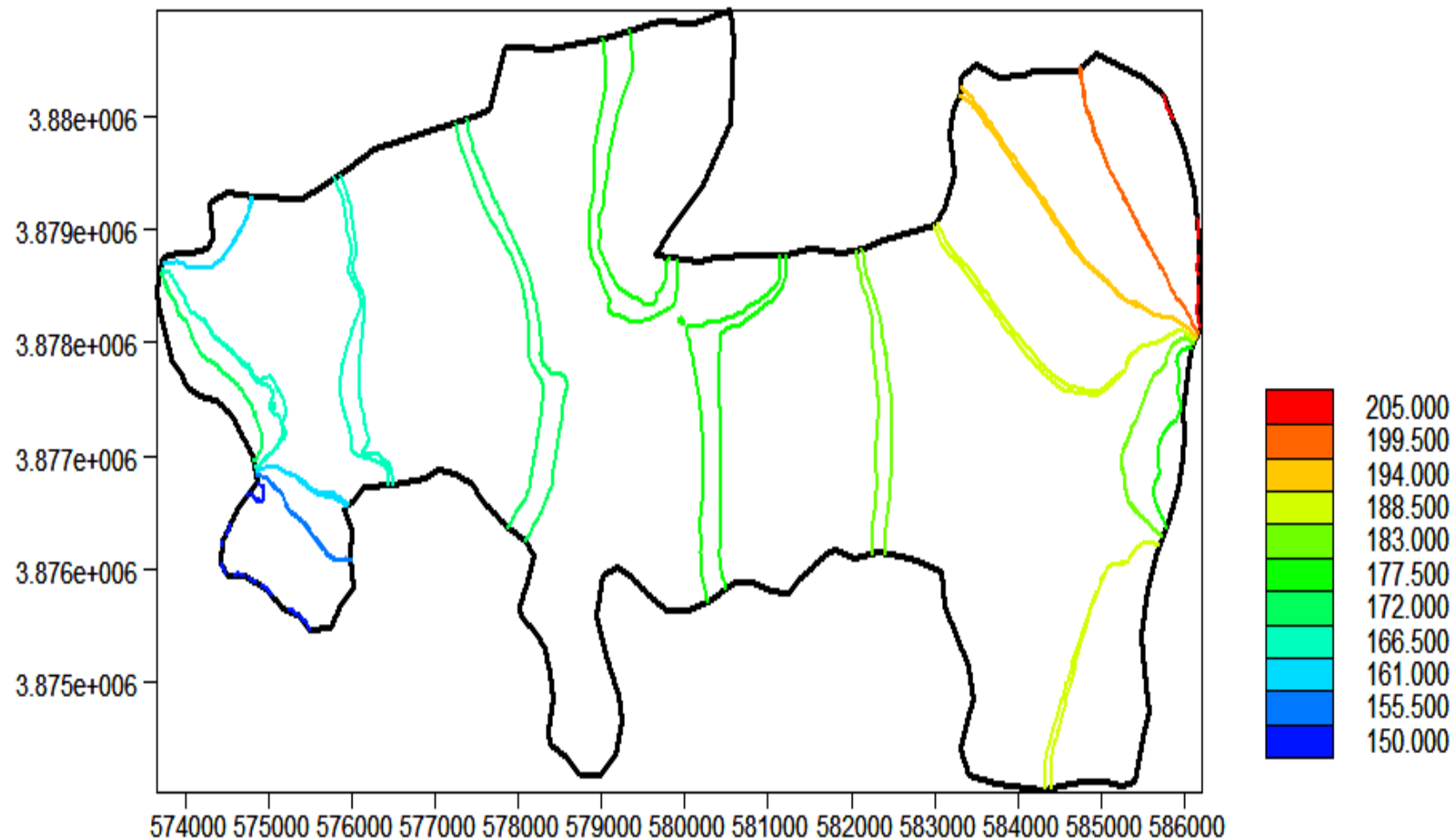
Εικόνα 3.9: Σύγκριση των υδραυλικών υψών ( $m$ ) της περιοχής πριν και μετά τη μείωση της βροχόπτωσης κατά 10% και την ταυτόχρονη αύξηση των αντλήσεων κατά 10%. Μετά τη μείωση του νερού, παρατηρείται μια μετατόπιση των καμπυλών του υδραυλικού ύψους προς τα δεξιά κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής.



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση των υδραυλικών υψών ( $m$ ) της περιοχής για μείωση της βροχόπτωσης κατά 20% και αύξηση των αντλήσεων κατά 20%.



Εικόνα 3.11: Αναπαράσταση της ταχύτητας ροής του υπόγειου υδροφορέα στο εκάστοτε σημείο ( $m/day$ ), για μείωση της βροχόπτωσης κατά 20% και αύξηση των αντλήσεων κατά 20%. Τα βέλη που αναπαριστούν ταχύτητες μεγαλύτερες από  $1.258 m/day$  δε λαμβάνονται υπόψιν καθώς είναι αποτέλεσμα των οριακών συνθηκών.



Εικόνα 3.12: Σύγκριση των υδραυλικών υψών ( $m$ ) της περιοχής πριν και μετά τη μείωση της βροχόπτωσης κατά 20% και την ταυτόχρονη αύξηση των αντλήσεων κατά 20%. Μετά τη μείωση του νερού, παρατηρείται μια μετατόπιση των καμπύλων του υδραυλικού ύψους προς τα δεξιά κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής.

Τα σενάρια αυτά εξετάστηκαν προκειμένου να διαπιστωθεί τι περιθώρια υπάρχουν για μελλοντική αύξηση των αντλήσεων και πως συμπεριφέρεται ο υπόγειος υδροφορέας σε μία ενδεχόμενη μείωση του νερού ( μείωση των βροχοπτώσεων σε συνδυασμό με αύξηση των αντλήσεων των πηγαδιών). Προέκυψε τελικά, ότι ο υδροφορέας της περιοχής μπορεί να ανταπεξέλθει στα ενδεχόμενα αυτά.

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, πως τα σενάρια που εξετάστηκαν, αφορούν αποκλειστικά τα καταγεγραμμένα και νομίμως λειτουργούντα πηγάδια της περιοχής. Όμως, όπως έχει προαναφερθεί, στην περιοχή υπάρχει πλήθος παρανόμων και μη καταγεγραμμένων πηγαδιών, η ανεξέλεγκτη χρήση των οποίων, έχει οδηγήσει σε δραματική μείωση της στάθμης του υδροφορέα της περιοχής (πάνω από 35 m) τα τελευταία 30 χρόνια. Συνεπώς, με δεδομένη την ύπαρξη και τη λειτουργία των πηγαδιών αυτών, είναι προφανές ότι η πτώση των υδραυλικών υψών θα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη απ'ότι προέκυψε μετά την εξέταση των παραπάνω δύο σεναρίων. Προκύπτει λοιπόν ότι η πραγματική έκταση του προβλήματος είναι πολύ μεγαλύτερη, όμως δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με τα υπάρχοντα δεδομένα.

**Σε κάθε περίπτωση πάντως, τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτελούν μια αρκετά αξιόπιστη προσέγγιση της συμπεριφοράς του υδροφορέα.**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

w/w	Όνομα πηγαδιού	Παροχή άντλησης( $m^3/h$ )
1	105	20
2	202	100
3	106	20
4	202A	90
5	107	20
6	201	120
7	108	100
8	201A	100
9	110	150
10	G96	50
11	204	100
12	125P	60
13	MG7	25
14	MG12	20
15	MG13	30
16	205	80
17	203	100
18	206	80
19	MG11	15
20	104	80
21	MG9	50
22	MG8	60
23	104P	80
24	MG10	25
25	B7A	80
26	207	100
27	B2	150
28	B1.5	80
29	B6	150
30	B1	120
31	58A	40
32	208	100
33	80	80
34	209	120
35	N9	80
36	G86	80
37	109A	90



38	B7	80
39	109	80
40	123	50
41	210	60
42	B4	12
43	211	50
44	126	150
45	143	60
46	G35	40
47	62	40
48	G37	60
49	65	50
50	64	50
51	212	70
52	G34	50
53	212A	30
54	46	50
55	44	25
56	43	30
57	42	25
58	103	25

Πίνακας με τα πηγάδια άντλησης και τις αντίστοιχες παροχές άντλησης.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992
2. D. K. Badu, G. F. Pinder, A. Niemi, D. P. Ahlfeld, S. A. Stothoff, Chemical Transport by Three-Dimensional Groundwater Flows, June 1997
3. Emmanouil A. Varouchakis, Integrated Water Resources Analysis at Basin Scale: A Case Study in Greece, Technical University of Crete, Chania, Greece (TUC), November 2015
4. Ioannis K. Tsanis, Aristeidis G. Koutroulis, Ioannis N. Daliakopoulos, HarmoniRiB River Basin Data Documentation Chapter 6-Geropotamou River Basin, Technical University of Crete, Chania, Greece (TUC), November 2006
5. Β. Περλέρος, Δ. Παπαμαστοράκης, Μ. Κριτσωτάκης, Ε. Δρακοπούλου, Α. Παναγόπουλος, Υπόγειο Υδατικό Δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και Προοπτικές
6. Ιωάννης Τριχάκης, Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρισης στην Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης, Χανιά, Σεπτέμβριος 2004
7. Αντώνιος Ν. Πουντουράκης, Ανάλυση Υδατικού Δυναμικού των Υδρολογικών Λεκανών Γεροποτάμου και Γιοφύρου με τη Χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, Χανιά, Σεπτέμβριος 2003
8. Στέφανος Μ. Καρτεράκης, Διαχείριση των Υπόγειων Υδάτων με χρήση Συνδυασμού Μεθόδων Προσομοίωσης και Βελτιστοποίησης, Χανιά, Αύγουστος 2005
9. Γεώργιος Καρατζάς, Σημειώσεις του μαθήματος: Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016