

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*«Ανάλυση Ευαισθησίας Του Μοντέλου  
Προσομοίωσης PTC Στον Υπόγειο Υδροφορέα  
Της Περιοχής Αγυιάς – Χανίων »*

**Δίγκα Άννα**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Καρατζάς Γεώργιος, (Επιβλέπων)  
Γκέκας Βασίλειος  
Νικολαΐδης Νικόλαος

***Χανιά, Οκτώβριος 2007***

# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **• ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

- 1.1 Υδρολογικός κύκλος
- 1.2 Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων
- 1.3 Υδροφορείς (Aquifers)
- 1.4 Παράμετροι των υδροφορέων
- 1.5 Υδραυλική αγωγιμότητα – Νόμος του Darcy  
Νόμος του Darcy (Darcy 's Law)
- 1.6 Ομοιογένεια και Ισοτροπία (Homogeneity and Isotropy)
- 1.7 Γενική μορφή του νομού του Darcy

## **• ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ**

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Βασικές Εξισώσεις και Αριθμητικές Μέθοδοι
  - 2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ
  - 2.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ
- 2.3 Θεμελιώδες Μοντέλο και σχεδιασμός πλέγματος
  - 2.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
  - 2.3.2 ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
    - 2.3.2.1 Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα
    - 2.3.2.2 Ημι-τρισδιάστατα μοντέλα
    - 2.3.2.3 Κάθετων τομών και Πλήρη τρισδιάστατα μοντέλα
  - 2.3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ
- 2.4 Οριακές συνθήκες
  - 2.4.1 ΕΙΔΗ ΟΡΙΩΝ

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

**ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARGUS ONE GIS**

**ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC**

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Σύντομη αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis
- 3.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC
  - 3.3.1 ΚΥΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ
  - 3.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ PTC
- 3.4 Τρισδιάστατη Ροή υπογείων Υδάτων
  - 3.4.1 ΚΥΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ
  - 3.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ
  - 3.4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ
  - 3.4.4 Η ΚΑΘΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ
  - 3.4.5 Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ
- 3.5 Οριακές Συνθήκες
- 3.6 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα
- 3.7 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων
  - 3.7.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

- **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ**

- 4.1 Γενικά
- 4.2. Συμβατικές Μέθοδοι Ανάλυσης Ευαισθησίας-Αβεβαιότητας

## • **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ**

- 5.1. Προσδιορισμός περιοχής μελέτης
- 5.2. Ιστορικά
- 5.3 Υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα
- 5.4 Κλιματολογικά στοιχεία
  - 5.4.1 ΓΕΝΙΚΑ
  - 5.4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ
  - 5.4.3 ΥΓΡΑΣΙΑ
  - 5.4.4 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ
  - 5.4.5 ΑΝΕΜΟΙ
  - 5.4.6 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ- ΝΕΦΩΣΗ- ΟΜΙΧΛΗ
- 5.5 Γεωλογία Περιοχής Μελέτης
- 5.6. Υδροφορία Υπολεκάνης Αγυιάς
  - 5.6.1.ΓΕΝΙΚΑ
    - 5.6.1.1 Καρστικοί σχηματισμοί
    - 5.6.1.2 Πορώδεις σχηματισμοί
    - 5.6.1.3 Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

## • **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ**

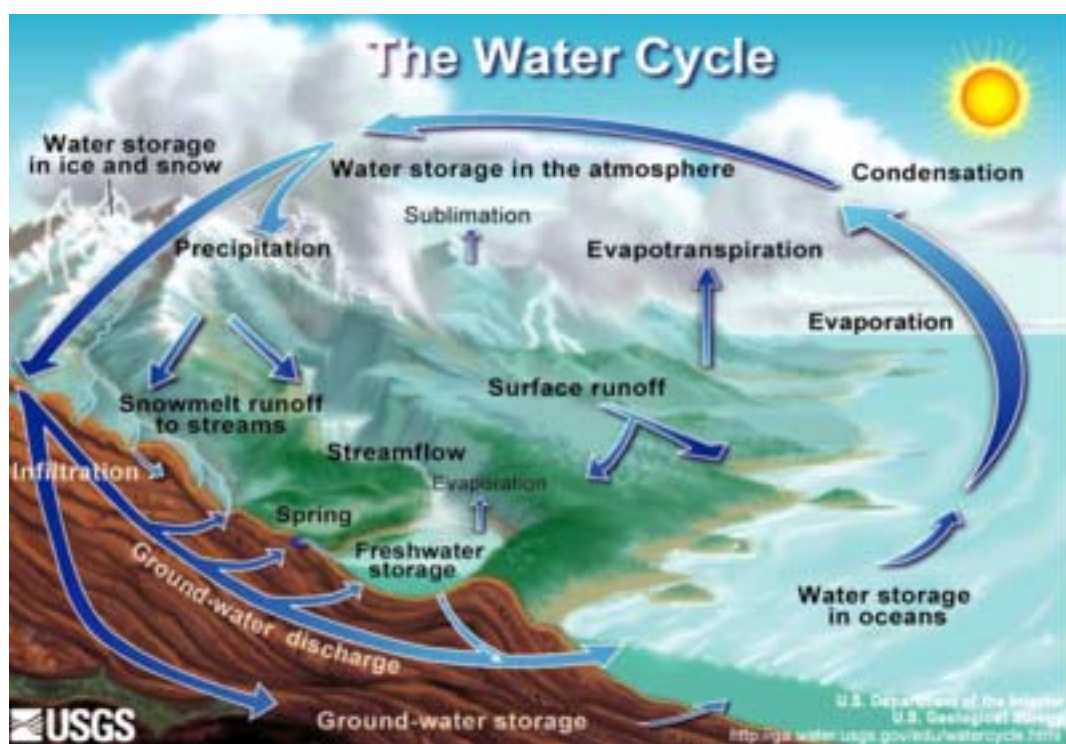
- 6.1 Εισαγωγή
- 6.2 Εφαρμογή Του Μοντέλου ARGUSONE Και Του Κώδικα Επίλυσης PTC Για Την Ανάλυση Ευαισθησίας Του Υδροφορέα Στην Λεκάνη του Κερίτη, Στην Περιοχή Της Αγυιάς
  - 6.2.1 ΓΕΝΙΚΑ
  - 6.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
- 6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας
  - 6.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ
  - 6.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ « ΣΕΝΑΡΙΩΝ»
- 6.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων
  - 6.4.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ
  - 6.4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ** **ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

## 1.1 Υδρολογικός κύκλος

Με το όρο υπόγεια ύδατα νοούνται οι υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την μελέτη τους είναι αναγκαία η σφαιρική εξέταση του θέματος σε συνδυασμό με την άμεση συσχέτιση με τον υδρολογικό κύκλο



Εικόνα 1.1 Ο κύκλος Του Νερού (U.S GEOLOGICAL SURVEY, [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov) )

Το υδρολογικό ισοζύγιο δίνεται από την σχέση

$$P - R - G - E - T = \Delta S \quad (1.1)$$

Όπου

*P: η βροχόπτωση*

*R: η επιφανειακή απορροή*

*G: η υπόγεια ροή*

*E: η εξάτμιση*

*T: η διαπνοή*

*ΔS: η μεταβολή ρυθμού αποθήκευσης νερού*

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν μόλις το 4% του όγκου των υδάτινων αποθεμάτων του πλανήτη, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ορθολογική ποσοτική και ποιοτική τους διαχείριση (Καρατζάς, 2003).

## **1.2 Ταξινόμηση των υπογείων υδάτων**

Τα υπόγεια ύδατα κινούνται σε δύο ζώνες:

- Την **ακόρεστη ζώνη** (unsaturated zone), όπου όλοι οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από αέρα και νερό συγχρόνως, εκτός από περιπτώσεις που προσωρινά καταλαμβάνονται μόνο με νερό – περίπτωση πλημμύρας. Περιλαμβάνει και δύο υποζώνες, την ζώνη εδαφικού ύδατος (soil water zone) και την ζώνη τριχοειδών φαινομένων (capillary zone).
- Την **κορεσμένη ζώνη** (zone of saturation), όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρεις με νερό και κάτω από την υδροστατική πίεση. Έχει ως άνω επιφάνεια τον υδροφόρο ορίζοντα όπου η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

### **1.3 Υδροφορείς (Aquifers)**

Υδροφορέας είναι ένας υπέδαφος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό, που μπορούν να προμηθεύουν με υδατικές ποσότητες γειτονικά φρέατα και πηγές.

Οι περισσότεροι υδροφορείς εκτείνονται σε μεγάλη έκταση και έτσι μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές.

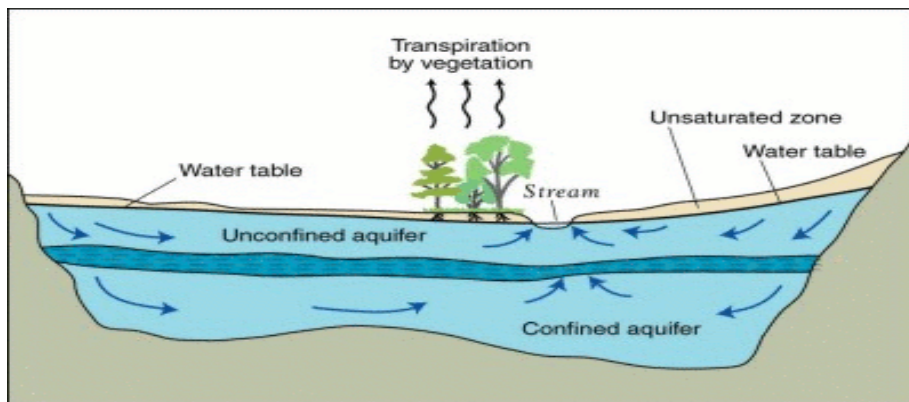
Οι υδροφορείς ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα (Καρατζάς, 2003) :

- Οι **ελεύθεροι υδροφορείς** (unconfined aquifers), όπου η ανώτερη επιφάνεια τους είναι ο υδροφόρος ορίζοντας.
- Οι **περιορισμένοι** ή αρτεσιανού υδροφορείς (confined aquifers), οι οποίοι περιέχουν νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζονται







Εικόνα 1.2 Περιορισμένος και ελεύθερος υδροφόρας (wikipedia, [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) )

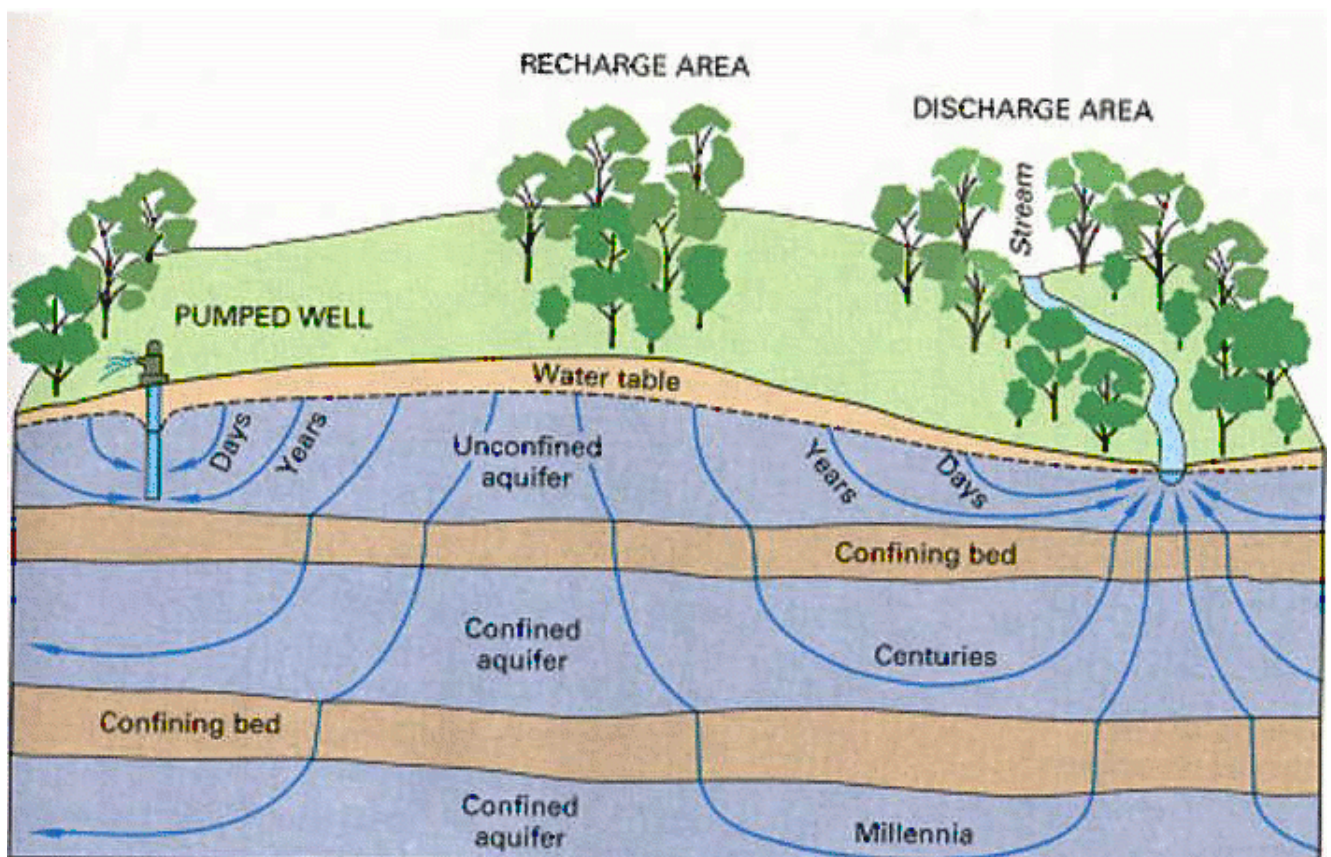
α.)



#### EXPLANATION

-  High hydraulic-conductivity aquifer
-  Low hydraulic-conductivity confining unit
-  Very low hydraulic-conductivity bedrock
-  Direction of ground-water flow

β.)



## **1.4 Παράμετροι των υδροφορέων**

Οι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να συγκροτούν και να μετακινούν το νερό. Οι βασικές ιδιότητες που τους χαρακτηρίζουν είναι:

α.) Το **πορώδες** (porosity) [n, ε]

Πορώδες είναι το ποσοστό του πετρώματος ή του εδάφους που δεν καταλαμβάνεται από στερεά υλικά (κενοί πόροι) και ορίζεται ως

**Πορώδες= όγκος όρων / συνολικός όγκος δείγματος**

$$n = \frac{V_v}{V_o} \quad (1.2)$$

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

1. Η κοκκομετρική σύνθεση.
2. Η διάταξη των κόκκων.
3. Το σχήμα των κόκκων.

β) Το **ενεργό πορώδες** (effective porosity  $n_e$ ), ή ειδική απόδοση (specific yield) :

Ενεργό πορώδες είναι το ποσοστό των πόρων που είναι διαθέσιμο για την ροή του ρευστού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό των πόρων  $i$  δεν επικοινωνούν μεταξύ τους

$$n_e = \frac{V_r}{V_o} \quad (1.2)$$

όπου

$V_v$ : ο όγκος του νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος του νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.

$V_o$ : ο συνολικός όγκος του εδάφους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ιζηματογενή πετρώματα δεν έχουν διακυμάνσεις στις τιμές του πορώδους και του ενεργού πορώδους, σε αντίθεση με τα αργιλώδη εδάφη που παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις

#### γ.) Η ειδική συγκράτηση

Ο όρος ειδική συγκράτηση αναφέρεται στο  $S_r$  όπου:

$$S_r = n - n_e \quad (1.3)$$

### **1.5 Υδραυλική αγωγιμότητα – Νόμος του Darcy**

#### **Νόμος του Darcy (Darcy 's Law)**

Το 1855 ο Henry Darcy, μμελέτησε τη ροή του νερού διαμέσου οριζοντίων στρωμάτων άμμου που συνήθως χρησιμοποιούνται σαν υδατικά φίλτρα. Το συμπέρασμα της μμελέτης του ήταν ότι ο ρυθμός ροής ( $Q/A$ ) διαμέσου πορώδους είναι ανάλογος των απωλειών φορτίου, ανάλογος ενός συντελεστή  $K$  που χαρακτηρίζει το πορώδες υλικό και αντιστρόφως ανάλογος του μμήκους πορείας της ροής. Η διατύπωση αυτή είναι γνωστή σαν νόμος του Darcy και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (1.4)$$

όπου

$Q$  : η παροχή ( $L^3/T$ )

$A$  : η επιφάνεια ( $L^2$ )

$K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

$\Delta h$  : η απώλεια φορτίου ( $L$ )

$L$  : το μήκος της στήλης

$q$  : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή ( $L/T$ )

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Η έκφραση  $\Delta h/L$  συνήθως εμφανίζεται στην γενική του μορφή ως  $\Delta h/dL$  και ονομάζεται υδραυλική κλίση.

Πρέπει να αναφερθεί ότι ο νόμος αυτός ισχύει για αριθμούς Reynolds,  $Re < 1$ . Έχει παρατηρηθεί όμως ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μμέχρι και για  $Re = 10$ . Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων η ροή συμβαίνει με  $Re < 1$ , πράγμα το οποίο εξασφαλίζει την χρήση του νομού του Darcy χωρίς καμιά προϋπόθεση, πλην των περιπτώσεων που έχουμε μεγάλη υδραυλική κλίση, όπως συμβαίνει κοντά σε ένα φρέαρ άντλησης καθώς και σε περιπτώσεις που έχουμε τυρβώδη ροή, όπως κοντά σε βασάλτη ή ασβεστόλιθο με μεγάλα ανοίγματα (Καρατζάς, 2003).

#### ➤ **Ταχύτητα διήθησης** (Seepage velocity)

Η ταχύτητα του Darcy, εξ' ορισμού θεωρεί ότι η ροή λαμβάνει χώρα διαμέσου της ολικής επιφάνειας χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το στερεό υλικό και τους πόρους. Ουσιαστικά όμως σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται μόνο εντός

του χώρου των πόρων και η πραγματική ταχύτητα ή ταχύτητα διήθησης δίνεται από την σχέση (Καρατζάς, 2003).

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -\frac{K}{n} \frac{dh}{dl} \quad (1.5)$$

όπου :

$q_p$  : η ταχύτητα διήθησης (L/T)

$Q$  : ο ρυθμός παροχής ( $L^3/T$ )

$A$  : η επιφάνεια ( $L^2$ )

$n$  : το πορώδες

$q$  : η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

$K$  : η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

$dh$  : η απώλεια φορτίου (L)

$dl$  : το μήκος της στήλης (L)

### ➤ Υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity – K)

Εάν θεωρήσουμε μία σειρά πειραμάτων ενός ομοιόμορφου ιδεώδους πορώδους μέσου, το οποίο αποτελείται από υάλινες σφαίρες διαμέτρου  $d$ , ομοιόμορφα κατανεμημένες, και δια μέσου του οποίου μελετάμε την ροή διαφόρων ρευστών που χαρακτηρίζονται από την πυκνότητά τους  $\rho$ , το ιξώδες  $\mu$ , και σταθερή υδραυλική κλίση  $dh/dl$ , παρατηρούμε ότι:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

όπου  $k = Cd^2$  και ορίζεται ως η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου

.Η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους μέσου σε αντίθεση με την ειδική διαπερατότητα και εκφράζεται σε μονάδες επιφάνειας ( $L^2$ ) (Freeze and Cherry, 1979).

➤ **Συντελεστής Μεταβιβασιμότητας (Transmissivity – T)**

Ο όρος της μεταβιβασιμότητας ορίζεται σαν ο ρυθμός με τον οποίο το νερό δεδομένου κινητικού ιξώδους μεταβιβάζεται διαμέσου μμοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μμοναδιαία υδραυλική αγωγιμότητα και εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$T = Kb$$

όπου :

*K*: η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

*b* : το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα ( $L$ )

*T* : ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας ( $L^2/T$ )

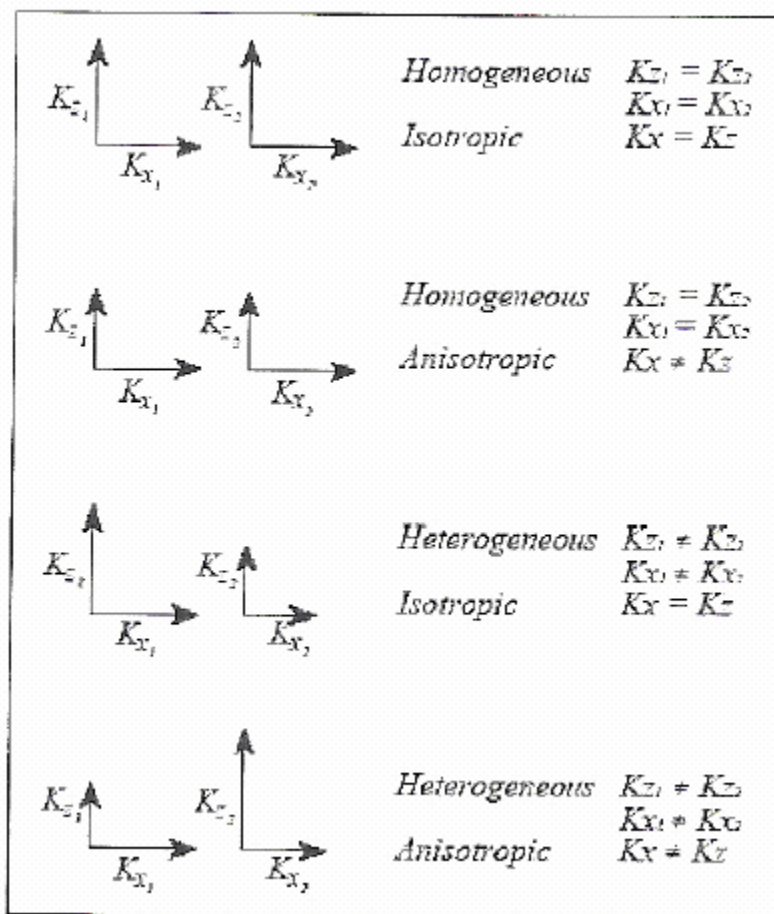
Η μεταβιβασιμότητα σε έναν περιορισμένο υδροφορέα είναι σταθερή εφόσον ο υδροφορέας είναι ομογενής και ομοιόμορφου πάχους. Ωστόσο η μεταβιβασιμότητα ενός ελεύθερου υδροφορέα μεταβάλλεται χωρικά καθώς το κορεσμένο πάχος του εξαρτάται από το υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα (Καρατζάς, 2003).

## **1.6 Ομοιογένεια και Ισορροπία (Homogeneity and Isotropy)**

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υδροφορέα συνήθως μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Σε δεδομένο σημείο είναι δυνατόν να μεταβάλλεται και ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση είναι η ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας και στην δεύτερη της ισότροπης ή ανισορροπίας. Σύμφωνα με τον Καρατζά (2003), για τη ομοιογένεια και ισορροπία ενός υδροφορέα προκύπτουν οι παρακάτω ορισμοί:

- **Ομοιογενής** (homogeneous) χαρακτηρίζεται ένας υδροφόρος που έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του.
- **Ετερογενής** (heterogeneous) χαρακτηρίζεται ένας υδροφόρος του οποίου οι υδραυλικές ιδιότητες αλλάζουν χωρικά.
- **Ισότροπος** (isotropic) χαρακτηρίζεται ο υδροφόρος ο οποίος σε οποιοδήποτε ορισμένο σημείο του έχει τις υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις.
- **Ανισότροπος** (anisotropic) χαρακτηρίζεται ο υδροφόρος με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε κατεύθυνση.

Σχήμα 1.3 : Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογενείας και ανισοτροπίας (Freeze and Cherry, 1979).



## **1.7 Γενική μορφή του νομού του Darcy**

Λόγω του φαινομένου της ανισορροπίας, στην περίπτωση της εφαρμογής του νομού του Darcy η ταχύτητα της υπόγειας ροής είναι διανυσματικό μέγεθος με συνιστώσες στις τρεις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Εάν ο άξονας του συστήματος των συντεταγμένων είναι κάθετος στην διεύθυνση των στρωμάτων και οι άλλοι παράλληλοι, τότε τις τρεις διευθύνσεις  $x$ ,  $y$ ,  $z$  έχουμε :

$$-x : \quad q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$-y : \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$-z : \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο νόμος του Darcy εμφανίζεται στην γενική του μορφή :

$$-x : \quad q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$-y : \quad q_y = -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$-z : \quad q_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΟΝΤΕΛΩΝ –** **ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ**

## **2.1 Εισαγωγή**

Το καλύτερο εργαλείο το οποίο βρίσκεται στη διάθεση των υδρογεωλόγων, για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων, είναι *ένα μοντέλο ροής υπογείων υδάτων*.

Ένα μοντέλο είναι κάθε εργαλείο το οποίο αναπαριστά προσεγγιστικά μια κατάσταση στο πεδίο. Τα μοντέλα διακρίνονται σε **φυσικά μοντέλα**, όπως οι εργαστηριακές δεξαμενές άμμου, τα οποία προσομοιώνουν την υπόγεια ροή άμεσα, και σε **μαθηματικά μοντέλα** τα οποία προσομοιώνουν την υπόγεια ροή έμμεσα.

Ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο αποτελείται από:

την **βασική εξίσωση**, η οποία αναπαριστά τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα, **τις εξισώσεις των οριακών συνθηκών** οι οποίες περιγράφουν τα υδραυλικά ύψη και τη ροή κατά μήκος των ορίων του μοντέλου, καθώς επίσης, σε προβλήματα μη σταθερών χρονικά συνθηκών, από **τις εξισώσεις των αρχικών συνθηκών** οι οποίες περιγράφουν την αρχική κατανομή των υδραυλικών υψών στο σύστημα.

Τα μαθηματικά μοντέλα επιλύονται με *αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους*. Εκτός από τις εφαρμογές στην υδραυλική φρεάτων, οι αναλυτικές λύσεις δεν χρησιμοποιούνται ευρέως σε πρακτικές εφαρμογές. Αντίθετα οι αριθμητικές λύσεις είναι πιο ευπροσάρμοστες και με τη χρήση υπολογιστών είναι πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν ακόμα και από τις πιο περίπλοκες αναλυτικές λύσεις.

## **2.2 Βασικές Εξισώσεις και Αριθμητικές Μέθοδοι**

### **2.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Τα συστήματα υπογείων υδάτων προσεγγίζονται από δύο θεωρήσεις:

- τη θεώρηση του υδροφορέα
- τη θεώρηση του συστήματος ροής

Η **θεώρηση του υδροφορέα** βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και του ελεύθερου υδροφορέα, και είναι κατάλληλη για αναλύσεις της ροής προς πηγάδια άντλησης καθώς επίσης είναι η βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων Thiem, Theis και Jacob. Γίνεται επίσης η παραδοχή ότι η υπόγεια ροή είναι αυστηρά οριζόντια μέσω των υδροφορέων και κάθετη δια μέσου των περιοριστικών στρωμάτων. Η θεώρηση του υδροφορέα χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της δισδιάστατης οριζόντιας ροής σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς, ενώ οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή προσομοιώνονται με βάση την ημι-τρισδιάστατη προσέγγιση. Στη θεώρηση αυτή τα υδραυλικά ύψη των περιοριστικών στρωμάτων δεν υπολογίζονται στη διαδικασία της προσομοίωσης. Η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης για τη θεώρηση του υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (3.1)$$

όπου

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

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

$h$ : το υδραυλικό ύψος

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

$S$ : ο συντελεστής αποθήκευτικότητας

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

$L$ : δηλώνει τη διαρροή μέσω ενός περιοριστικού στρώματος

$K_z$ : η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του περιοριστικού στρώματος

$b$ : το πάχος του στρώματος και

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

Όταν η εξίσωση (3.1) εφαρμόζεται σε ελεύθερο υδροφορέα τότε χρησιμοποιούνται οι παραδοχές Dupuit σύμφωνα με τις οποίες: 1) οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κάθετες, 2) η οριζόντια υδραυλική κλίση είναι ίση με τη κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους.

Η **θεώρηση του συστήματος ροής** αφορά στη τρισδιάστατη κατανομή των υδραυλικών υψών, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο μέσα στο σύστημα. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα, δίνοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα χειρισμού της ροής σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Η γενική μορφή της βασικής εξίσωσης για τη θεώρηση του συστήματος ροής είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.2)$$

Όπου

$K_x, K_y, K_z$ : οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας

$S_s$ : η ειδική αποθήκευτικότητα

$R^*$ : ο γενικός όρος δεξαμενής/πηγής ο οποίος καθορίζεται ως θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού, και καθορίζει τον όγκο των εισροών στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα, ανά μονάδα χρόνου. Σε περίπτωση άντλησης ισχύει

$$R^* = -W.$$

Η εξίσωση (3.1) απορρέει από τη μαθηματική σύνδεση ενός υδατικού ισοζυγίου με το νόμο του Darcy.

Σύμφωνα με το υδατικό ισοζύγιο που εκφράζει την αρχή διατήρησης της μάζας ισχύει:

$$\text{Έξοδος} - \text{Είσοδος} = \text{Αλλαγή στην Αποθήκευση} \quad (3.3)$$

Ο νόμος του Darcy χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της ροής  $q$  και του υδραυλικού ύψους  $h$ . Στις τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy γράφεται

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.4)$$

Στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) θεωρείται ότι οι συνιστώσες  $K_x, K_y, K_z$ , (ή  $T_x, T_y$ ) είναι παράλληλες με τους άξονες  $x, y, z$ . Εάν η γεωλογία είναι τέτοια, ώστε να

μην επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, τότε απαιτείται μια τροποποιημένη μορφή της βασικής εξίσωσης του συστήματος που χρησιμοποιεί το διάνυσμα της υδραυλικής αγωγιμότητας στη παρακάτω μορφή:

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

Τα στοιχεία του πίνακα μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης, αλλά όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται μετάθεση των συντεταγμένων έτσι ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία που βρίσκονται εκτός της κυρίας διαγωνίου. [3]

### **2.2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

Υπάρχουν πέντε αριθμητικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων:

- i. Πεπερασμένων διαφορών (finite differences)
- ii. Πεπερασμένων στοιχείων (finite elements)
- iii. Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές (Integrated finite differences)
- iv. Μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης (Boundary Integral equation method)
- v. Αναλυτικά στοιχεία (Analytic elements)

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

Ένα πρόγραμμα ή κώδικας στον υπολογιστή επιλύει μια ομάδα από αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες παράγονται από την προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες σχηματίζουν το μαθηματικό μοντέλο. Οι διαδικασίες προσέγγισης όπως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών, και πεπερασμένων στοιχείων επιδρούν στο μαθηματικό μοντέλο και το αλλάζουν σε μια φόρμα η οποία μπορεί να επιλυθεί γρήγορα από τον υπολογιστή. Η ομάδα των αλγεβρικών εξισώσεων που παράγεται με αυτό τον τρόπο μπορεί να εκφραστεί και σαν εξίσωση πίνακα.

Η επιλογή ανάμεσα σε μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και μια μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί καθώς και από την προτίμηση του χρήστη. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι εύκολη ως προς την κατανόηση αλλά και τον προγραμματισμό, καθώς επίσης χρειάζονται λιγότερα δεδομένα εισόδου για την κατασκευή του πλέγματος του μοντέλου. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει μεγαλύτερη ικανότητα στην προσέγγιση ορίων με ακανόνιστα σχήματα, είναι ευκολότερη στην προσαρμογή του μεγέθους ξεχωριστών στοιχείων αλλά και της θέσης των ορίων. Επίσης η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι καλύτερη σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών στο να χειριστεί εσωτερικά όρια καθώς και να προσομοιώσει σημειακές πηγές, δεξαμενές, επιφάνειες διαρροής και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες.

Στην πραγματικότητα έχει αποδειχτεί από πολλούς επιστήμονες (Pinder και Gray (1976), Wang και Anderson (1977) ) ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Παρόλα αυτά υπάρχει μια βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους: η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο η οποία είναι επίσης το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού το οποίο περιβάλλει τον κόμβο. Με αυτό τον τρόπο δεν γίνεται καμία εκτίμηση για τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίζει ακριβώς την διακύμανση του

υδραυλικού ύψους σε ένα στοιχείο με τη μέθοδο της παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά είναι καθορισμένα παντού με χρήση βασικών συναρτήσεων. [3]

## **2.3 Θεμελιώδες Μοντέλο και σχεδιασμός πλέγματος**

### **2.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

Το θεμελιώδες μοντέλο είναι μια γραφική αναπαράσταση του συστήματος ροής των υπογείων υδάτων, το οποίο συνήθως έχει τη μορφή διαγράμματος με κουτιά ή διατομής. Η φύση του μοντέλου θα καθορίσει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και το σχεδιασμό του πλέγματος. Ο σκοπός της κατασκευής του θεμελιώδους μοντέλου είναι η απλοποίηση του προβλήματος του πεδίου, καθώς και η οργάνωση των δεδομένων που προέρχονται από το πεδίο έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αναλυθεί πιο εύκολα. Οι απλοποιήσεις είναι απαραίτητες λόγω του ότι μια πλήρης αναπαράσταση του συστήματος του πεδίου δεν είναι εφικτή. Στην πράξη είναι επιθυμητό το θεμελιώδες μοντέλο να έχει απλοποιηθεί όσο περισσότερο γίνεται, ενώ ταυτόχρονα να διατηρεί αρκετή πολυπλοκότητα έτσι ώστε να αναπαριστά επαρκώς τη συμπεριφορά του συστήματος. Είναι κριτικής σημασίας το θεμελιώδες μοντέλο να αποτελεί μια έγκυρη αναπαράσταση των σημαντικών υδρογεωλογικών συνθηκών του συστήματος.

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



### ***a. Καθορισμός των υδροστρωματογραφικών μονάδων.***

Γεωλογικές πληροφορίες, όπως γεωλογικοί χάρτες και διατομές, πηγάδια και γεωλογικά καρότα, συνδυάζονται με πληροφορίες ως προς τις υδρογεωλογικές ιδιότητες του συστήματος, για τον καθορισμό των υδροστρωματογραφικών μονάδων του θεμελιώδους μοντέλου. Με απλά λόγια οι υδροστρωματογραφικές μονάδες αποτελούνται από γεωλογικές μονάδες με παρόμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες. Αρκετοί γεωλογικοί σχηματισμοί είναι δυνατόν να συνδυαστούν μέσα σε μία μοναδική υδροστρωματο-γραφική μονάδα ή ένας γεωλογικός σχηματισμός μπορεί να υποδιαιρείται σε υδροφορείς και περιοριστικές μονάδες. Οι γεωλόγοι βασίζονται σε στρωματογραφικές πληροφορίες και στην κατανόηση της ιστορίας της εναπόθεσης του ιζήματος, για να ανακατασκευάσουν το περιβάλλον της εναπόθεσης. Η έννοια της υδροστρωματο-γραφικής μονάδας χρησιμοποιείται κυρίως για προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα. Σε μικρότερες κλίμακες όμως αυτό είναι δύσκολο να γίνει γιατί για να οριστούν οι υδροστρωματογραφικές μονάδες σε αυτή τη κλίμακα, απαιτούνται λεπτομερείς (ως προς την τοποθεσία) πληροφορίες για τη στρωματογραφία και την υδραυλική αγωγιμότητα, οι οποίες είναι σπάνια διαθέσιμες. [3]

### ***b. Εκτίμηση του Υδρολογικού Ισοζυγίου***

Οι πηγές νερού προς το σύστημα μαζί με τις αναμενόμενες διευθύνσεις ροής του νερού και τα σημεία εξόδου πρέπει να αποτελούν μέρος του θεμελιώδους μοντέλου. Το υδατικό ισοζύγιο, το οποίο βασίζεται σε μετρήσεις πεδίου, παρουσιάζει τα μεγέθη των εισροών και εκροών του υπόγειου υδροφορέα καθώς και τις αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του συστήματος. Οι εισροές περιλαμβάνουν φόρτιση του υπόγειου υδροφορέα από τη βροχή, από επιφανειακά ύδατα, την επιφανειακή και υπόγεια απορροή. Οι εκροές περιλαμβάνουν τις

πηγές, την ροή προς χείμαρρους, την υπόγεια απορροή, την εξατμισοδιαπνοή και την άντληση. [3]

### ***c. Καθορισμός του συστήματος ροής***

Για την μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων μέσα στο σύστημα χρησιμοποιούνται υδρολογικές πληροφορίες δηλαδή μετρήσεις για τη βροχή, την εξάτμιση, την επιφανειακή απορροή, σε συνδυασμό με δεδομένα για τα υδραυλικά ύψη, και γεωχημικά δεδομένα. Μετρήσεις του επιπέδου του νερού, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της γενικής διεύθυνσης της υπόγειας ροής, της τοποθεσίας των περιοχών φόρτισης και αποφόρτισης του υδροφορέα, της σύνδεσης μεταξύ υδροφορέων και συστημάτων επιφανειακών υδάτων. Ο καθορισμός του συστήματος ροής μπορεί να βασιστεί μόνο σε φυσικά υδρολογικά στοιχεία, ενώ στοιχεία χημείας του νερού χρησιμοποιούνται για να αναγνωριστούν οι πηγές και η ποσότητα εμπλουτισμού, να εκτιμηθούν οι ρυθμοί υπόγειας ροής και να οριστούν τοπικά, ενδιάμεσα και περιφερειακά συστήματα ροής. [3]

### **2.3.2 ΤΥΠΟΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ**

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να ταξινομήσουμε τα μοντέλα ροής υπογείων υδάτων. Τα μοντέλα διακρίνονται σε μεταβατικών ή σταθερών συνθηκών, περιορισμένου ή ελεύθερου υδροφορέα και θεωρούνται μιας, δύο ή τριών χωρικών διαστάσεων. Για την κατασκευή του πλέγματος ενός αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιούνται τα μοντέλα τα οποία ταξινομούνται με βάση τις χωρικές διαστάσεις. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε:

Δισδιάστατα χωρικά, ημι-τρισδιάστατα, κάθετων τομών και πλήρη τρισδιάστατα. Τα δισδιάστατα χωρικά και ημι-τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούν την θεώρηση του υδροφορέα ενώ τα κάθετων τομών και πλήρη τρισδιάστατα μοντέλα την θεώρηση του συστήματος ροής. [3]

### **2.3.2.1 Δισδιάστατα χωρικά μοντέλα**

Οι δισδιάστατες χωρικές προσομοιώσεις αφορούν τέσσερις διαφορετικούς τύπους υδροφορέων. Οι υδροφορείς αυτοί περιγράφονται παρακάτω:

#### ***a. Περιορισμένοι Υδροφορείς***

Κατά την προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων, οι συντελεστές μεταβασιμότητας και αποθηκευτικότητας καθορίζονται για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Μεταβολές στην μεταβασιμότητα μπορεί να αντιπροσωπεύουν αλλαγές είτε στην υδραυλική αγωγιμότητα είτε στο πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο χωρικό μοντέλο, η ανισοτροπία στη μεταβασιμότητα εκφράζεται από τη διαφορά ανάμεσα στη μεταβασιμότητα στον  $x$  και στον  $y$  άξονα ( $T_x$  και  $T_y$ ). Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου μπορεί να αποτελούνται από τους δύο πίνακες μεταβασιμότητας ή από τον πίνακα  $T_x$  και έναν ανισοτροπικό παράγοντα που υπολογίζει τον πίνακα  $T_y$  από τον πίνακα  $T_x$ . Η μεταβασιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από βιβλιογραφικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και από εκτιμήσεις του πάχους του υδροφορέα. [3]

#### ***b. Περιορισμένοι Υδροφορείς με διαρροή***

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή το περιορισμένο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που διαρρέει στον περιορισμένο υδροφορέα δεν αναπαρίστανται ρητά στο μοντέλο αλλά προσομοιώνονται μέσω ενός όρου διαρροής. Ο όρος της διαρροής είναι μία συνάρτηση του συντελεστή διαρροής ( $L$ ) η οποία είναι ο λόγος της κατακόρυφης υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K_z'$ ) του περιορισμένου στρώματος ως προς το πάχος του περιορισμένου στρώματος ( $b'$ ).

$$L = K_z' / b' \quad (3.5)$$

Οι τιμές της διαρροής καθώς και η διανομή του υδραυλικού ύψους στον υδροφορέα πηγή καθορίζονται από πίνακες.

Η πηγή του νερού στον περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή μπορεί να είναι ένας άλλος περιορισμένος υδροφορέας ή ένας ελεύθερος υδροφορέας ή ακόμα ένα επιφανειακό στρώμα νερού. Το μοντέλο γενικά υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος στη πηγή είναι σταθερό με το χρόνο, με άλλα λόγια, οι υδρολογικές πιέσεις στον περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή δεν ασκούν καμία επίδραση στο υδραυλικό ύψος στον υδροφορέα πηγή. Άλλη μία παραδοχή που γίνεται στην προσομοίωση των υδροφορέων αυτών είναι ότι δεν υπάρχει καμία απελευθέρωση νερού από την αποθηκευμένη ποσότητα μέσα στο περιορισμένο στρώμα. Η παροδική απελευθέρωση νερού από το περιοριστικό στρώμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει κατά την περίοδο:

$$t_s = S_s' b'^2 / 2K_z'$$

όπου  $S_s'$  και  $K_z'$  είναι αντίστοιχα η ειδική αποθηκευτικότητα και η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του περιορισμένου στρώματος και  $b'$  είναι το πάχος του περιορισμένου στρώματος. [3]

### ***c. Ελεύθεροι Υδροφορείς***

Οι περισσότερες εφαρμογές μοντελοποίησης που αφορούν ελεύθερους υδροφορείς χρησιμοποιούν τις παραδοχές Dupuit, οι οποίες εγγυώνται την οριζόντια ροή θεωρώντας ότι δεν υπάρχει αλλαγή του υδραυλικού ύψους με το βάθος. Η χρήση των παραδοχών Dupuit έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή ενός τρισδιάστατου προβλήματος σε δισδιάστατο χωρικό πρόβλημα και ενός

δισδιάστατου προβλήματος καθέτων τομών σε μονοδιάστατο πρόβλημα. Το μοντέλο υπολογίζει την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε κόμβο. Οι προσομοιώσεις που περιλαμβάνουν έναν ελεύθερο υδροφορέα απαιτούν πίνακες που καθορίζουν την υδραυλική αγωγιμότητα, την ειδική απόδοση και την ανύψωση του επιπέδου αναφοράς. Επειδή οι προσομοιώσεις γίνονται συνήθως βάση της δισδιάστατης χωρικής άποψης, οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας πρέπει να υπολογίζονται κατά μέσο όρο κατακόρυφα όταν χρησιμοποιούνται σημειακά δεδομένα ή να παίρνονται από τεστ άντλησης. Οι τιμές της ειδικής απόδοσης μπορούν επίσης να παρθούν από τεστ άντλησης, τα οποία όμως δεν είναι πάντα αξιόπιστα. Η ειδική απόδοση κυμαίνεται από 0,1 έως 0,4.

Όταν δεν είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθούν οι παραδοχές Dupuit, αντί για δισδιάστατα χωρικά μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δισδιάστατα μοντέλα κάθετων τομών ή πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα. [3]

#### ***d. Μικτά συστήματα υδροφορέων***

Ένα μικτό σύστημα υδροφορέων αποτελείται από διάφορους συνδυασμούς των παραπάνω τριών τύπων υδροφορέων. Ένας υδροφορέας μπορεί να μεταβάλλεται χωρικά από ελεύθερες σε περιορισμένες συνθήκες ή μπορεί να υποστεί την αντίθετη μεταβολή ως αποτέλεσμα άντλησης.

#### **2.3.2.2 Ημι-τρειςδιάστατα μοντέλα**

Ένα ημι-τρειςδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια σειρά υδροφορέων με αδιαπέραστα στρώματα που παρεμβαίνουν μεταξύ των υδροφορέων. Όπως και στα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα περιορισμένων υδροφορέων με διαρροή, τα περιορισμένα στρώματα δεν αναπαρίστανται ρητά στο ημι-τρειςδιάστατο μοντέλο, ούτε τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στα αδιαπέραστα στρώματα. Η επίδραση

ενός περιορισμένου στρώματος προσομοιώνεται μέσω ενός όρου διαρροής ( $L_{i,j}$ ) το οποίο αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη ροή ανάμεσα σε δύο υδροφορείς. Ο όρος της διαρροής είναι μία συνάρτηση του συντελεστή διαρροής ( $L$ ) όπως εκφράζεται στην εξίσωση (3.5) και της διαφοράς του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του περιορισμένου στρώματος. Η περίπτωση απελευθέρωσης αποθηκευμένου νερού ανάμεσα στα αδιαπέραστα στρώματα τυπικά δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτή την προσέγγιση. Σε ένα ήμι-τρισδιάστατο μοντέλο το υδραυλικό ύψος της μονάδας νερού πάνω από το ανώτερο αδιαπέραστο στρώμα (συνήθως ένας ελεύθερος υδροφόρας) μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από το μοντέλο.

Αγνοώντας την οριζόντια ροή στα αδιαπέραστα στρώματα προκαλείται μια διαφορά μικρότερη από 5% στα υδραυλικά ύψη των μοντελοποιημένων στρωμάτων, όταν ο βαθμός διαφοράς της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ του υδροφόρα και των περιοριστικών στρωμάτων είναι τουλάχιστον δύο τάξεις μεγέθους (Neuman και Witherspoon, 1969). Όταν υπάρχει μικρότερη διαφορά από δύο τάξεις μεγέθους μεταξύ της υδραυλικής αγωγιμότητας των αδιαπέραστων στρωμάτων και των υδροφορέων, προτιμάται ένα πλήρες τρισδιάστατο μοντέλο. [3]

### **2.3.2.3 Κάθετων τομών και Πλήρη τρισδιάστατα μοντέλα**

Τα δισδιάστατα μοντέλα κάθετων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα προσομοιώνουν το σύστημα με βάση την θεώρηση συστήματος ροής. Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα ουσιαστικά έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε πίνακες όπως και τα δισδιάστατα χωρικά μοντέλα με τη διαφορά ότι οι πίνακες παραμέτρων πρέπει να καθορίζονται για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα μοντέλα κάθετων τομών είναι ένας ειδικός τύπος μοντέλων των οποίων τα δεδομένα εισόδου μπορεί να δομηθούν όμοια με αυτά των δισδιάστατων χωρικών μοντέλων περιορισμένων υδροφορέων ή των πλήρως τρισδιάστατων μοντέλων.

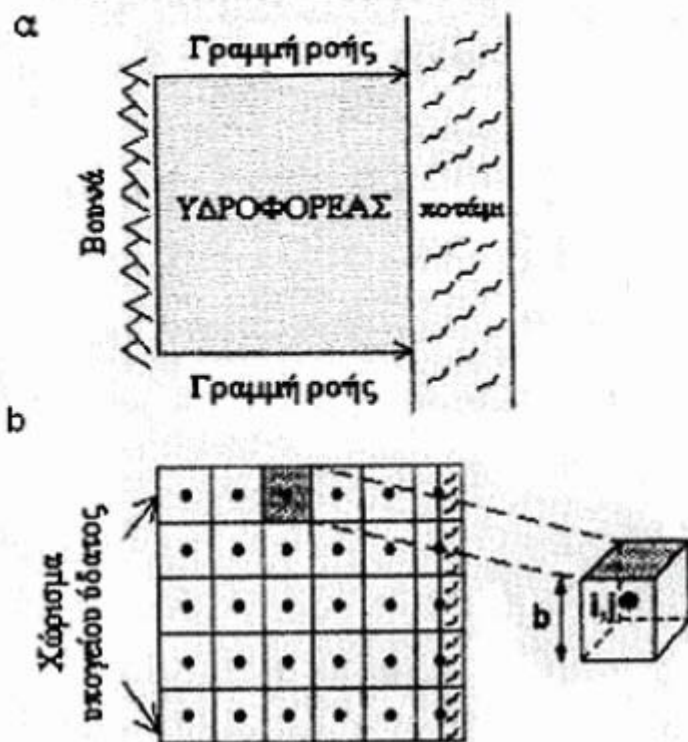
Τα μοντέλα καθέτων τομών και τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων όταν οι κατακόρυφες κλίσεις του υδραυλικού ύψους είναι σημαντικές. Στα μοντέλα αυτά ο υδροφόρος ορίζοντας αποτελεί μέρος του ορίου. Αμφότερα τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να προσομοιώσουν υδροφορείς σε κάθετη τομή, ενώ για τη κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση παροδικής απελευθέρωσης αποθηκευμένου νερού ανάμεσα από τα αδιαπέραστα στρώματα, λαμβάνοντας το αδιαπέραστο στρώμα σαν στρώμα με προσδιορισμένη τιμή ειδικής αποθηκευτικότητας. [3]

### **2.3.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

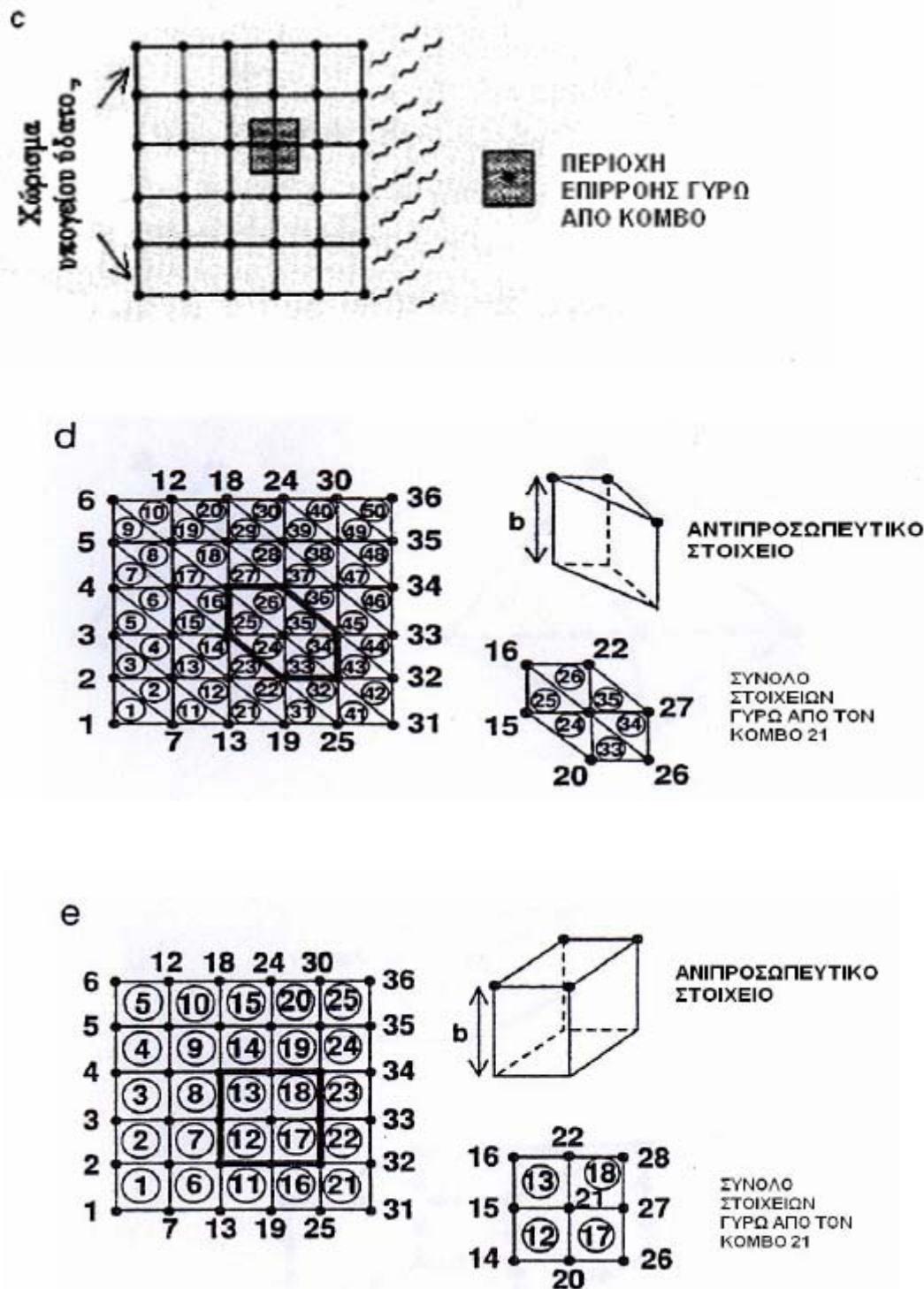
Σε ένα αριθμητικό μοντέλο το πεδίο του προβλήματος αντικαθίσταται από ένα διακριτοποιημένο πεδίο το οποίο αποτελείται από ένα πίνακα κόμβων και τα αντίστοιχα κελιά πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Το πλέγμα των κόμβων αποτελεί το πλαίσιο εργασίας του αριθμητικού μοντέλου. Η επιλογή μοντέλου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

Υπάρχουν δύο τύποι πλέγματος πεπερασμένων διαφορών: το στοιχείο-κεντρικό (block-centered) (σχήμα.3.1b) και το δίκτυο-κεντρικό (mesh centered) πλέγμα (σχήμα 3.1c). Η διαφορά μεταξύ τους έγκειται στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις οριακές συνθήκες ροής. Στα στοιχείο-κεντρικά πλέγματα οι οριακές συνθήκες ροής τοποθετούνται πάντα στα άκρα των τετραγώνων ενώ στα δίκτυο-κεντρικά οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με ένα κόμβο.

Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει μεγαλύτερη ευχέρεια στο σχεδιασμό του πλέγματος. Τα δισδιάστατα στοιχεία είναι τριγωνικά ή τετραγωνικά (σχήμα 3.1d,e) ενώ τα τρισδιάστατα είναι τετράεδρα, εξαέδρα ή πρίσματα. Η συνάρτηση της παρεμβολής η οποία προσδιορίζει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο, καθορίζει εάν το στοιχείο θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στοιχείο είναι το γραμμικό.







**Σχήμα 2.1** : Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων (Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992)

Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1a στην περιοχή του προβλήματος, ορίζονται οριακές συνθήκες μηδενικής ροής για την έκταση των βουνών και κατά μήκος των γραμμών ροής. Το ποτάμι διαπερνά πλήρως των υδροφορέα και μπορεί να αναπαρασταθεί από οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους.

Στο σχήμα 3.1b απεικονίζεται το στοιχειο- κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Οριακές συνθήκες μηδενικής ροής ορίζονται στις πλευρές των τετραγώνων. Η οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους του ποταμού εγκαθίσταται πάνω σε κόμβους.

Στο Σχήμα 3.1c παρουσιάζεται το δίκτυο-κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών. Αμφότερες οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής και σταθερού υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς πάνω στους κόμβους.

Στα Σχήματα 3.1d και 3.1e απεικονίζονται το τριγωνικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και το τετραγωνικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων αντίστοιχα. Στα δύο αυτά σχήματα οι αριθμοί των κόμβων αναγράφονται, ενώ σε κύκλο είναι οι αριθμοί των στοιχείων. Αμφότερες οι οριακές συνθήκες μηδενικής ροής και καθορισμένου υδραυλικού ύψους τοποθετούνται ακριβώς πάνω στους κόμβους των πλεγμάτων.

Σε ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών είναι σημαντικό να προσανατολιστεί το πλέγμα έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι κόμβοι οι οποίοι πέφτουν εκτός των ορίων της μοντελοποιημένης επιφάνειας. Οι κόμβοι αυτοί ονομάζονται ανενεργοί ενώ αυτοί που βρίσκονται εντός της μοντελοποιημένης επιφάνειας ονομάζονται ενεργοί. Τα πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων δεν έχουν ανενεργούς κόμβους γιατί τα στοιχεία ταιριάζουν ακριβώς στα όρια της περιοχής.

## **2.4 Οριακές συνθήκες**

### **2.4.1 ΕΙΔΗ ΟΡΙΩΝ**

Οι οριακές συνθήκες είναι μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες καθορίζουν την εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) ή την παράγωγο αυτής (ροή) στα όρια του πεδίου ελέγχου του προβλήματος. Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι ένα κρίσιμο βήμα στο σχεδιασμό του μοντέλου.

Τα φυσικά όρια των συστημάτων ροής υπογείων υδάτων δημιουργούνται από την παρουσία ενός αδιαπέραστου στρώματος (βράχου) ή ενός μεγάλου στρώματος επιφανειακού νερού. Επιπλέον όρια δημιουργούνται ως αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών. Τα όρια αυτά είναι νοητά και καλούνται υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια.

Τα υδρογεωλογικά όρια αναπαρίστανται από τους παρακάτω τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών:

- *1ος τύπος οριακών συνθηκών:* Συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (συνθήκες Dirichlet) για τις οποίες το υδραυλικό ύψος είναι δεδομένο.
- *2ος τύπος οριακών συνθηκών:* Συνθήκες σταθερής ροής (συνθήκες Neumann), για τις οποίες η ροή (παράγωγος του υδραυλικού ύψους) διαμέσου του ορίου είναι δεδομένη.
- *3ος τύπος οριακών συνθηκών:* Συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος (Cauchy ή μικτές οριακές συνθήκες) για τις οποίες η ροή διαμέσου του ορίου υπολογίζεται με βάση μια δεδομένη τιμή του υδραυλικού ύψους. Αυτός ο τύπος οριακών

συνθηκών καλείται και ως μικτές οριακές συνθήκες λόγω του ότι συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με την οριακή ροή.

Η τοποθεσία μιας οριακής συνθήκης μέσα στο πλέγμα εξαρτάται από το αν χρησιμοποιείται στοιχειο-κεντρικό (block-centered) ή δικτυο-κεντρικό (mesh centered) πλέγμα πεπερασμένων διαφορών ή πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.

**(Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, M.Anderson-W.Woessner)**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ARGUS ONE** **GIS** **ΚΑΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PTC**

### **3.1 Εισαγωγή**

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι μία σύντομη αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis καθώς και μία εκτενής περιγραφή του θεωρητικού υποβάθρου του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code).

### **3.2 Σύντομη αναφορά στο λογισμικό Argus One Gis**

Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών , που χρησιμοποιείται για μοντελοποίηση με την χρήση αριθμητικών μεθόδων . Ασχολείται με τα περισσότερα μοντέλα υπογείων υδάτων που υπάρχουν και χρησιμοποιείται από υδρογεωλόγους για την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης των διάφορων υδροφορέων . Μ άλλα λόγια , το Argus One αποτελεί ένα ιδανικό περιβάλλον για την μοντελοποίηση της ροής υπογείων υδάτων και περιλαμβάνει μία μεγάλη ποικιλία μοντέλων που χρησιμεύουν για τον σκοπό αυτό .

Το Argus One περιλαμβάνει τα ακόλουθα μοντέλα :

- .Το MODFLOW, ένα αρθρωτό τρισδιάστατο μοντέλο υπογείων υδάτων που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και επιτυγχάνει να προσομοιώσει τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών και να εκτιμήσει παραμέτρους.
- Το PTC, ένα προηγμένο τρισδιάστατο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών που προσομοιώνει την ροή και μεταφορά υπογείων υδάτων
- Το NAPL, ένα μοντέλο προσομοίωσης της ρύπανσης του εδάφους και των υδροφορέων από οργανικά υγρά , γνωστά ως υγρά μ η υδατώδους φάσης .

- Το SUTRA, ένα μοντέλο που προσομοιώνει την κορεσμένη και ακόρεστη ροή , ροή υγρού σταθερής ή μεταβλητής πυκνότητας και μεταφορά διαλυμένων ουσιών και ενέργειας .
- Το HST3D, ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση ρευστών , διαλυμάτων μιας ουσίας και μεταφοράς θερμότητας στις τρεις διαστάσεις και υπό συνθήκες κορεσμού . Επίσης , επιτρέπει την προσομοίωση της προσρόφησης και της αποσύνθεσης .

Άλλα μοντέλα είναι το FEMWATER, το Acunsaf2d, το CFEST και το FEM3DmeshE-Pie

### **3.3 Περιγραφή του μοντέλου PTC**

Το μοντέλο PTC πραγματοποιεί την επίλυση των χωρικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή υπογείων υδάτων και την μεταφορά ρύπων . Έχει σχεδιαστεί κατά βάση για τους πρακτικούς υδρολόγους παρά για θεωρητικούς και επικεντρώνεται στις αριθμητικές μεθόδους και στην βιβλιογραφία που αφορά στις πηγές υδάτων ενώ δεν ασχολείται με τις λεπτομέρειες για την ανάπτυξη εξισώσεων και την ανάλυση σφάλματος

### **3.3.1 ΚΥΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Το PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για τη αναπαράσταση της ροής υπογείων υδάτων βάση:

- το υδραυλικό ύψος hf:

$$\frac{\theta}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\theta}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\theta}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (4.1)$$

- τις συνιστώσες της ταχύτητας ροής των υπογείων υδάτων :

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (4.2)$$

- τη μεταφορά ρύπου σε σχέση με την συγκέντρωσή του:

$$\begin{aligned} & \frac{\theta}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\theta}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\theta}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + Q(c^* - c) - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης μάζας και τον νόμο του Darcy. Οι ορισμοί των μεγεθών που αναφέρθηκαν θα επεξηγηθούν παρακάτω. Η λύση των εξισώσεων ακολουθεί την εξής διαδικασία :

α) πρώτα λύνουμε την 4.1 ως προς το υδραυλικό ύψος hf

β) στη συνέχεια υπολογίζουμε τις ταχύτητες του Darcy από τις εξισώσεις 4.2 α,β,γ (Vx,Vy,Vz)

γ) τέλος λύνουμε την 4.3 ως προς την συγκέντρωση του ρύπου c.



### **3.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ ΛΥΣΗ ΤΟΥ PTC**

Η λύση του συστήματος των εξισώσεων 4.1,4.2,4.3 για σύνθετα φυσικά συστήματα ,γενικά, απαιτεί εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα απεικόνισης πεδίου η υπολογιστική διαδικασία, με αριθμητική λύση της κάθε τρισδιάστατες εξίσωσης ξεχωριστά είναι μεγάλη και δύσκολη.

Το PTC διαθέτει ένα μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για τη ολοκληρωμένη επίλυση των 3διαστατων εξισώσεων , ο οποίος μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό μέρος . Ο αλγόριθμος στηρίζεται σε έναν προσεγγιστικό διαχωρισμό του πεδίου ορισμού σε οριζόντια παράλληλα επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο ένα συγκεκριμένο πεπερασμένο διακριτικό στοιχείο , χρησιμοποιείται για τη ακριβή απεικόνιση του ακαθόριστου πεδίου ορισμού, δηλαδή ο διαχωρισμός στα οριζόντια στρώματα γίνεται με βάση ένα χαρακτηριστικό (πεπερασμένο ) στοιχείο που διέπει όλο το στρώμα ξεχωρίζοντας το από τα υπόλοιπα.

Τα επίπεδα είναι συνδεδεμένα κάθετα με πεπερασμένες διαφορές . Η διαχωριστική διαδικασία εξασφαλίζεται με την μέθοδο της υδρόβιας ένωσης των πεπερασμένων στοιχείων με τις πεπερασμένες διαφορές.

Κατά την διάρκεια μιας επανάληψης ,δεδομένης διάρκειας , όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα . Στο πρώτο όλα τα πεπερασμένα χαρακτηριστικά στοιχεία της οριζόντιας διεύθυνσης επιλύονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Στο δεύτερο βήμα λύνονται οι κάθετες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα.

### **3.4 Τρισδιάστατη Ροή υπογείων Υδάτων**

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία υπολογισμού του παροδικού υδραυλικού ύψους  $h_f(x,y,z,t)$  επιλύοντας την εξίσωση ροής (4.1)

### **3.4.1 ΚΥΡΙΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά ροής ενός συστήματος υπογείων υδάτων , επιλύοντας ως προς το υδραυλικό ύψος ,hf, την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-S\frac{\partial h}{\partial t}+\sum_{i=1}^r Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)=0 \quad (4.4)$$

→ χρησιμοποιώ τις μονάδες μετρήσεις των μεγεθών σε S.I

όπου:

$hf$  → υδραυλικό ύψος (L)

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

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

$K_{zz}$  → υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη z διεύθυνση [ $LT^{-1}$ ]

$S$  → αποθηκευτική ικανότητα [ $L^{-1}$ ]

$Q_i$  → παροχή (πηγή, γεώτρηση στο σημείο i) [ $L^3T^{-1}$ ]

$\delta$  → η συνάρτηση Δέλτα

$r$  → ο αριθμός των πηγαδιών

για μεγαλύτερη διευκόλυνση μας ο τελευταίος όρος θα χρησιμοποιείται ως Q

Η βασική εξίσωση (4.4) λύνεται αριθμητικά από το PTC χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

### **3.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ**

Το διαχωριστικό ,σχήμα που χρησιμοποιείται από το PTC για την επίλυση της εξίσωσης 4.4 ασχολείται με την προσέγγιση των ορίων της εξίσωσης 4.4 που περιέχουν τις  $x$  και  $y$  συνιστώσες χρησιμοποιώντας την μέθοδο του πεπερασμένου στοιχείου .Τα πεπερασμένα στοιχεία στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιούνται ευρέως(π.χ Pinder and gray 1977)

Η μέθοδος των πεπερασμένου στοιχείου υποθέτει ότι υπάρχει ένα άθροισμα απείρων συναρτήσεων που μπορούν να αναπαραστήσουν με ακρίβεια την λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει την ροή των υπογείων υδάτων .

Μια πεπερασμένη προσέγγιση σε μορφή σειράς είναι

$$h(x, y, z, t) \sim \hat{h}(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (4.5)$$

όπου :

$h \rightarrow$  υδραυλικό ύψος [L]

$\hat{h} \rightarrow$  η προσέγγιση της σειράς για το  $h$  [L]

$h_i \rightarrow$  μη καθορισμένος παράγοντας

$w_i \rightarrow$  μια βασική συνάρτηση

$N \rightarrow$  ο αριθμός των βρόγχων στο δίκτυο του πεπερασμένου στοιχείου

Η προσεγγιστική σειρά (4.5) παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση όταν το  $N$  πλησιάζει το άπειρο (τότε  $\hat{h} \approx h$ ).

Με μία προσεκτική επιλογή της βασικής συνάρτησης ( $w_i$ ) , ο μη καθορισμένος παράγοντας  $h_i$  παίρνει τις τιμές των υδραυλικών υψών στους κόμβους με συντεταγμένες  $(x, y, z)$

Ένα κλειδί για τον επιτυχή υπολογισμό της μεθόδου του πεπερασμένου στοιχείου είναι η χρήση μιας εύστοχης συνεχούς βασικής συνάρτησης η οποία δεν μηδενίζεται παρά μόνο σε μια μικρή περιοχή του πεδίου.

Όσο χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι βασικών συναρτήσεων το PTC χρησιμοποιεί την ιδανική, γραμμική, βασική συνάρτηση ανάμεσα στους παρακείμενους βρόγχους των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος του πεπερασμένου στοιχείου προχωράει βασιζόμενη στο ότι όταν ο διαφορικός χειριστής  $L$  (εξ. 4.4) ενεργεί στο  $h$  τότε αυτός είναι ίσος με μηδέν. Ενώ όταν το  $L$  ενεργεί στην προσεγγιστική συνάρτηση προκύπτει σφάλμα.

Περιγράφοντας το παραπάνω με μαθηματική γραφή έχουμε :

$$L(h) = 0 \quad (4.6)$$

$$L(\hat{h}) = R \quad (4.7)$$

Όπου  $R$  το υπολειμματικό σφάλμα

Όταν χρησιμοποιούμε την μέθοδο του πεπερασμένου στοιχείου για την επίλυση της 4.5 πρέπει να κατορθώσουμε να ελαχιστοποιήσουμε το υπολειμματικό σφάλμα  $R$ .

Αυτό επιτυγχάνεται αν θεωρήσουμε από την αρχή έναν ολοκληρωμένο σύστημα των εξισώσεων  $w_i$ . Αν τώρα ωθήσουμε το υπολειμματικό σφάλμα  $R$  να είναι ορθογωνικό για όλες τις πιθανές τιμές του  $w_j$ , ωθούμε ουσιαστικά το  $R$  στο μηδέν και έτσι επιτυγχάνεται η επίλυση της εξ. 4.5.

Εκφράζοντας τον παραπάνω συλλογισμό διαφορετικά έχουμε :

$$L(\hat{h}) = L(h) \quad \text{όταν } R=0 \quad (4.8)$$

### **3.4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ**

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών είναι η εξής :

$$Ah + B \frac{\partial h}{\partial t} - v + f = 0 \quad (4.9)$$

Όπου A και B είναι μαθηματικοί πίνακες με διαστάσεις NxN και οι όροι h,f,v και  $\partial h / \partial t$  είναι διανύσματα στήλης με μήκος N.

Τα στοιχεία A,B,v και f είναι :

$$A_{ij} = \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} \right] dx dy \quad (4.10a)$$

$$B_{ij} = \iint_{\Omega} S w_i w_j dx dy \quad (4.10b)$$

$$f_i = - \iint_{\Omega} Q w_i dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma \quad (4.10c)$$

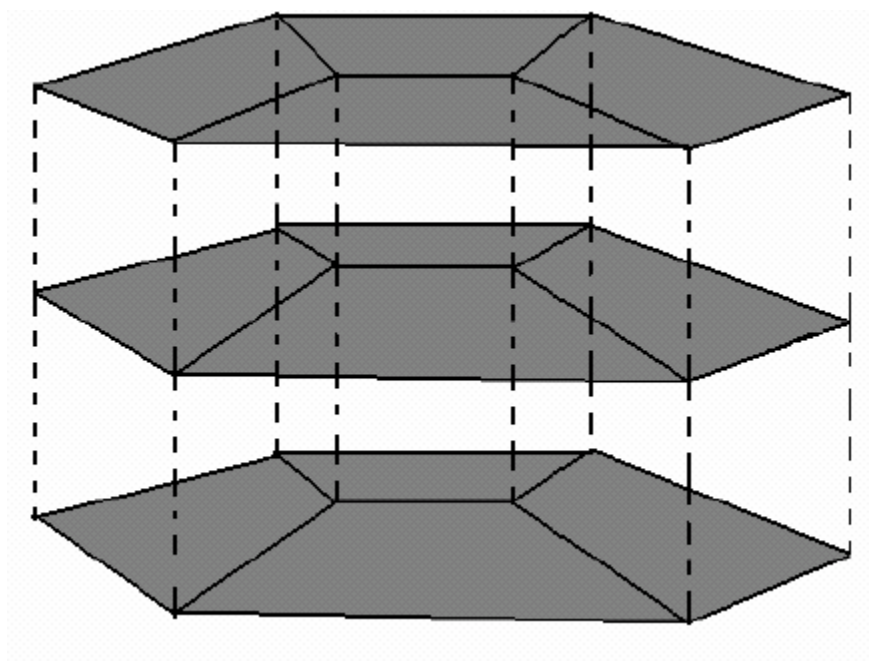
$$v_i = \sum_{j=1}^N \left[ \iint_{\Omega} \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial w_j}{\partial z} \right) w_i w_j dx dy \right] \quad (4.10d)$$

### **3.4.4 Η ΚΑΘΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ**

Το κεντρικό γνώρισμα του παρόντος κώδικα του μοντέλου PTC είναι η χρήση ενός σχήματος κεντρικής διαφοροποίησης για τις χωρικές παραγώγους της εξίσωσης (4.10d) στην διεύθυνση z. Η κάθετη διακριτοποίηση πραγματοποιείται με την χρήση

οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα τα οποία αντικαθίστανται από κόμβους που βρίσκονται ο ένας πάνω από τον άλλο (σχήμα 4.1).

ΣΧΗΜΑ 4.1 : Σχηματικό διάγραμμα οριζόντιων δικτύων πεπερασμένων στοιχείων στοιβαγμένων το ένα πάνω στο άλλο , δημιουργώντας την τρισδιάστατη διακριτοποίηση (Babu et al., 1997 )



Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μμονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών με σκοπό την προσέγγιση της εξίσωσης (4.10d). Χρησιμοποιώντας τον κάθετο δείκτη  $k$ , όπου  $k=1$  το στρώμα του πυθμένα, αυτή η προσέγγιση σε μορφή διανυσμάτων γράφεται ως εξής:

$$v \cong C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1}) \quad (4.11)$$

όπου το αρμονικό μέσο των ιδιοτήτων των παρακειμένων στρωμάτων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των στοιχείων  $C_k^+$ , ο κάθετος όρος ανάμεσα το επίπεδο  $k$  και  $k+1$ , και τα στοιχεία  $C_k^-$ , ο κάθετος όρος ανάμεσα στο επίπεδο  $k$  και  $k-1$

$$C_{ij;k}^{\pm} = \iint_{\Omega} \left[ \frac{2}{\Delta z_k} \left[ \Delta z_{k\pm 1} / (K_{zz})_k + \Delta z_k / (K_{zz})_{k\pm 1} \right] \right] w_i w_j dx dy \quad (4.12)$$

όπου  $(\Delta z_k)$  είναι το πάχος του  $k^{ou}$  επιπέδου στο σημείο προσέγγισης. Ο αρμονικός μέσος δίνει τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα στις ετερογενείς καταστάσεις που συναντώνται συνήθως.

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (4.12) στην (4.10) προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για ένα τυπικό  $k_0$  επίπεδο:

$$A_k h_k + B_k \frac{\partial h_k}{\partial t} - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})] + f_k = 0 \quad (4.14)$$

όπου το  $h_k$  αντιπροσωπεύει το διάνυσμα  $h$  των υδραυλικών υψών στο  $k^o$  επίπεδο,  $k=1,2,...M$ , και όπου  $M$  ο αριθμός των επιπέδων στη διεύθυνση  $z$ .

### **3.4.5 Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ**

Η συνεπαγόμενη “προς τα πίσω” προσέγγιση της χρονικής παραγώγου παρέχει την πιο ακριβή λύση για τα προβλήματα ροής υπογείων υδάτων, για ένα δεδομένο κόστος. Στην “προς τα πίσω” διαφορική απεικόνιση χρησιμοποιείται ένα 1ης τάξης διορθωμένο πλάνο για την προσέγγιση της χρονικής παραγώγου και οι χωρικές παράγωγοι γράφονται με βάση το νέο χρονικό επίπεδο. Εφαρμόζοντας το πλάνο αυτό στη χρονική παράγωγο στην εξίσωση (2.11) έχει ως αποτέλεσμα για κάθε επίπεδο την παρακάτω σχέση:

$$A_k h_k^{(t+\Delta t)} + \frac{(B_D)_k}{\Delta t} [h_k^{(t+\Delta t)} - h_k^t] - [C_k^+ (h_{k+1} - h_k) - C_k^- (h_k - h_{k-1})]^{t+\Delta t} + f_k^t = 0 \quad (4.15)$$

Η εξίσωση (4.15) είναι η πλήρης διακριτοποίηση της (4.4) και παρέχει  $M \times N$  εξισώσεις στους  $N$  αγνώστους της (4.5) πάνω σε κάθε ένα από τα  $M$  επίπεδα. [4]

### **3.5 Οριακές Συνθήκες**

Το PTC χρησιμοποιεί τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής: τις συνθήκες Dirichlet (σταθερού υδραυλικού ύψους), Neumann (σταθερής ροής) και τις συνθήκες τρίτου τύπου (διαρροής). Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενικής ροής. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες εντός του πεδίου εργασίας ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες.

#### **➤ Οριακές συνθήκες Σταθερού Υδραυλικού Ύψους**

Οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους επιτυγχάνονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές των υδραυλικών υψών που είναι ορισμένα σε αυτούς. Ο κώδικας αυτομάτως ορίζει ως σταθερές τις στήλες και τις γραμμές του πίνακα συντελεστών που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Όταν οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους απαλειφθούν από την εξίσωση του πίνακα τότε μένουν  $(N \times M - N_c)$  εξισώσεις με  $(N \times M - N_c)$  αγνώστους, όπου  $N_c$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων με οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους

#### **➤ Οριακές συνθήκες Τρίτου Τύπου**

Οι οριακές συνθήκες διαρροής προκύπτουν με αντικατάσταση στη (4.11c) την σχέση:

$$Q = k_L (h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (4.17)$$

όπου:

$h_{j,L}^t$ : είναι το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο  $j$  στο επίπεδο  $k$  το χρόνο  $t$

$h_{j,k}^t$ : το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής

$k_L$ : η αγωγιμότητα της διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα δια απόσταση)



Ο όρος της αγωγιμότητας ολοκληρώνεται επιφανειακά έτσι ώστε να αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Με κατάλληλο όμως καθορισμό από το χρήστη της παραμέτρου  $k_L$ , μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.

### ➤ **Οριακές συνθήκες Σταθερής Ροής**

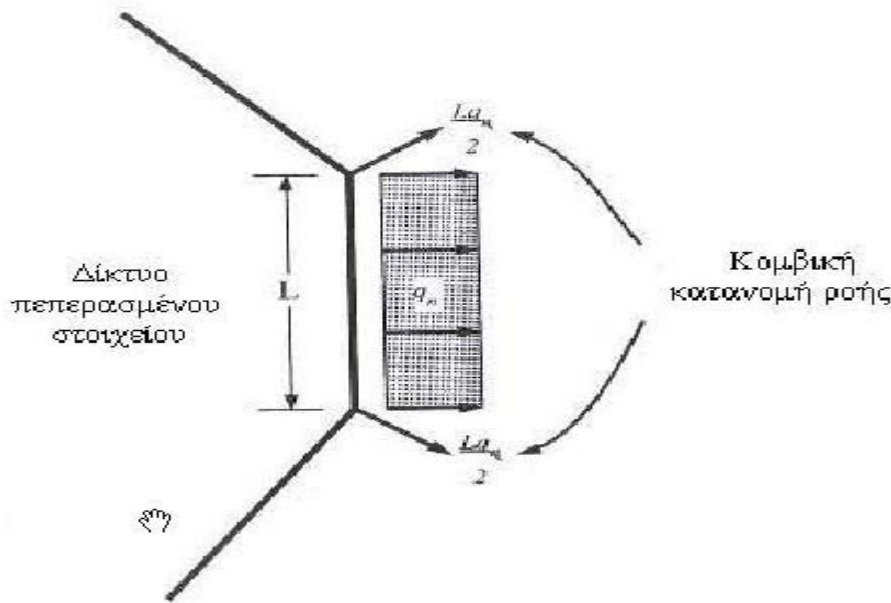
Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν απλό τρόπο για τον καθορισμό οριακών συνθηκών σταθερής ροής. Από τη σχέση (4.9) προκύπτει ένας οριακός όρος που μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$-\int_{\sigma} [K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y] \omega_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n \omega_i d\sigma \quad (4.16)$$

Όπου  $q_n$ : η κανονική ροή δια μέσου μιας μονάδας επιφάνειας (μήκος x ύψος) του κάθετου ορίου  $\sigma$ .

Όταν η ροή  $q_n$  θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$  τότε η ολοκλήρωση της σχέσης (4.16) δίνει την κομβική κατανομή (Σχήμα 4.2).

Επομένως, αρκεί ο χρήστης να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου.



ΣΧΗΜΑ 4.2. Κομβική κατανομή της ροής διαμέσου ενός στοιχείου μήκους  $L$  (Πηγή: Princeton Transport Code Manual)

### **3.6 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα**

Η επιβολή συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα ή για τον ελεύθερο υδροφορέα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών για το επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα. Στο σχήμα 4.3 αναπαρίσταται ένας κινούμενος υδροφόρος ορίζοντας που υπόκειται σε διήθηση μεγέθους  $R(x, y, t)$ . Το σταθερό υψόμετρο του ανώτερου ορίου της περιοχής ροής συμβολίζεται με  $z = z_{M+1}(x, y, t)$  και το ακριβές υψόμετρο του υδροφόρου ορίζοντα συμβολίζεται με  $z = z_{WT}(x, y, t)$ .

Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο στρώμα ( $h_M$ ) καθορίζει το πάχος του υδροφορέα του ανώτερου στρώματος ( $z_{WT} - z_M$ ).

Σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει

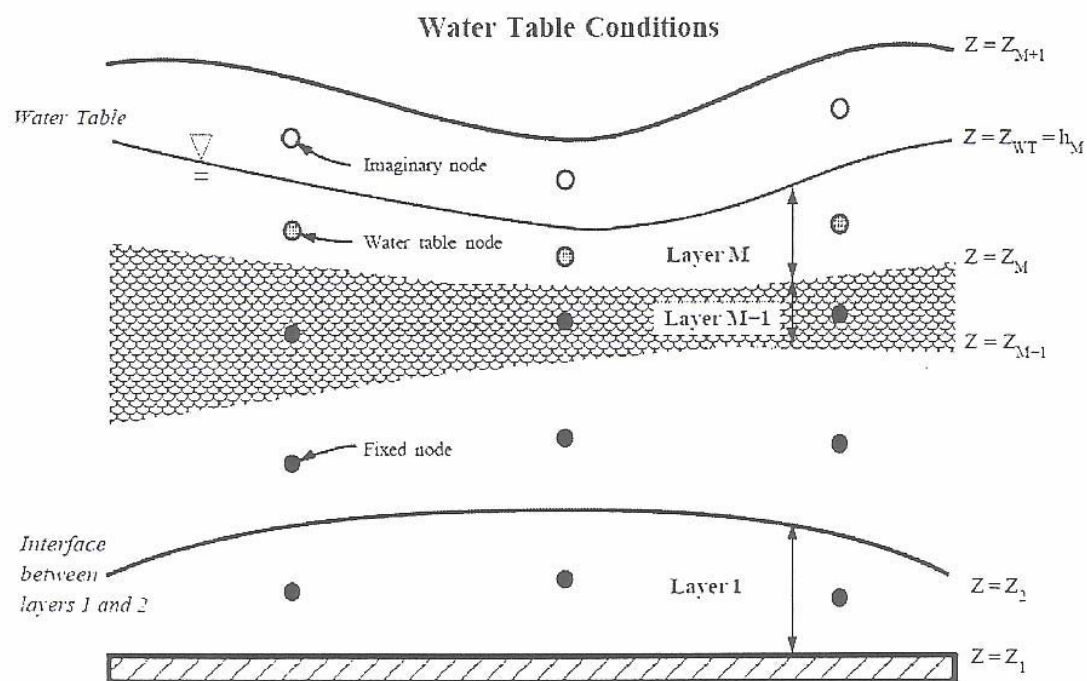
$$(z_{WT})_i = (h_M)_i \quad (4.17)$$

Στην παρούσα διαδικασία, υποθέτουμε ότι υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάντα στο ανώτερο στρώμα ( $k = M$ ). Έτσι, όταν το πρόγραμμα υπολογίζει τα υδραυλικά ύψη στο ανώτερο στρώμα, ελέγχει εάν οι τιμές του  $h_M$  στους κόμβους βρίσκονται μέσα στο ακόλουθο εύρος υψομέτρων

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1} \quad (4.18)$$

Το μοντέλο PTC εμφανίζει ένα μήνυμα στην περίπτωση όπου η παραπάνω συνθήκη παραβιάζεται. Στη συνέχεια, εκτέλεση αυτή τερματίζεται. Η παραπάνω σχέση πρέπει επίσης να ικανοποιεί και τις οριακές συνθήκες για το υδραυλικό ύψος. Εφόσον το  $z_{WT}$  αντιπροσωπεύει το πάχος του ανώτερου στρώματος που εμφανίζεται στα μητρώα των συντελεστών, η εξίσωση που ισχύει για κάθε κόμβο εισάγει μη γραμμικότητα στην λύση των εξισώσεων του συστήματος ροής. Αυτή η μη γραμμικότητα αντιμετωπίζεται με μια σειρά επαναλήψεων στο δεύτερο βήμα. Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την μεταβλητή απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση. Εάν το  $S_y$  συμβολίζει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, τότε έχουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} = R \quad (4.19)$$



Σχήμα 4.3: Υδροφόρος ορίζοντας και συνθήκες κατακρήμνισης στο πάνω όριο.

Οι επιφάνειες δηλώνονται με  $z=z_1, z=z_2$  κ.τ.λ. είναι καθορισμένα όρια στο χώρο και καθορίζουν τα στρώματα

(Babu et al., 1997)

### **3.7 Τρισδιάστατη μεταφορά ρύπων**

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται αναλυτικά η εξίσωση μεταφοράς ρύπων (4.3)

#### **3.7.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ**

Η εξίσωση μεταφοράς ρύπων είναι η εξής:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] \\ & + Q(c^w - c) - \theta [1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Οι όροι της διασποράς της εξίσωσης (4.18) καθορίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις (σύμφωνα με τους Burnett και Frind [1987])

$$\begin{aligned} D_{xx} &= (a_L V_x^2 + a_T V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{yy} &= (a_T V_x^2 + a_L V_y^2 + a_V V_z^2) / V + D_M \\ D_{zz} &= (a_V V_x^2 + a_V V_y^2 + a_L V_z^2) / V + D_M \\ D_{yx} &= D_{xy} = (a_L - a_T) V_x V_y / V \\ D_{yz} &= D_{zy} = (a_L - a_V) V_y V_z / V \\ D_{zx} &= D_{xz} = (a_L - a_V) V_z V_x / V \end{aligned} \quad (4.19)$$

όπου

$D_M$  : ο συντελεστής μοριακής διάχυσης, που είναι γενικά 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 της ταχύτητας [ $L/T$ ] ( )

$c$  : η χημική συγκέντρωση στο σημείο  $(x,y,z)$  τη χρονική στιγμή  $t$  [ $ML^{-3}$ ]

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

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

$Q$  : η ισχύς (πηγής/δεξαμενής) της άντλησης [ $1/T$ ]

$Q_i$  : ο ρυθμός ογκομετρικής έκχυσης/εκκένωσης [ $L^{-3}T^{-1}$ ] στο σημείο  $(x,y,z)$

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

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

Σε όλες τις περιπτώσεις άντλησης ρευστού ( $Q_i \leq 0$ ) υποθέτουμε ότι η συγκέντρωση του αντλούμενου (υγρού) νερού  $c^w$  στην αντλία είναι ίσο με τη συγκέντρωση του περιβάλλοντος νερού  $c$ . Συνεπώς για όλες τις αντλίες εκκένωσης ο όρος  $Q(c^w - c)$  της εξίσωσης (3.1) ισούται με μηδέν. Για το λόγο αυτό ο κώδικας διατηρεί τον όρο που περιέχει το  $Q$ , στην εξίσωση (4.18), μόνο όταν η αντλία εμπλουτίζει τον υδροφορέα ( $Q_i \geq 0$ ) με διάλυμα. Στην περίπτωση αυτή ο όρος  $c^w$  αντιπροσωπεύει τη συγκέντρωση του διαλύματος εμπλουτισμού.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ**

## 4.1 Γενικά

Ο στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας είναι να υπολογίσει το βαθμό αλλαγής των αποτελεσμάτων ενός μοντέλου σε αντιστοιχία με τις αλλαγές στα δεδομένα εισόδου. Αυτή η γνώση είναι σημαντική για:

- (α) την αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητας του μοντέλου,
- (β) τον καθορισμό των παραμέτρων για τις οποίες είναι απαραίτητο να έχουμε περισσότερο ακριβείς τιμές και,
- (γ) την κατανόηση του συστήματος το οποίο μοντελοποιείται.

Η επιλογή της μεθόδου με την οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από

- (α) τον βαθμό ευαισθησίας που υιοθετείται,
- (β) τη επιθυμητή ακρίβεια στους υπολογισμούς του βαθμού ευαισθησίας που έχουμε επιλέξει και,
- (γ) το υπολογιστικό κόστος.

Σε γενικές γραμμές, ο όρος ανάλυση ευαισθησίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο έχει επιλεγεί να γίνει η ανάλυση ευαισθησίας. Ο Πίνακας B-1-1 δείχνει κάποια από τα μέτρα που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας ενός μαθηματικού μοντέλου της μορφής όπου  $k$  είναι ένα σύνολο  $m$  παραμέτρων, και  $u$  είναι ένα διάνυσμα με  $n$  μεταβλητές εξόδου.

Βασιζόμενοι στην επιλογή του μέτρου για τον υπολογισμό της ευαισθησίας και στη μεταβλητότητα των παραμέτρων του μοντέλου, οι μέθοδοι ανάλυσης ευαισθησίας μπορούν ευρέως να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- *Μεταβλητότητα παραμέτρων ή μορφοποίησης μοντέλου:* Σε αυτή την προσέγγιση το μοντέλο «τρέχει» για ένα σύνολο σημείων που λειτουργούν ως δείγμα (διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν). Τα μέτρα ευαισθησίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εδώ είναι η αντίδραση από



την αυθαίρετη παραλλαγή παραμέτρου, η ομαλοποιημένη απάντηση και τα ακρότατα. Από αυτά τα μέτρα, οι ακρότατες τιμές είναι συχνά κρίσιμης σημαντικότητας, στις περιβαλλοντικές εφαρμογές.

- *Ανάλυση ευαισθησίας ευρέος πεδίου:* Εδώ, η ευαισθησία εμπλέκει την συμπεριφορά του συστήματος σχετικά με όλο το εύρος της μεταβλητότητας των παραμέτρων, και συχνά λαμβάνοντας υπόψιν την αβεβαιότητα που εμπλέκεται στον υπολογισμό των παραμέτρων.
- *Ανάλυση ευαισθησίας τοπικής κλίμακας:* Εδώ, η προσοχή στρέφεται στον υπολογισμό της ευαισθησίας του μοντέλου σχετικά με τη μεταβλητότητα των δεδομένων εισόδου και της μεταβλητότητας κοντά σε ένα σημείο του δείγματος.

## **4.2. Συμβατικές Μέθοδοι Ανάλυσης Ευαισθησίας- Αβεβαιότητας**

Οι συμβατικές μέθοδοι για την ανάλυση ευαισθησίας και τη διάδοση της αβεβαιότητας μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε τέσσερις κατηγορίες:

- (α) «τέστ ευαισθησίας»,
- (β) αναλυτικές μέθοδοι,
- (γ) μέθοδοι βασιζόμενες σε δείγματα και,
- (δ) μέθοδοι βασιζόμενες στην υπολογιστική άλγεβρα.

| Sensitivity Measure                         | Definition   |
|---|--|
| Response from arbitrary parameter variation | $u = u(\bar{k} + \delta k) - u(k)$   |
| Normalized Response                         | $D_i = \frac{\delta u_i}{u_i(\bar{k})}$  |
| Average Response                            | $\overline{u_i(\bar{k})} = \frac{\int \dots \int u_i(\bar{k}) d\mathbf{k}}{\int \dots \int d\mathbf{k}}$ |
| Expected Value                              | $\langle u_i(\mathbf{k}) \rangle = \int \dots \int u_i(\mathbf{k}) P(\mathbf{k}) d\mathbf{k}$            |
| Variance                                    | $\delta_i^2(\mathbf{k}) = \langle u_i(\mathbf{k})^2 \rangle - \langle u_i(\mathbf{k}) \rangle^2$         |
| Extrema                                     | $\max [u_i(\mathbf{k})], \min [u_i(\mathbf{k})]$   |
| Local Gradient Approximation                | $\delta u \approx [S] \delta k ; S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial k_j}$                             |
| Normalized Gradient                         | $S_{ij}^n = \frac{\bar{k}_j}{u_i(\bar{k})} \frac{\partial u_i}{\partial k_j}$                            |

Πίνακας B-1-1 : Σύνοψη των μέτρων ευαισθησίας που εμπλέκονται στην ανάλυση ευαισθησίας (McRae et al., 1982)

Τα τέστ ευαισθησίας περιλαμβάνουν την απόκριση του μοντέλου για ένα σύνολο αλλαγών στην μορφοποίηση του, και για ένα επιλεγμένο συνδυασμό παραμέτρων. Οι αναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν είτε την διαφοροποίηση των εξισώσεων του μοντέλου και συνεπακόλουθη επίλυση ενός συνόλου βοηθητικών εξισώσεων ευαισθησίας, είτε την αναμόρφωση του κανονικού μοντέλου χρησιμοποιώντας στοχαστικές αλγεβρικές / διαφορικές εξισώσεις. Από την άλλη πλευρά οι μέθοδοι που βασίζονται στα δείγματα περιλαμβάνουν «τρεξίματα» του κανονικού μοντέλου για ένα σύνολο δεδομένων εισόδου / συνδυασμών παραμέτρων

(σημεία δείγματος) και υπολογισμό της ευαισθησίας / αβεβαιότητας χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου σε αυτά τα σημεία.

Ακόμα μια μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας βασίζεται στον διαφορετικό χειρισμό του υπολογιστικού κώδικα του μοντέλου και καλείται αυτόματα τη διαφοροποίηση.

Αξίζει να αναφέρουμε πως οι αναλυτικές μέθοδοι διακρίνονται στις:

- ✓ Μεθόδους διαφορικής ανάλυσης
- ✓ Μέθοδο συνάρτησης του Green
- ✓ Μέθοδος στοχαστικών πεπερασμένων στοιχείων φασματικής βάσεως

και,

- ✓ Μέθοδος της ευθείας σύνδεσης / αποσύνδεσης

Ενώ οι μέθοδοι που βασίζονται σε δείγματα είναι οι εξής :

- ✓ Μέθοδος Monte Carlo και Latin Hypercube Sampling
- ✓ Ανάλυση ευαισθησίας εύρους Fourier (FAST)
- ✓ Μέθοδοι αξιοπιστίας και,
- ✓ Μέθοδοι επιφανειακής απόκρισης

**([www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP\\_Groundwater\\_Modelling.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf))**

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗ**

### **5.1. Προσδιορισμός περιοχής μελέτης**

Η Λεκάνη Κερίτη έχει έκταση  $176 \text{ km}^2$  περίπου. Βρίσκεται στο βόρειο κεντρικό τμήμα της επαρχίας Κυδωνίας του νομού Χανίων, με διεύθυνση βοράς – νότος, σε απόσταση 12 περίπου χιλιομέτρων δυτικά της πόλης των Χανίων. Εκτείνεται από βορά από το Γεράνι έως τον Γαλατά φτάνοντας νοτίως τις κορυφές των Λευκών Ορέων. Περιλαμβάνει τους οικισμούς Βρύσσες, Βατόλακο, Κουφό, Αλικιανό, Σκινέ, Φουρνέ, Αγυιά, Βαρύπετρο, Ορθούνι, Καρές, Λάκκοι και Μεσκλά.

Η περιοχή ενδιαφέροντος στην περιοχή της Αγυιάς στην οποία εφαρμόστηκε η προσομοίωση με το πρόγραμμα ARGUS ONE είναι τμήμα της ευρύτερης Λεκάνης του Κερίτη. Έχει έκταση  $30 \text{ km}^2$  περίπου και περιλαμβάνει την Αγυιά, Κουφό, Αλικιανό και Σκινέ. Στην περιοχή αυτή βρίσκονται τα περισσότερα σημεία εμφάνισης νερού ΣΕΝ, τα οποία αναφέρονται σε γεωτρήσεις, πηγάδια και πηγές.



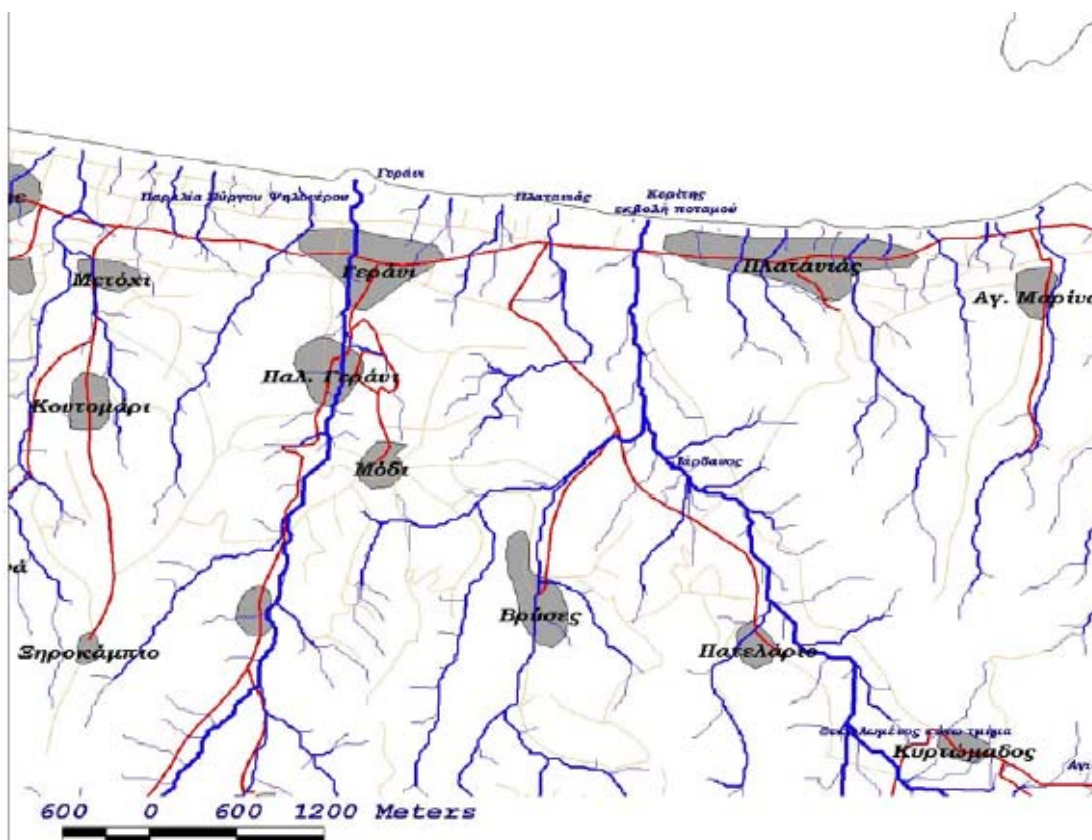
Εικόνα 1: Εικόνα της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης Κερίτη



***Εικόνα 2: Αεροφωτογραφία της υπό μελέτης περιοχής***  
(GoogleEarth)

## **5.2. Ιστορικά**

Η ονομασία της λεκάνης του Κερίτη προέρχεται από τον ομώνυμο ποταμό, ο οποίος αναφέρεται από τον Όμηρο σαν Ιάρδανος, ονομασία που επανέρχεται για το κομμάτι της εκβολής του. Πρόκειται για ένα μεγάλο ποταμό με αμμώδεις όχθες ο οποίος καταλήγει στη θάλασσα στην περιοχή του Πλατανιά. Η παραλία, η εκβολή του ποταμού και η θαμνώδης έκταση δυτικά και ανατολικά είναι ενδιαφέρουσες περιοχές κατά τη διάρκεια της μετανάστευσης των πουλιών. Όλη η κοιλάδα έχει ενδιαφέρον λόγω της σημαντικής δεντρώδους ανάπτυξης. Η κοιλάδα του Φασά έχει ενδημικές φτέρες και συστάδες με καστανιές.



**Εικόνα 3: Ποταμός, εκβολή και παραλία Κερίτη**

(Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων, 2001 )

Στον χείμαρρο Κερίτη εκβάλλουν οι παραπόταμοι ή παραχείμαρροι: Μεσκληανός, Μαύρος, Σκινιανός, Βαρσαμιώτης και της Αγιάς. Όλοι αυτοί μαζί με τον Κερίτη συνθέτουν το πρωτεύον αποχετευτικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης.

Το νότιο τμήμα της λεκάνης απορροής αποτελεί τμήμα του ορεινού όγκου των Λευκών Ορέων. Το υδρογραφικό δίκτυο σε αυτό το τμήμα είναι αραιό με βαθιές χαραδρώσεις. Η βλάστηση επίσης είναι ελάχιστη.

Το ενδιάμεσο τμήμα είναι ημιορεινό και λοφώδες με πυκνότερο υδρογραφικό δίκτυο και πιο πλούσια βλάστηση. Περιλαμβάνει σχηματισμούς φυλλιτών και χαλαζιτών.

Το βόρειο τμήμα τέλος, είναι πεδινό, με πλούσια βλάστηση και υδροφορία. Εδώ βρίσκεται ο υγρότοπος της Αγιάς.

(Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων, 2001 )

### **5.3 Υδρολογικά και μετεωρολογικά δεδομένα**

Τα χαρακτηριστικά των βροχομετρικών και μετεωρολογικών σταθμών που βρίσκονται εντός ή κοντά στην περιοχή μελέτης φαίνονται στον πίνακα 1. Οι αντίστοιχες χρονοσειρές που περιλαμβάνουν βροχόπτωση, θερμοκρασία και εξάτμιση φαίνονται στον πίνακα 2. Υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για την περίοδο 1977-1997.

| Κωδικός<br>σταθμού | Ονομασία          | Τοποθεσία ΕΓΣΑ 87 |         | Υψόμετρο<br>(μ) |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------|-----------------|
|                    |                   | Χ                 | Ψ       |                 |
| MT4                | Αλικιανός         | 492238,8          | 3922540 | 66,3            |
| MT3                | Αγροκήπιο         | 502876,3          | 3927430 | 8               |
| MT41               | Ταυρωνίτης        | 484018,4          | 3930876 | 15,4            |
| RG20               | Παλαιά<br>Ρούματα | 479746,3          | 3917260 | 316             |
| RG29               | Πρασές            | 486286,5          | 3914250 | 520             |

#### **πίνακας 1: Πίνακας σταθμών περιοχής μελέτης**

(Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων, 2001 )



**MT:** Μετεωρολογικός σταθμός

**RG:** Βροχομετρικός σταθμός

**PH:** βροχόπτωση

**EH:**εξάτμιση,

**TH:** θερμοκρασία

| Κωδικός<br>σταθμού | Ονομασία       | Κωδικός<br>παραμέτρων | Περίοδος μετρήσεων |         |
|--------------------|----------------|-----------------------|--------------------|---------|
|                    |                |                       | Έναρξη             | Λήξη    |
| MT4                | Αλικιανός      | PH                    | 1/1971             | 8/1993  |
|                    |                | TH                    | 1/1971             | 12/1990 |
|                    |                | EH                    | 1/1986             | 12/1990 |
| MT3                | Αγροκήπιο      | TH                    | 1/1971             | 12/1990 |
|                    |                | EH                    | 1/1986             | 12/1990 |
|                    |                | PH                    | 1/1971             | 12/1990 |
| MT41               | Ταυρωνίτης     | PH                    | 1/1971             | 12/1990 |
| RG20               | Παλαιά Ρούματα | PH                    | 9/1967             | 8/1997  |
| RG29               | Πρασσές        | PH                    | 12/1990            | 8/1997  |

**πίνακας 2 : Περίοδος μετρήσεων σταθμών**

(Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων, 2001 )

## **5.4 Κλιματολογικά στοιχεία**

### **5.4.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Ο τύπος κλίματος της Κρήτης είναι ένας μεταβατικός ενδιάμεσος τύπος μεταξύ του χερσαίου Μεσογειακού και ερημοειδούς Μεσογειακού, στο οποίο υπάγεται κυρίως η νοτιοανατολική Κρήτη. Το κύριο χαρακτηριστικό του κλίματος είναι η γλυκύτητα και η ηπιότητα. Η ψυχρή εποχή είναι ήπια και σε αυτό συντελεί η συχνή άφιξη στην περιοχή των θερμών και υγρών ΝΔ αερίων μαζών.

Ο νομός Χανίων ανήκει στις πεδινές και ημιορεινές περιοχές του στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό ήπιο ή ψυχρό, ενώ οι ορεινές περιοχές του ανήκουν στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Ένα πολύ μικρό μέρος των πολύ ορεινών περιοχών του νομού ανήκει στον υγρό βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα δριμύ.

Ολόκληρη η παραλιακή ζώνη της βόρειας και νότιας Κρήτης έχει έντονο θερμομεσογειακό χαρακτήρα με αριθμό βιολογικώς ξηρών ημερών κατά τη θερμή και ξηρά περίοδο ( $125 < \chi < 150$ ). Στις ημιορεινές και ορεινές περιοχές ο χαρακτήρας μετατρέπεται σε έντονο μεσο-μεσογειακό ( $75 < \chi < 100$ ), ασθενή μεσο-μεσογειακό ( $40 < \chi < 75$ ), υπομεσογειακό ( $0 < \chi < 40$ ), ενώ μόνο η κορυφή των Λευκών Ορέων υπάγεται στον υποξηρικό ψυχρό με περίοδο υπόξηρη χαρακτήρα ( $\chi = 0$ ). («Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Συγκεκριμένα στην περιοχή ενδιαφέροντος το κλίμα είναι μεσογειακό με θερμό και ξηρό καλοκαίρι και βροχερό και ήπιο χειμώνα. Ο χειμώνας αρχίζει το δεύτερο δεκαήμερο του Νοεμβρίου και παρατείνεται μέχρι το Μάρτιο με πολλές βροχοπτώσεις. Η άνοιξη είναι μικρής διάρκειας, από τον Απρίλιο έως αρχές Μαΐου και παρουσιάζει μικρές βροχοπτώσεις. Το καλοκαίρι αρχίζει συνήθως μέσα Μαΐου και διαρκεί έως τέλη Σεπτεμβρίου με λίγες βροχοπτώσεις κατά το μήνα αυτό. Ολικοί παγετοί δεν εμφανίζονται στην περιοχή ενώ οι μερικοί ή λευκοί αποτελούν σπάνιο φαινόμενο. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες και δεν δημιουργούν πρόβλημα στα χαμηλά υψόμετρα. Το χαλάζι είναι ένα σπάνιο φαινόμενο στα χαμηλά υψόμετρα, έχει μικρό μέγεθος και δεν προκαλεί ζημιές. Η θερμοκρασία ελάχιστες φορές με εξαίρεση τα μεγάλα υψόμετρα (Ζούρβα) πέφτει υπό το μηδέν. Οι άνεμοι που παρατηρούνται συνήθως

στην περιοχή είναι Δυτικοί και Βορειοδυτικοί μέσης εντάσεως. Οι παραπάνω λόγοι εξηγούν τη μεγάλη ευδοκίμηση των καλλιεργειών στην περιοχή και ειδικότερα των εσπεριδοειδών. («Διαχειριστικό σχέδιο για τον Υγρότοπο της Αγιάς», 1998)

#### **5.4.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Στο νομό Χανίων υπάρχουν 5 σταθμοί μέτρησης της θερμοκρασίας αέρος, Αγροκηπίου, Αλικιανού, Καλυβών, Βάμου και Σούδας. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του σταθμού του Αλικιανού, ο οποίος βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης.

Από την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών δεδομένων του σταθμού προέκυψαν τα εξής:

| Σταθμός<br>°C | Μέση ετήσια<br>θερμοκρασία | Μέση ελάχιστη<br>μηνιαία<br>θερμοκρασία | Μέση μέγιστη<br>μηνιαία<br>θερμοκρασία | Ετήσιο<br>θερμομετρικό<br>εύρος |
|---------------|----------------------------|---|--|---------------------------------|
| Αλικιανός     | 16,96                      | 8                                       | 26,0                                   | 18,0                            |

Το κλίμα της Κρήτης θεωρείται προνομιούχο και αυτό οφείλεται στην κεντρική θέση που κατέχει η νήσος στην Ανατολική Μεσόγειο. Ο χειμώνας αρχίζει κατά τα μέσα Δεκεμβρίου και είναι ήπιος, ενώ ψυχρότερος μήνας του έτους είναι ο Φεβρουάριος ο οποίος διαφέρει ελάχιστα από τον Ιανουάριο. Θερμότερος μήνας του έτους είναι ο Ιούλιος με μέση υπερετήσια θερμοκρασία περίπου 25 °C. Ο Ιούνιος

εμφανίζει χαμηλότερη θερμοκρασία τόσο από τον Ιούλιο όσο και από τον Αύγουστο, παρουσιάζοντας ίδια επίπεδα θερμοκρασίας με τον Σεπτέμβριο, ο οποίος παρουσιάζει μέση υπερετήσια θερμοκρασία περίπου  $21,5^{\circ}\text{C}$  (Αλικιανός). Οι θερμοκρασίες αυτές προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη χρονική διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου, η οποία στην περιοχή μελέτης καλύπτει τουλάχιστον 4 μήνες. Η εικόνα διαφοροποιείται σημαντικά στα ορεινά όπου οι μέσες θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες, οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις εντονότερες και οι θερμοκρασίες κατά τους χειμερινούς μήνες σημαντικά χαμηλότερες. Με βάσει τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα:

Η πεδινή ζώνη της Κρήτης αποτελεί κλιματικά μια μετάβαση από το Μεσογειακό προς το ημιερημικό κλίμα. Χαρακτηρίζεται από μικρό ύψος βροχοπτώσεων, ήπιο χειμώνα και ξηρή περίοδο μεγάλης διάρκειας. Το θέρος λόγω θαλάσσιας αύρας και των ετήσιων ανέμων είναι σχετικά δροσερό και διαρκεί από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο. Θερμότεροι μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Στην περιοχή αυτή δεν παρατηρείται ποτέ παγετός και η θερμοκρασία σπάνια πέφτει κάτω από  $0^{\circ}\text{C}$ . Οι θερμοκρασιακές αποκλίσεις είναι ήπιες.

Η ορεινή ζώνη της Κρήτης εμφανίζει μεγαλύτερες θερμοκρασιακές αποκλίσεις, μέση ετήσια θερμοκρασία  $2-3^{\circ}\text{C}$  χαμηλότερη από την πεδινή ζώνη. Η μέση θερμοκρασία του θερμότερου μήνα ταυτίζεται με τα επίπεδα των πεδινών σταθμών, ενώ η μέση θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα είναι κατά  $3^{\circ}\text{C}$  χαμηλότερη. («Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

### **5.4.3 ΥΓΡΑΣΙΑ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Η μέση ατμοσφαιρική σχετική υγρασία είναι σε ολόκληρη τη βόρεια Κρήτη ελάχιστη τον Ιούνιο και μέγιστη τον Δεκέμβριο. Μεταξύ των βορείων σταθμών η μέση ελάχιστη μηνιαία σχετική υγρασία μειώνεται από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι χαμηλές τιμές υγρασίας τους καλοκαιρινούς μήνες, ιδιαίτερα στη νότια Κρήτη, καθιστούν το θέρος ευχάριστο και δε δημιουργούν συνθήκες δυσφορίας.

### **5.4.4 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Κρήτη παρουσιάζει αύξηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά και από νότια προς βόρεια. Στην πόλη της Σητείας η τιμή της είναι 490mm, στο Ηράκλειο 470mm ενώ στους σταθμούς Αλικιανού και Σούδας 824mm και 600mm αντίστοιχα.

Η Κρήτη γενικά παρουσιάζει σημαντική ανισοκατανομή του ετήσιου όγκου βροχόπτωσης, τόσο γεωγραφικά όσο και φυσιογραφικά, εμφανίζοντας βροχοβαθμίδα από τις μεγαλύτερες στην Ελλάδα.

Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι μέγιστη τον Δεκέμβριο ή τον Ιανουάριο και ελάχιστη τον Ιούλιο και τον Αύγουστο, οι οποίοι είναι σχεδόν άνομβροι σε ολόκληρη την πεδινή Κρήτη. Το 25% της ετήσιας βροχόπτωσης συμβαίνει κατά τη διάρκεια του βροχότερου μήνα. Ο μηνιαίος αριθμός ημερών βροχής κυμαίνεται από 0,3 έως 15 ημέρες για

Δεκέμβριο/Ιανουάριο και Ιούλιο/Αύγουστο αντίστοιχα. Ο μέσος αριθμός ημερών βροχής στην Κρήτη ανέρχεται σε 90 ημέρες περίπου.

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μέσες μηνιαίες και ετήσιες βροχοπτώσεις σε mm, η μέση τιμή ημερών βροχής κατά μήνα και έτος καθώς και η εξάτμιση όπως υπολογίστηκε από παρατηρήσεις 50 ετών στην περιοχή της λεκάνης της Αγιάς.

| ΜΗΝΕΣ       | Μέσες Μηνιαίες<br>Βροχοπτώσεις | Ημέρες Βροχής | Εξάτμιση Απο<br>Εξατμισόμετρο |
|-------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------|
| Ιανουάριος  | 176,4                          | 15,3          | 35                            |
| Φεβρουάριος | 137                            | 14,3          | 40                            |
| Μάρτιος     | 119,5                          | 10,5          | 67                            |
| Απρίλιος    | 52,8                           | 7             | 117                           |
| Μάιος       | 9,9                            | 3,4           | 175                           |
| Ιούνιος     | 5,8                            | 0,9           | 235                           |
| Ιούλιος     | 0,9                            | 0,5           | 246                           |
| Αύγουστος   | 4,9                            | 0,6           | 207                           |
| Σεπτέμβριος | 24,3                           | 2,7           | 142                           |
| Οκτώβριος   | 82,1                           | 7,8           | 81                            |
| Νοέμβριος   | 111,2                          | 11,4          | 3                             |
| Δεκέμβριος  | 125,9                          | 14,5          | 30                            |
| ΕΤΟΣ        | <b>850,7</b>                   | <b>89</b>     | <b>1412</b>                   |

#### **5.4.5 ΑΝΕΜΟΙ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Καθόλη τη διάρκεια του έτους επικρατούν κυρίως βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι. Η νηνεμία καλύπτει ετήσιο ποσοστό της τάξης του 20 % στους πεδινούς σταθμούς της ανατολικής Κρήτης και το 30%

στους ορεινούς. Η μέγιστη μηνιαία ένταση ανέμων εμφανίζεται στην Σητεία και την Ιεράπετρα τον Ιούλιο (5,82 και 6,84 m/sec αντίστοιχα). Στους σταθμούς δυτικής Κρήτης η μέγιστη μηνιαία ένταση ανέμων εμφανίζεται κατά το Φεβρουάριο και Μάρτιο, είναι δε σημαντικά χαμηλότερη της τάξης των 4 m/sec.

#### **5.4.6 ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑ- ΝΕΦΩΣΗ- ΟΜΙΧΛΗ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

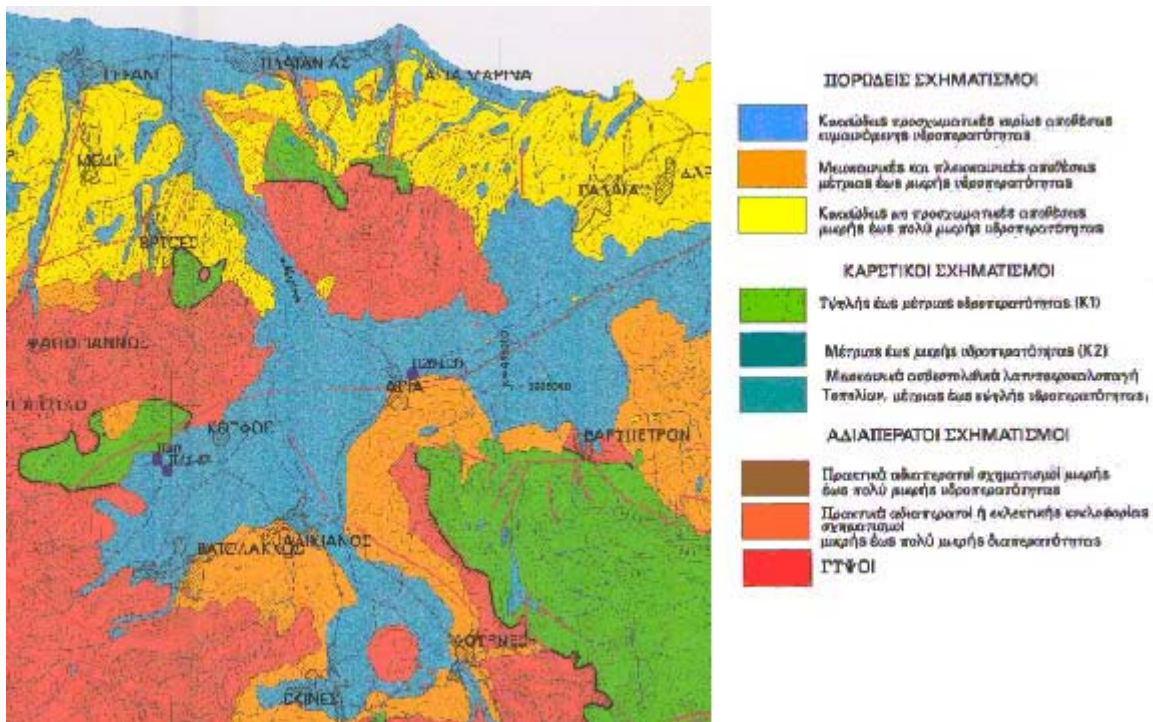
Η ηλιοφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλή σε ολόκληρο το νησί. Ο μέσος ετήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σε 2700 ώρες περίπου στη βόρεια Κρήτη, ενώ στη νότια είναι κατά 10% τουλάχιστον υψηλότερος ανερχόμενος σε 3000 περίπου ώρες. Ο αριθμός ωρών ηλιοφάνειας στην Ιεράπετρα είναι ο μεγαλύτερος στην Ελλάδα και φτάνει τις 3068.

Η μέση νέφωση κυμαίνεται μεταξύ 5/8 τον Ιανουάριο και 0,6-1/8 τον Ιούλιο. Ο μέσος αριθμός αιθρίων ημερών (νέφωση μεταξύ 0-1,5/8) κυμαίνεται μεταξύ 3 τον Ιανουάριο και 28 ημερών τον Ιούλιο περίπου στις πεδινές περιοχές, ενώ στις ορεινές ο αριθμός κατά τους θερινούς μήνες είναι κατά 30% μικρότερος.

Η ομίχλη, όπως και η πάχνη είναι σπάνιο φαινόμενο για την Κρήτη. Ο μέσος αριθμός ημερών ομίχλης είναι λιγότερος από 1 μέρα για τους πεδινούς σταθμούς και περίπου 15 για τους ορεινούς.

## **5.5 Γεωλογία Περιοχής Μελέτης**

Η γεωλογική και τεκτονική δομή της ευρύτερης περιοχής Κερίτη, η παλαιογεωμορφολογική εξέλιξη και η υδρογεωλογική συμπεριφορά των διάφορων πετρολογικών σχηματισμών που συμμετέχουν στη γεωλογική δομή της περιοχής, αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που έχουν καθορίσει τις υδρογεωλογικές συνθήκες και έχουν οδηγήσει στη δημιουργία των πηγών.



**εικόνα 4: Λιθολογικός χάρτης περιοχής μελέτης**

Το πιο παλιό γνωστό σύμπλεγμα πετρωμάτων στη Δυτική Κρήτη είναι τα στρώματα Ιονίου ζώνης. Οι σχηματισμοί αυτοί δομούν τη νότια και νοτιοανατολική εξεταζόμενη περιοχή και αναπτύσσονται σε μεγάλα



υψόμετρα, κοντά στη ζώνη του υδροκρίτη. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν τον πυρήνα των Λευκών Ορέων.

Πάνω στους σχηματισμούς αυτούς βρίσκονται οι σκοτεινόμαυροι λατυποπαγείς ασβεστόλιθοι και δολομίτες, με χαρακτηριστική θραυσματοπαγή και κυψελώδη υφή, ασβεστόλιθοι Τρυπαλίου. Είναι οι γνωστοί δολομιτικοί ασβεστόλιθοι της βορειοδυτικής περιμέτρου των Λευκών Ορέων. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν εμφανίζουν σαφή στρώση και το πάχος τους ξεπερνάει τα 500 μέτρα.

Οι φυλλίτες με σημαντικές ενστρώσεις χαλαζιτών και ψαμμιτών, που απαντούν στα βόρεια και δυτικά του καλύμματος Τρυπαλίου, είναι επωθημένοι στους ασβεστόλιθους αυτούς. Δομούν επίσης, την περιοχή βόρεια της Αγυιάς και του Κουφού. Βόρεια της Αγυιάς δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι οι φυλλίτες είναι επωθημένοι σε ασβεστόλιθους Τρυπαλίου, ενώ δυτικότερα στην περιοχή Κουφού καταγράφεται η τεκτονική επαφή ασβεστόλιθων Τρυπαλίου και φυλλιτών. Οι μικρές εμφανίσεις στις περιοχές αυτές ασβεστόλιθων της ζώνης Τριπόλεως δε φαίνεται να έχουν υδρογεωλογική σημασία, πιθανώς συνδέονται με τις γνωστές καρστικές υδροφορίες του Κερίτη.

Οι μεταλπικοί, νεογενείς και δилουβιακοί σχηματισμοί, απαντούν στη βόρεια περίμετρο της ασβεστολιθικής μάζας, από την Αγυιά μέχρι το ακρωτήριο Καλάμι, καθώς και στη βόρεια παράκτια ζώνη, από την πόλη των Χανίων και προς τα δυτικά. Στα νεογενή περιλαμβάνονται πορώδης μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι και μάργες του Μειόκαινου, καθώς και μάργες, μαργαϊκοί ψαμμίτες, κροκαλομιγείς μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι του Πλειόκαινου. Οι δилουβιακοί σχηματισμοί απαντούν κυρίως στην περιοχή της Αγυιάς. Τέλος, οι πρόσφατες ολοκαινικές αποθέσεις

σημειώνουν μεγάλη ανάπτυξη στην κοιλάδα Αγυιάς-Χανίων-Σούδας και στη λεκάνη Κουφού-Κερίτη. Στην κοιλάδα απαντούν κυρίως λεπτόκοκκοι αργιλοϊλυαμμώδεις σχηματισμοί ενώ στη λεκάνη Κουφού-Κερίτη επικρατούν οι αδρομερείς κροκαλοαμμώδεις αποθέσεις, ποτάμιας προέλευσης.

Οι ασβεστολιθικές εμφανίσεις με τα χαμηλότερα υψόμετρα , σημειώνονται στην περιοχή των Μυλωνιανών και στον Κουφό. Και στις δυο παρατηρούνται μορφές παλαιότερων αναβλύσεων σε υψόμετρα υψηλότερα από τις σημερινές θέσεις των αντίστοιχων πηγών.

Στα Μυλωνιανά σε υψόμετρο 100 μ. περίπου υπάρχουν ίχνη που πιθανών να συνδέονται με λειτουργία πηγών σε παλαιότερη γεωλογική εποχή. Όμως η ελάττωση του πάχους της αργιλικής επικάλυψης των ασβεστόλιθων στην περιοχή της Αγυιάς κατά μια φάση ανοδικής κινήσεως και διαβρώσεως και η εξασθένηση της υδατοστεγανότητας οδήγησε στην εμφάνιση των πηγών εκεί όπου υπάρχουν σήμερα

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

## **5.6. Υδροφορία Υπολεκάνης Αγυιάς**

### **5.6.1.ΓΕΝΙΚΑ**

(«Υδρογεωλογική μελέτη του κάμπου Χανίων», 2001)

Οι πετρολογικοί σχηματισμοί που συμμετέχουν στη δομή της περιοχής διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες σχηματισμών, ανάλογα με τα υδρολιθολογικά χαρακτηριστικά τους:

- Καρστικούς – υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας
- Καρστικούς – μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας
- Καρστικούς – μειοκαινικούς - υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας
- Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας
- Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας
- Πορώδεις μη προσχωματικούς - μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας
- Πρακτικά αδιαπέρατους

#### **5.6.1.1 Καρστικοί σχηματισμοί**

Η κυκλοφορία του νερού στους καρστικούς σχηματισμούς γίνεται μέσω του δευτερογενούς πορώδους (ασυνέχειες και καρστικά κενά). Ανάλογα με την υδροπερατότητά τους διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Ασβεστόλιθοι, δολομίτες, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα υψηλής έως μέτριας υδροπερατότητας. Ο χαρακτηρισμός 'μέτριας υδροπερατότητας' αποδίδεται στα μη καρστικοποιημένα ή δολομιτωμένα τμήματα της μάζας των σχηματισμών αυτών. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται οι έντονα καρστικοποιημένοι

ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης, τα ανθρακικά Τρυπαλίου και οι Τριαδικοί ασβεστόλιθοι και Δολομίτες της Ιονίου ζώνης, οι οποίοι αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες που εκφορτίζονται μέσω μεγάλων καρστικών πηγών.

- Ασβεστόλιθοι μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ασβεστόλιθοι της ζώνης της Πίνδου και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Ουρασικής – Ηωκαινικής ηλικίας Ιονίου ζώνης. Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς ελέγχεται από τις παρεμβολές πυριτολίθων, κερατολίθων, αργιλικών σχιστολίθων. Αναπτύσσονται εδώ μέσου έως μικρού δυναμικού υπόγειες υδροφορίες. Κατά θέσεις οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν το υδρογεωλογικό όριο και υπόβαθρο των υψηλής υδροπερατότητας ανθρακικών σχηματισμών, όταν έχουν μικρή υδροπερατότητα και η θέση τους το επιτρέπει.

- Μειοκαινικά ασβεστολιθικά κυρίως λατυποκροκαλοπαγή Τοπολίων μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας. Παρουσιάζουν πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες.

#### **5.6.1.2 Πορώδεις σχηματισμοί**

Η κυκλοφορία του νερού στους σχηματισμούς αυτούς πραγματοποιείται μέσω του πρωτογενούς πορώδους (πορώδες κόκκων). Ανάλογα με την υδροπερατότητά τους διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

- Μειοκαινικές και Πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας. Αποτελούνται από τα κροκαλοπαγή και τους μαργαϊκούς ασβεστόλιθους των νεογενών σχηματισμών. Καταλαμβάνουν τις παρυφές των ορεινών ασβεστολιθικών όγκων και μερικές φορές τροφοδοτούνται πλευρικά από τους ασβεστόλιθους όταν η πιεζομετρία το επιτρέπει. Στη μάζα τους αναπτύσσονται επιμέρους υπόγειες υδροφορίες μέσου ή μικρού δυναμικού.

- Κοκκώδεις προσχωματικοί σχηματισμοί μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι ποτάμιες και θαλάσσιες αναβαθμίδες, τα κροκαλοπαγή ποτάμιας προέλευσης, τα πλευρικά κορήματα και οι κώνοι κορημάτων. Στις περιπτώσεις που οι σχηματισμοί των πλευρικών κορημάτων, των κώνων κορημάτων και των αναβαθμιδών καλύπτουν μικρή έκταση και έχουν μικρό πάχος, δεν έχουν υδρογεωλογική σημασία. Αναπτύσσονται ιδιαίτερα στις σύγχρονες αποθέσεις ποταμών και χειμάρρων με αξιόλογες φρεάτιες υδροφορίες. Κοντά στη θάλασσα οι υδροφορίες αυτές έχουν υποστεί έντονη υφαλμύριση.

- Κοκκώδεις μη προσχωματικοί σχηματισμοί μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας. Περιλαμβάνονται οι πλειοκαινικές και μειοκαινικές μάργες, καθώς και ο αδιαίρετος σχηματισμός των νεογενών. Τοπικά στον αδιαίρετο σχηματισμό των νεογενών αναμένεται η ανάπτυξη υδροφοριών μέσα σε παρεμβολές κροκαλοπαγών ή μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Σε ορισμένα σημεία αναπτύσσονται στρώματα γύψου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία, υποβαθμισμένη όμως λόγω των θειικών ιόντων.

#### **5.6.1.3 Αδιαπέραστοι σχηματισμοί**

Πρόκειται για πρακτικά αδιαπέραστους ή εκλεκτικής κυκλοφορίας σχηματισμούς με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται το τεκτονικό κάλυμμα των φυλλιτών – χαλαζιτών, ο φλύσχης και πρώτος φλύσχης της ζώνης της Πίνδου, ο φλύσχης της ζώνης της Τρίπολης και οι σχιστόλιθοι με Posidonia της Ιονίου ζώνης. Μέσα στο σύστημα φυλλιτών – χαλαζιτών παρεμβάλλονται συχνά ζώνες μαρμάρων που έχουν τοπική υδρογεωλογική σημασία σε συνδυασμό με τις ζώνες κερματισμού του τεκτονικού αυτού καλύμματος.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ARGUS ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ**

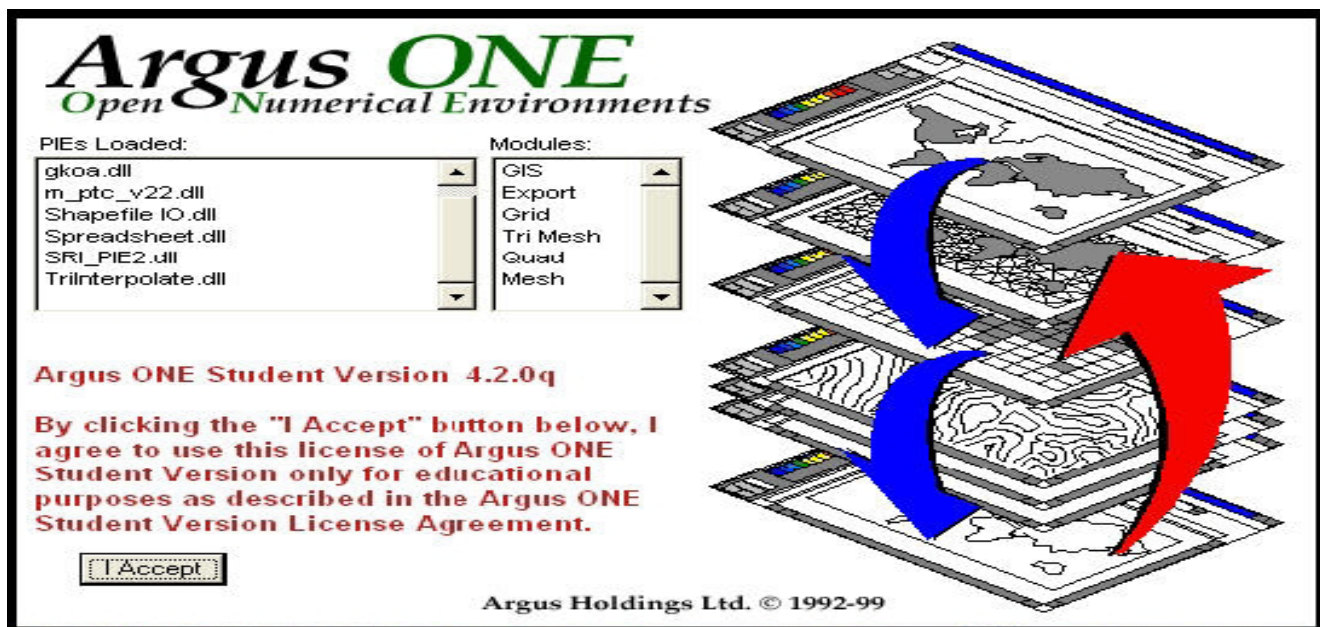
## **6.1 Εισαγωγή**

Για την ανάλυση ευαισθησίας στην περιοχή της λεκάνης του Κερίτη στηριχθήκαμε στην διπλωματική εργασία : «*Υδρολογική μελέτη και σενάρια διαχείρισης υπόγειου υδροφορέα περιοχής Αγιάς Χανίων με χρήση μοντέλων προσομοίωσης*» του Δ. Βρυζώνη που ασχολήθηκε εκτενώς με την προσομοίωση της συγκεκριμένης περιοχής μέσω του προγράμματος PTC.

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ARGUS ONE Student Version 4.2.0.q σε συνδυασμό με το PTC (Princeton Transport Code).

Το ARGUS ONE είναι ένα πρόγραμμα που δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών και απεικονίζει με απλό τρόπο τα αποτελέσματα. Περιέχει ένα σύνολο εργαλείων που επιτρέπουν την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών, επεξεργασία τμήματός τους και τη δημιουργία πλέγματος. Επιτρέπει επίσης την εισαγωγή διαφόρων μεταβλητών στο πλέγμα, όπως τιμές, συγκεντρώσεις, σημειακά δεδομένα κτλ. Αυτό γίνεται μέσω των επιπέδων πληροφορίας 'layers'. Τέλος, τα δεδομένα που σχηματίζονται μέσω του προγράμματος μπορούν να εξαχθούν σε format κατάλληλο για οποιοδήποτε αριθμητικό κωδικό.

Το επίπεδο πληροφορίας 'layer' είναι το βασικό στοιχείο με το οποίο λειτουργεί το πρόγραμμα. Μπορεί να περιγραφεί ως ένα διάφανο φύλλο όπου εγγράφονται όλες οι πληροφορίες. Σχεδιάζοντας το πεδίο ορισμού, πλέγματα, grids, χάρτες σε διαφορετικές διαφάνειες οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν πάνω-κάτω, να διαγραφούν ή να αποκρύπτονται, ο χρήστης μπορεί να προσθέσει ή να μεταβάλλει τμήματα της μελέτης με γραφικό τρόπο.



**Εικόνα 7.1**

Διαφορετικά είδη πληροφορίας μπορούν να αποθηκευτούν σε ειδικού τύπου επίπεδα 'layer'. Τα βασικά στοιχεία με τα οποία λειτουργεί το πρόγραμμα, δηλαδή πεδίο ορισμού, πλέγματα και grids ορίζονται στα layer 'Domain', 'Mesh' και 'Grid' αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα layers είναι 'πληροφορία', 'χάρτες' και 'δεδομένα'. Τα layer μπορούν να σχηματιστούν ή και να διαγραφούν από τον χρήστη.

- Τα layer 'πληροφορίας' χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεταβλητών με το πλέγμα ή το grid. Για παράδειγμα, είναι δυνατός ο ορισμός της διαπερατότητας του εδάφους.
- Τα layer 'χάρτες' χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών. Αυτό επιτρέπει στον χρήστη να εξαγάγει τα όρια του πεδίου ορισμού από το χάρτη ή απλά να χρησιμοποιήσει το χάρτη ως σημείο αναφοράς.
- Τα layer 'δεδομένων' χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή δεδομένων άλλων προγραμμάτων (PTC κυρίως) στο ARGUS ONE. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για διάφορες χρήσεις, όπως είναι η δημιουργία γραφικής απόδοσης των αποτελεσμάτων του PTC

(ARGUS ONE Student Version 4.2.0.q LantchBook)



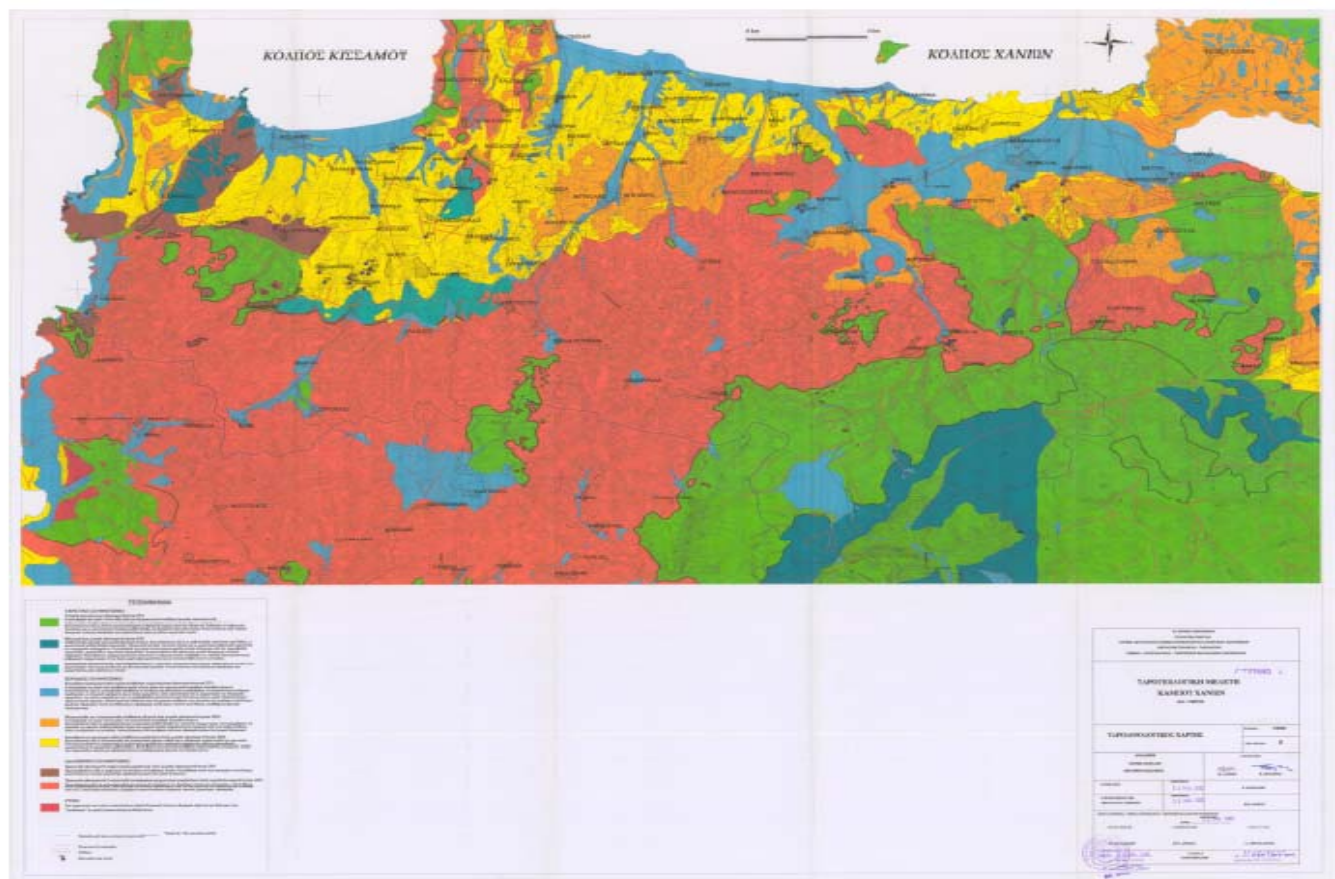
## **6.2 Εφαρμογή Του Μοντέλου ARGUSONE Και Του Κώδικα Επίλυσης PTC Για Την Ανάλυση Ευαισθησίας Του Υδροφορέα Στην Λεκάνη του Κερίτη, Στην Περιοχή Της Αγιάς**

### **6.2.1 ΓΕΝΙΚΑ**

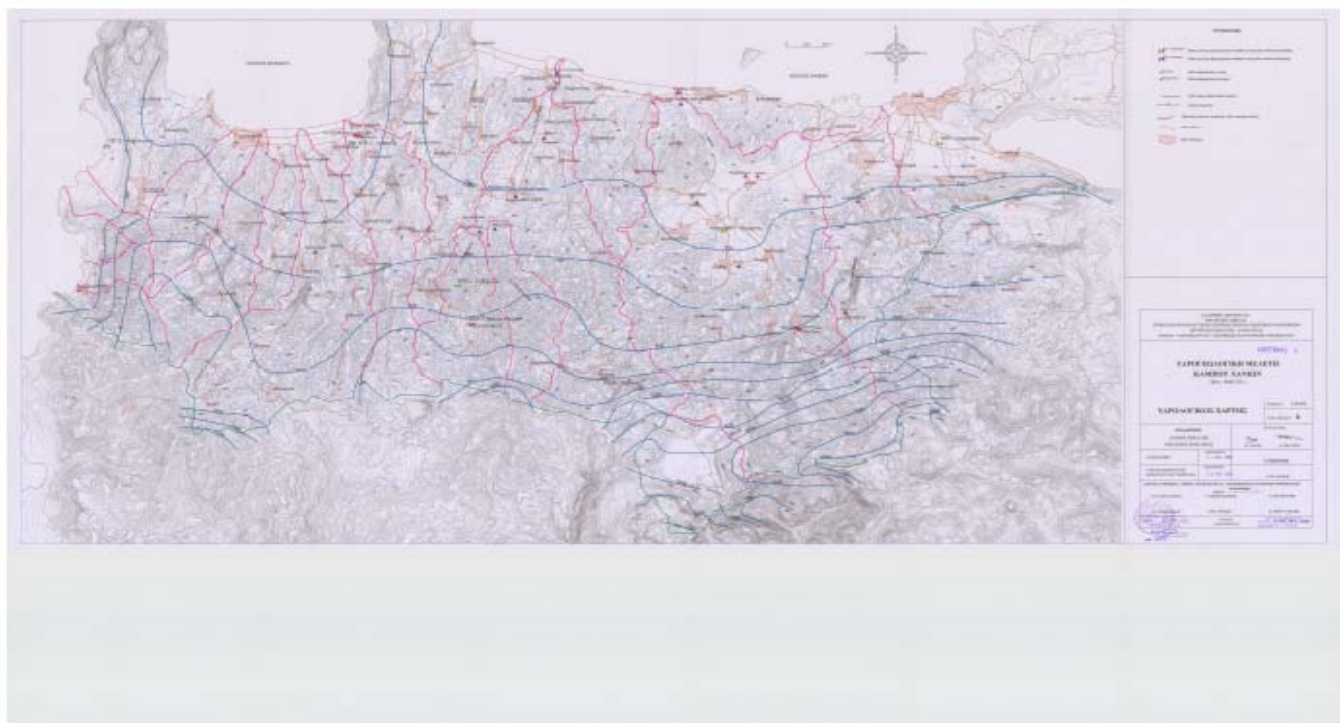
Η ανάλυση ευαισθησίας για την λεκάνη του Κερίτη στηρίχθηκε στις υπάρχουσες κλιματολογικές συνθήκες όπως και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής όπως αυτά αποτυπώθηκαν στην διπλωματική εργασία : «*Υδρολογική μελέτη και σενάρια διαχείρισης υπόγειου υδροφορέα περιοχής Αγιάς Χανίων με χρήση μοντέλων προσομοίωσης*» του Δ. Βρυζώνη

### **6.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

**1.Χάρτης Περιοχής - Κλίμακα** Η κλίμακα του μοντέλου έχει ρυθμιστεί ούτως ώστε να αντιστοιχεί με τον χάρτη που αντιπροσωπεύει την περιοχή (1:50000). Έχουν εισαχθεί ένας υδρολογικός καθώς και ένας γεωλογικός χάρτης ο οποίος μας δίνει πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία της περιοχής και την υδραυλική αγωγιμότητα του κάθε γεωλογικού σχηματισμού.



**Εικόνα 7.2: Γεωλογικός χάρτης**

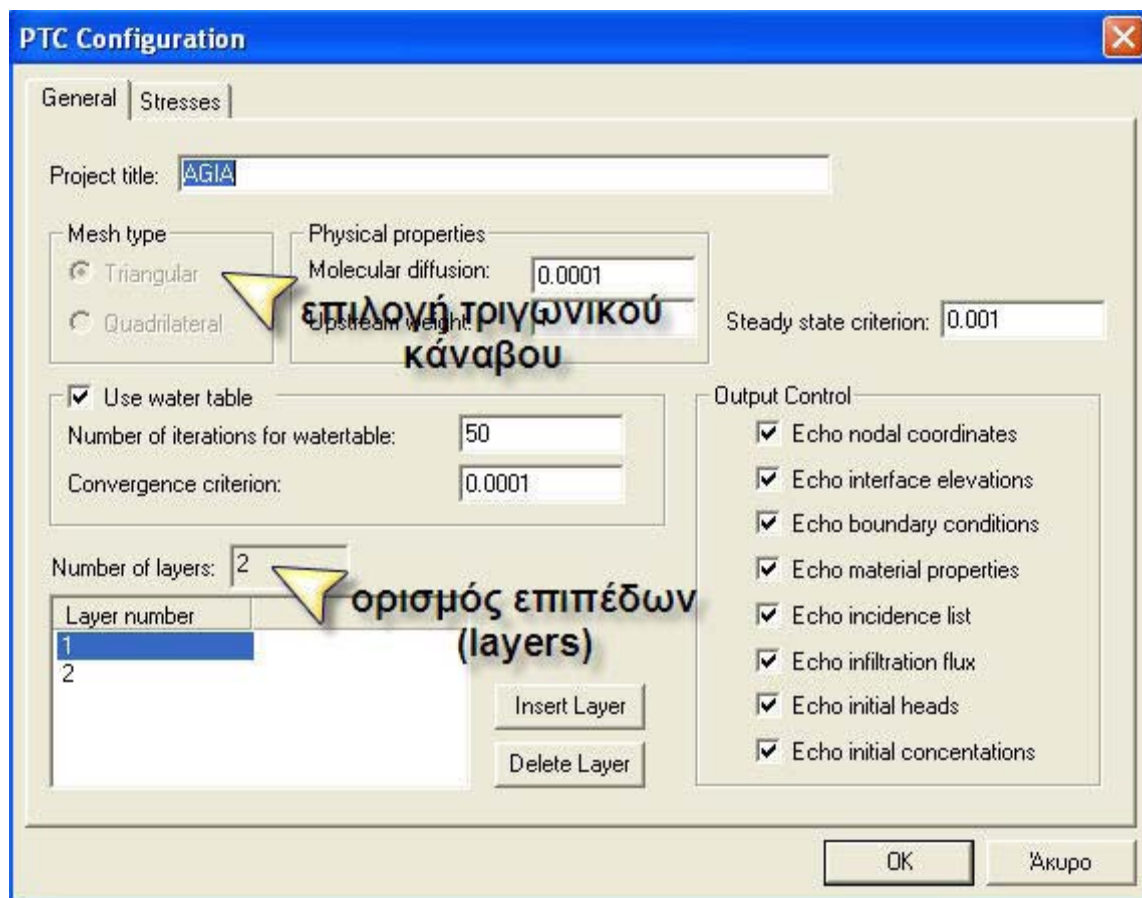


**Εικόνα 7.3: Υδρολογικός χάρτης**

**2.Τριγωνικός Κανάβος :** Πρέπει να σημειώσουμε πως στην εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή της Αγυιάς , χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του πεδίου (δηλαδή της περιοχής) η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με την οποία έχουμε τμηματοποίηση της περιοχής σε στοιχεία τριγωνικού σχήματος, όπου οι κόμβοι βρίσκονται στις κορυφές αυτών των τριγώνων. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου κανάβου έγινε λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειάς του συγκριτικά με τον ορθογωνικό.

**3.Υπόγειος Υδροφορέας:** Ο υπόγειος υδροφορέας της περιοχής χαρακτηρίστηκε ως ελεύθερος

**4. Επίπεδα (layers) Άντλησης** : Θεωρούμε 2 επίπεδα άντλησης. Το πρώτο εκτείνεται από υψόμετρο 0 έως τα 100 μέτρα (που θεωρούμε το υψόμετρο της θάλασσας), και το δεύτερο από τα 100 μέτρα έως την επιφάνεια του εδάφους.



**Εικόνα 7.4:** Επιλογή Τριγωνικού Κανάβου και Καθορισμός επιπέδων



**5. Περίοδος Μελέτης** : Η περίοδος μελέτης οριστική στο ένα έτος (360 μέρες) χωρισμένο σε 7 περιόδους (stresses) :

**stress 1**: Οκτώβριος- Μάρτιος,

**stress 2**: Απρίλιος,

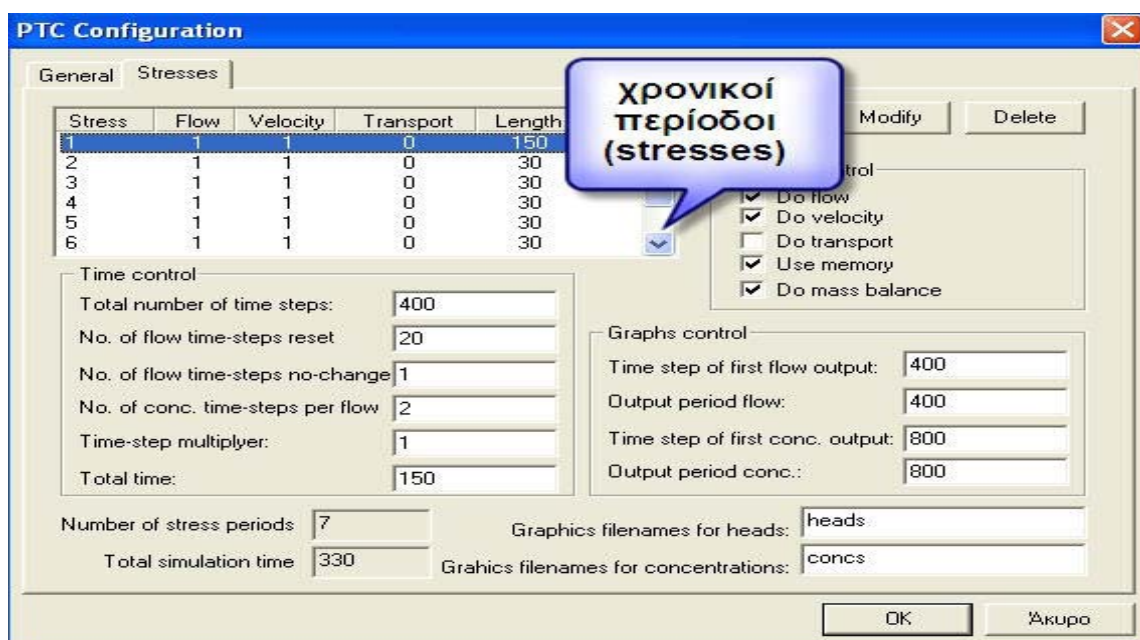
**stress 3**: Μάιος,

**stress 4**: Ιούνιος,

**stress 5**: Ιούλιος,

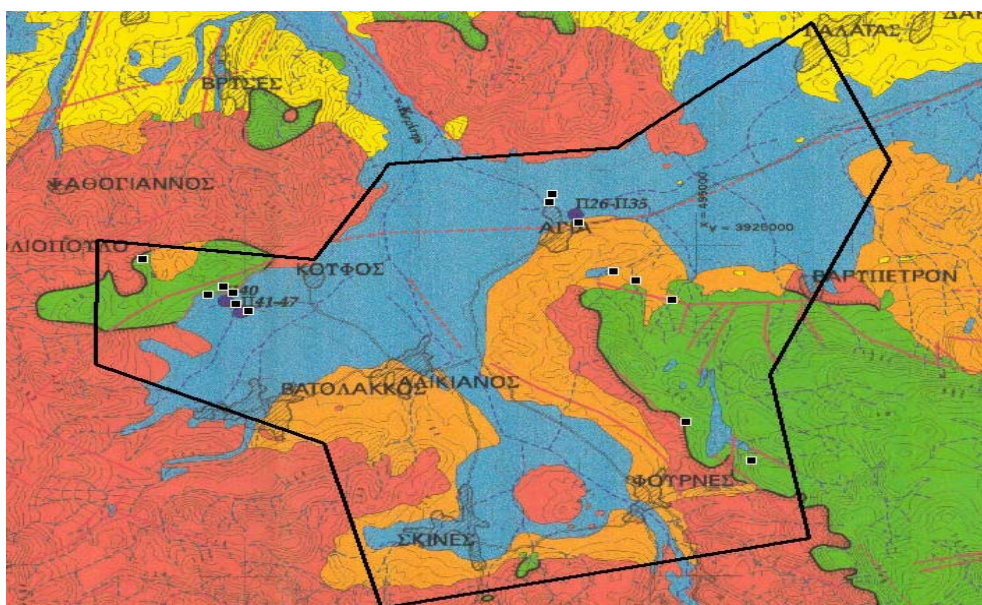
**stress 6**: Αύγουστος,

**stress 7**: Σεπτέμβριος



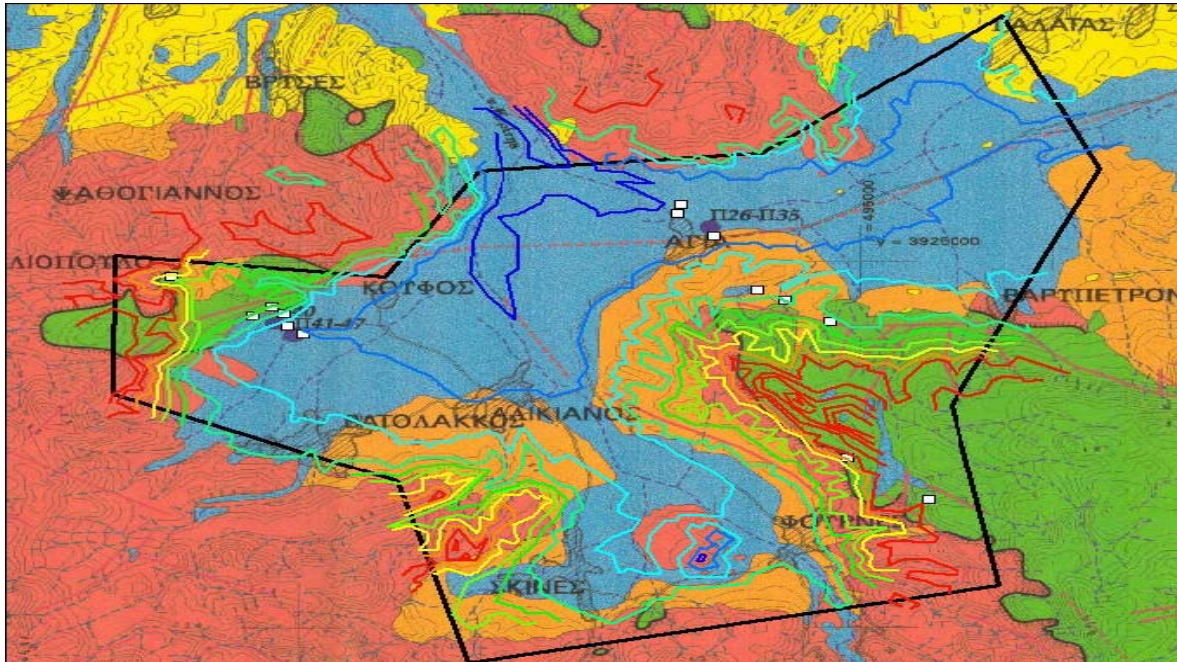
**Εικόνα 7.5:** Καθορισμός Διάρκειας Μελέτης και περιόδων

**6. Όρια Περιοχής Μελέτης** :



**Εικόνα 7.6:** Οριοθέτηση Περιοχής Μελέτης

**7. Ισουψείς Της Περιοχής Μελέτης** : Οι ισοϋψείς τοποθετήθηκαν στις θέσεις των πηγών και των γεωτρήσεων και ορίστηκαν στο layer 2 , αφού το layer 1 έχει σταθερή τιμή (100m)



**Εικόνα 7.7:** Ισουψείς

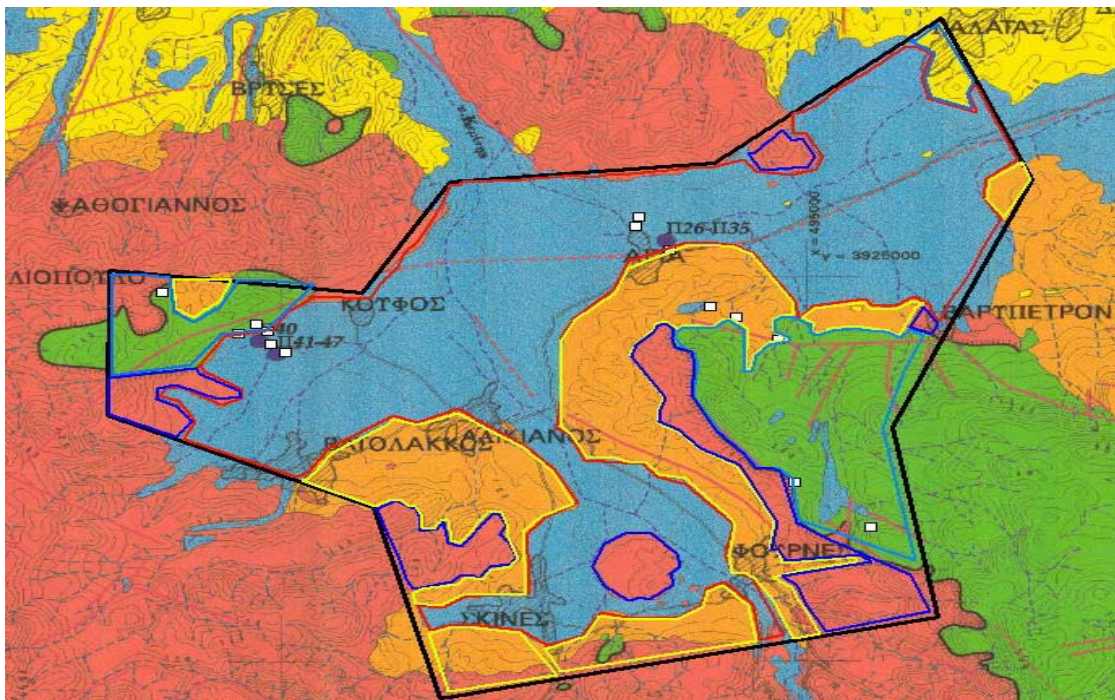
**8. Υδραυλική Αγωγιμότητα:** Υπάρχουν 3 ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας που καθορίζονται από τους αντίστοιχους πορώδεις σχηματισμούς, και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες :

- Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας ( $8 \cdot 10^{-4}$  m/sec ή 69,12m/day)
- Πορώδεις προσχωματικοί - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας ( $6 \cdot 10^{-4}$  m/sec ή 51,84m/day)
- Πορώδεις μη προσχωματικοί-μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας ( $10^{-4}$  m/sec ή 8,64m/day)



- ✓ Οι πρακτικά αδιαπέραστοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από την τιμή  $10^{-8}$  m/sec ή 0,000864m/day .

Οι παραπάνω τιμές είναι ίδιες και για τα δυο στρώματα. Παρατηρούμε όμως ότι ένας καρστικός σχηματισμός στο ένα επίπεδο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με 10m/day ενώ στο επίπεδο 2 έχει τιμή ίση με 300 m/day. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης ενός ρήγματος στο επίπεδο 2 το οποίο έχει σπάσει σε πολλαπλά σημεία το σχηματισμό αποδίδοντας του πολύ μεγαλύτερη υδροπερατότητα.

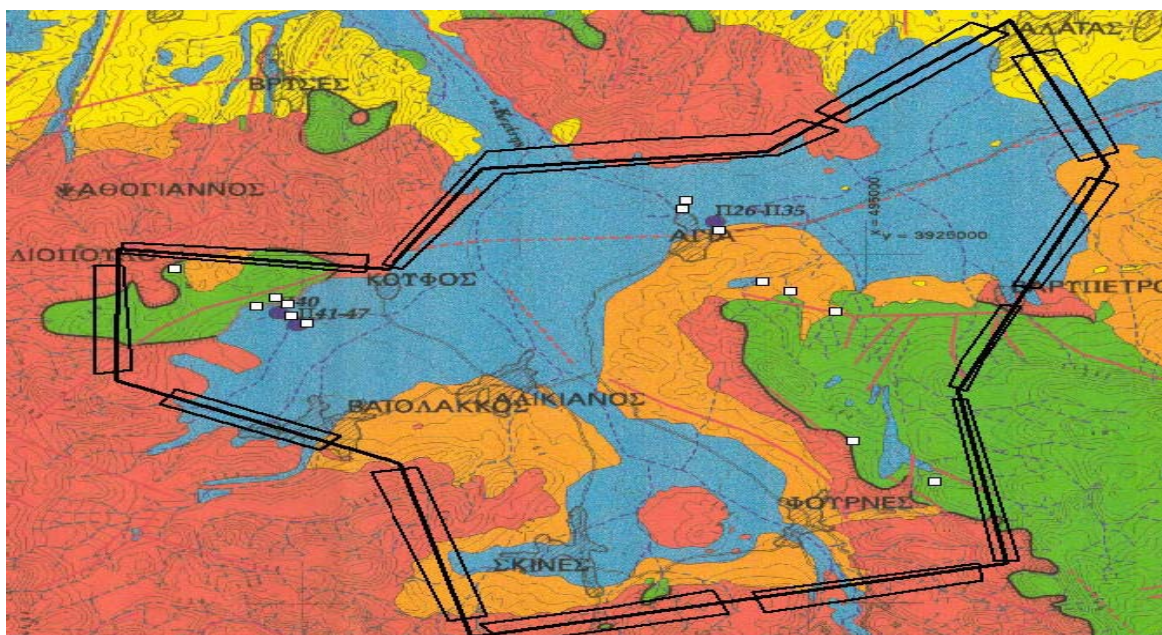


**Εικόνα 7.8:** Ζώνες Υδραυλικής αγωγιμότητας

**9. Οριακές Συνθήκες** : Στην περιοχή υπάρχει σταθερή ροή (β' είδους συνθήκες ) με διαφορετική τιμή σε κάθε χρονική περίοδο μας.

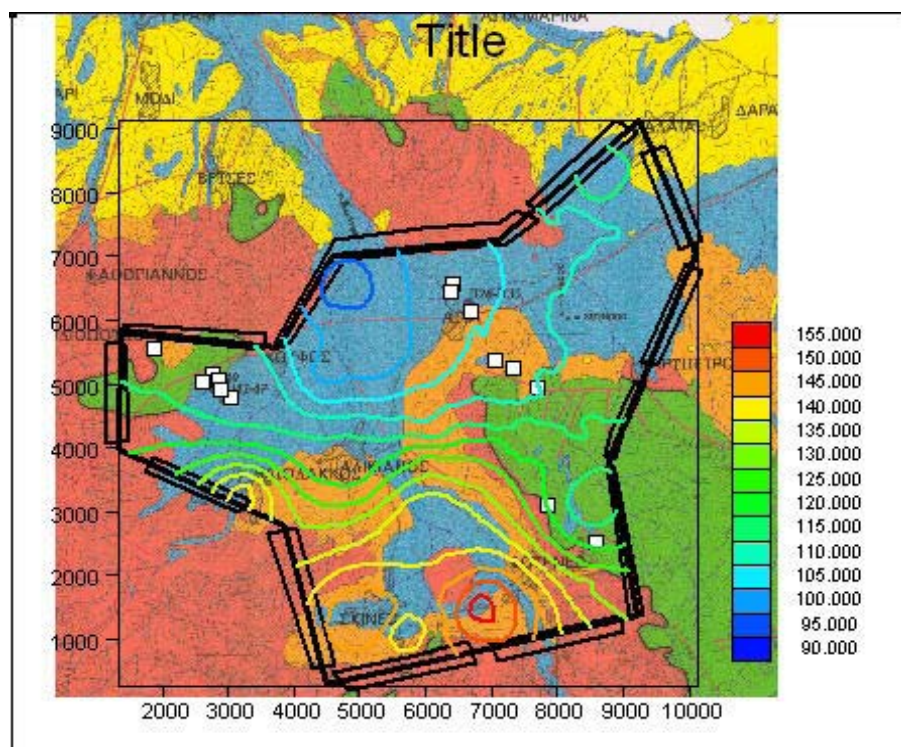
Οι τιμές στις οριακές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις υποθετικές τιμές εισροών(+) & εκροών(-). Οι σημειακές τιμές είναι διαφορετικές, δεδομένου ότι αναπαριστούν τις

παροχές από τις αντλήσεις των γεωτρήσεων και τις εκφορτίσεις των πηγών κατά τη διάρκεια των περιόδων μας.



**Εικόνα 7.9:** Οριακές συνθήκες

**10. Αρχικά Υδραυλικά Ύψη (Initial heads):** Οι τιμές που ορίστηκαν ως αρχικές προέκυψαν από μετρήσεις στο πεδίο



**Εικόνα 7.10:** Αρχικά Υδραυλικά ύψη



**11. Βροχόπτωση:** Για να προσδιοριστεί η διήθηση λόγω βροχόπτωσης. Ορίστηκε ως μέση τιμή βροχόπτωσης 0.0005m/ημέρα (150 mm/μήνα) κατά τους χειμερινούς μήνες και μηδενική τιμή για τη θερινή περίοδο.

Layer Parameters:

| Name   | Units   | Type | Value                                      |
|--|---------|------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Rain Stress1 | [L]/[T] | Real | <input checked="" type="checkbox"/> 0.0005 |
| Rain Stress2                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |
| Rain Stress3                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |
| Rain Stress4                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |
| Rain Stress5                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |
| Rain Stress6                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |
| Rain Stress7                                     | [L]/[T] | Real | <input type="checkbox"/> 0                 |

**Εικόνα 7.11:** Καθορισμός Βροχόπτωσης ανά περίοδο

**12. Πορώδες:** Ορίστηκε μια μέση τιμή 0.4 πορώδες για την περιοχή μας ανεξαρτήτως layer

Layer Parameters:

| Name   | Units | Type | Value                                   |
|--|-------|------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Porosity |       | Real | <input checked="" type="checkbox"/> 0.4 |

**Εικόνα 7.12:** Καθορισμός Πορώδους Περιοχής

**13.Αποθηκευτικότητα:** Ορίζουμε μια μέση τιμή 0.0001 αποθηκευτικότητας για την περιοχή μας ανεξαρτήτως layer και ανεξαρτήτως χρονικής περιόδου.

Layer Parameters:

| Name   | Units | Type | Value                                      |
|--|-------|------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Storativity L1 |       | Real | <input checked="" type="checkbox"/> 0.0001 |

**Εικόνα 7.13:** Καθορισμός Αποθηκευτικότητας Περιοχής



## **6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας**

### **6.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ**

Εδώ παρουσιάζουμε την εφαρμογή του μοντέλου για την περιοχή της λεκάνης του Κερίτη και συγκεκριμένα του υπόγειου υδροφορέα της Αγυιάς. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας στηριχθήκαμε σε τέσσερις παραμέτρους:

- (α) τις οριακές συνθήκες
- (β) τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, εφόσον δεν έχει ενιαία τιμή σε όλο το εύρος της περιοχής.
- (γ) τις τιμές του πορώδους
- (δ) τις τιμές των παροχών άντλησης

Συγκεκριμένα, πραγματοποιήσαμε μεταβολές στις τιμές αυτών των παραμέτρων σε διάφορους συνδυασμούς, διατηρώντας σταθερά τα υπόλοιπα δεδομένα όπως περιγράφηκαν παραπάνω. Δημιουργήσαμε, έτσι διαφορετικά «σενάρια» για την περιοχή μελέτης που, με κάθε προσομοίωση του προγράμματος, μας δίνουν νέες τιμές υδραυλικών υψών. Κατόπιν μελετώντας τις ποσοστιαίες μεταβολές της παραμέτρου, διαπιστώνουμε την ευαισθησία της περιοχής σε διάφορες υποπεριοχές.

### **6.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ « ΣΕΝΑΡΙΩΝ »**

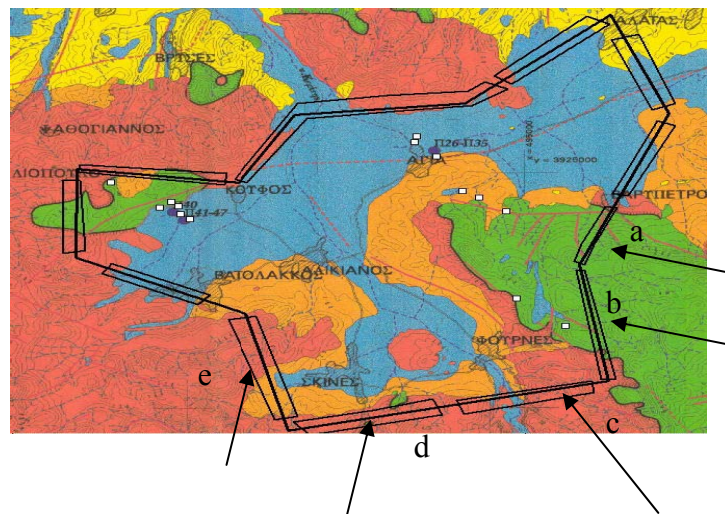
**A) ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΗΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ** : Η περιοχή της Λεκάνης του Κερίτη δεν παρουσιάζει σταθερή τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας, λόγω της διαφορετικότητας του υπεδάφους. Έτσι δημιουργούνται 3 ζώνες υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με το είδος του γεωλογικού σχηματισμού. Οι πορώδεις σχηματισμοί που συναντάμε είναι: Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις, προσχωματικοί και μη προσχωματικοί σχηματισμοί.

Δημιουργήσαμε 14 νέα διαφορετικά «σενάρια» βασισμένοι στις μεταβολές της υδραυλικής αγωγιμότητας, που διαμορφώθηκαν ως εξής :

- ❖ αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας όλων των ζωνών
- ❖ μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας όλων των ζωνών
- ❖ αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας κάθε ζώνης ξεχωριστά
- ❖ μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας κάθε ζώνης ξεχωριστά
- ❖ αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας ανά δύο ζώνες
- ❖ μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας ανά δύο ζώνες

## **B) ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ :**

Οι οριακές συνθήκες στην περιοχή της Λεκάνης του Κερίτη δεν θεωρήθηκαν σταθερές. Τα τμήματα της περιοχής που μεταβάλαμε τις τιμές των παραμέτρων επιλέχθηκαν συμφωνά με την διεύθυνση της ροής του υπόγειου ύδατος. Τα σημεία «εισόδου» του νερού στον υπόγειο υδροφορέα του συστήματος φαίνονται δίπλα. Μεταβάλαμε τις οριακές συνθήκες σε 5 τμήματα της περιοχής, δημιουργώντας άλλα 2 νέα σενάρια:



- ❖ αύξηση των τιμών των οριακών συνθηκών κατά 10% στα επιλεγμένα τμήματα της περιοχής
- ❖ μείωση των τιμών των οριακών συνθηκών κατά 10% στα επιλεγμένα τμήματα της περιοχής

**Γ) ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ** :Το πορώδες της περιοχής έχει οριστεί σταθερό ανεξαρτήτου στρώματος παίρνοντας μία αντιπροσωπευτική τιμή. Μεταβάλλοντας την παράμετρο δημιουργήσαμε δυο ακόμη νέα σενάρια:

- ❖ αύξηση της τιμής του πορώδες κατά 10%
- ❖ μείωση της τιμής του πορώδες κατά 10%

**Δ) ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΙΣ ΠΑΡΟΧΕΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ**: Η παροχή άντλησης της πηγής της περιοχής και των γειτονικών προς αυτήν πηγαδιών παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές λόγω των θέσεων και των χρήσεων τους. Μεταβάλλοντας , λοιπόν, την συγκεκριμένη παράμετρο δημιουργήσαμε άλλα 4 σενάρια :

- ❖ αύξηση της τιμής της παροχής άντλησης κατά 10%
- ❖ μείωση της τιμής της παροχής άντλησης κατά 10%
- ❖ αύξηση της τιμής της παροχής άντλησης κατά 25%
- ❖ μείωση της τιμής της παροχής άντλησης κατά 25%

## **6.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Σύμφωνα με τις μεταβολές των παραμέτρων και με την βοήθεια του PTC δημιουργήθηκαν καινούριες τιμές υδραυλικών υψών για κάθε ένα από τα σενάρια που περιγράφηκαν παραπάνω. Για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου στην περιοχή της Λεκάνης του Κερίτη συγκρίναμε τις ποσοστιαίες μεταβολές των τιμών των νέων υδραυλικών υψών με τις αρχικές της περιοχής.

Η εξαγωγή των συμπερασμάτων βασίστηκε στη σχέση μεταξύ των παραμέτρων που σαφέστατα επηρέασαν τα εξαχθέντα αποτελέσματα του μοντέλου. Είναι απαραίτητο να αναφερθούμε στα εξής :

- ✓ όσο μεγαλύτερη είναι η παροχή άντλησης ενός πηγαδιού, τόσο περισσότερο επηρεάζεται το ύψος της μεταβολής των υδραυλικών υψών. Συγκεκριμένα κατά την αύξηση της παροχής αντλήσεως υπάρχει μείωση των αρχικών υδραυλικών υψών, ενώ το αντίθετο συμβαίνει κατά την μείωση της παροχής άντλησης.
- ✓ Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε μία περιοχή, τόσο μικρότερη θα είναι η υδραυλική κλίση στην περιοχή αυτή, για δεδομένη παροχή αντλήσεως, άρα τόσο μικρότερη θα είναι και η μεταβολή των υδραυλικών υψών σύμφωνα και με το νόμο του Darcy :

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

Ο συνδυασμός βέβαια των δύο παραπάνω περιπτώσεων, κάτι που μας ενδιαφέρει εδώ, είναι αυτός που θα μας δώσει το ύψος της μεταβολής των υδραυλικών υψών.

Συμπερασματικά , σε μία περιοχή με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα και μικρές παροχές αντλήσεως θα παρατηρηθούν και μικρές μεταβολές στα υδραυλικά ύψη. Το αντίθετο θα συμβεί στην περίπτωση όπου έχουμε μικρή υδραυλική αγωγιμότητα και μεγάλες παροχές αντλήσεως. Φυσικά σε κάποια ενδιάμεση περίπτωση τα αποτελέσματα της μεταβολής των υδραυλικών υψών θα εξαρτώνται από το ύψος των δύο παραπάνω παραμέτρων και το πόσο αυτές μεταβάλλονται.

Πάντως οι μεγαλύτερες μεταβολές, και αυτό είναι που μας ενδιαφέρει, περιμένουμε να σημειωθούν εκεί όπου θα έχουμε πολύ μεγάλη παροχή αντλήσεως και πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα ή εκεί όπου θα συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή θα έχουμε μικρή παροχή αντλήσεως και μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα.

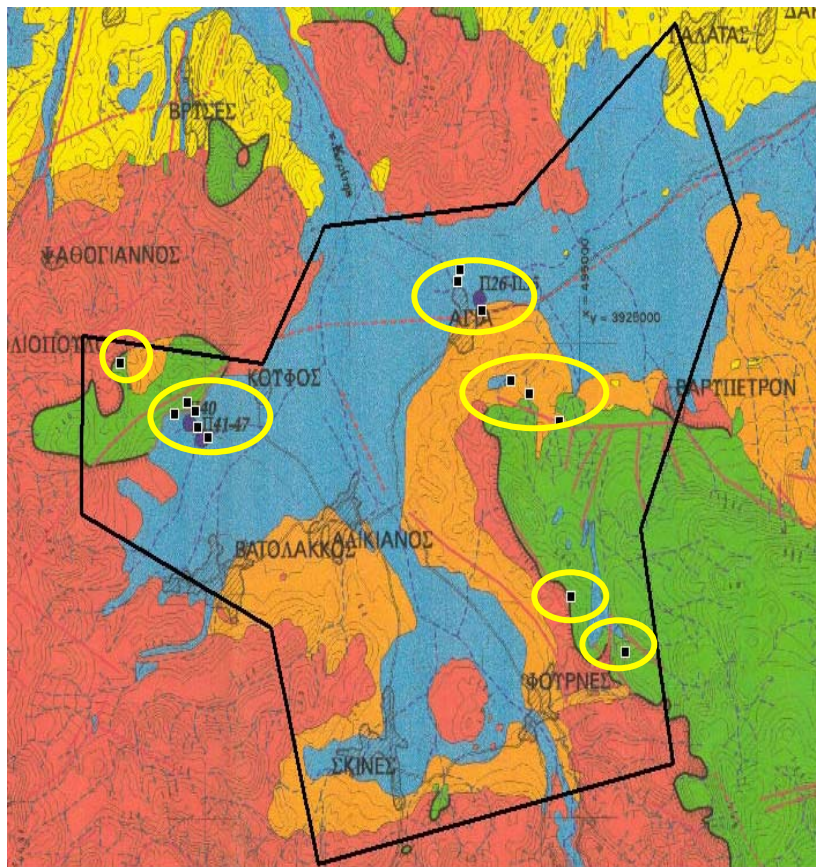
Παρακάτω εξετάζεται η κάθε περίπτωση μεταβολής των παραμέτρων χωριστά, αρχικά για τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στα διάφορα τμήματα της περιοχής μελέτης έπειτα για τις τιμές των οριακών συνθηκών στη συνέχεια για τις τιμές του πορώδους και τέλος για τις τιμές τω παροχών άντλησης.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων πρέπει να σημειώσουμε τα παρακάτω:

-Ομαδοποιήσαμε τα πηγάδια άντλησης σύμφωνα με τη διάταξη τους στη περιοχή για να πετύχουμε μεγαλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων ,όπως φαίνεται δίπλα

-Λάβαμε υπόψη μας τρεις από τις επτά περιόδους που αντιστοιχούν στον συνολικό χρόνο μελέτης. Επιλέξαμε τις περιόδους που αντιπροσωπεύουν τις εποχές του χρόνου για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα: **stress 1**: Οκτώβριος- Μάρτιος, **stress4**: Ιούνιος, **stress 7**: Σεπτέμβριος

-Για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών κάθε ομάδας πηγαδιών άντλησης στηριχθήκαμε σε πηγάδια παρατήρησης τα οποία τοποθετήθηκαν σε κόμβους (κορυφές τριγώνων του πλέγματος τμηματοποίησης της περιοχής ) περιμετρικά των ομάδων.



Τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το μοντέλο ,σε ένα αρχείο WORDPAD , είναι οι τιμές υδραυλικού ύψους που παρατηρούνται σε κάθε κόμβο του πλέγματος για κάθε περίοδο(stress).Από το αρχείο αυτό εξήγαμε τις τιμές για τους κόμβους που αντιστοιχούσαν στα πηγάδια παρατήρησης για κάθε περίοδο (stress) ξεχωριστά. Έτσι υπολογίσαμε το Δh (διαφορά αρχικής με νέας τιμής), στη συνέχεια τους μέσους όρους των Δh για τις περιόδους 1-4-7 και τέλος το μέσο όρο των τριών περιόδων για κάθε πηγάδι σε κάθε σενάριο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω του PTC αποτυπώθηκαν σε 2 διαγράμματα. Το πρώτο απεικονίζει την ποσοστιαία μεταβολή των υδραυλικών υψών κάθε πηγαδιού άντλησης για κάθε χρονική περίοδο (stress) ενώ το δεύτερο τη ποσοστιαία μέση μεταβολή των περιόδων μελέτης για κάθε πηγάδι.

### 7.2.3.3.α. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

#### 6.4.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

##### 1) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΙΜΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι μεταβολές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα σενάρια

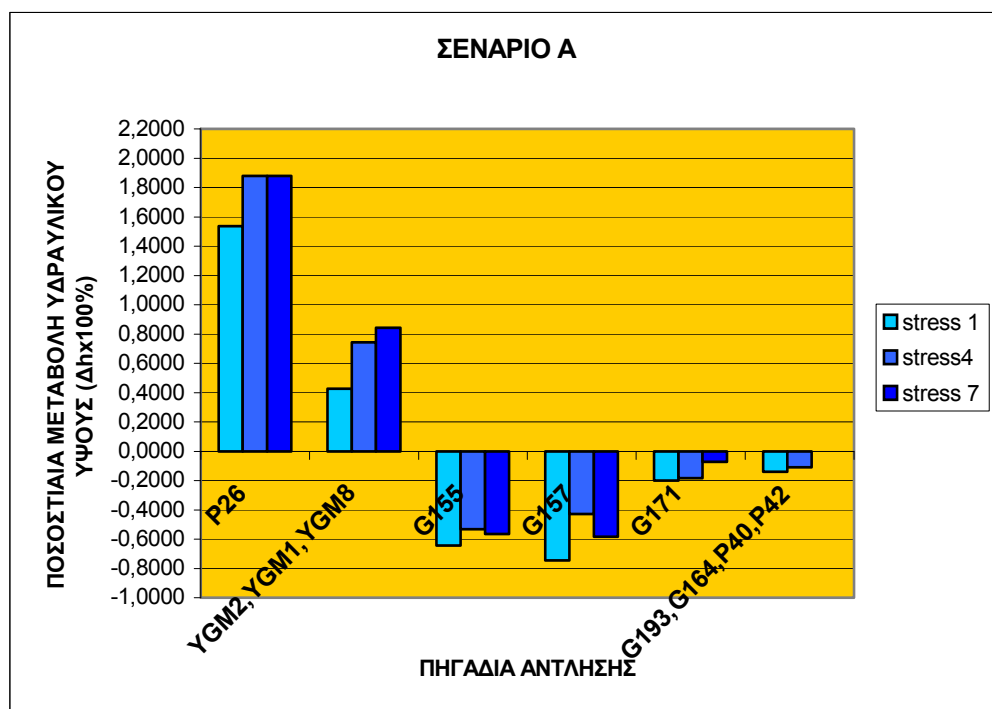
**Πίνακας 7.α**

| ΕΙΔΟΣ<br>ΠΟΡΩΔΟΥΣ<br>ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ   | ΣΤΡΩΜΑ | ΔΙΑΣΤΑΣΗ | ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ |                  |                  |
|--|--------|----------|-----------------------|------------------|------------------|
|  |        |          | ΑΡΧΙΚΗ<br>ΤΙΜΗ        | ΑΥΞΗΜΕΝΗ<br>ΤΙΜΗ | ΜΕΙΩΜΕΝΗ<br>ΤΙΜΗ |
| Πορώδεις<br>προσχωματικοί -<br>μέτριας έως<br>μικρής<br>υδροπερατότητας                                | L1     | x        | 51,84                 | 57,024           | 46,656           |
|  |        | ψ        | 51,84                 | 57,024           | 46,656           |
|  |        | z        | 5,184                 | 5,7024           | 4,6656           |
|  | L2     | x        | 51,84                 | 57,024           | 46,656           |
|  |        | ψ        | 51,84                 | 57,024           | 46,656           |
|  |        | z        | 5,184                 | 5,7024           | 4,6656           |
| Πορώδεις<br>μειοκαινικές και<br>πλειοκαινικές<br>αποθέσεις<br>μέτριας έως<br>μικρής<br>υδροπερατότητας | L1     | x        | 69,12                 | 76,032           | 62,208           |
|  |        | ψ        | 69,12                 | 76,032           | 62,208           |
|  |        | z        | 6,912                 | 7,6032           | 6,2208           |
|  | L2     | x        | 69,12                 | 76,032           | 62,208           |
|  |        | ψ        | 69,12                 | 76,032           | 62,208           |
|  |        | z        | 6,912                 | 7,6032           | 6,2208           |
| Πορώδεις μη<br>προσχωματικοί-<br>μικρής έως πολύ<br>μικρής<br>υδροπερατότητας                          | L1     | x        | 10                    | 11               | 9                |
|  |        | ψ        | 10                    | 11               | 9                |
|  |        | z        | 0,1                   | 1,1              | 0,9              |
|  | L2     | x        | 300                   | 330              | 270              |
|  |        | ψ        | 300                   | 330              | 270              |
|  |        | z        | 30                    | 33               | 27               |

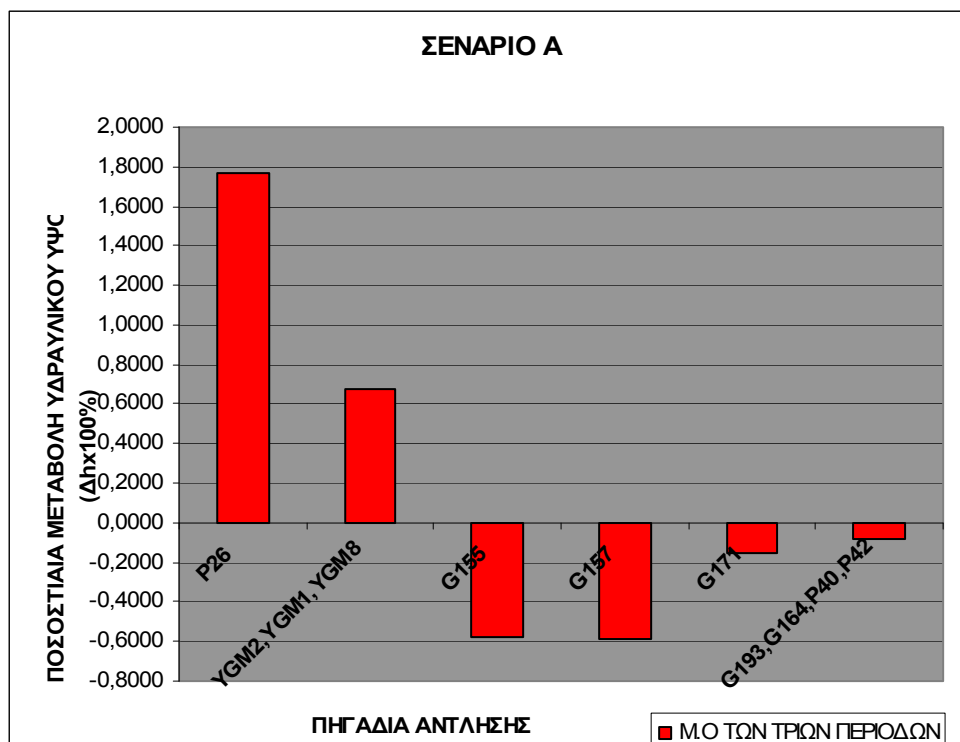
### ΣΕΝΑΡΙΟ Α:

Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας και των τριών ζωνών

Διάγραμμα 7.α.1

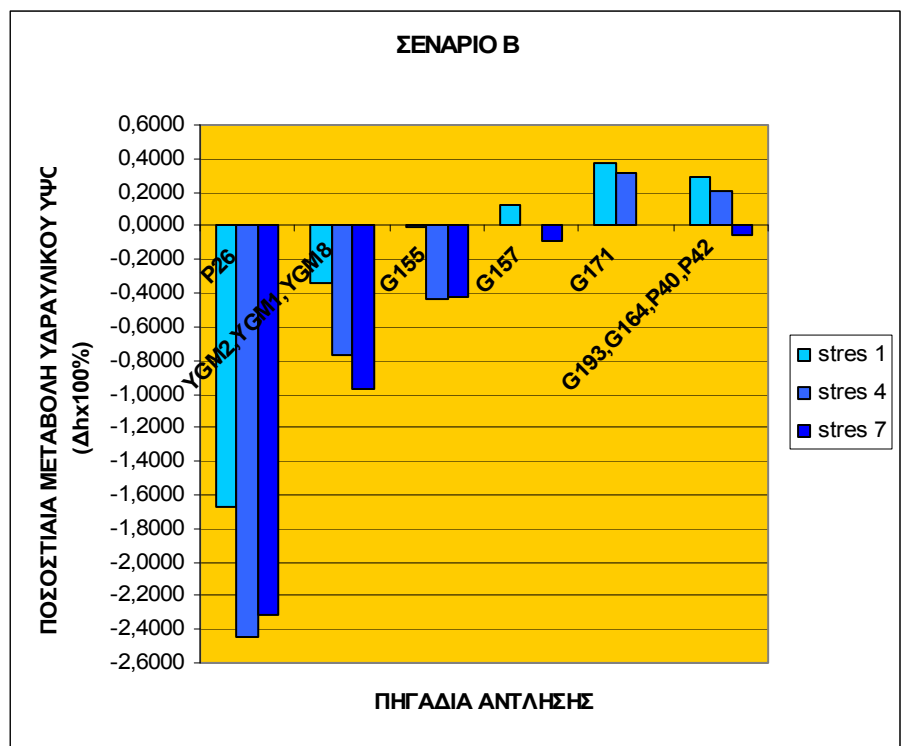


Διάγραμμα 7.α.2

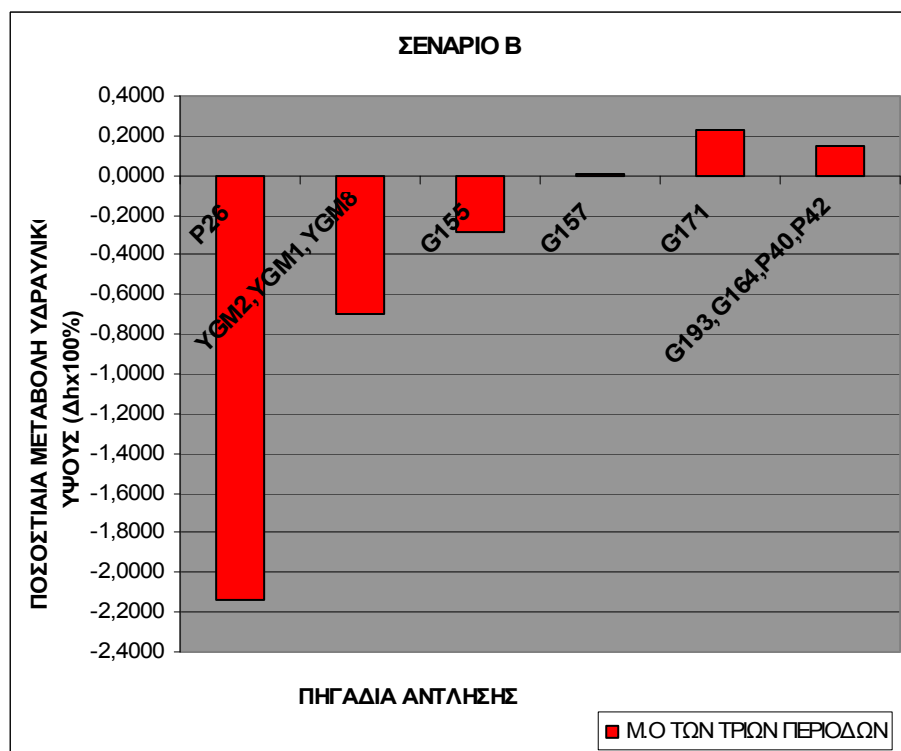


**ΣΕΝΑΡΙΟ Β:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας και των τριών ζωνών

Διάγραμμα 7.α.3



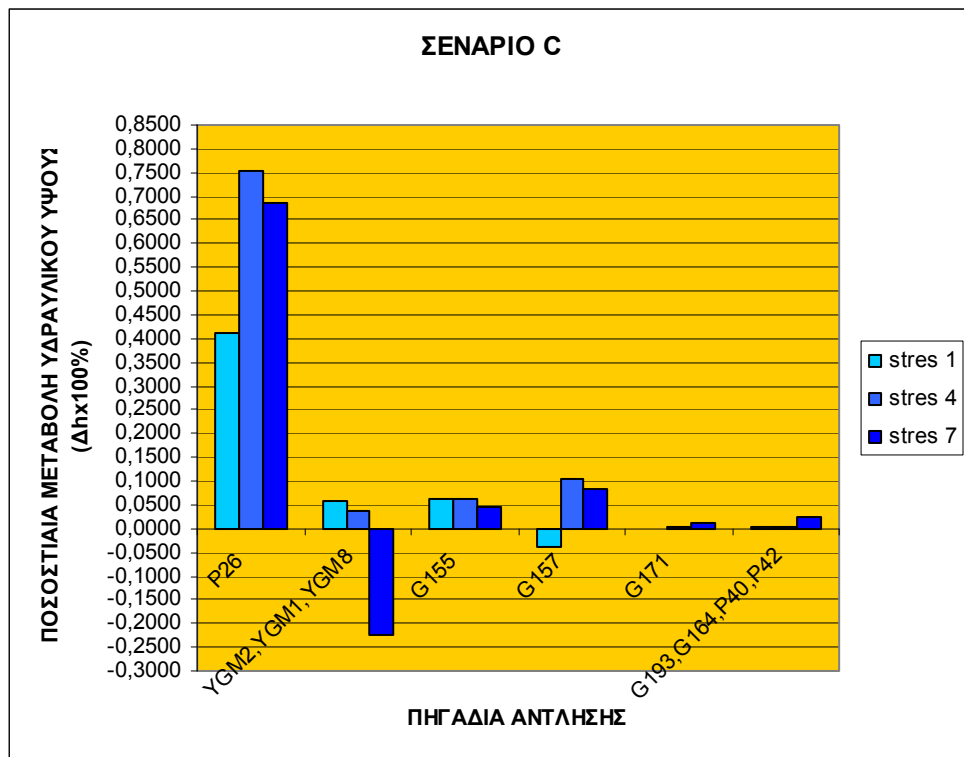
Διάγραμμα 7.α.4



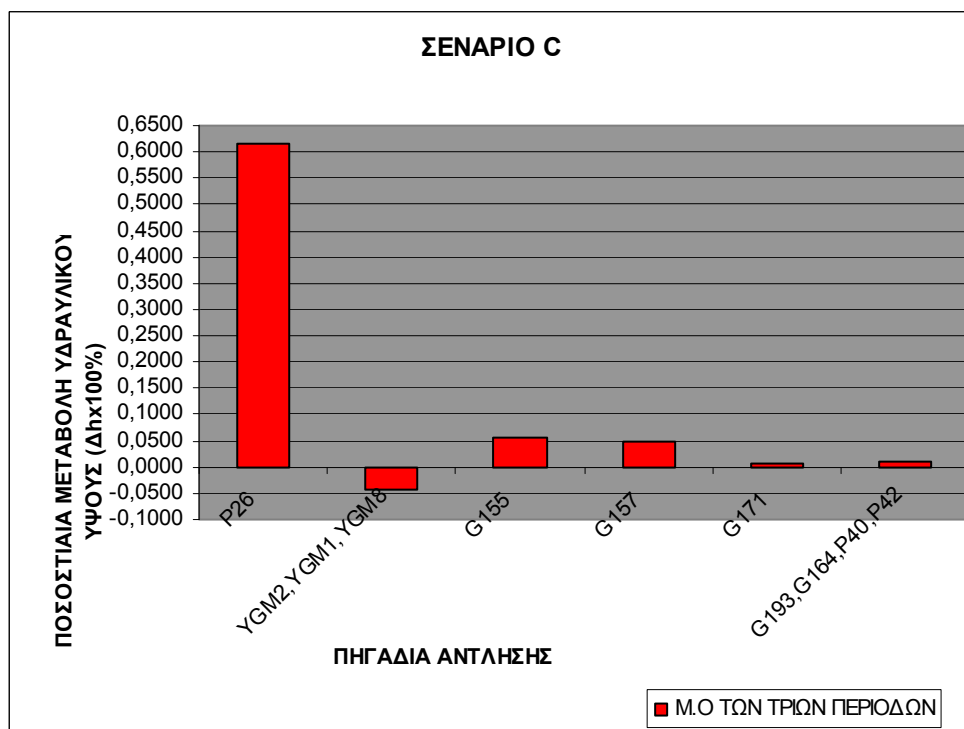


**ΣΕΝΑΡΙΟ C:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.5

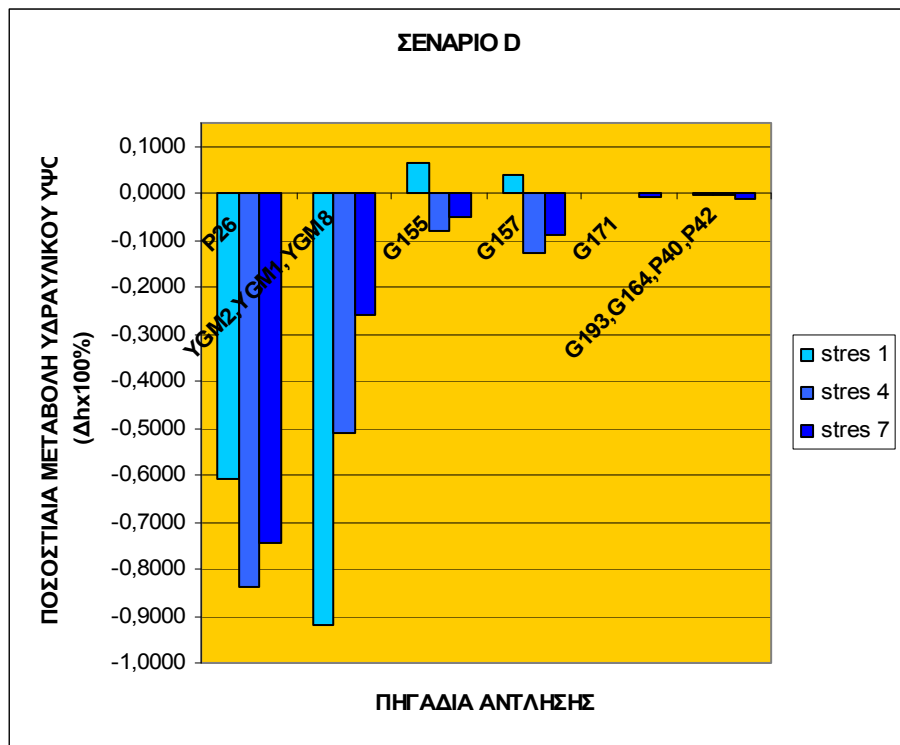


Διάγραμμα 7.α.6

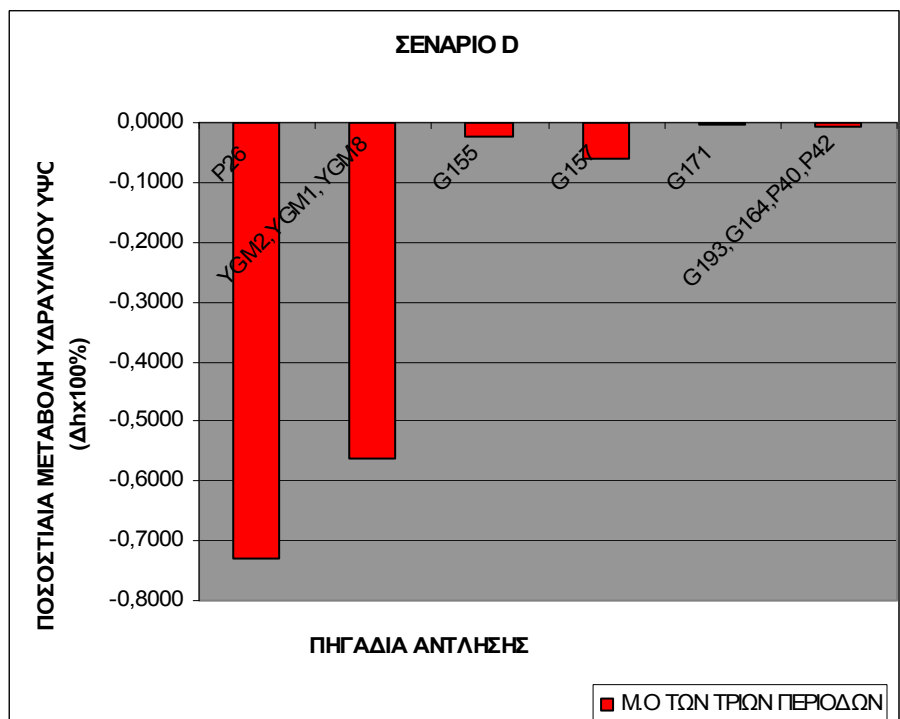


**ΣΕΝΑΡΙΟ D:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.7

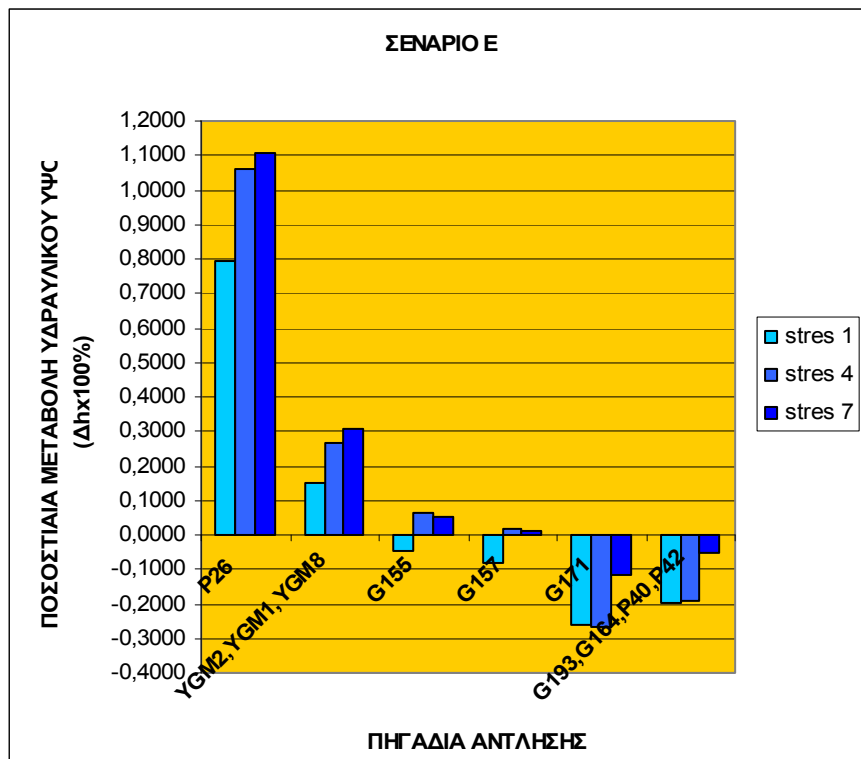


Διάγραμμα 7.α.8

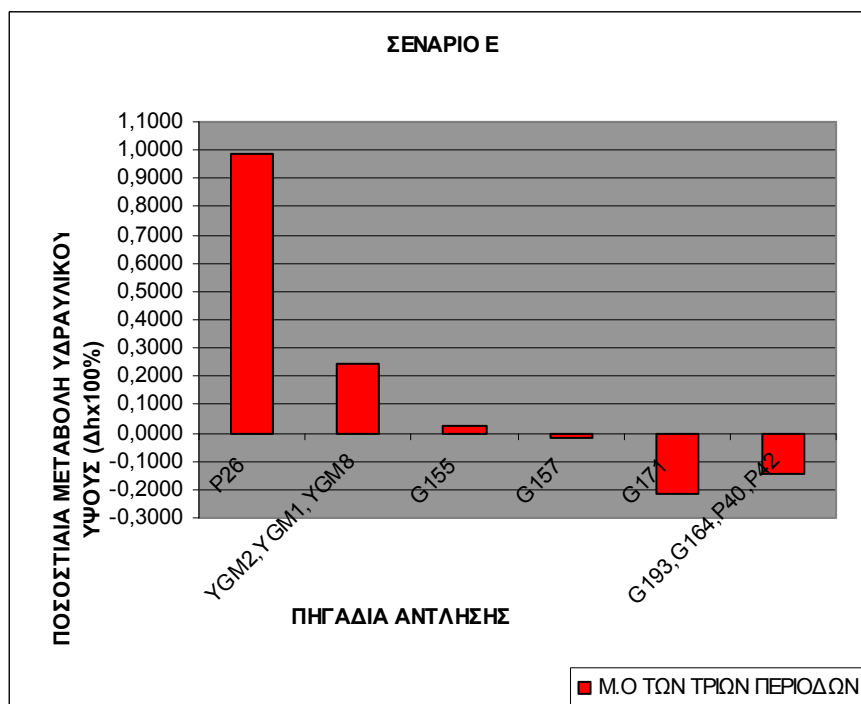


**ΣΕΝΑΡΙΟ Ε:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day)

Διάγραμμα 7.α.9

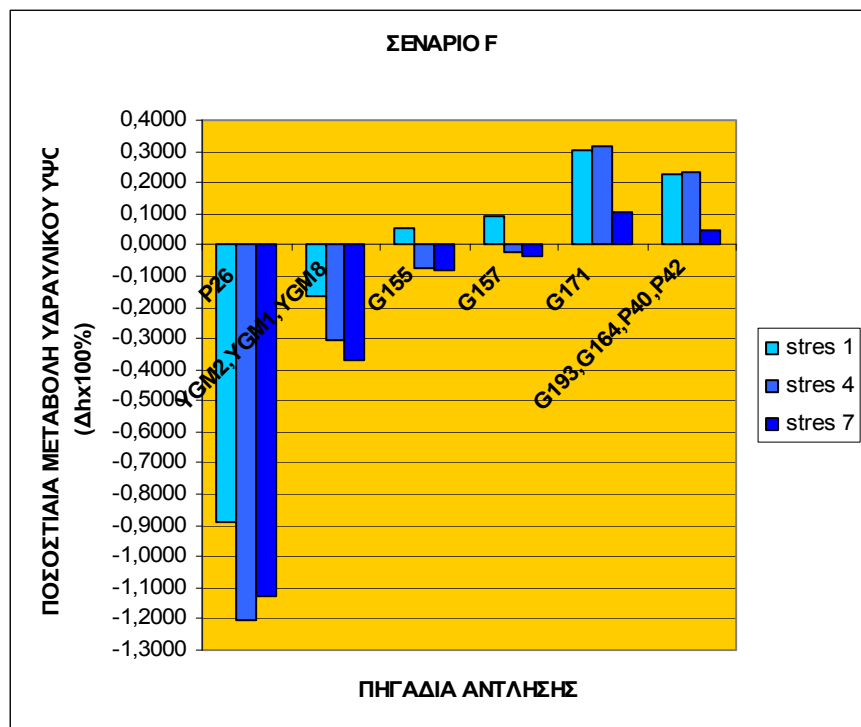


Διάγραμμα 7.α.10

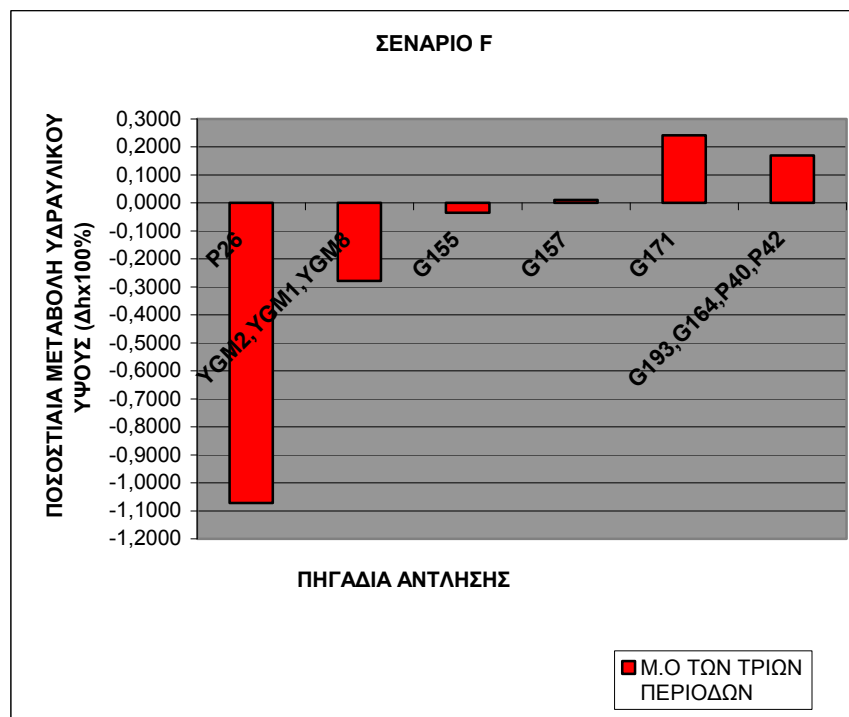


**ΣΕΝΑΡΙΟ F:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day)

Διάγραμμα 7.α.11

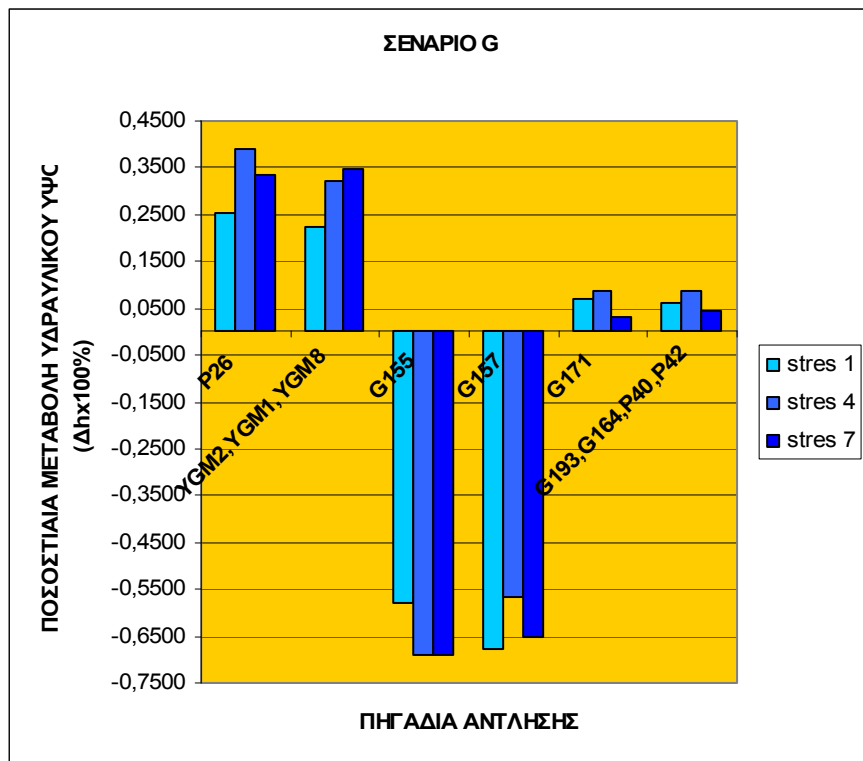


Διάγραμμα 7.α.12

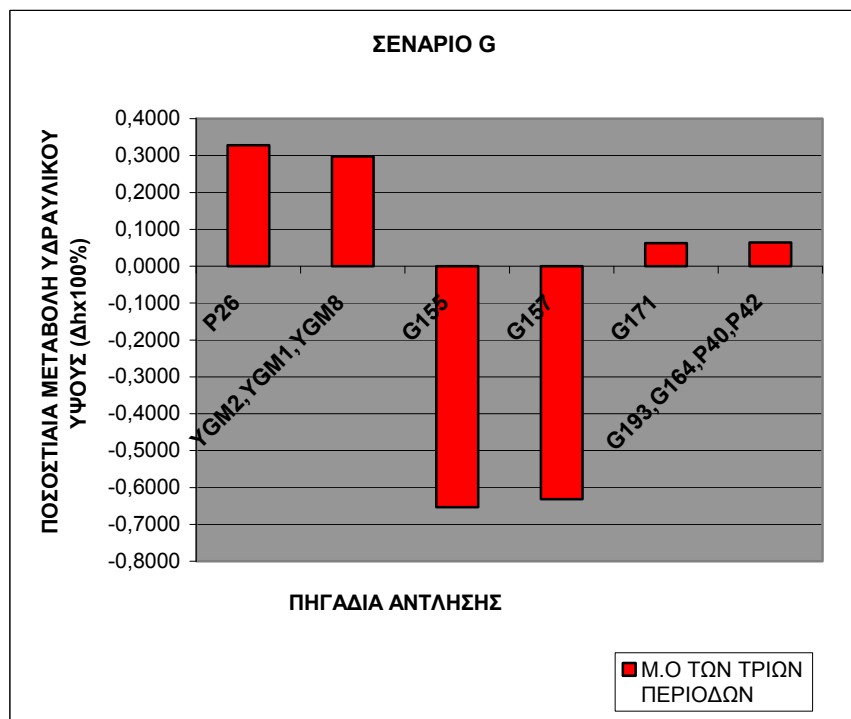


**ΣΕΝΑΡΙΟ G:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις μη προσχωματικούς-μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.13

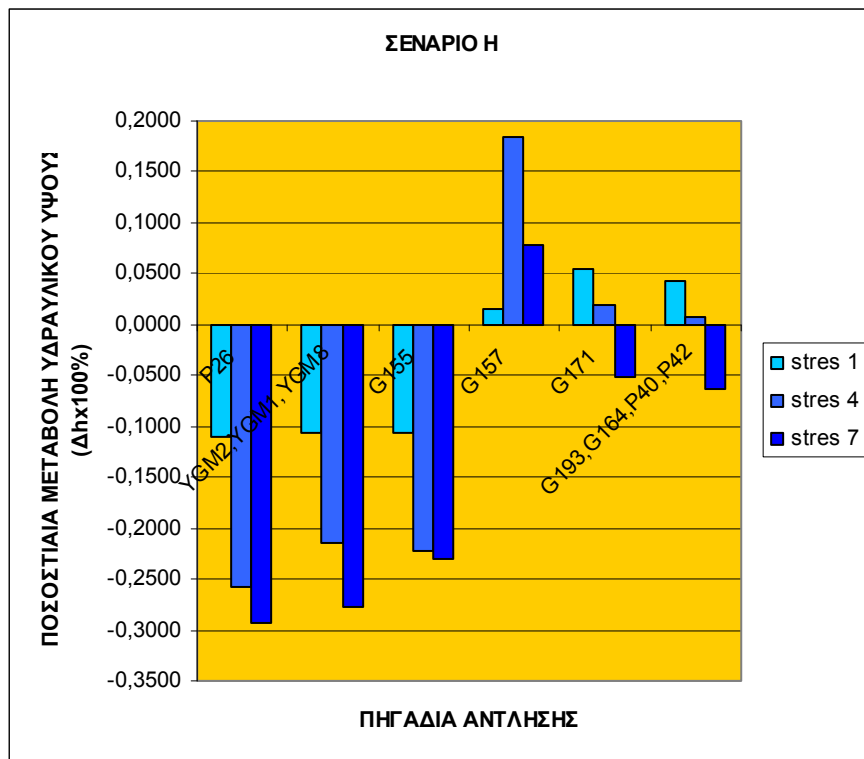


Διάγραμμα 7.α.14

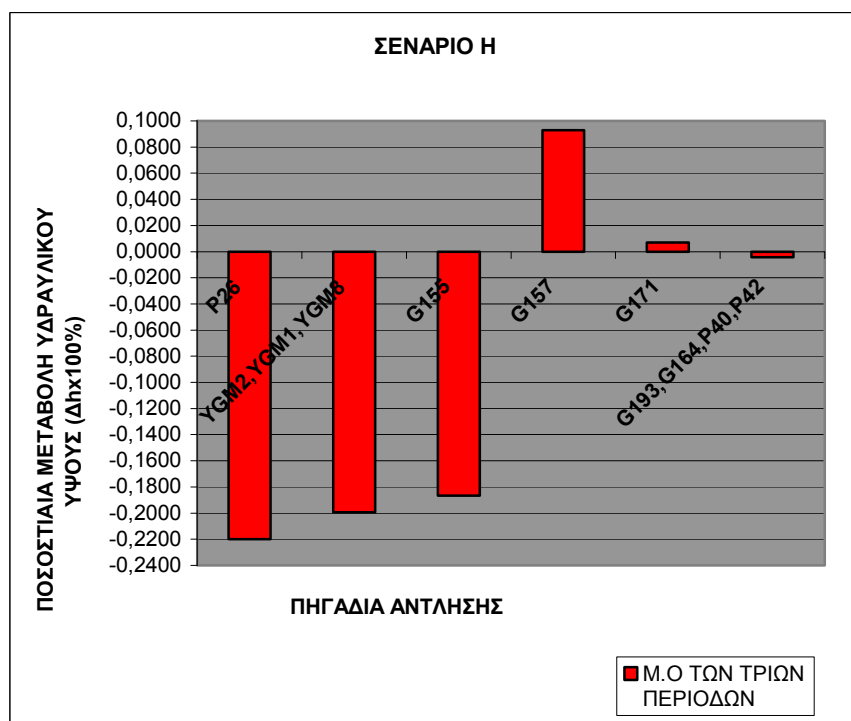


**ΣΕΝΑΡΙΟ Η:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας της ζώνης από Πορώδεις μη προσχωματικούς -μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.15

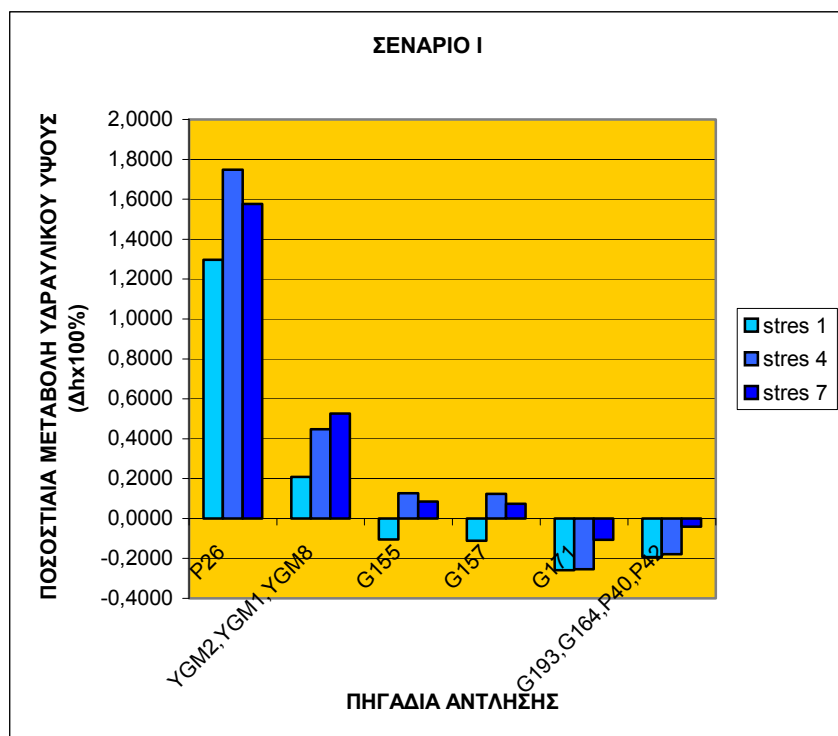


Διάγραμμα 7.α.16

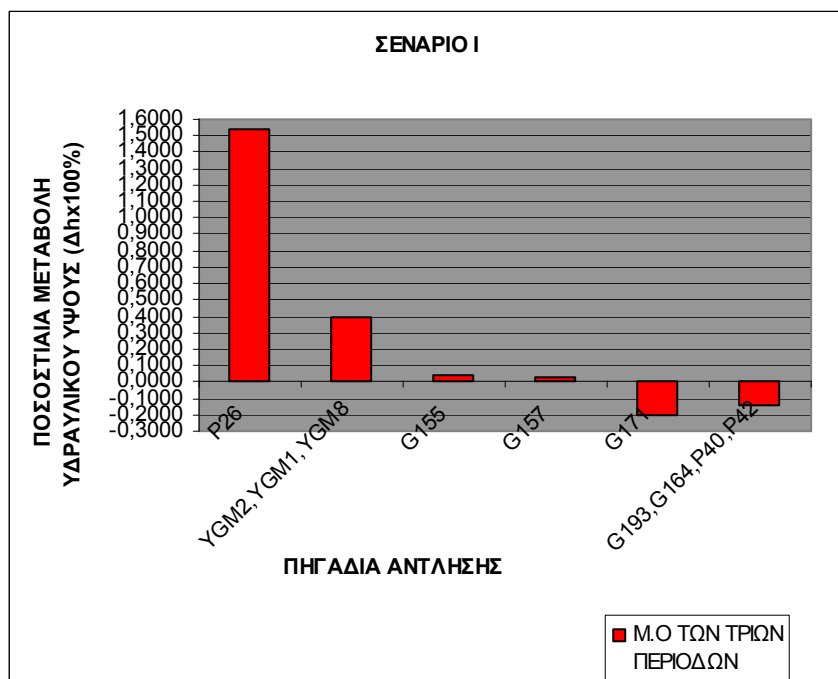


**ΣΕΝΑΡΙΟ Ι:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.17

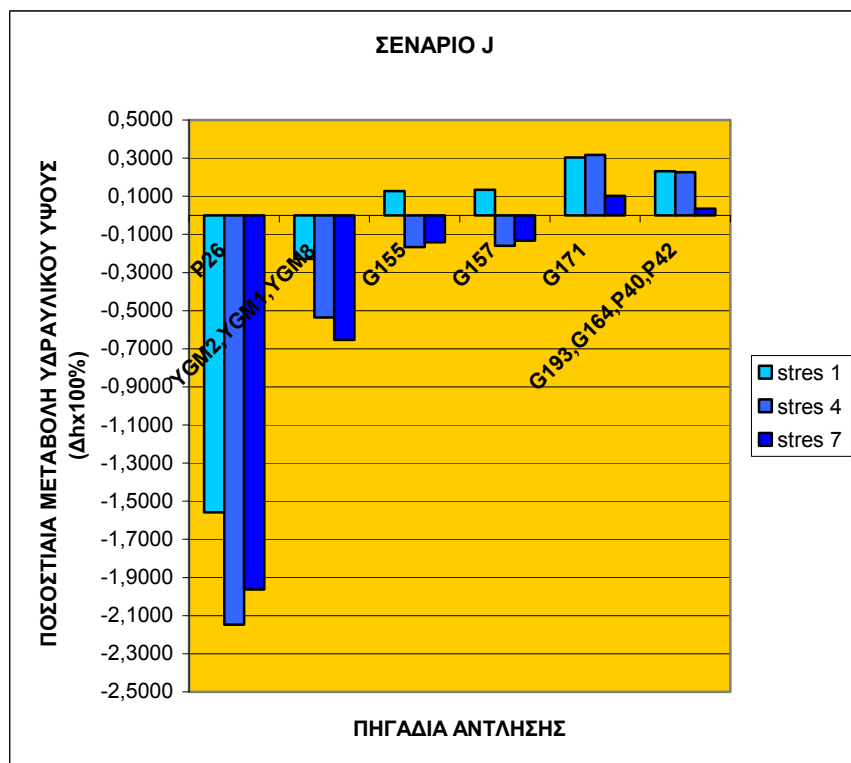


Διάγραμμα 7.α.18

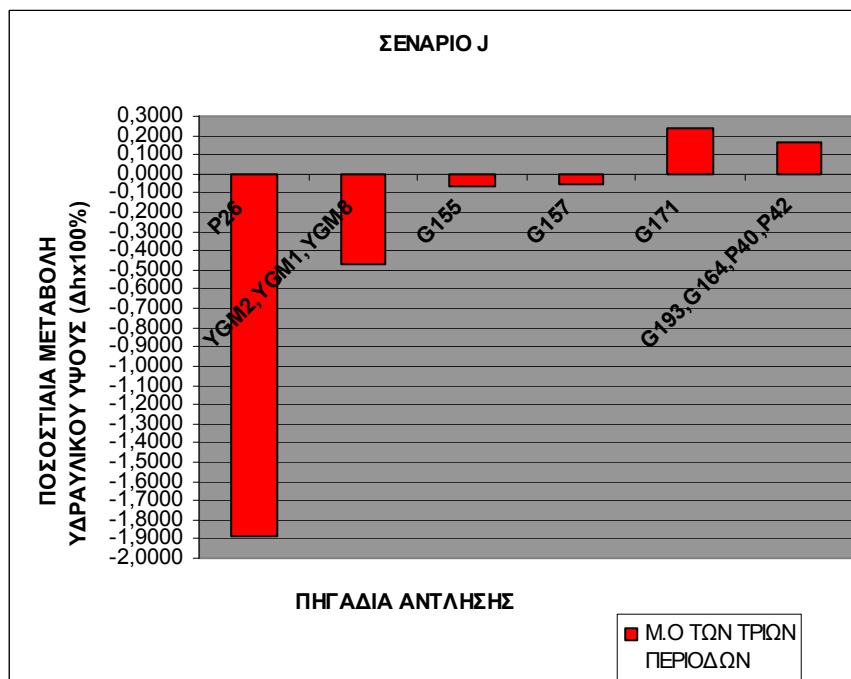


**ΣΕΝΑΡΙΟ J:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day) σχηματισμούς )

Διάγραμμα 7.α.19



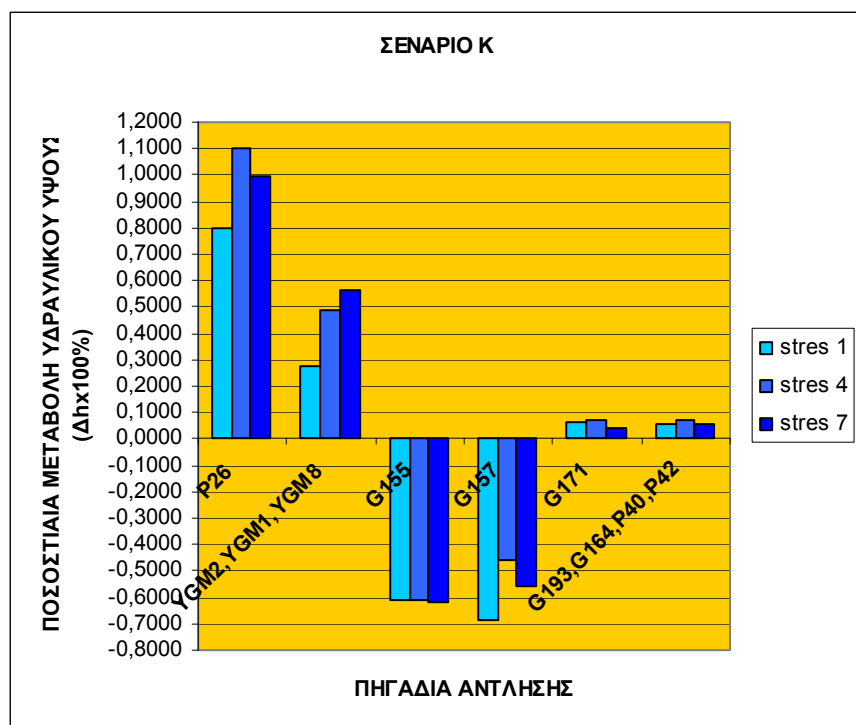
Διάγραμμα 7.α.20



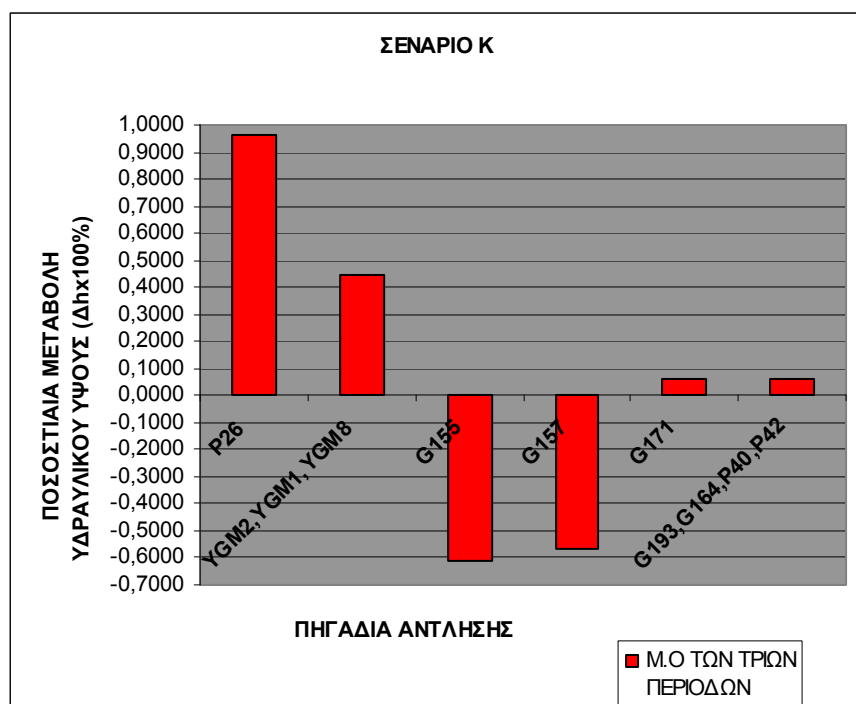


**ΣΕΝΑΡΙΟ Κ:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μη προσχωματικούς -μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς)

Διάγραμμα 7.α.21

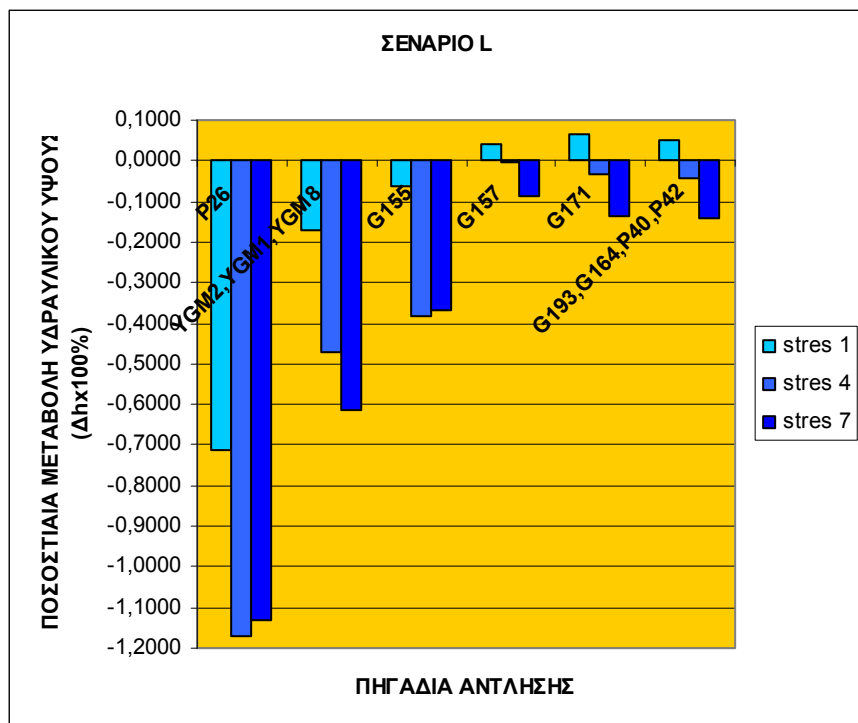


Διάγραμμα 7.α.22

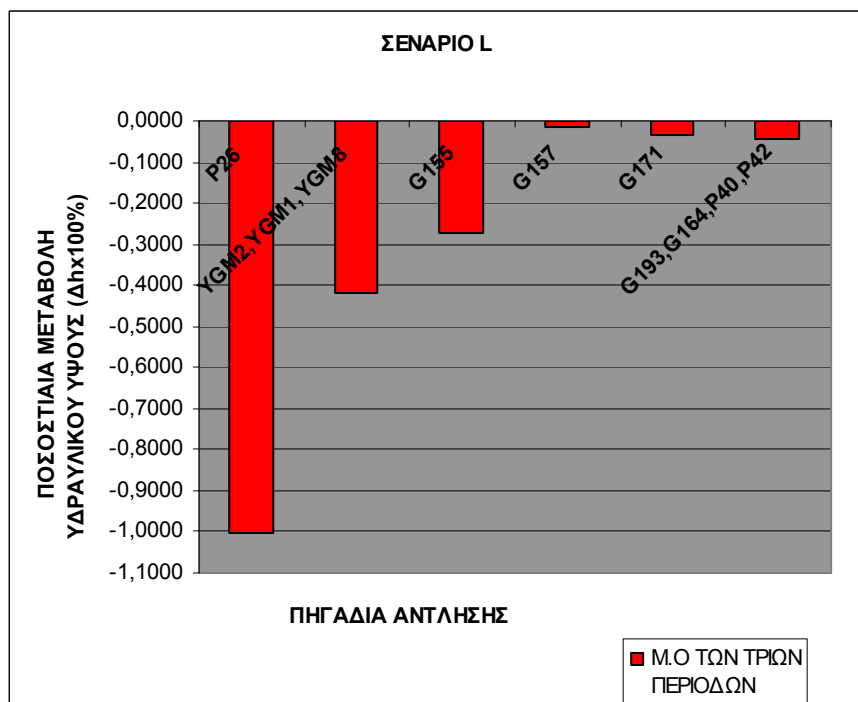


**ΣΕΝΑΡΙΟ L:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις προσχωματικούς - μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (51,84m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μη προσχωματικούς -μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς

Διάγραμμα 7.α.23

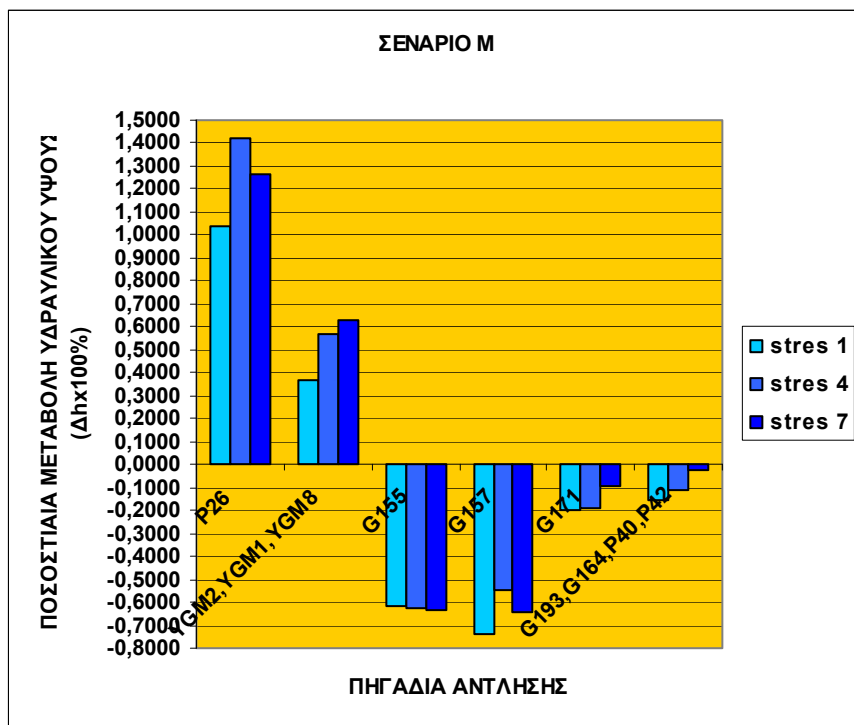


Διάγραμμα 7.α.24

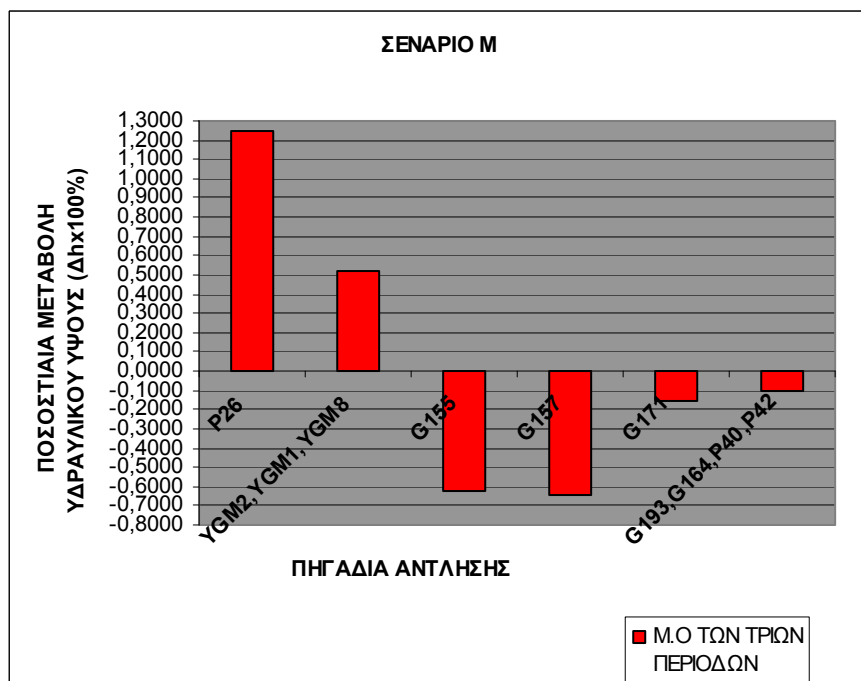


**ΣΕΝΑΡΙΟ Μ:** Αύξηση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις μη προσχωματικούς -μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day)

Διάγραμμα 7.α.25

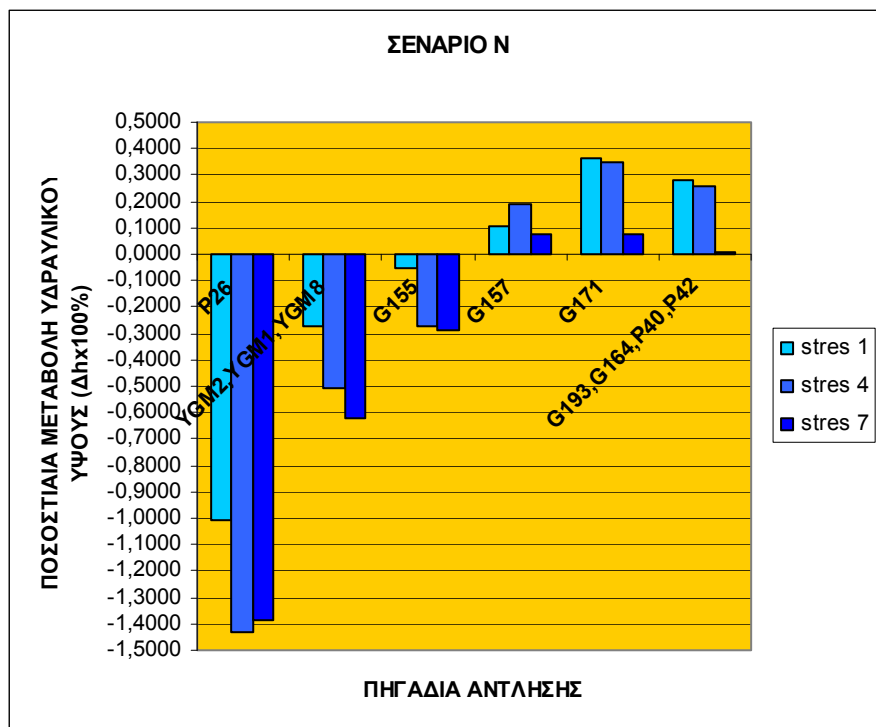


Διάγραμμα 7.α.26

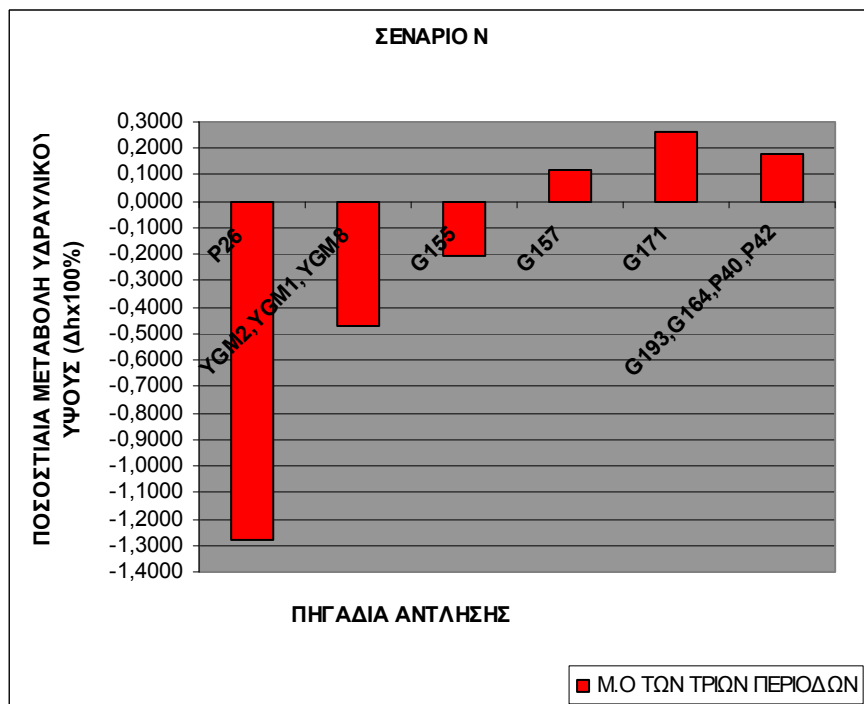


**ΣΕΝΑΡΙΟ N:** Μείωση κατά 10% της υδραυλικής αγωγιμότητας δύο ζωνών (α. από Πορώδεις μη προσχωματικούς -μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας (8,64m/day) σχηματισμούς και β. από Πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (69,12m/day)

Διάγραμμα 7.α.27



Διάγραμμα 7.α.28



## **2) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΙΜΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ**

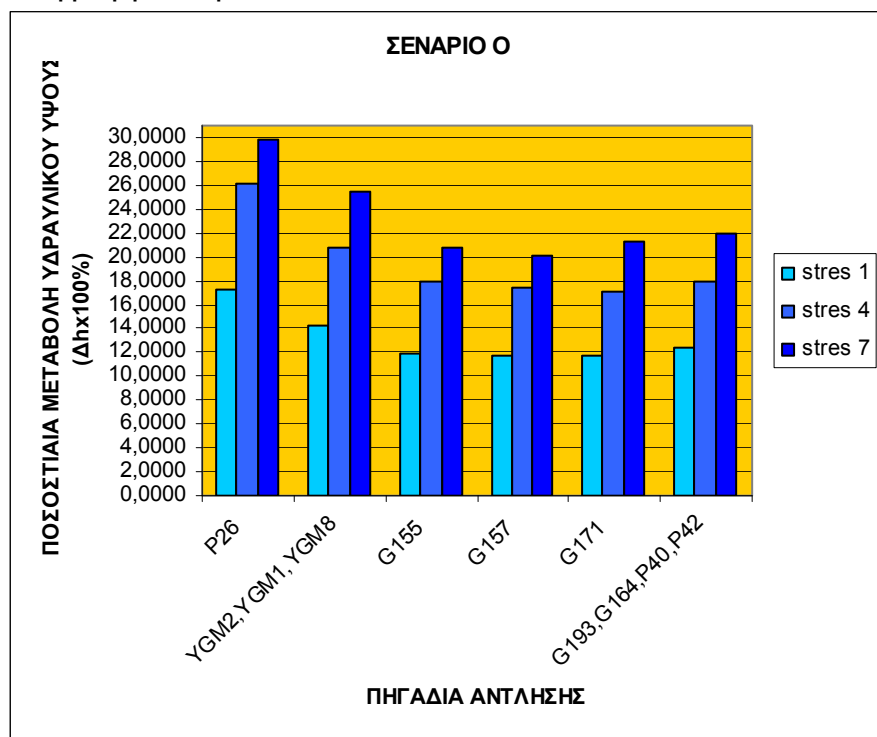
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι μεταβολές στις τιμές των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα σενάρια

**Πίνακας 7.β**

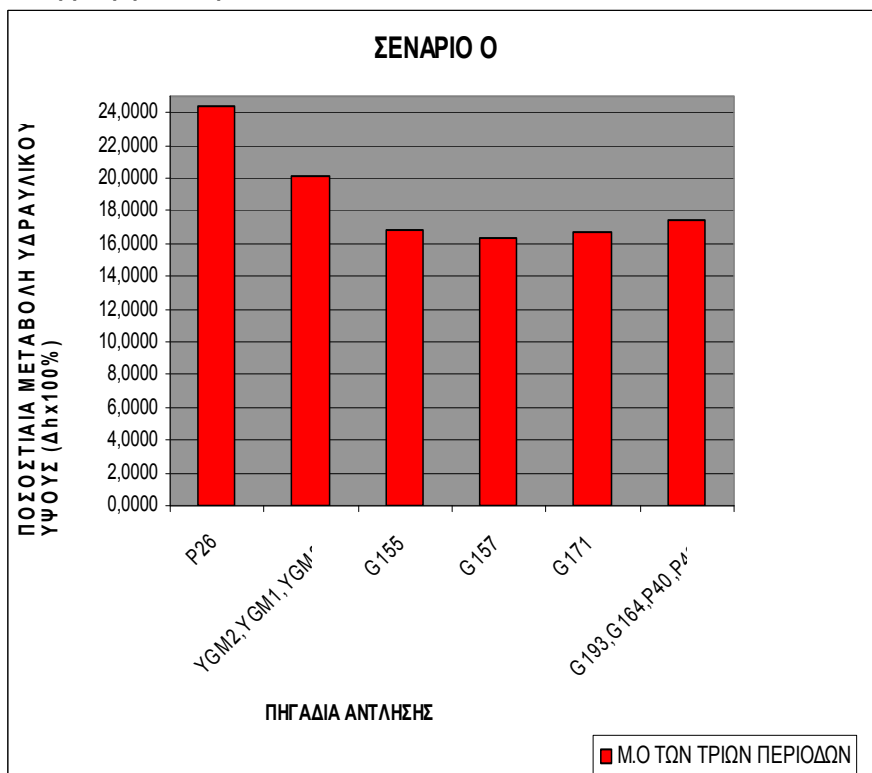
| ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ | STRESS | ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ |               |               |
|----------------|--------|------------------|---------------|---------------|
|                |        | ΑΡΧΙΚΗ ΤΙΜΗ      | ΑΥΞΗΜΕΝΗ ΤΙΜΗ | ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΤΙΜΗ |
| A              | 1      | 3200             | 3520          | 2880          |
|                | 2      | 3600             | 3960          | 3240          |
|                | 3      | 3700             | 4070          | 3330          |
|                | 4      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 5      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 6      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 7      | 3200             | 3520          | 2880          |
| B              | 1      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 2      | 1100             | 1210          | 990           |
|                | 3      | 1300             | 1430          | 1170          |
|                | 4      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 5      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 6      | 1000             | 1100          | 900           |
|                | 7      | 1200             | 1320          | 1180          |
| C              | 1      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 2      | 3000             | 3300          | 2700          |
|                | 3      | 3100             | 3410          | 2790          |
|                | 4      | 3100             | 3410          | 2790          |
|                | 5      | 3100             | 3410          | 2790          |
|                | 6      | 3100             | 3410          | 2790          |
|                | 7      | 3000             | 3300          | 2700          |
| D              | 1      | 18000            | 19800         | 16200         |
|                | 2      | 20000            | 22000         | 18000         |
|                | 3      | 21000            | 23100         | 18900         |
|                | 4      | 21000            | 23100         | 18900         |
|                | 5      | 21000            | 23100         | 18900         |
|                | 6      | 20500            | 22550         | 18450         |
|                | 7      | 20000            | 22000         | 18000         |
| E              | 1      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 2      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 3      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 4      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 5      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 6      | 2000             | 2200          | 1800          |
|                | 7      | 2000             | 2200          | 1800          |

**ΣΕΝΑΡΙΟ Ο:** Αύξηση των τιμών των οριακών συνθηκών στα τμήματα a-b-c-d-e κατά 10% από την αρχική τιμή

Διάγραμμα 7.β.1



Διάγραμμα 7.β.2



**ΣΕΝΑΡΙΟ P:** Μείωση των τιμών των οριακών συνθηκών στα τμήματα a-b-c-d-e κατά 10% από την αρχική τιμή.

Μειώνοντας τις τιμές των οριακών συνθηκών παρατηρήσαμε ότι το μοντέλο μας δεν κατάφερε να προσομοιώσει την περιοχή. Συμπεραίνουμε , λοιπόν πως σε αυτήν την περίπτωση ο υδροφόρος ορίζοντας αποστραγγίζεται.

### **3) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΕΣ**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά οι μεταβολές στις τιμές του πορώδες που χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα σενάρια

**Πίνακας 7.γ**

| LAYER | ΤΙΜΗ ΠΟΡΩΔΕΣ |                 |                 |                 |                 |
|-------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|       | ΑΡΧΙΚΗ       | ΑΥΞΗΜΕΝΗ<br>10% | ΜΕΙΩΜΕΝΗ<br>10% | ΑΥΞΗΜΕΝΗ<br>50% | ΜΕΙΩΜΕΝΗ<br>50% |
| 1     | 0,4          | 0,44            | 0,36            | 0,6             | 0,2             |
| 2     | 0,4          | 0,44            | 0,36            | 0,6             | 0,2             |
| 2     | 0,6          | 0,66            | 0,54            | 0,9             | 0,3             |

### **ΣΕΝΑΡΙΟ Q-R :**

Τα σενάρια Q και R δημιουργήθηκαν αυξάνοντας και μειώνοντας αντίστοιχα το πορώδες κατά 10%. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι οι νέες τιμές των υδραυλικών υψών πλησιάζουν ή ακόμα και ταυτίζονται με τις αρχικές τιμές της παραμέτρου. Συνεπώς , η μεταβολή των υδραυλικών υψών είναι μηδενική. Το ίδιο συνέβη και στην περίπτωση που η μεταβολή των τιμών έγινε κατά 50%

#### **4) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ**

Βάση των τιμών των παροχών άντλησης δημιουργήσαμε 4 σενάρια αυξομειώνοντας τις αρχικές τιμές της παραμέτρου οι οποίες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

**Πίνακας 7.δ**

| stress | ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                |                |
|--------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|        | P26<br>layer 1   | P26<br>layer 2 | YGM2<br>layer 2 | YGM1<br>layer 2 | YGM8<br>layer 2 | G155<br>layer 2 | G157<br>layer 1 | G171<br>layer 2 | G193<br>layer 1 | G164<br>layer 1 | P40<br>layer 2 | P42<br>layer 2 |
| 1      | -87000           | -30000         | -600            | -600            | -500            | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | -72            | -24            |
| 2      | -90000           | -32000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 3      | -100000          | -42000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 4      | -110000          | -52000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 5      | -110000          | -52000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 6      | -110000          | -52000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 7      | -90000           | -42000         | -14000          | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |

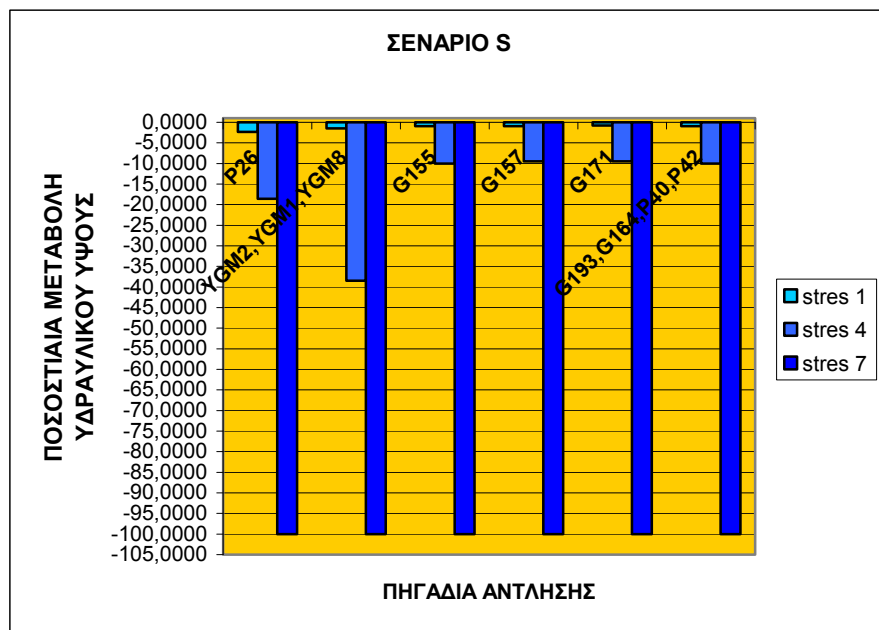
**ΣΕΝΑΡΙΟ S:** Αύξηση των παροχών άντλησης κατά 10%  
Οι νέες τιμές διαμορφώθηκαν ως εξής:

**Πίνακας 7.δ.α**

| stress | ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ |               |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                |                |
|--------|------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|        | P26<br>layer 1   | P26<br>layer2 | YGM2<br>layer2 | YGM1<br>layer 2 | YGM8<br>layer 2 | G155<br>layer 2 | G157<br>layer 1 | G171<br>layer 2 | G193<br>layer 1 | G164<br>layer 1 | P40<br>layer 2 | P42<br>layer 2 |
| 1      | -87000           | -30000        | -600           | -600            | -500            | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | -72            | -24            |
| 2      | -90000           | -32000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 3      | -100000          | -42000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 4      | -110000          | -52000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 5      | -110000          | -52000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 6      | -110000          | -52000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |
| 7      | -90000           | -42000        | -14000         | -25000          | -20000          | -6000           | -3600           | -3120           | -5760           | -8160           | -72            | -24            |



## Διάγραμμα 7.δ.1

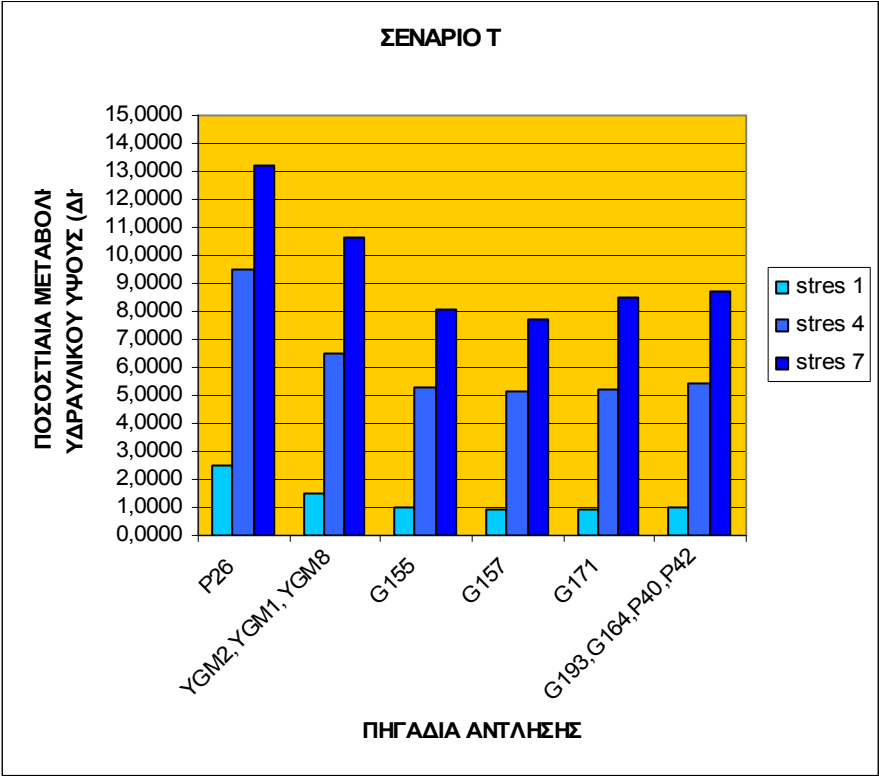


**ΣΕΝΑΡΙΟ T:** Μείωση των παροχών άντλησης κατά 10%  
Οι νέες τιμές διαμορφώθηκαν ως εξής:

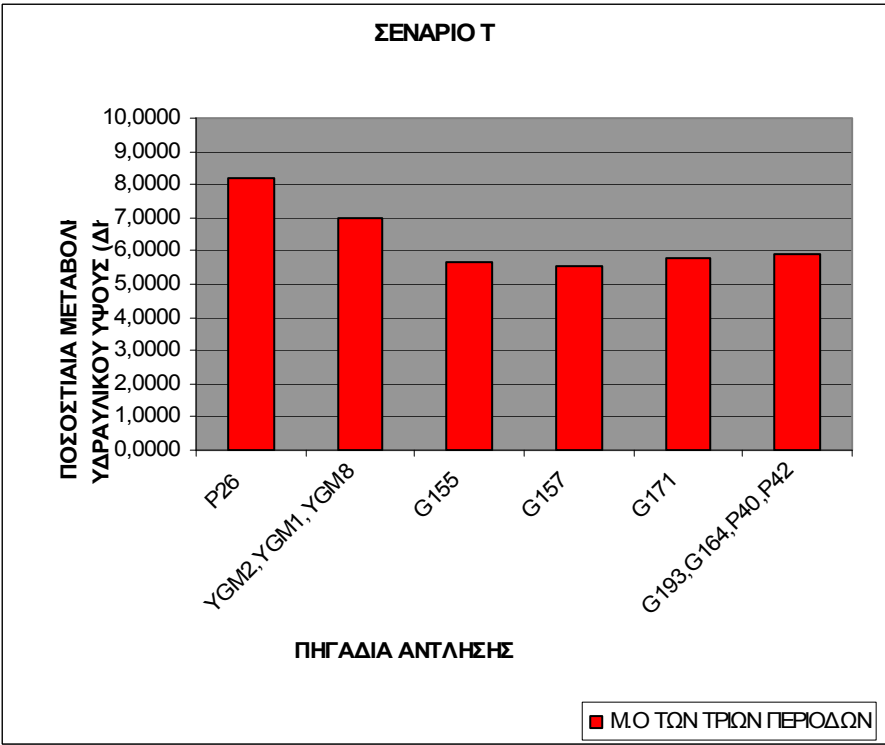
**Πίνακας 7.δ.β**

| stress | ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ |                |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                |                |
|--------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
|        | P26<br>layer 1   | P26<br>layer 2 | YGM2<br>layer 2 | YGM1<br>layer 2 | YGM8<br>layer 2 | G155<br>layer 2 | G157<br>layer 1 | G171<br>layer 2 | G193<br>layer 1 | G164<br>layer 1 | P40<br>layer 2 | P42<br>layer 2 |
| 1      | -78300           | -27000         | -540            | -540            | -450            | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | -64,8          | -21,6          |
| 2      | -81000           | -28800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |
| 3      | -90000           | -37800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |
| 4      | -99000           | -46800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |
| 5      | -99000           | -46800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |
| 6      | -99000           | -46800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |
| 7      | -81000           | -37800         | -12600          | -22500          | -18000          | -5400           | -3240           | -2808           | -5184           | -7344           | -64,8          | -21,6          |

Διάγραμμα 7.δ.2



Διάγραμμα 7.δ.3

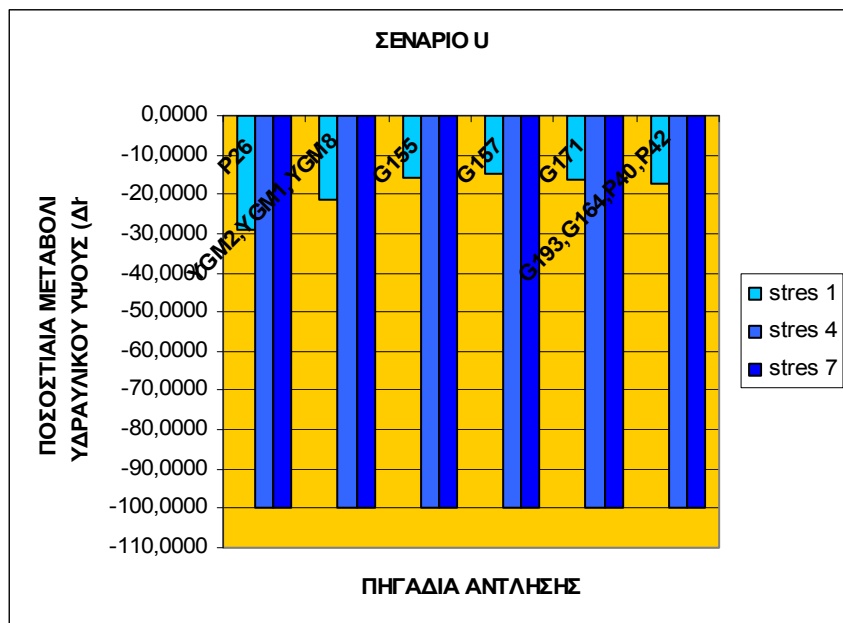


**ΣΕΝΑΡΙΟ U:** Αύξηση των παροχών άντλησης κατά 25%.  
Οι νέες τιμές διαμορφώθηκαν ως εξής:

**Πίνακας 7.δ.γ**

| stress | ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ |             |              |              |              |              |              |              |              |              |             |             |
|--------|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|        | P26 layer 1      | P26 layer 2 | YGM2 layer 2 | YGM1 layer 2 | YGM8 layer 2 | G155 layer 2 | G157 layer 1 | G171 layer 2 | G193 layer 1 | G164 layer 1 | P40 layer 2 | P42 layer 2 |
| 1      | -108750          | -37500      | -750         | -750         | -625         | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | -90         | -30         |
| 2      | -112500          | -40000      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |
| 3      | -125000          | -52500      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |
| 4      | -137500          | -65000      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |
| 5      | -137500          | -65000      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |
| 6      | -137500          | -65000      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |
| 7      | -112500          | -52500      | -17500       | -31250       | -25000       | -7500        | -4500        | -3900        | -7200        | -10200       | -90         | -30         |

**Διάγραμμα 7.δ.4**

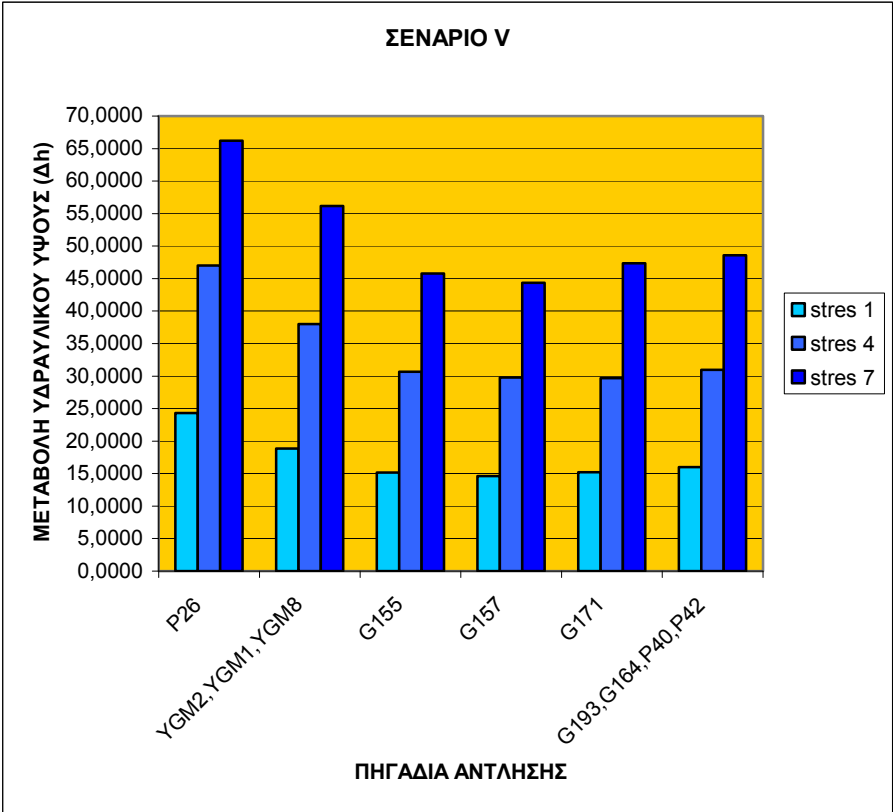


**ΣΕΝΑΡΙΟ V:** Μείωση των παροχών άντλησης κατά 25%.  
Οι νέες τιμές διαμορφώθηκαν ως εξής:

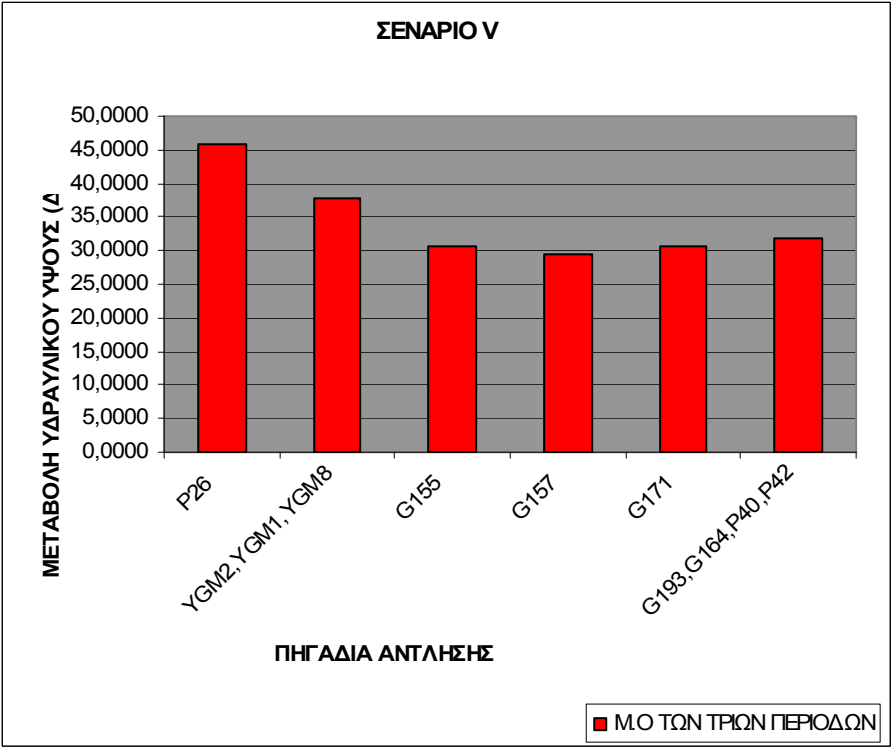
**Πίνακας 7.δ.δ**

| stress | ΠΗΓΑΔΙΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ |             |              |              |              |              |              |              |              |              |             |             |
|--------|------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|        | P26 layer 1      | P26 layer 2 | YGM2 layer 2 | YGM1 layer 2 | YGM8 layer 2 | G155 layer 2 | G157 layer 1 | G171 layer 2 | G193 layer 1 | G164 layer 1 | P40 layer 2 | P42 layer 2 |
| 1      | -65250           | -22500      | -450         | -450         | -375         | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            | -54         | -18         |
| 2      | -67500           | -24000      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |
| 3      | -75000           | -31500      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |
| 4      | -82500           | -39000      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |
| 5      | -82500           | -39000      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |
| 6      | -82500           | -39000      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |
| 7      | -67500           | -31500      | -10500       | -18750       | -15000       | -4500        | -2700        | -2340        | -4320        | -6120        | -54         | -18         |

Διάγραμμα 7.δ.5



Διάγραμμα 7.δ.6



### 6.4.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βάση όλων των προηγούμενων κεφαλαίων ,τόσο του θεωρητικού όσο και του υπολογιστικού μέρους ,είμαστε πλέον σε θέση να βγάλουμε αρκετά ασφαλή συμπεράσματα για την ευαισθησία της περιοχής της Αγυιάς σε μεταβολές βασικών παραμέτρων όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, το πορώδες, οι οριακές συνθήκες και η παροχή άντλησης των πηγαδιών.

*Πιο συγκεκριμένα:*

- Ευαισθησία της περιοχής σε μεταβολές της υδραυλικής αγωγιμότητας :

Το υπέδαφος της περιοχής , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω , αποτελείται από τρεις γεωλογικούς σχηματισμούς εκ των οποίων οι δύο χαρακτηρίζονται μέτριας έως μικρής υδροπερατότητας (πορώδεις μειοκαινικές και πλειοκαινικές αποθέσεις και Πορώδεις προσχωματικές αποθέσεις) και ο τρίτος ως σχηματισμός μικρής έως πολύ μικρής υδροπερατότητας(πορώδεις μη προσχωματικές αποθέσεις).Οι γεωλογικοί αυτοί σχηματισμοί εκτείνονται και στα δύο επίπεδα δίνοντας σταθερές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας με εξαίρεση στο σημείο του ρήγματος εμφανίζοντας πολύ μεγαλύτερη υδροπερατότητα.

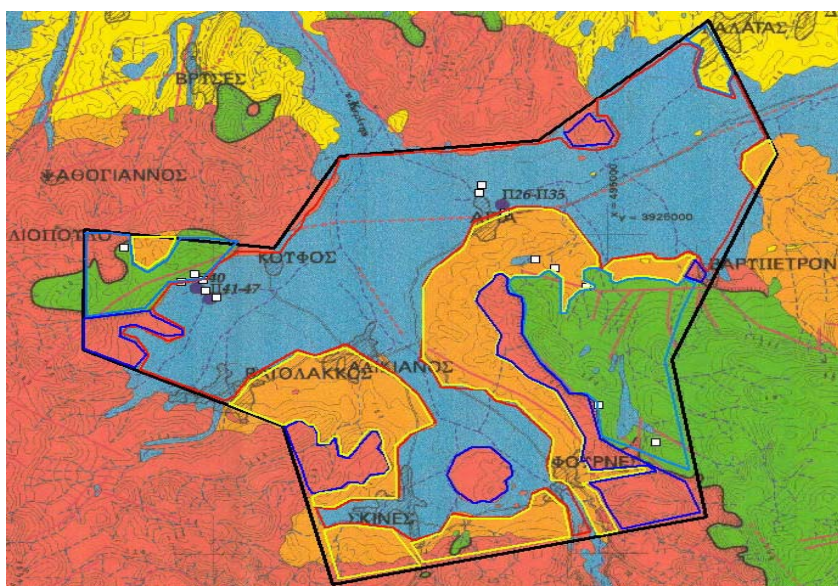
Μεταβάλλοντας τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, με κάθε πιθανό συνδυασμό, κατά  $\pm 10\%$  (σενάρια A-N) παίρνουμε τον παρακάτω πίνακα:

| <b>ΖΩΝΗ</b><br><b>ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ</b><br><b>ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ</b><br><b>ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ</b> | <b>ΕΥΡΟΣ</b><br><b>ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ</b><br><b>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ</b><br><b>ΥΨΟΥΣ(%)</b> |             | <b>ΕΥΡΟΣ</b><br><b>ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ</b><br><b>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ</b><br><b>ΥΨΟΥΣ (m)</b> |             |
|---|--|-------------|---|-------------|
|   | <b>-10%</b>  | <b>+10%</b> | <b>-10%</b>   | <b>+10%</b> |
| A-B-Γ   | -0,456   | 0,172       | -0,526  | 0,197       |
| A   | -0,23  | 0,116       | -0,150  | 0,133       |
| B   | -0,16  | 0,145       | -0,183  | 0,166       |
| Γ   | -0,085   | -0,089      | -0,097  | 0,102       |
| A-B   | -0,345   | 0,279       | -0,395  | 0,320       |
| A-Γ   | -0,298   | 0,059       | -0,341  | 0,067       |
| B-Γ   | -0,23  | 0,04        | -0,263  | 0,046       |

A :ΠΟΡΤΟΚΑΛΗ ΖΩΝΗ (K=51,84 m/day)

В: ΜΠΛΕ ΖΩΝΗ (K=69,12m/day)

Γ: ΠΡΑΣΙΝΗ ΖΩΝΗ (K=10 m/day)



Αρχικά παρατηρούμε ότι οι αλλαγές των υδραυλικών υψών κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά ποσοστά. Οι εντονότερες αλλαγές σημειώνονται στην περίπτωση που μεταβάλουμε την υδραυλική αγωγιμότητα και των τριών ζωνών, λίγο μικρότερες είναι οι αλλαγές των υδραυλικών υψών όταν μεταβάλουμε την υδραυλική αγωγιμότητα ανά δύο ζώνες, ενώ στις περιπτώσεις που οι μεταβολές συντελούνται σε μία ζώνη οι διαφορές των υδραυλικών υψών είναι ακόμα πιο περιορισμένες. Σε αυτή την περίπτωση όμως πρέπει να σημειώσουμε ότι η ζώνη που παρουσιάζει πιο αυξημένες τιμές μεταβολής των υδραυλικών υψών σε σχέση με τις άλλες δύο είναι η Β, στην οποία σημειώνεται και η υψηλότερη τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας.

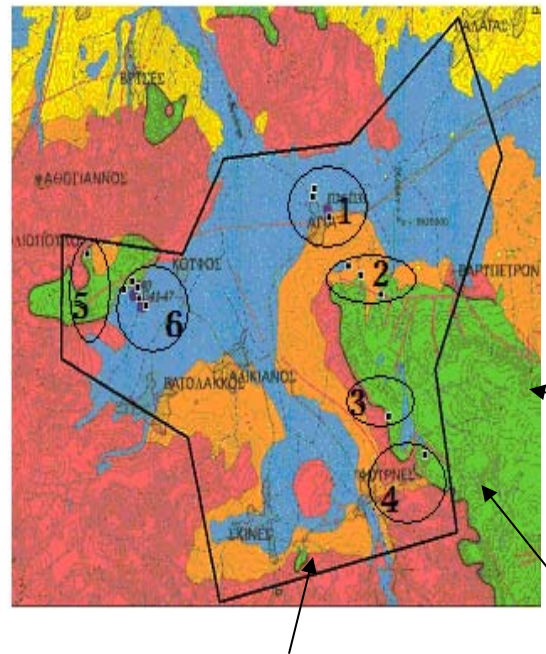
Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρούμε ότι η αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας επηρεάζει τα υδραυλικά ύψη σύμφωνα με τον νόμο του Darcy:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

Το υδραυλικό ύψος είναι ανάλογο της υδραυλικής αγωγιμότητας, αυξάνεται ή μειώνεται μεγαλώνοντας και μικραίνοντας την αγωγιμότητα αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, για τις ίδιες μεταβολές υδραυλικής αγωγιμότητας (της τάξης του +/- 10%,) λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα των μέσων μεταβολών, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά των υδραυλικών υψών για τις ομάδες των πηγαδιών αλλά και την πηγή σε κάθε σενάριο, παρατηρούμε πολύ μικρές αλλαγές στα υδραυλικά ύψη που διαμορφώνονται ως εξής :

| ΟΜΑΔΑ | ΠΗΓΑΔΙΑ                   | ΕΥΡΟΣ<br>ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ(%) |      | ΕΥΡΟΣ<br>ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ(m) |      |
|-------|---------------------------|--|------|--|------|
|       |                           |  |      |  |      |
| 1     | P26<br>(πηγή)             | -2,14  | 1,76 | -2,1   | 1,73 |
| 2     | YGM1,<br>YGM2,<br>YGM8    | -0,69  | 0,67 | -0,75  | 0,73 |
| 3     | G155                      | -0,65  | 0,05 | -0,78  | 0,06 |
| 4     | G157                      | -0,64  | 0,12 | -0,78  | 0,15 |
| 5     | G171                      | -0,21  | 0,26 | -0,25  | 0,31 |
| 6     | G193,<br>G164,<br>P40,P42 | -0,14  | 0,18 | -0,17  | 0,21 |



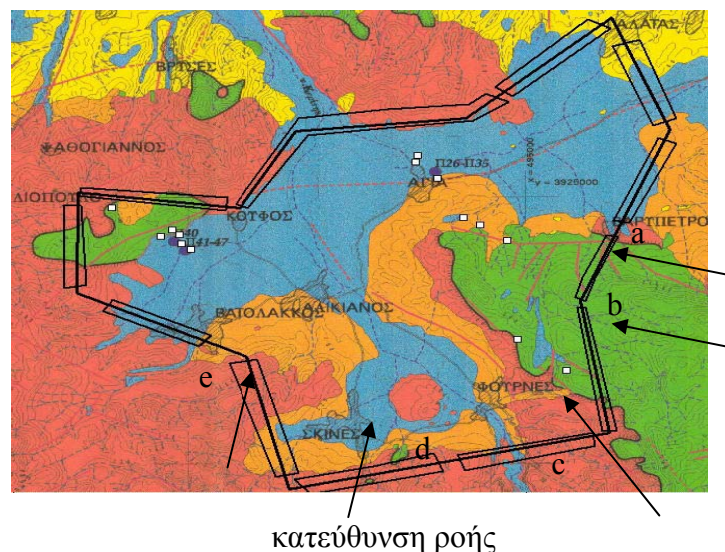
Παρατηρούμε , λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες μεταβολές υδραυλικών υψών, όπως ήταν αναμενόμενο, συμβαίνουν στην πηγή(ομάδα 1) και στα πηγάδια άντλησης στην περιοχή γύρω από αυτήν (ομάδα 2).Στις ομάδες 3 και 4 συναντάμε ελαφρώς μικρότερες μεταβολές ενώ στις ομάδες 5 και 6 η αλλαγή των υδραυλικών υψών είναι πολύ μικρή. Στην διαμόρφωση αυτών των αποτελεσμάτων ,πέρα από τη θέση των πηγαδιών ως προς την πηγή, συντελεί και η κατεύθυνση της ροής του υπόγειου ύδατος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε ότι η περιοχή της Αγυιάς δεν παρουσιάζει ευαισθησία στην μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Χαρακτηρίζεται ως ανθεκτική με μεγάλη αντοχή σε αλλαγές της υδραυλικής αγωγιμότητας διατηρώντας τα υδραυλικά ύψη αρκετά πάνω από τη στάθμη της θάλασσας .Να σημειώσουμε ότι το πιο κρίσιμο τμήμα της περιοχής είναι το σημείο που βρίσκεται η πηγή στην ζώνη Β, η οποία σημειώνει μέτρια υδατοπερατότητα, όμως ακόμα και εδώ η ευαισθησία παραμένει σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



- Ευαισθησία της περιοχής σε μεταβολές των οριακών συνθηκών :

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα στην περιοχή υπάρχει σταθερή ροή (β' είδους συνθήκες) με διαφορετική τιμή σε κάθε χρονική περίοδο μας. Οι μεταβολές των οριακών συνθηκών έγιναν στα τμήματα από τα οποία εισέρχεται το νερό στην περιοχή (a,b,c,d,e), όπως φαίνεται δίπλα. Το πρώτο σενάριο (Ο) βασίστηκε στην αύξηση των τιμών των οριακών συνθηκών κατά 10% όπου πήραμε τα εξής αποτελέσματα:



| ΟΜΑΔΑ | ΠΗΓΑΔΙΑ             | ΜΕΤΑΒΟΛΗ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ ΓΙΑ<br>STRESS 1 |       | ΜΕΤΑΒΟΛΗ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ ΓΙΑ<br>STRESS 4 |       | ΜΕΤΑΒΟΛΗ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ ΓΙΑ<br>STRESS 7 |       | ΜΕΣΗ<br>ΜΕΤΑΒΟΛΗ<br>ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ<br>ΥΨΟΥΣ |       |
|-------|---------------------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
|       |                     | (%)   | (m)   | (%)   | (m)   | (%)   | (m)   | (%)                                     | (m)   |
| 1     | P26 (πηγή)          | 17,32   | 17,5  | 26,12   | 25,27 | 29,82   | 28,91 | 24,42                                   | 24,04 |
| 2     | YGM1, YGM2, YGM8    | 14,20   | 16,04 | 20,76   | 23,69 | 25,41   | 27,15 | 20,13                                   | 22,27 |
| 3     | G155                | 11,90   | 14,69 | 17,87   | 21,32 | 20,70   | 24,53 | 16,85                                   | 20,18 |
| 4     | G157                | 11,65   | 14,52 | 17,37   | 20,00 | 20,02   | 24,11 | 16,35                                   | 19,54 |
| 5     | G171                | 11,80   | 14,46 | 17,08   | 20,83 | 21,23   | 24,27 | 16,70                                   | 19,85 |
| 6     | G193, G164, P40,P42 | 12,41   | 14,86 | 17,86   | 21,27 | 21,87   | 25,07 | 17,38                                   | 20,35 |



Στο επόμενο σενάριο (P), το οποίο δημιουργήσαμε μειώνοντας τις οριακές συνθήκες κατά 10% το μοντέλο δεν μπόρεσε να προσομοιώσει την περιοχή συμπεραίνοντας ότι σε αυτήν την περίπτωση ο υδροφόρος ορίζοντας αποστραγγίζεται.

Οι τιμές των οριακών συνθηκών που εισήγαμε αρχικά στο πρόγραμμα αντιπροσωπεύουν τις υποθετικές τιμές εισροών(+) & εκροών(-) για τις οποίες το σύστημα λειτουργεί , οριακά , κανονικά.

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες αντιλαμβανόμαστε ότι η συγκεκριμένη παράμετρος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάλυση ευαισθησίας της περιοχής. Παρατηρούμε σημαντική άνοδο των υδραυλικών υψών της τάξης του 18,6 % κατά την αύξηση των οριακών συνθηκών. Στην αντίθετη περίπτωση τα υδραυλικά ύψη των πηγαδιών μειώνονται κατακόρυφα με αποτέλεσμα την πλήρη αποστράγγιση του υδροφόρου ορίζοντα.

Συνεπώς , η περιοχή της Αγυιάς εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία στις μεταβολές των οριακών συνθηκών , κάνοντας απαραίτητο τον έλεγχο τους για κάθε αλλαγή σε οποιοδήποτε στοιχείο της περιοχής.

- Ευαισθησία της περιοχής σε μεταβολές του πορώδους :

Το πορώδες θεωρήθηκε σταθερό σε όλη την περιοχή, ανεξαρτήτου layer με μέση τιμή 0,4. Για την ανάλυση ευαισθησίας της περιοχής ως προς αυτή την παράμετρο δημιουργήσαμε δύο σενάρια αυξάνοντας και μειώνοντας την τιμή της (σενάριο Q και R ) κατά 10%, και στις δύο περιπτώσεις δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στα υδραυλικά ύψη. Για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων αυξήσαμε το ποσοστό μεταβολής του πορώδους κάνοντας άλλα δύο σενάρια (Q' και R') αυξομειώνοντας την τιμή του πορώδους κατά 50%. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις δεν σημειώθηκε καμία μεταβολή στα υδραυλικά ύψη.

Εκτιμώντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η περιοχή της Αγυιάς δεν εμφανίζει καμία ευαισθησία στο πορώδες.

- Ευαισθησία της περιοχής σε μεταβολές της παροχής άντλησης:

Η ανάλυση ευαισθησίας της περιοχής όσο αφορά τις παροχές άντλησης των πηγαδιών, στηρίχθηκε σε τέσσερα «σενάρια» ,που δημιουργήθηκαν αυξομειώνοντας τις τιμές της παραμέτρου κατά 10% και 25%.

Σύμφωνα με τον νόμο του Darcy :

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{L} \Rightarrow q = -K \frac{\Delta h}{L}$$

η παροχή είναι ανάλογη της υδραυλική κλίσης , δηλαδή αυξάνοντας την η υδραυλική κλίση μεγαλώνει ενώ στην αντίθετη περίπτωση μειώνεται.

Αυξάνοντας τις παροχές άντλησης παίρνουμε τις εξής τιμές υδραυλικών υψών:

| ΟΜΑΔΑ | ΠΗΓΑΔΙΑ                    | ΑΥΞΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ 10% | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ |       |          |        |          |         | ΑΥΞΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ 25% | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ |        |          |         |          |            |
|-------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|-------|----------|--------|----------|---------|--------------------------|---------------------------|--------|----------|---------|----------|------------|
|       |                            |                          | STRESS 1                  |       | STRESS 4 |        | STRESS 7 |         |                          | STRESS 1                  |        | STRESS 4 |         | STRESS 7 |            |
|       |                            |                          | (%)                       | (m)   | (%)      | (m)    | (%)      | (m)     |                          | (%)                       | (m)    | (%)      | (m)     | (%)      | (m)        |
| 1     | P26<br>πηγή                |                          | -2,35                     | -2,37 | -18,60   | -17,99 | 100      | -96,97  |                          | -29,27                    | -29,53 | 100      | -96,75  | 100      | -96,9      |
| 2     | YGM1,<br>YGM2,<br>YGM8     |                          | -1,45                     | -1,64 | -38,50   | -15,54 | 100      | -106,84 |                          | -21,20                    | -23,92 | 100      | -107,39 | 100      | -<br>106,8 |
| 3     | G155                       |                          | -0,97                     | -1,19 | -10,00   | -11,95 | 100      | -118,50 |                          | -15,73                    | -19,30 | 100      | -119,31 | 100      | -<br>118,5 |
| 4     | G157                       |                          | -0,90                     | -1,15 | -9,46    | -11,44 | 100      | -120,40 |                          | -14,81                    | -18,54 | 100      | -120,94 | 100      | -<br>120,4 |
| 5     | G171                       |                          | -0,77                     | -0,95 | -9,46    | -11,54 | 100      | -116,42 |                          | -16,08                    | -19,71 | 100      | -121,96 | 100      | -<br>116,4 |
| 6     | G193<br>G164<br>P40<br>P42 |                          | -0,90                     | -1,08 | -10,05   | -11,97 | 100      | -114,66 |                          | -17,08                    | -20,46 | 100      | -119,12 | 100      | -<br>114,6 |

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα σε συνδυασμό με τα διαγράμματα (Δ.7.δ.1 και 7.δ.4 ) των αντίστοιχων σεναρίων (S ,U ) μας οδηγούν στο συμπέρασμα που αναμέναμε : η αύξηση της παροχής συνεπάγεται μείωση των υδραυλικών υψών.

Στην περίπτωση που αυξάνουμε την παροχή κατά 10% τα υδραυλικά ύψη μειώνονται σταδιακά, στο stress 1 τα υδραυλικά ύψη σημειώνουν μια μικρή μείωση, ιδιαίτερα στην πηγή, στο stress 4 η μείωση είναι αρκετά μεγαλύτερη ενώ από εκεί και πέρα ο υδροφορέας αποστραγγίζεται όπως φαίνεται στο stress 7.

Παρόμοια αποτελέσματα παίρνουμε και στην περίπτωση που η παροχή αυξάνεται κατά 25%, μόνο που εδώ η μείωση ήδη από την πρώτη περίοδο είναι εμφανής και ο υδροφορέας αποστραγγίζεται νωρίτερα, από την τέταρτη κιόλας περίοδο.

Αυτά που πρέπει να τονίσουμε εδώ και για τις δυο περιπτώσεις αύξησης των παροχών, είναι ότι στην πρώτη περίοδο (stress 1) τα ποσοστά μείωσης είναι μικρότερα από ότι στη συνέχεια. Αυτό οφείλεται στις μειωμένες ανάγκες άντλησης των πηγαδιών εκείνης της περιόδου η οποία αναφέρεται σε χειμερινούς μήνες. Στην τέταρτη περίοδο , που αντιπροσωπεύει το καλοκαίρι , τα ποσοστά μείωσης μεγαλώνουν σύμφωνα με τις ανάγκες άντλησης των πηγαδιών , οι οποίες είναι αυξημένες την συγκεκριμένη εποχή. Μετά την τέταρτη περίοδο, που σημαίνει η έναρξη του φθινοπώρου, παρόλη την μείωση των αναγκών άντλησης , τα υδραυλικά ύψη πέφτουν κατακόρυφα μέχρι την πλήρη αποστράγγιση του υδροφορέα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εξάντλησης των αποθεμάτων του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της υπεράντλησης όλης της προηγούμενης περιόδου, στη προσπάθεια του υδροφορέα να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες των πηγαδιών της περιοχής .

Μειώνοντας τις παροχές άντλησης παίρνουμε τις εξής τιμές υδραυλικών υψών:

| ΟΜΑΔΑ | ΠΗΓΑΔΙΑ                       | ΜΕΙΩΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ 10% | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ |      |          |      |          |       | ΜΕΙΩΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ 25% | ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ |       |          |       |          |       |
|-------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|------|----------|------|----------|-------|--------------------------|---------------------------|-------|----------|-------|----------|-------|
|       |                               |                          | STRESS 1                  |      | STRESS 4 |      | STRESS 7 |       |                          | STRESS 1                  |       | STRESS 4 |       | STRESS 7 |       |
|       |                               |                          | (%)                       | (m)  | (%)      | (m)  | (%)      | (m)   |                          | (%)                       | (m)   | (%)      | (m)   | (%)      | (m)   |
| 1     | P26<br>(πηγή)                 |                          | 2,48                      | 2,50 | 9,51     | 9,20 | 13,24    | 12,84 |                          | 24,32                     | 24,55 | 47,00    | 45,48 | 66,22    | 64,21 |
| 2     | YGM1,<br>YGM2,<br>YGM8        |                          | 1,50                      | 1,69 | 6,50     | 7,87 | 10,66    | 11,39 |                          | 18,83                     | 21,25 | 38,01    | 41,21 | 56,17    | 60,02 |
| 3     | G155                          |                          | 0,96                      | 1,18 | 5,31     | 6,34 | 8,04     | 9,53  |                          | 15,15                     | 18,59 | 30,66    | 36,58 | 45,77    | 54,23 |
| 4     | G157                          |                          | 0,91                      | 1,14 | 5,15     | 6,22 | 7,72     | 9,29  |                          | 14,61                     | 18,20 | 29,77    | 36,00 | 44,33    | 53,38 |
| 5     | G171                          |                          | 0,93                      | 1,14 | 5,19     | 6,33 | 8,40     | 9,87  |                          | 15,21                     | 18,64 | 29,68    | 36,20 | 47,37    | 55,15 |
| 6     | G193,<br>G164,<br>P40,<br>P42 |                          | 1,07                      | 1,21 | 5,43     | 6,47 | 8,71     | 10,00 |                          | 16,01                     | 19,17 | 30,94    | 36,86 | 18,60    | 55,72 |

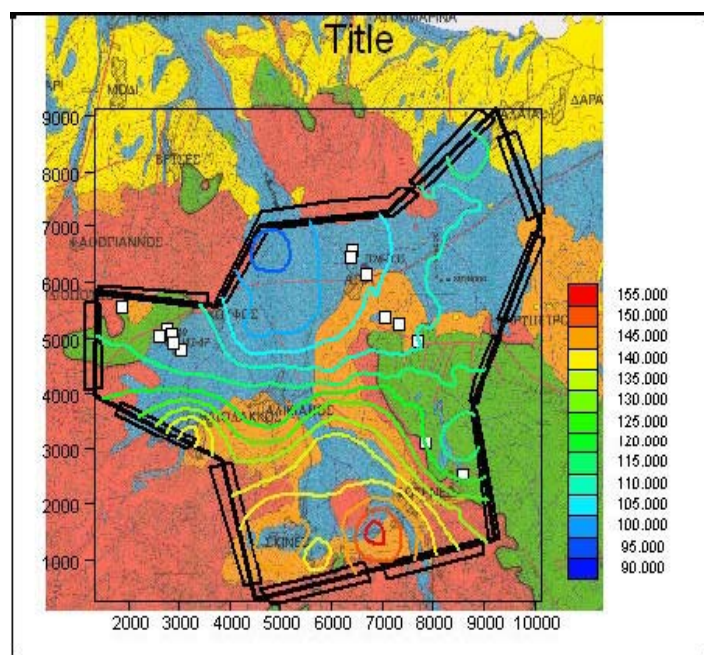
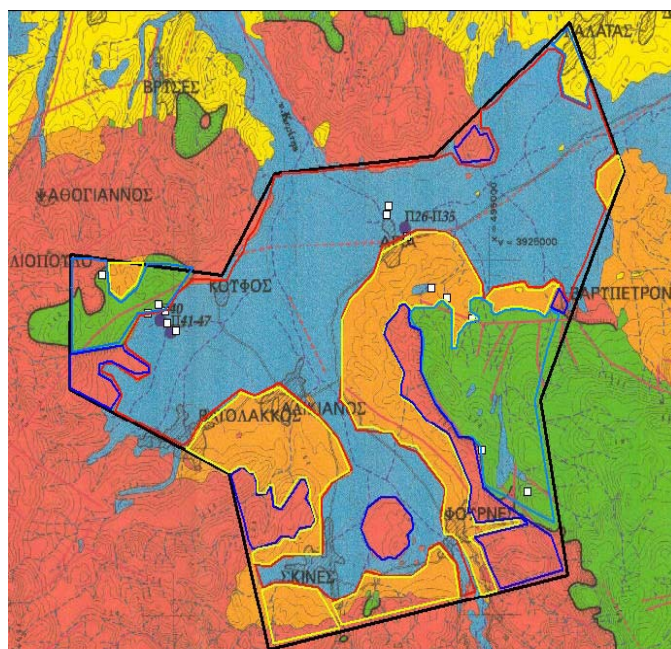
Σε αυτές τις περιπτώσεις τα υδραυλικά ύψη εμφανίζουν σημαντική αύξηση ανάλογη με το ποσοστό μείωσης (10% & 25%). Παρατηρούμε επίσης ότι τα υδραυλικά ύψη σημειώνουν μεγαλύτερη αύξηση με το πέρασμα των περιόδων , κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι ο υδροφορέας υπερκαλύπτει τις ανάγκες άντλησης των πηγαδιών και έτσι τα αποθέματα νερού μεγαλώνουν με τον χρόνο.

Συνεπώς η περιοχή της Αγυιάς δεν είναι ανθεκτική σε αλλαγές των παροχών άντλησης και χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα ευαισθησίας ως προς την συγκεκριμένη παράμετρο. Συμπεραίνουμε , λοιπόν, πως με κάθε αλλαγή που θα συντελείται στο σύστημα ο έλεγχος των παροχών άντλησης κρίνεται απαραίτητος.

## 6.5 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Σύμφωνα με τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής, παρατηρούμε ότι είναι αρκετά υδροπερατή. Στον κύριο όγκο της η τιμή της υδροπερατότητας είναι στα 69,12m/day. Όμως στην περιοχή μεταξύ της περιοχής του Βαρύπετρου και του Φουρνέ παρατηρείται ένας καρστικός σχηματισμός που στο ένα επίπεδο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με 10m/day ενώ στο 2ο επίπεδο η τιμή του ανέρχεται στα 300 m/day, λόγω ενός ρήγματος. Η κατεύθυνση ροής του συστήματος μας

είναι από νότια προς τα βόρεια. Ο ορεινός όγκος φορτίζει την περιοχή με νερό η οποία αποφορτίζεται φυσικά στη θάλασσα καθώς και κατόπιν ανθρώπινης παρέμβασης στις γεωτρήσεις.



Τα αρχικά υδραυλικά ύψη, όπως παρουσιάζονται και στην παρακείμενη εικόνα, παρουσιάζουν ομαλή μείωση από νότια προς βόρεια, πράγμα το οποίο συμφωνεί και με τα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής καθώς και με την κατεύθυνση ροής. Η υδρολογική μελέτη της συγκεκριμένης περιοχής εμφανίζει μεγάλο ενδιαφέρον διότι η Αγιά αποτελεί την κύρια πηγή υδροδότησης για το σύνολο του Δήμου Χανίων. Γενικά η ευρύτερη περιοχή της Αγιάς δεν

φαίνεται να αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα σχετικά με τα αποθέματα νερού στον υδροφόρο ορίζοντα ακόμα και παρά το γεγονός της ύπαρξης αρκετών γεωτρήσεων στην περιοχή. Τα αρχικά υδραυλικά ύψη της περιοχής αρκετά πάνω από το ύψος της θάλασσας προσδίδοντας στο σύστημα αρκετή αντοχή στις υπάρχουσες συνθήκες.

Σε περίπτωση μεταβολής των αρχικών παραμέτρων και συνθηκών της περιοχής , το σύστημα παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα σε αλλαγές της υδραυλικής αγωγιμότητας και του πορώδους σημειώνοντας εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ευαισθησίας. Έτσι συμπεραίνουμε ότι και στο εγγύς μέλλον ο υδροφορέας δεν θα παρουσιάσει κάποιο πρόβλημα σχετικά με τη υδρομάστευση στην οποία υπόκειται, ακόμα και αν υπάρξει μεταβολή των παραπάνω παραμέτρων. Αντιθέτως στην περίπτωση μεταβολής των οριακών συνθηκών και των παροχών άντλησης η περιοχή της Αγυιάς παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία , κάνοντας το σύστημα ιδιαίτερα ευπαθές. Συνεπώς οποιαδήποτε εκτίμηση μελλοντικών διαχειριστικών σχεδίων ή μοντελοποίηση της περιοχής θα πρέπει να επικεντρώνεται στην ορθή και όσο γίνεται ακριβέστερη εκτίμηση των συγκεκριμένων παραμέτρων.

# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## **Βιβλία**

1. Mary P. Anderson, William W. Woessner, Applied Groundwater Modeling, Academic Press, 1992.
2. Γεώργιος Π. Καρατζάς, Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002.
3. Γ. Τσακίρης, Υδατικοί Πόροι: Η Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.
4. Βρυζώνης Δημήτρης, Διπλωματική Εργασία : «'Υδρολογική μελέτη και σενάρια διαχείρισης υπόγειου υδροφορέα περιοχής Αγιάς Χανίων με χρήση μοντέλων προσομοίωσης» ,2007
5. Υδρογεωλογική Μελέτη Υπολεκάνης Κερίτη. Έργο ΥΠΕΧΩΔΕ, Ι.Γ.Μ.Ε. Παράρτημα Κρήτης .
6. ARGUS ONE Student Version 4.2.0.q (LantchBook).
7. PTC Manual

## **Ιστοσελίδες**

8. [www.water.usgs.gov](http://www.water.usgs.gov)
9. [www.emy.gr](http://www.emy.gr)
10. [www.astm.org](http://www.astm.org)
11. [www.europa.eu.int](http://www.europa.eu.int)
12. [www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP\\_Groundwater\\_Modelling.pdf](http://www.dtsc.ca.gov/SiteCleanup/SMP_Groundwater_Modelling.pdf)
13. [www.argusint.com/index.html](http://www.argusint.com/index.html)
14. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## **Λογισμικά**

15. Argus One
16. Google Earth