

**ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ  
ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ**

**WATER SUPPLY AND SEWAGE COMPANY OF  
ATHENS**

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ  
& ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES, HYDRAULIC  
& MARITIME ENGINEERING**

**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ  
ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ  
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ  
ΑΘΗΝΑΣ**

**RESEARCH PROJECT  
UPDATING OF THE  
SUPERVISION AND  
MANAGEMENT OF THE  
WATER RESOURCE SYSTEM  
OF ATHENS**

**ΤΕΥΧΟΣ 10  
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ  
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΤΗ  
ΛΕΚΑΝΗ Β. ΚΗΦΙΣΟΥ**

**VOLUME 10  
A SYSTEM FOR THE SIMULATION  
OF THE HYDROLOGICAL CYCLE  
IN THE BOEOTICOS KIFISSOS  
BASIN**

**ΣΥΝΤΑΞΗ: Ι. ΝΑΛΜΠΑΝΤΗΣ, Ε. ΡΟΖΟΣ**

**BY: I. NALBANTIS, E. ROZOS**

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Δ. ΚΟΥΤΣΟΓΙΑΝΝΗΣ**

**SCIENTIFIC DIRECTOR: D. KOUTSOYIANNIS**

**ΑΘΗΝΑ – ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2000**

**ATHENS – DECEMBER 2000**



## **Περίληψη**

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας», καταρτίστηκε επιχειρησιακό πακέτο προγραμμάτων Η/Υ με στόχο την προσομοίωση και πρόγνωση (με στοχαστικό τρόπο) της υπόγειας υδροφορίας στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Το πακέτο χρησιμοποιεί το μοντέλο MODFLOW της υπηρεσίας USGS και αξιοποιεί τα αποτελέσματα προγενέστερης μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ στην οποία είχε χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο. Έγινε προσαρμογή του μοντέλου μέσω της κατασκευής κατάλληλου εξειδικευμένου λογισμικού έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της στοχαστικής προσομοίωσης στη μεταβλητή του ύψους βροχόπτωσης. Τέλος, έγινε πιλοτική εφαρμογή στο καρστικό σύστημα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για μέσες συνθήκες από την άποψη της βροχόπτωσης αλλά και της εκμετάλλευσης του συστήματος για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς εντός της λεκάνης και συνθήκες υψηλών αλλά και μηδενικών απολήψεων από τις γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου για ύδρευση της Αθήνας.

## **Abstract**

A computer package is built to simulate groundwater flow in the Boeoticos Kifissos River Basin. This is carried out by a research team at the NTUA within the frame of the project entitled “Modernization of the supervision and management of the water resources for water supply of Athens”. Stochastic groundwater flow simulation and forecasting is based on the MODFLOW model of the USGS which had been calibrated in a previous study by the Ministry of Environment, Town Planning and Public Works. Suitable computer programs are written to adapt the model package to the operational needs which include stochastic simulation of rainfall. Finally, the adapted package is applied to the karstic aquifer system of Boeoticos Kifissos Basin for a typical scenario with average hydrologic conditions and projected water requirements for irrigation and water supply within the basin and high (and zero) withdrawals through the Vassilika – Parori boreholes which supply water to Athens.



## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	i
Abstract .....	i
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Ιστορικό .....	1
1.2 Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους.....	1
1.3 Διάρθρωση του τεύχους .....	3
<b>2 Σχεδιασμός μοντέλου προσομοίωσης</b>	<b>4</b>
2.1 Επιλογή μοντέλου – πακέτο MODFLOW .....	4
2.2 Σύντομη θεωρητική τεκμηρίωση του μοντέλου .....	4
2.3 Συμμόρφωση στις λειτουργικές απαιτήσεις.....	6
2.3.1 Γενικές απαιτήσεις του συστήματος.....	6
2.3.2 Γενικές απαιτήσεις του μαθηματικού μοντέλου.....	6
2.3.3 Απαιτήσεις σε δεδομένα.....	7
2.3.4 Απαιτήσεις σε εξαγόμενα .....	8
2.4 Συμμόρφωση στις μη λειτουργικές απαιτήσεις .....	9
<b>3 Δεδομένα</b>	<b>11</b>
3.1 Γεωγραφικά δεδομένα .....	11
3.2 Δεδομένα βροχόπτωσης.....	11
3.3 Δεδομένα παροχής υδατορευμάτων και πηγών .....	13
3.4 Δεδομένα στάθμης υδροφορέων .....	16
3.5 Δεδομένα χρήσης νερού.....	17
<b>4 Βαθμονόμηση μοντέλου - Παραδοχές</b>	<b>20</b>
4.1 Γενικά.....	20
4.2 Περιοχή μελέτης .....	20
4.3 Αναπαράσταση της γεωμετρίας του υδροφορέα.....	21
4.4 Αναπαράσταση οριακών συνθηκών.....	21
4.4.1 Πλευρικά, άνω και κάτω όρια .....	21
4.4.2 Επικοινωνία υδροφορέα και Βοιωτικού Κηφισού.....	23
4.4.3 Υδραυλικές ιδιότητες υδροφορέα.....	23
4.5 Εξωτερικές διεγέρσεις.....	23
4.6 Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης.....	26

<b>5 Προετοιμασία του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση</b>	<b>27</b>
5.1 Τοποθέτηση του προβλήματος της επιχειρησιακής χρήσης - Η στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση.....	27
5.2 Αναπαράσταση οριακών συνθηκών.....	28
5.3 Ανάλυση απαιτήσεων επιχειρησιακού πακέτου .....	30
5.3.1 Γενικά .....	30
5.3.2 Γενικές απαιτήσεις.....	30
5.3.3 Απαιτήσεις σε δεδομένα.....	31
5.3.4 Απαιτήσεις σε εξαγόμενα.....	31
5.3.5 Μη λειτουργικές απαιτήσεις.....	31
5.4 Σχεδιασμός και υλοποίηση .....	31
5.5 Οδηγίες χρήσης προγραμμάτων.....	32
5.5.1 Εισαγωγή.....	32
5.5.2 Δομή καταλόγων .....	32
5.5.3 Ορίσματα προγραμμάτων.....	33
5.5.4 Προκαθορισμένα δεδομένα .....	33
5.5.5 Μεταβλητά δεδομένα (αρχεία εισόδου προγραμμάτων).....	33
5.6 Πιλοτική εφαρμογή επιχειρησιακού πακέτου .....	34
<b>6 Σύνοψη – Συμπεράσματα</b>	<b>44</b>
<b>Αναφορές</b>	<b>47</b>
<b>Κατάλογος συμβόλων</b>	<b>49</b>
<b>Παράρτημα Α – Πίνακες δεδομένων επιφανειακής βροχόπτωσης</b>	<b>50</b>
<b>Παράρτημα Β – Υδατικά ισοζύγια υδροφορέα</b>	<b>53</b>
Υδατικά ισοζύγια διαχειριστικού σεναρίου 1 .....	53
Υδατικά ισοζύγια διαχειριστικού σεναρίου 2 .....	59

# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Ιστορικό

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με τίτλο «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας» που ανατέθηκε από την ΕΥΔΑΠ (με την από 26/5/1999 απόφαση του Διοικητικού Συμβουλίου της) σε ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων του ΕΜΠ με επιστημονικό υπεύθυνο τον επίκουρο καθηγητή ΕΜΠ Δ. Κουτσογιάννη.

Αντικείμενο του τεύχους είναι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός μαθηματικού μοντέλου υπόγειας υδροφορίας για επιχειρησιακή χρήση στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Το μοντέλο υλοποιήθηκε μέσω ενός υπολογιστικού συστήματος που ακολουθεί πιστά τη σχετική ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999). Η τελευταία έχει συνταχθεί σύμφωνα με το Παράρτημα Ι της σύμβασης ανάθεσης του ερευνητικού έργου (ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, 1999β).

Στη σύνταξη του παρόντος τεύχους συμμετείχαν οι:

1. Ι. Ναλμπάντης, Δρ μηχανικός, και
2. Ε. Ρόζος, Πολιτικός Μηχανικός, υποψήφιος Δρ.

Ως σύμβουλοι για τις εργασίες που περιγράφονται στο τεύχος εργάστηκαν οι:

1. Π. Μαρίνος, καθηγητής ΕΜΠ
2. Π. Παπανικολάου, επίκουρος καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
3. Β. Δένδρου, Δρ μηχανικός
4. Α. Παναγόπουλος, Δρ υδρογεωλόγος
5. Β. Περγέρης, υδρογεωλόγος
6. Σ. Δρακοπούλου, υδρογεωλόγος

## 1.2 Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους

Στο Παράρτημα Ι της Σύμβασης του έργου (ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, 1999α) αναφέρεται ρητά ο στόχος του υπό μελέτη συστήματος ως εξής:

*«Το μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης θα περιλαμβάνει μαθηματική αναπαράσταση των κύριων υδρολογικών διεργασιών στη λεκάνη απορροής τόσο για τα επιφανειακά νερά όσο και για τα υπόγεια. Προγραμματίζεται ως ένα κατανοημένο στο χώρο μοντέλο με αδρομερή κάρναβο τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια (αναπαράσταση των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων). Το μοντέλο θα βασίζεται στις μετρήσεις των κατακρημνισμάτων και των μετεωρολογικών μεταβλητών της λεκάνης, των παροχών στη Διώρυγα Καρδίτσας και σε ενδιάμεσες θέσεις, καθώς και σε ανάλυση των δεδομένων λειτουργίας των γεωτρήσεων της ΕΥΔΑΠ αλλά και άλλων φορέων. Τελικό εξαγόμενό του θα είναι η μελλοντική, κάθε φορά, διακύμανση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας για τα επόμενα έτη και η αντίστοιχη πρόγνωση των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων που εκμεταλλεύεται η ΕΥΔΑΠ.»*

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει διευκρίνιση των όρων που χρησιμοποιούνται στο παρόν τεύχος. Ως μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης εννοείται το σύνολο των μαθηματικών σχέσεων και μεθόδων που επιτρέπουν την επίλυση των εξισώσεων της ροής του υπόγειου νερού. Το υπολογιστικό σύστημα μέσω του οποίου υλοποιείται το μοντέλο αναφέρεται και ως ΣΥΒΟΙΚ (Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης) και περιλαμβάνει το σύνολο του λογισμικού που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων, τρέξιμο του μοντέλου και οπτικοποίηση και εκτύπωση των αποτελεσμάτων. Το υπολογιστικό σύστημα επιλέγεται από λογισμικό που διατίθεται στην αγορά. Τέλος, ως επιχειρησιακό πακέτο αναφέρεται το σύνολο προγραμμάτων για την επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου. Το πακέτο περιλαμβάνει νέα προγράμματα που γράφηκαν στο παρόν έργο αλλά και το παραπάνω υπολογιστικό σύστημα (ΣΥΒΟΙΚ). Σε ότι αφορά στο μοντέλο και το υπολογιστικό σύστημα έχει ήδη συνταχθεί σχετική ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999). Για το επιχειρησιακό πακέτο, η ανάλυση απαιτήσεων δίνεται στο παρόν τεύχος.

Το υπολογιστικό σύστημα αποτελεί, μαζί με το υποσύστημα πρόγνωσης των εισροών στους ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα, ένα καίριο βοηθητικό εργαλείο για το σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (Υδρονομέας), έτσι ώστε το τελευταίο να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένες επιχειρησιακές ανάγκες της ΕΥΔΑΠ. Οι ανάγκες αυτές συνοψίζονται ως απαιτήσεις απάντησης σε ερωτήματα της μορφής:

1. Ποια είναι η μέγιστη ετήσια δυνατότητα απόληψης νερού, για δεδομένο υδρολογικό καθεστώς και δεδομένη αξιοπιστία;
2. Με ποια διαχειριστική πολιτική εξασφαλίζεται η παραπάνω απόληψη νερού;
3. Ποιο είναι το κόστος της παραπάνω διαχειριστικής πολιτικής;
4. Ποια είναι η βέλτιστη πολιτική διαχείρισης για την κάλυψη δεδομένης ζήτησης, για δεδομένο υδρολογικό καθεστώς και δεδομένη αξιοπιστία;
5. Ποιο είναι το ελαχιστοποιημένο κόστος της πολιτικής αυτής;
6. Πώς θα εξελιχθεί η διαθεσιμότητα υδατικών πόρων τους επόμενους μήνες (πιθανά εναλλακτικά σενάρια);
7. Ποια είναι η επίπτωση στο μέλλον (π.χ. σε ορίζοντα 10 ετών) ενός συγκεκριμένου διαχειριστικού μέτρου;
8. Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός υπό μελέτη έργου (π.χ. νέου αγωγού, ενίσχυση υδραγωγείου, αντλιοστασίου, κτλ.)
9. Πόσο εφικτή είναι η επέκταση των δραστηριοτήτων της ΕΥΔΑΠ (π.χ. υδροδότηση άλλων περιοχών)
10. Ποιες είναι οι επιπτώσεις ενός αρνητικού κλιματικού σεναρίου (έμμονη ξηρασία, κλιματική αλλαγή) και πως αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί;
11. Πόσο επαρκείς είναι οι υφιστάμενες εφεδρικές πηγές (υπόγειοι υδατικοί πόροι) και τα αντίστοιχα έργα αξιοποίησής τους για την κάλυψη ειδικών συνθηκών ή έκτακτων περιστατικών (π.χ. Ολυμπιακοί Αγώνες);
12. Με ποιο τρόπο αντιμετωπίζονται τα περιστατικά αυτά;

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4 του τεύχους προδιαγραφών, το σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας (Υδρονομέας) περιλαμβάνει την πλήρη και λεπτομερή προσομοίωση της διακίνησης του νερού στα εξωτερικά υδραγωγεία (μέχρι τα διωλιστήρια), τους ταμιευτήρες και τα άλλα έργα που συνδέονται με το εξωτερικό δίκτυο ύδρευσης της Αθήνας. Πραγματοποιεί βελτιστοποίηση των κανόνων λειτουργίας του συστήματος ταμιευτήρων, συνυπολογίζοντας τις στατικές και δυναμικές πληροφορίες του υδροσυστήματος και αξιοποιώντας τις πληροφορίες από το σύστημα τηλεμέτρησης. Συνυπολογίζει, πέραν της ύδρευσης της Αθήνας, και τις άλλες θεσμοθετημένες χρήσεις νερού και προτείνει εναλλακτικές δυνατότητες λειτουργίας σε



περιπτώσεις βλαβών του συστήματος. Σε συνθήκες αυξημένης ζήτησης νερού, σε περιπτώσεις βλάβης σε ένα υδραγωγείο αναμένεται να γίνονται σημαντικές απολήψεις από τους υπόγειους υδροφορείς του υδροσυστήματος οι οποίοι θεωρούνται, γενικά, εφεδρικές πηγές (ΕΥΔΑΠ, 1996). Οι ομάδες των γεωτρήσεων που, σήμερα, η ΕΥΔΑΠ θεωρεί ότι θα πρέπει να διατηρούνται σε εφεδρεία είναι οι ακόλουθες:

1. Μαυροσουβάλας
2. Ούγγρων και Παραλίμνης
3. Αυλώνα, και
4. Βασιλικών – Παρορίου.

Από τις παραπάνω γεωτρήσεις, αυτές της τελευταίας ομάδας αντλούν νερό από τον πιο σημαντικό και εκτεταμένο υδροφορέα του υδροσυστήματος που είναι αυτός της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού. Για το λόγο αυτό, η δυναμική πληροφορία σχετικά με τα αποθέματα υπόγειου νερού στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είναι κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος υποστήριξης της διαχείρισης του συστήματος (Υδρονομίας). Βέβαια, για τα σημερινά επίπεδα ζήτησης νερού και με απρόσκοπτη λειτουργία των εξωτερικών υδραγωγείων, τα υπόγεια νερά του Β. Κηφισού παραμένουν ως εφεδρική πηγή. Σε ότι αφορά τη λεκάνη της Υλίκης, οι γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί στην περίμετρο της λίμνης κατά την τελευταία περίοδο λειψυδρίας θεωρείται ότι αντλούν ουσιαστικά νερό από τη λίμνη (μειώνοντας τα αποθέματά της) και, κατά συνέπεια, δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την ύδρευση της Αθήνας. Γι' αυτό και στην παρούσα πρώτη φάση του ερευνητικού έργου, η υπόγεια υδροφορία της λεκάνης της Υλίκης δεν διερευνήθηκε. Ο λόγος ήταν ο περιορισμένος χρόνος και τα οικονομικά μέσα του έργου. Στη δεύτερη, όμως, φάση του έργου, η διερεύνηση της υπόγειας υδροφορίας στην Υλίκη κρίνεται αναγκαία για δύο, τουλάχιστον, λόγους:

1. Η υπόγεια υδροφορία της λεκάνης σχετίζεται άμεσα με τις απώλειες της λίμνης, και
2. Η μελέτη της υδροφορίας αυτής είναι απαραίτητη για την προστασία του υπόγειου νερού από ποιοτική υποβάθμιση.

### **1.3 Διάρθρωση του τεύχους**

Το παρόν τεύχος περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια από τα οποία το πρώτο είναι η παρούσα εισαγωγή. Στο δεύτερο κεφάλαιο σχολιάζεται το πρόβλημα της επιλογής του κατάλληλου μοντέλου, δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του, όπως αυτά ορίζονται στην ανάλυση απαιτήσεων, καθώς και σύντομη θεωρητική τεκμηρίωση του μοντέλου. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν τόσο στη βαθμονόμηση όσο και στην προσαρμογή του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση (πρόγνωση). Στο κεφάλαιο 4 δίνονται στοιχεία για τις παραδοχές της βαθμονόμησης του μοντέλου ενώ στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι παραδοχές και μερικά αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση (πρόγνωση). Στο ίδιο αυτό κεφάλαιο παρουσιάζεται το νέο λογισμικό που υλοποιεί την προσαρμογή του μοντέλου. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται ανακεφαλαίωση των εργασιών και εξάγονται συμπεράσματα. Τέλος, το τεύχος συμπληρώνεται με δύο παραρτήματα που περιλαμβάνουν πίνακες με δεδομένα και αποτελέσματα των διερευνήσεων που αφορούν το υπό μελέτη μοντέλο.

## 2 Σχεδιασμός μοντέλου προσομοίωσης

---

### 2.1 Επιλογή μοντέλου – πακέτο MODFLOW

Τα κριτήρια που τέθηκαν για την επιλογή του μοντέλου ήταν δύο:

1. Η συμμόρφωση με την ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999) σε ότι αφορά στις απαιτήσεις σε δεδομένα, εξαγόμενα και τη θεωρητική τεκμηρίωση.
2. Η θεώρηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του φυσικού συστήματος: (α) οι υδροφορείς είναι καρστικοί με γεωμετρία αγωγών άγνωστη, και (β) οι υπόγειοι αγωγοί είναι πολλοί και μικροί στην κλίμακα του πεδίου ροής (λεκάνη έκτασης της τάξης των 2000 km<sup>2</sup>)
3. Ο σοβαρός περιορισμός στο κόστος του έργου (για το συγκεκριμένο σύστημα) και στο χρόνο εκτέλεσής του.

Με όλους τους παραπάνω περιορισμούς, η διεθνής και η ελληνική εμπειρία μας οδήγησαν μονοσήμαντα στην προσέγγιση του Ισοδύναμου Πορώδους Μέσου (Equivalent Porous Medium, ή, σε συντομογραφία, EPM) και τον ουσιαστικά μοναδικό εκπρόσωπό της, το μοντέλο MODFLOW της Αμερικανικής Υπηρεσίας U.S. Geological Survey (USGS). Για την υλοποίηση του μοντέλου αυτού (υπολογιστικό σύστημα ΣΥΒΟΙΚ) επελέγη το έτοιμο πακέτο GMS (Groundwater Modeling System) του Αμερικανικού Υπουργείου Άμυνας.

### 2.2 Σύντομη θεωρητική τεκμηρίωση του μοντέλου

Το λογισμικό MODFLOW υλοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της τρισδιάστατης κίνησης του υπόγειου νερού σε πορώδη μέσα. Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση αυτή είναι η ακόλουθη

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Όπου  $K$  είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας με δείκτες που υποδηλώνουν τους άξονες σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων που συμπίπτει με τις κύριες κατευθύνσεις του μεγέθους αυτού,  $h$  είναι το πιεζομετρικό φορτίο,  $W$  είναι όρος πηγής ή καταβόθρας,  $S_s$  είναι η ειδική αποθήκευση, και  $t$  ο χρόνος.

Το μαθηματικό μοντέλο της εξίσωσης (1) μαζί με τις οριακές και τις αρχικές συνθήκες εκφρασμένες σε όρους πιεζομετρικού φορτίου ορίζουν ένα πλήρες πρόβλημα προσομοίωσης σε συνθήκες μη μόνιμης ροής (undsteady flow).

Η διαφορική εξίσωση (1) μετατρέπεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Χρησιμοποιείται η τεχνική των κυψελίδων (μπλοκ) στις οποίες χωρίζεται το πεδίο ροής. Στο κέντρο κάθε κυψελίδας λαμβάνεται ένας κόμβος που χαρακτηρίζεται με τους δείκτες  $i, j, k$  για τις κατευθύνσεις  $x, y, z$  αντίστοιχα. Μετά από εφαρμογή της μεθόδου, η εξίσωση (1) γίνεται

$$CY_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CY_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) +$$

$$\begin{aligned}
& CX_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CX_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
& CZ_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CZ_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
& p_{i,j,k}h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k}^m = SS_{i,j,k}\Delta V_{i,j,k} \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}}
\end{aligned} \tag{2}$$

Όπου τα μεγέθη CX, CY, CZ είναι όροι υδραυλικής αγωγιμότητας (conductance) που περιλαμβάνουν την υδραυλική αγωγιμότητα και τις διαστάσεις των κυψελίδων και εκφράζουν παροχή δια μέσου επιφάνειας κυψελίδας (κάθετη στους άξονες x, y, z αντίστοιχα) ανηγμένη στη μονάδα μήκους της διαδρομής του νερού από κόμβο σε κόμβο (κέντρο κυψελίδας). Οι δείκτες δείχνουν την τάξη της κυψελίδας στον τρισδιάστατο χώρο και οι εκθέτες τον παρόντα χρόνο  $m$  και τον χρόνο πριν από ένα χρονικό βήμα  $m-1$ . Τα μεγέθη  $p$ ,  $Q$  είναι όροι της εξωτερικής φόρτισης της κυψελίδας. SS είναι ο συντελεστής της ειδικής αποθήκευσης. Το μέγεθος  $\Delta V$  είναι ο όγκος της κυψελίδας.

Γράφοντας την εξίσωση (2) για κάθε κυψελίδα του πεδίου ροής ξεκινώντας από γνωστές αρχικές συνθήκες εκφρασμένες σε όρους πιεζομετρικού φορτίου, προκύπτει σύστημα γραμμικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές του φορτίου στο τέλος του πρώτου χρονικού βήματος. Το σύστημα αυτό είναι της μορφής

$$\mathbf{Ax}=\mathbf{b} \tag{3}$$

Όπου  $\mathbf{A}$  είναι  $(m \times n) \times (m \times n)$  τετραγωνικός πίνακας που εξαρτάται από τους όρους υδραυλικής αγωγιμότητας των  $n$  επί  $m$  κυψελίδων,  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα των πιεζομετρικών φορτίων σε κάθε κυψελίδα και  $\mathbf{b}$  είναι το διάνυσμα που προκύπτει από τις οριακές συνθήκες.

Η επίλυση του συστήματος (3) επιτρέπει την όλη διαδικασία να προχωρήσει με τον ίδιο τρόπο στη δεύτερη χρονική περίοδο. Έτσι, ολοκληρώνεται η επίλυση για το σύνολο των επιθυμητών χρονικών περιόδων και ομιλούμε για έναν πλήρη κύκλο προσομοίωσης της ροής. Για την επίλυση χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1999b):

1. Strongly Implicit Procedure
2. Slice-Successive Overrelaxation
3. Preconditioned Conjugate Gradient

Η μέθοδος PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) (Hestenes and Stiefel, 1952) είναι μια αρκετά ευσταθής και συντηρητική αριθμητική μέθοδος από την άποψη των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων. Οι προϋποθέσεις για να εφαρμοστεί η μέθοδος είναι ο πίνακας  $\mathbf{A}$  να είναι συμμετρικός και θετικά ορισμένος. Οι πίνακες συντελεστών που προκύπτουν από τα προβλήματα υπόγειας ροής σε υδροφορείς ικανοποιούν πάντα αυτές τις συνθήκες.

Η βασική τεχνική που χρησιμοποιείται είναι ο χωρισμός του μητρώου  $\mathbf{A}$  σε δύο μητρώα  $\mathbf{M}$  και  $\mathbf{N}$  έτσι ώστε  $\mathbf{A} = \mathbf{M} + \mathbf{N}$ . Το  $\mathbf{M}$  ονομάζεται συντηρημένο (preconditioned form) μητρώο του  $\mathbf{A}$  και ο στόχος είναι να βρεθεί τέτοιο  $\mathbf{M}$  που να είναι εύκολα αντιστρέψιμο και να μοιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο με το  $\mathbf{A}$ . Επίσης το  $\mathbf{M}$  πρέπει να είναι συμμετρικό και θετικά ορισμένο. Ορίζεται ως βασική επαναληπτική εξίσωση η ακόλουθη

$$\mathbf{M}\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{M}\mathbf{x}_k + \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_k \tag{4}$$

Όπου οι δείκτες  $k$  και  $k+1$  αναφέρονται στην επανάληψη  $k$  και  $k+1$ . Η ποσότητα  $\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_k$  αποτελεί το σφάλμα της επανάληψης  $k$  και συμβολίζεται με  $\mathbf{r}_k$ . Αν τεθεί  $\mathbf{s}_k = \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k$ , η επαναληπτική εξίσωση γίνεται

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{r}_k \tag{5}$$

Ένας τρόπος υπολογισμού του διάνυσματος  $\mathbf{s}$  του επόμενου χρονικού βήματος είναι ο ακόλουθος

$$\mathbf{p}_k = \begin{cases} \mathbf{s}_k & \text{αν } k = 0 \\ \mathbf{s}_k + \frac{\mathbf{s}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{s}_{k-1}^T \mathbf{r}_{k-1}} \mathbf{p}_{k-1} & \text{αν } k > 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{a}_k = \frac{\mathbf{s}_k^T \mathbf{r}_k}{\mathbf{p}_k^T \mathbf{A} \mathbf{p}_k} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{a}_k \mathbf{p}_k$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = \mathbf{r}_k - \mathbf{a}_k \mathbf{A} \mathbf{p}_k$$

Το αν θα συγκλίνουν οι επαναλήψεις και πόσο γρήγορα εξαρτάται από την επιλογή του συντηρημένου πίνακα και από τον τρόπο που υπολογίζεται το διάνυσμα  $\mathbf{s}$ .

## 2.3 Συμμόρφωση στις λειτουργικές απαιτήσεις

### 2.3.1 Γενικές απαιτήσεις του συστήματος

Στο κεφάλαιο 5 του τεύχους των απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999), δίνονται οι απαιτήσεις για το σύστημα: Οι απαιτήσεις αυτές μεταφέρθηκαν στο κείμενο που ακολουθεί με προσθήκη σχολίων σχετικών με τη συμμόρφωση (με τις απαιτήσεις) του μοντέλου που επιλέχτηκε.

- (5. 1) *Το σύστημα θα λειτουργεί σε παραθυρικό περιβάλλον.*
- (5. 2) *Σε αυτή την φάση του έργου, δεν προβλέπεται ξεχωριστός Η/Υ για το ΣΥΒΟΙΚ. Συνεπώς, το σύστημα θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει με ένα μέρος της υπολογιστικής ισχύος ενός κοινού προσωπικού Η/Υ.*
- (5. 3) *Το σύστημα θα είναι φιλικό στο χρήστη ως προς την εισαγωγή δεδομένων (δεν θα απαιτεί γράψιμο σε αρχεία ASCII).*

Το σύστημα ικανοποιεί και τις τρεις απαιτήσεις

### 2.3.2 Γενικές απαιτήσεις του μαθηματικού μοντέλου

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5 του τεύχους των απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999), το μοντέλο θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- (5. 4) *Να προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις.*
- Στο παρόν έργο, το μοντέλο δεν απαιτείται να χειρίζεται μεταβλητή πυκνότητα του νερού. Επίσης, στο παρόν έργο το μοντέλο δεν απαιτείται να προσομοιώνει τη ροή στην ακόρεστη ζώνη. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δομικά στοιχεία του μοντέλου MODFLOW. Ακόμη, θεωρήθηκε μόνο ένα γεωλογικό στρώμα κατά την κατακόρυφη έννοια.
- (5. 5) *Να χρησιμοποιεί μια από τις καταξιωμένες και ελεγμένες μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για τη υπόγεια ροή (πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένα στοιχεία).*
- Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Από τις μεθόδους επίλυσης της σελίδας 5, στο παρόν έργο χρησιμοποιείται η Pre Conjugate Gradient.
- (5. 6) *Να προσομοιώνει τόσο την μόνιμη όσο και τη μη μόνιμη ροή.*
- Το μοντέλο έχει επιλογή της μιας ή της άλλης δυνατότητας.
- (5. 7) *Να εφαρμόζεται για όλους τους τύπους υδροφορέα (φρεάτιους, υπό πίεση).*

Το μοντέλο, με κατάλληλο χειρισμό των γεωλογικών στρωμάτων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, καθώς και των οριακών συνθηκών, αντιμετωπίζει και τους δύο τύπους υδροφορέα. Χρησιμοποιήθηκε η επιλογή του φρεάτιου υδροφορέα που, όμως, μπορεί να μεταπίπτει σε υπό πίεση.

- (5. 8) *Να επιτρέπει την προσομοίωση της ροής σε υδροφόρα στρώματα μεταβλητής γεωμετρίας.*

Η γεωμετρία του πεδίου ροής προσεγγίζεται από ένα σύνολο συνεχόμενων κυψελίδων που επιτρέπουν να προσεγγιστεί οποιαδήποτε γεωμετρία.

- (5. 9) *Να προσομοιώνει τις εξωτερικές διεγέρσεις τους συστήματος ροής όπως είναι η ροή προς φρέατα, επαναφόρτιση από βροχόπτωση ή η διήθηση επιφανειακών νερών, η εξατμοδιαπνοή και η ροή προς στραγγιστήρια.*

Όλες οι εξωτερικές διεγέρσεις προσομοιώνονται κατάλληλα με τον ορισμό οριακών συνθηκών μέσω παραμέτρων.

- (5. 10) *Να επιτρέπει ανισοτροπία στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα (υδραυλική αγωγιμότητα και ειδική αποθήκευση).*

Σε κάθε κυψελίδα του καννάβου είναι δυνατός ο ορισμός διαφορετικών υδραυλικών ιδιοτήτων.

- (5. 11) *Να χειρίζεται οριακές συνθήκες σταθερής ή μεταβλητής παροχής και σταθερού ή μεταβλητού πιεζομετρικού φορτίου.*

Το μοντέλο αντιμετωπίζει όλα τα παραπάνω.

- (5. 12) *Να χρησιμοποιεί κάνναβο μεταβλητού χωρικού βήματος.*

Το χωρικό βήμα σε κάθε κατεύθυνση μπορεί να είναι μεταβλητό, χωρίς, όμως, απότομες μεταβολές.

- (5. 13) *Να χειρίζεται αποτελεσματικά αριθμητικά προβλήματα όπως είναι η ταχύτητα σύγκλισης στη λύση ή προβλήματα ταλαντώσεων.*

Τα προβλήματα αυτά έχουν τύχει εκτεταμένων ερευνών των οποίων τα αποτελέσματα έχουν ενσωματωθεί σε κατάλληλες παραμέτρους που επιλέγονται με βοηθητικά μενού από τον χρήστη.

- (5. 14) *Να λειτουργεί σε μηνιαίο χρονικό βήμα.*

- (5. 15) *Να λειτουργεί για περίοδο προσομοίωσης τουλάχιστον ίση με μια δεκαετία.*

Ο αριθμός των χρονικών περιόδων προσομοίωσης ορίζεται, ούτως ή άλλως, από το χρήστη.

- (5. 16) *Να διαθέτει επαρκές βήμα διακριτοποίησης στο χώρο (κάνναβο) συμβατό με την αναπαράσταση στο χώρο των σημαντικότερων συνιστωσών του συστήματος.*

Οι συνιστώσες αυτές είναι: (α) η λεκάνη Β. Κηφισού, (β) η αρδευόμενες εκτάσεις της λεκάνης Β. Κηφισού εντός ή εκτός ΤΟΕΒ, (γ) οι πηγές Χαρίτων, Πολυγύρας, Μαυρονερίου και Λιβαδιάς, (δ) οι γεωτρήσεις του ΥΠΓΕ, (ε) οι γεωτρήσεις της ΕΥΔΑΠ, (στ) η διασύνδεση με το υδροδοτικό σύστημα μέσω του υδραγωγείου Διστόμου, (ζ) το Υδραγωγείο Κωπαΐδας. Τα στοιχεία αυτά αναπαρίστανται στο μοντέλο άμεσα ή έμμεσα μετά από κατάλληλη απλοποίηση σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό.

### **2.3.3 Απαιτήσεις σε δεδομένα**

Το υπό μελέτη σύστημα θα πρέπει να δέχεται τα ακόλουθα δεδομένα (Καραβοκυρός κ.ά., 1999):

- (5. 17) Γεωγραφικά όρια των γεωλογικών στρωμάτων (στατικά).
- (5. 18) Γεωγραφικά δεδομένα της υδραυλικής αγωγιμότητας (στατικά).
- (5. 19) Γεωγραφικά δεδομένα της ειδικής αποθήκευσης (στατικά).
- (5. 20) Γεωγραφικά δεδομένα της θέσης των απολήψεων νερού από υδρογεωτρήσεις.

Όλα τα παραπάνω γεωγραφικά δεδομένα θα προέλθουν από επεξεργασία δεδομένων από τα ακόλουθα επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας: (α) ψηφιακό μοντέλο εδάφους στη λεκάνη, (β) επιφανειακοί (και υπόγειοι) υδροκρίτες, (γ) γεωλογικός χάρτης επιφάνειας, και (δ) μικρός αριθμός γεωλογικών τομών. Τα παραπάνω επιτρέπουν τον καθορισμό του καννάβου και των υδραυλικών ιδιοτήτων σε κάθε κυψελίδα.

- (5. 21) Υδρολογικά δεδομένα εισόδου (χρονοσειρές) που διατίθενται στη λεκάνη χωρίς ειδικές απαιτήσεις: (α) σημειακή βροχόπτωση σε ένα αριθμό σταθμών και (β) δυναμική εξατμοδιαπνοή υπολογισμένη από μετεωρολογικές μεταβλητές με βάση γνωστές από τη βιβλιογραφία μεθόδους.

Στο μοντέλο εισάγεται η κατείδυση που έχει προηγουμένως υπολογιστεί με βάση τη βροχόπτωση και την πραγματική εξατμοδιαπνοή.

- (5. 22) Δεδομένα διαχείρισης του νερού (χρονοσειρές): (α) ζήτηση νερού από τις γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου και άλλες μικρότερες ομάδες γεωτρήσεων, (β) ζήτηση για άρδευση υπολογισμένη από τις αρδευόμενες εκτάσεις της περιοχής μελέτης (τόσο από τα επιφανειακά όσο και από τα υπόγεια νερά) και (γ) ζήτηση νερού από την Υλίκη (για ύδρευση της Αθήνας και άρδευση της Κοπαΐδας).

Εισάγονται τα δεδομένα των γεωτρήσεων τόσο της ΕΥΔΑΠ όσο και του Υπουργείου Γεωργίας υπό μορφή ισοδύναμων γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις αυτές κατανέμονται περίπου ομοιόμορφα στην έκταση που αρδεύεται κατά τρόπο που να μη προκαλείται σοβαρή αλλοίωση στην παρατηρημένη πιεζομετρία.

- (5. 23) Δεδομένα φυσικής εκφόρτισης των υδροφορέων υπό μορφή πηγών (χρονοσειρές).

Οι σημαντικότερες πηγές εισάγονται ως οριακές συνθήκες στραγγιστηρίου.

- (5. 24) Αρχικές συνθήκες πιεζομετρικού φορτίου ή παροχής σε κάθε κυψελίδα του καννάβου.

### **2.3.4 Απαιτήσεις σε εξαγόμενα**

Στο τέλος κάθε κύκλου προσομοίωσης, το μοντέλο θα δίνει τα ακόλουθα εξαγόμενα (Καραβοκυρός κ.ά., 1999):

- (5. 25) Τη διακύμανση της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στη θέση της Διώρυγας Καρδίτσας.

Στην παρούσα (πρώτη) φάση του έργου όπου ενδιαφέρει μόνο η υπόγεια υδροφορία στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού, δίνεται η διακύμανση της παροχής μόνον στις κύριες πηγές εκφόρτισης του υδροφορέα που εξετάστηκε.

- (5. 26) Τη διακύμανση των μηνιαίων συνολικών ρυθμιστικών αποθεμάτων υπόγειου νερού στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.

Υπενθυμίζεται ότι η Υλίκη δεν εξετάστηκε εδώ.

- (5. 27) Τη διακύμανση της στάθμης της Υλίκης στην αρχή κάθε μήνα.

Υπενθυμίζεται ότι η Υλίκη δεν εξετάστηκε εδώ.

- (5. 28) *Τη διακύμανση της μηνιαίας ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για άντληση του νερού.  
Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ενέργειας άντλησης γίνεται σε άλλο σύστημα του έργου (Υδρονομέας).*
- (5. 29) *Τη χωροχρονική διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου.*
- (5. 30) *Τη χωροχρονική διακύμανση της απόλυτης στάθμης του υπόγειου ορίζοντα.*
- (5. 31) *Τη χωροχρονική διακύμανση της παροχής του υπόγειου νερού.*
- (5. 32) *Τη χωροχρονική διακύμανση της κατεύθυνσης ροής του υπόγειου νερού.*
- (5. 33) *Τη χωροχρονική διακύμανση της καθαρής επαναφόρτισης.*
- (5. 34) *Συναθροισμένα στο χρόνο μεγέθη των (5. 25) ως (5. 28) για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης.*
- (5. 35) *Συναθροισμένα στο χρόνο μεγέθη των (5. 29) ως (5. 33) για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης.*
- (5. 36) *Συναθροισμένα στο χώρο μεγέθη των (5. 29) ως (5. 33) για όλη την περιοχή μελέτης.*
- (5. 37) *Συναθροισμένα στο χώρο και το χρόνο μεγέθη των (5. 29) ως (5. 33) για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης και για όλη την περιοχή μελέτης.*

Ακόμη, το σύστημα θα πρέπει:

- (5. 38) *Να δίνει για κάθε αρχή του μήνα και το σύνολο των διαθέσιμων, κάθε φορά, δεδομένων εισόδου.*
- (5. 39) *Να αναπαράγει την ιστορική σειρά των μηνιαίων παροχών του Β. Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας όταν τροφοδοτηθεί με τα κατάλληλα δεδομένα. Συνεπώς, θα πρέπει να προβλεφθούν, εντός ή εκτός του υποσυστήματος, εργαλεία αριθμητικής σύγκρισης των υπολογισμένων και των ιστορικών παροχών. Αυτά θα βοηθήσουν στην ταχύτερη και πιο αξιόπιστη βαθμονόμηση του μοντέλου.*

Τα παραπάνω αντιμετωπίζονται από το επιλεγέν πακέτο και στην επιχειρησιακή αξιοποίησή του από το σύνολο των προγραμμάτων που τρέχουν (βλέπε κεφάλαιο 5) εκτός των περιπτώσεων που επισημαίνονται με κατάλληλο σχόλιο. Κύρια εξαίρεση, βέβαια, αποτελούν τα μεγέθη της Υλίκης η οποία δεν εξετάζεται στην παρούσα πρώτη φάση του έργου.

## **2.4 Συμμόρφωση στις μη λειτουργικές απαιτήσεις**

- (5. 40) *Το υπό μελέτη υποσύστημα θα πρέπει να επιτρέπει μεγάλο αριθμό κυψελίδων της τάξης των 100000..*

Στην παρούσα φάση του έργου, ο αριθμός των κυψελίδων ήταν μικρότερος των 8000.

- (5. 41) *Ο χρόνος εκτέλεσης των αριθμητικών υπολογισμών ενός κύκλου προσομοίωσης διάρκειας 10 ετών θα παραμένει χαμηλός (της τάξης του λεπτού της ώρας) καθόσον θα απαιτηθεί μεγάλος αριθμός κύκλων για την εφαρμογή της μεθόδου στοχαστικής προσομοίωσης.*

Η απαίτηση αυτή δεν κατέστη δυνατό να ικανοποιηθεί στην παρούσα πρώτη φάση του έργου.

- (5. 42) *Η απαιτούμενη χωρητικότητα μνήμης H/Y και δίσκων θα παραμένουν κάτω από τα σημερινά (1999) άνω όρια των προσωπικών υπολογιστών.*

Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται πλήρως.

- (5. 43) *Το λογισμικό θα εκτυπώνει σε αρχείο τα δεδομένα και τα εξαγόμενα για κάθε κυψελίδα.*  
Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται πλήρως.
- (5. 44) *Θα είναι δυνατή η εκτέλεση του προγράμματος και σε μορφή batch ως μεμονωμένον (stand alone) υπολογιστικού πακέτου.*  
Αυτό κατέστη δυνατό με την κατασκευή νέων προγραμμάτων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 5 του παρόντος.
- (5. 45) *Το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος θα αξιοποιεί τις τελευταίες εξελίξεις της επιστήμης της υπόγειας υδρολογίας και υδραυλικής ειδικά για καρστικούς υδροφόρους.*  
Η αντιμετώπιση των καρστικών υδροφορέων γίνεται με την προσέγγιση του Ισοδύναμου Πορώδους Μέσου πράγμα που είναι μια συνήθης πρακτική σε τέτοιου είδους προβλήματα.
- (5. 46) *Θα υφίσταται δυνατότητα εισαγωγής οριακών συνθηκών με γραφικό τρόπο.*  
Η απαίτηση ικανοποιείται.
- (5. 47) *Θα υφίσταται δυνατότητα αυτόματης (ή με δοκιμές) ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου μέσω κατάλληλων εργαλείων (π.χ. διαγράμματα διασποράς).*  
Το πακέτο, στην παρούσα φάση, δεν υποστηρίζει αυτόματη βαθμονόμηση αλλά παρέχει τα εργαλεία για βαθμονόμηση με δοκιμές.
- (5. 48) *Θα υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής μεταβατικών οριακών συνθηκών (π.χ. κυμαινόμενη στάθμη ελεύθερου νερού στην Υλίκη).*  
Στην παρούσα πρώτη φάση του έργου, το πρόβλημα της Υλίκης δεν αντιμετωπίστηκε, αλλά όπως εξηγείται και στην εισαγωγή, η σχετική διερεύνηση προγραμματίζεται για τη δεύτερη φάση.
- (5. 49) *Θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα παρουσίασης αποτελεσμάτων σε γραφική μορφή (2 διαστάσεων).*
- (5. 50) *Θα υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής των γραφικών και των άλλων αποτελεσμάτων σε μορφές συμβατές με τα άλλα συστήματα του έργου.*  
Και οι δύο προηγούμενες απαιτήσεις ικανοποιούνται πλήρως από το επιλεγέν πακέτο.



## 3 Δεδομένα

---

### 3.1 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα γεωγραφικά δεδομένα που αφορούν τις οριακές συνθήκες και τις εξωτερικές διεγέρσεις (φορτίσεις) του υδροφορέα είναι καταγεγραμμένα στην βάση γεωγραφικής πληροφορίας του έργου. Τα γεωγραφικά δεδομένα συνοδεύονται και από περιγραφική πληροφορία (σταθερή ή χρονικά μεταβαλλόμενη).

Τα γεωγραφικά δεδομένα αφορούν στα ακόλουθα:

1. Επιφανειακή εμφάνιση κύριων γεωλογικών σχηματισμών
2. Υδραυλικές ιδιότητες υδροφορέων
3. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους
4. Επιφανειακός υδροκρίτης
5. Θέση σημείων ύδατος (ποταμοί, λίμνες πηγές, γεωτρήσεις)
6. Αρδευόμενες εκτάσεις

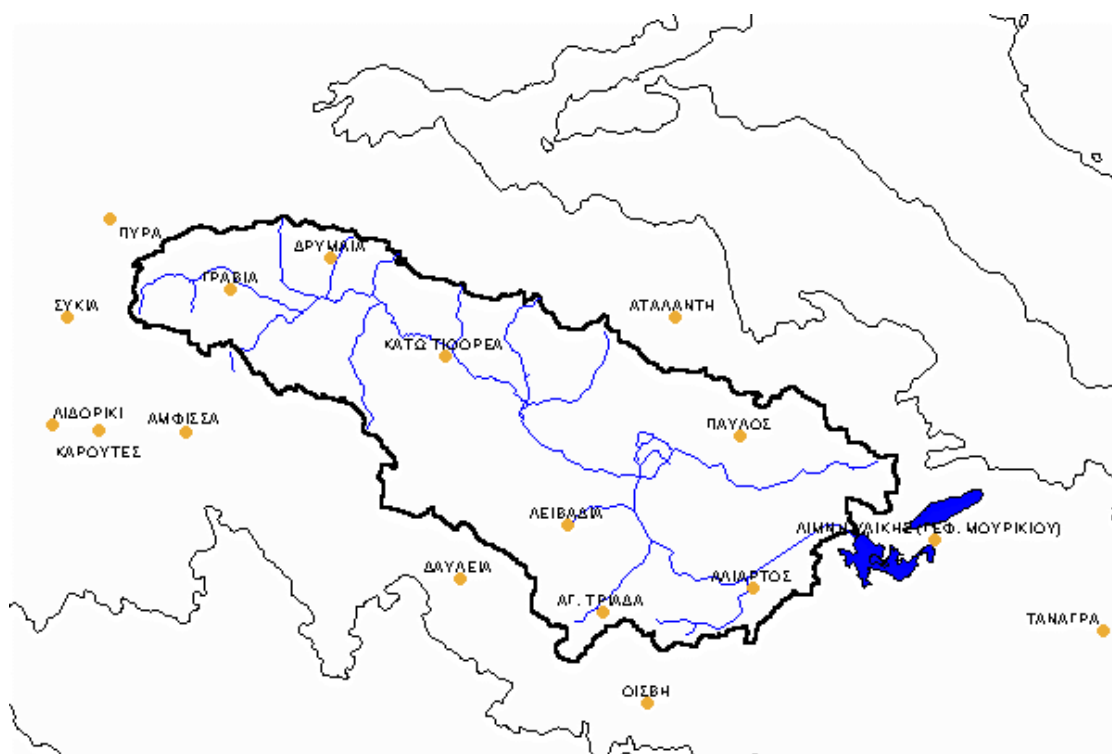
### 3.2 Δεδομένα βροχόπτωσης

Στα πλαίσια της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) είχε γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση δεδομένα επιφανειακής βροχόπτωσης η οποία υπολογίστηκε ξεχωριστά για τη λεκάνη του Άνω, του Μέσου και του Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Στη μελέτη εκείνη, η υπολεκάνη του Άνω Ρου περιλαμβάνει το τμήμα της λεκάνης εντός του επιφανειακού υδροκρίτη και ανάντη της γέφυρας Μοδίου στον Βοιωτικό Κηφισό. Η υπολεκάνη του Μέσου Ρου περιλαμβάνει το τμήμα της λεκάνης (εντός του επιφανειακού υδροκρίτη) κατάντη της γέφυρας Μοδίου και ανάντη της γέφυρας Ανθοχωρίου. Τέλος, η υπολεκάνη του Κάτω Ρου περιλαμβάνει το τμήμα της λεκάνης κατάντη της γέφυρας Ανθοχωρίου μέχρι την έξοδο της λεκάνης στη Διώρυγα Καρδίτσας. Οι εκτιμήσεις της επιφανειακής βροχόπτωσης είχαν γίνει στα πλαίσια της μελέτης των επιφανειακών νερών στη λεκάνη (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000β). Παρόλο που η λεκάνη του Κάτω Ρου στο μοντέλο των υπόγειων νερών δεν συμπίπτει με τη λεκάνη με τη λεκάνη μεταξύ Γέφυρας Ανθοχωρίου και Διώρυγας Καρδίτσας (αλλά είναι μικρότερη) στη μελέτη εκείνη το σφάλμα από την προσέγγιση αυτή θεωρήθηκε αμελητέο.

Απολύτως όμοια μεθοδολογία για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης ακολουθήσαμε και στο παρόν ερευνητικό έργο στα πλαίσια της προσαρμογής του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση. Μετά τη συλλογή, αξιολόγηση και επεξεργασία των δεδομένων σημειακής βροχόπτωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και στην περίμετρό της διαθέταμε δεδομένα σε 17 βροχομετρικούς σταθμούς των οποίων τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Αναλυτικά οι επεξεργασίες των δεδομένων παρουσιάζονται στο Τεύχος 4 του παρόντος έργου. Η θέση των σταθμών στο χώρο φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Πίνακας 3.1: Βροχομετρικοί σταθμοί λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης

Όνομα	Υψόμετρο (m)	Υπηρεσία	Νομός	Ετήσιο ύψος (mm)
Θίσβη	166.8	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	452
Τανάγρα	138.4	ΕΜΥ	Βοιωτίας	457
Αλιάρτος	105	ΕΜΥ	Βοιωτίας	585
Γεφ. Μουρικού	85.2	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	438
Λιβαδιά	175.6	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	763
Καρούτες	1049.6	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	1270
Άμφισα	199.6	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	769
Πάυλος	212.7	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	493
Λιδορίκι	547.6	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	943
Κάτω Τιθορέα	168.3	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φθιώτιδας	667
Συκιά	707.8	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	1267
Αταλάντη	78.1	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φθιώτιδας	573
Γραβιά	380.7	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	924
Δρυμαία	502.6	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φθιώτιδας	731
Πυρά	1137.1	ΥΠΕΧΩΔΕ	Φωκίδας	1351
Δαύλεια	380	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	844
Αγ. Τριάδα	400	ΥΠΕΧΩΔΕ	Βοιωτίας	1007



Σχήμα 3.1: Βροχομετρικοί σταθμοί λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης

Η κατάρτιση των πολυγώνων Thiessen έδειξε ότι μόνον 11 από τους σταθμούς του Πίνακα 3.1 επηρεάζουν τη βροχόπτωση στην περιοχή μελέτης. Τα ονόματά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 μαζί με τους συντελεστές Thiessen για τις υπολεκάνες του Άνω, Μέσου και Κάτω Ρου.

Πίνακας 3.2: Βροχομετρικοί σταθμοί λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης και σχετικοί συντελεστές Thiessen

	Άνω Ρους	Μέσος Ρους	Κάτω Ρους
Αγία Τριάδα			0.11
Αλίαρτος			0.18
Αταλάντη		0.09	0.06
Γραβιά	0.47		
Δαύλεια			0.07
Δρυμαία	0.39		
Κάτω Τιθορέα	0.09	0.91	0.03
Λειβαδιά			0.27
Παύλος			0.28
Πυρά	0.03		
Συκέα	0.02		

### 3.3 Δεδομένα παροχής υδατορευμάτων και πηγών

Στον Βοιωτικό Κηφισό έχουν γίνει στο παρελθόν υδρομετρήσεις από το ΙΓΜΕ (Παγούνης, 1994) σε 11 σημεία του ποταμού για τα έτη 1983-1994. Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι ονομασίες των σημείων υδρομέτρησης και οι μέσες τιμές όλων των μετρήσεων παροχής ενώ η θέση των σημείων στο χώρο φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Το σημείο υδρομέτρησης Πύργος βρίσκεται πάνω στον ποταμό Μέλανα ο οποίος πηγάζει από τις πηγές Μέλανα και χάνεται σε καρστικές καταβόθρες του ανατολικού άκρου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Πίνακας 3.3: Σημεία υδρομέτρησης Βοιωτικού Κηφισού

Σημείο υδρομέτρησης	Μέση παροχή (m <sup>3</sup> /s)
Παπαλουκά	3.12
Μπράλος	2.75
Μόδι	3.77
Ανθοχώρι	2.77
Δαύλεια Σταθμός	2.93
Μαυρονέρι Δαύλειας	1.76
Χαιρώνεια- Αγ.Βασίλειος	5.60
Ορχομενός Γέφυρα	5.48
Λειβαδιά Γέφυρα	1.06
Πύργος Γέφυρα	1.92
Σήραγγα Καρδίτσας	12.10

Για τις μεγάλες πηγές της περιοχής μελέτης διατίθενται μετρήσεις παροχής την περίοδο 1981-95 (Παγούνης, 1994). Στον Πίνακα 3.4 δίνονται οι ονομασίες των πηγών μαζί με τη μέση παροχή τους ενώ η θέση τους στο χώρο φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Οι σημαντικότερες πηγές από την άποψη της μεγαλύτερης μέσης παροχής είναι οι πηγές Μαυρονερίου και Μέλανα (Ορχομενού). Οι πηγές Μαυρονερίου τροφοδοτούνται από την ευρύτερη περιοχή του Παρνασσού και από το ποτάμι Βοιωτικό Κηφισό μέσω μεταγίσεων και διηθήσεων αντίστοιχα. Ο υδροφόρος καρστικός ορίζοντας στην περιοχή ανάβλυσης των πηγών έχει μικρή έκταση και αποθηκευτική ικανότητα, ενώ η λεκάνη τροφοδοσίας του αναπτύσσεται σε μεγάλη έκταση κάτω από τις προσχώσεις του Μέσου και του Άνω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού.

Οι πηγές Μέλανα αναβλύζουν από τους κρητιδικούς ασβεστόλιθους του Ακοντίου όρους σχηματίζοντας εκτεταμένο μέτωπο διάχυσης νερού εύρους 2.5 km περίπου, σε απόλυτο υψόμετρο 97.9-101.2 m. Είναι πηγές υπερχείλισης στην τεκτονική ζώνη επαφής του καρστικού υδροφορέα με τα στεγανά πετρώματα του φλύσχη και τις αργιλομαργαϊκές αποθέσεις με διαστρώσεις άμμων και κροκαλών πλειοπλειστοκαινικής ηλικίας (Παγούνης, 1994).

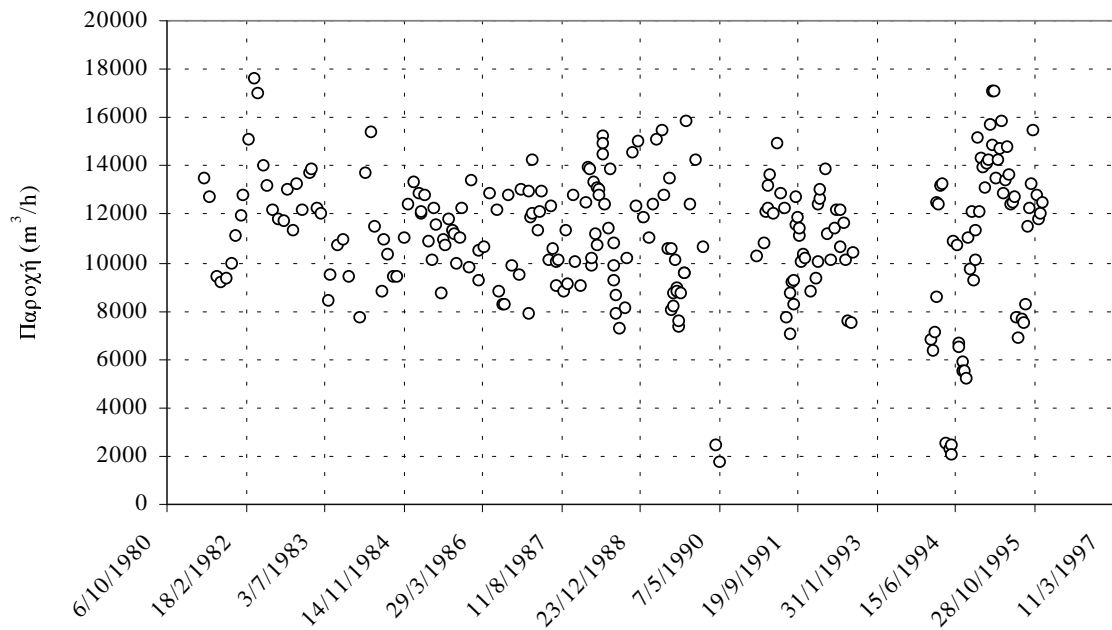
Πίνακας 3.4: Πηγές λεκάνης Β. Κηφισού και μέσες παροχές τους

Πηγή	Μέση παροχή (m <sup>3</sup> /d)
Αγ. Ελεούσα	51800
Δ. Κεφαλόβρυσο	24200
Μαυρονέρι	128700
Αγ. Παρασκευή	44000
Λειβαδιά	57900
Μέλανα	267000
Αγ. Ιωάννης	9500
Πολύγυρα	81200
Λιλαία Ελαιοτ.	38000
Λάρυμνα Γεφ.	16400
Λάρυμνα Κεφ.	26000

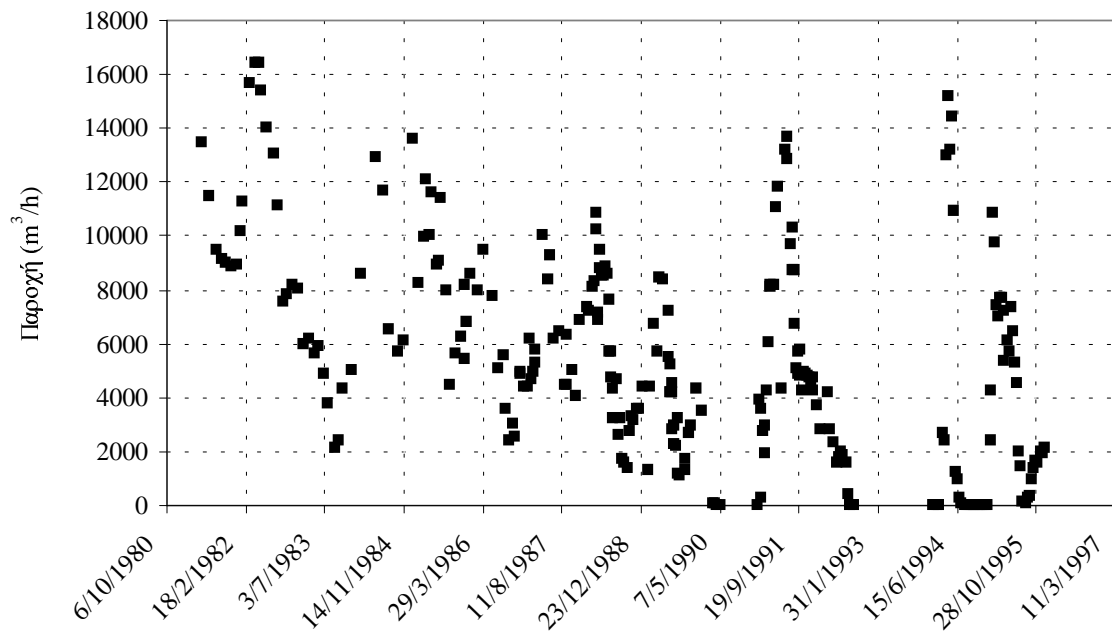


Σχήμα 3.2: Κύριες πηγές (κύκλοι) και σημεία υδρομέτρησης υδατορευμάτων (τρίγωνα) της περιοχής μελέτης

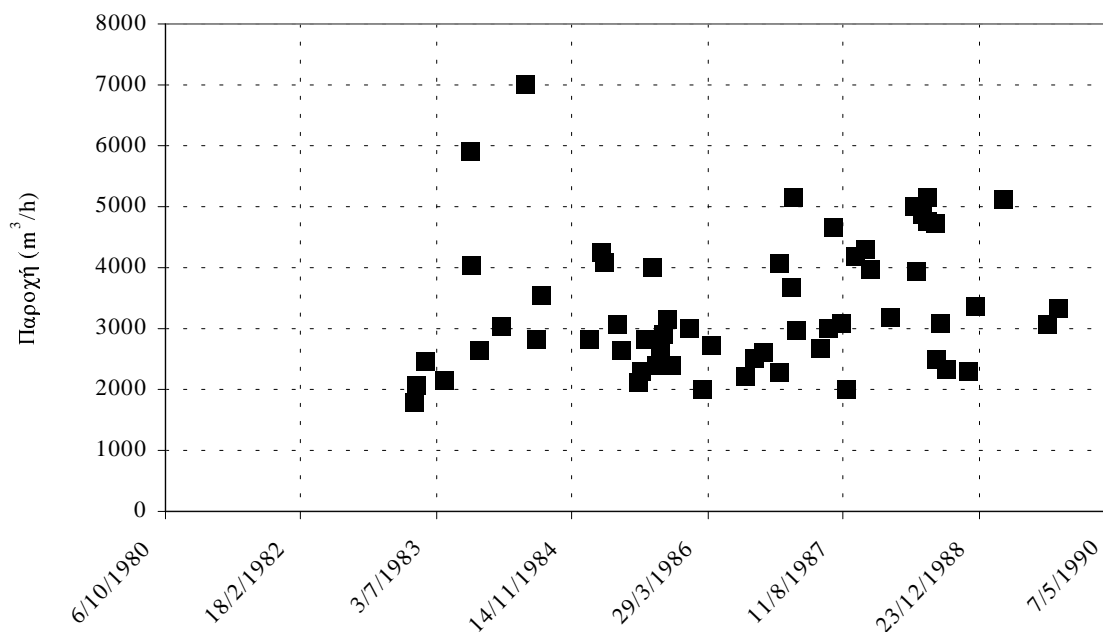
Στα σχήματα 3.3, 3.4 και 3.5 φαίνεται η διακύμανση της παροχής (από υδρομετρήσεις) των κύριων πηγών της περιοχής μελέτης (αντίστοιχα των πηγών Ορχομενού, Μαυρονερίου, και Πολύγυρας).



Σχήμα 3.3: Παροχή πηγών Μέλινα (από υδρομετρήσεις)



Σχήμα 3.4: Παροχή πηγών Μαυρονερίου (από υδρομετρήσεις)



Σχήμα 3.5: Παροχή πηγών Πολυγύρας (από υδρομετρήσεις)

### 3.4 Δεδομένα στάθμης υδροφορέων

Από την ΕΥΔΑΠ μας διατέθηκαν δεδομένα στάθμης από μετρήσεις που διενεργεί συστηματικά για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ το ΙΓΜΕ σε 42 σημεία της ευρύτερης λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης. Οι ονομασίες των θέσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Σημεία παρακολούθησης στάθμης υπόγειου νερού

α/α	Όνομα	Υψόμ.* (m)	α/α	Όνομα	Υψόμ.* (m)	α/α	Όνομα	Υψόμ.* (m)
1	ΥΥΣ2	179	15	ΥΥ5	104.67	29	ΠΛ1	100.56
2	ΥΜ3	91.8	16	ΥΥ9	116.9	30	EMP2	178.83
3	ΥΜ4	79	17	ΥΥ14	136.36	31	EMP3	129.87
4	ΥΜ5	90.4	18	Γ43	101.83	32	EMP6	129.27
5	ΥΜ7	62.2	19	EK1	99.23	33	EMP8	142.12
6	ΥΜ10	178.3	20	EK7	116.55	34	EMP13	138.44
7	ΕΠ6	41.96	21	EK9	103.33	35	EMP22	127.08
8	ΕΠ9	58.95	22	MP1	124.22	36	F37	135.01
9	ΕΠ10	39.03	23	XP2	121.39	37	Γ82	166.3
10	ΕΠ14	48.72	24	XP3	118.13	38	Γ84	170.03
11	ΥΤ1	88.96	25	XP4	116.83	39	EAP5	309.34
12	ΥΤ7	106.9	26	AK4	114.74	40	EAP7	324.92
13	ΥΤ8	138.44	27	KP2	108.75	41	EAP9	332.46
14	ΥΥ4	107.71	28	ΠΡ1	105.44	42	EAP11	282.27

\*Υψόμετρο διάτρησης

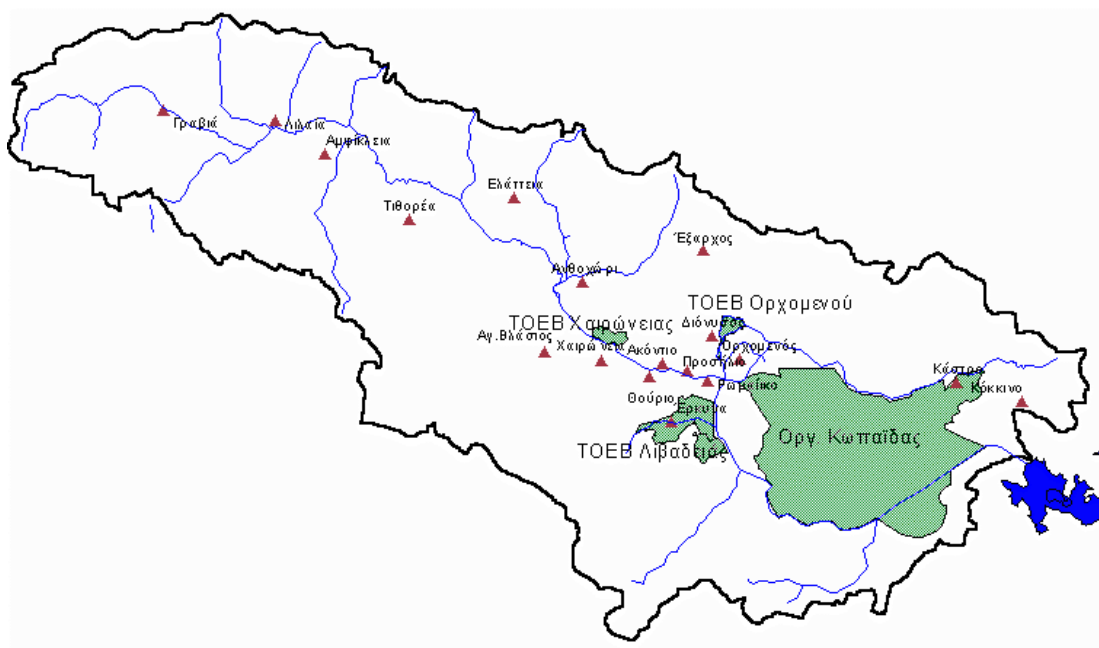
Στη βαθμονόμηση του μοντέλου είχαν χρησιμοποιηθεί και παλιότερα δεδομένα του ΙΓΜΕ σε 10 από τις παραπάνω θέσεις. Αυτές είναι οι ΕΑΡ3 και ΕΑΡ5 για τον Άνω Ρου, ΥΜΡΣ10 και ΕΜΡ10 για τον Μέσο Ρου και ΑΚ4, ΜΡ2, ΧΡ4, ΕΜΡ6, ΕΜΡ22 και ΚΡ22 για τον Κάτω Ρου.

### 3.5 Δεδομένα χρήσης νερού

Στην περιοχή μελέτης υφίστανται τέσσερις τοπικοί οργανισμοί εγγείων βελτιώσεων (ΤΟΕΒ). Τα ονόματα τους και η έκταση τους φαίνονται στον Πίνακα 3.6. Η χωρική ανάπτυξη τους φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (Κουκουβίνος και Χριστοφίδης, 1998, Ζαρρής κ.ά., 1999). Εκτός από τους οργανισμούς αυτούς καλλιεργήσιμες εκτάσεις υπάρχουν και σε πεδινές περιοχές γύρω από διάφορους οικισμούς. Η έκταση και τα ονόματα τους φαίνονται στους πίνακες 3.7 και 3.8. Η θέση των οικισμών στους οποίους ανήκουν οι εκτάσεις αυτές φαίνονται στο Σχήμα 3.6. Η άρδευση των περιοχών αυτών γίνεται κυρίως από υπόγεια νερά αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις (Οργανισμός Κοπαΐδας) και από απευθείας απολήψεις από το ποτάμι.

Πίνακας 3.6: Άρδευόμενες εκτάσεις ΤΟΕΒ και Οργανισμού Κοπαΐδας (στρέμματα)

Περιοχή	Άρδευσιμη	Άρδευόμενη (1996)
Οργανισμός Κοπαΐδας	180000	160000
Ορχομενού	3500	3000
Λιβαδειάς	6000	5300
Χαιρώνειας	2500	2300



Σχήμα 3.6: Άρδευόμενες εκτάσεις

Πίνακας 3.7: Αρδευόμενες περιοχές Μέσου και Άνω Ρου Β. Κηφισού εκτός δημόσιων δικτύων

	Αρδευσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
<b>Μέσος Ρους Β.Κηφισού</b>		
Ελάτειας	123000	20000
Τιθορέας	17000	5500
Έξαρχου	6100	5000
Ανθοχωρίου	32000	20000
<b>Σύνολο</b>	<b>170100</b>	<b>50500</b>
<b>Άνω Ρους Β. Κηφισού</b>		
Γραβιάς	3800	3500
Λιλαίας Πολυδρόσου	10000	5800
Αμφίκλειας	20000	10000
<b>Σύνολο</b>	<b>33800</b>	<b>19300</b>

Πίνακας 3.8: Αρδευόμενες περιοχές του Κάτω Ρου Β. Κηφισού εκτός δημόσιων δικτύων

	Αρδευσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
Διονύσου	7000	6300
Κάστρου	17000	16000
Κόκκινου	6000	4000
Έρκυνας	13000	11000
Αγ. Βλάση	6100	5950
Χαιρώνειας	11100	8000
Ακοντίου	3300	2650
Θουρίου	5300	4500
Προσηλίου	3000	2350
Ρωμαίικο	5900	4700
Πεδιάδα Ορχομενού	39800	39000
<b>Σύνολο</b>	<b>117500</b>	<b>104450</b>

Οργανωμένη διάνοιξη γεωτρήσεων έγινε σε δύο περιπτώσεις: (α) από το ΥΠΓΕ στην περιοχή του όρους Ακοντίου (Πίνακας 3.9) και (β) κατά την περίοδο της πρόσφατης λειψυδρίας (1988-94) από την ΕΥΔΑΠ στην περιοχή Βασιλικών-Παρορίου (Πίνακας 3.10).

Πίνακας 3.9: Γεωτρήσεις ΥΠΓΕ στη λεκάνη Β. Κηφισού

Γεώτρηση	Περιοχή	Παροχή (m <sup>3</sup> /s)	Γεώτρηση	Περιοχή	Παροχή (m <sup>3</sup> /s)
XP1	Χαιρώνεια	0.32	AK1	Ακόντιο	0.31
XP2	Χαιρώνεια	0.20	AK4	Ακόντιο	0.22
XP3	Χαιρώνεια	0.32	AK5	Ακόντιο	0.14
XP4	Χαιρώνεια	0.23	AK6	Ακόντιο	0.22
			AK7	Ακόντιο	0.09



Πίνακας 3.10: Γεωτρήσεις ΕΥΔΑΠ στη λεκάνη Β. Κηφισού

Γεωτρήσεις	Περιοχή	Παροχή (m <sup>3</sup> /s)	Γεωτρήσεις	Περιοχή	Παροχή (m <sup>3</sup> /s)
EMP4	Βασιλικά	0.11	ΥΜΡΠ3	Παρόρι	0.11
EMP3	Βασιλικά	0.14	ΥΜΠΣ11	Παρόρι	0.14
EMP7	Βασιλικά	0.14	ΥΜΡΣ14	Παρόρι	0.14
EMP6	Βασιλικά	0.14	ΥΜΡΣ13	Παρόρι	0.14
EMP11	Βασιλικά	0.14	ΥΜΡΣ16	Παρόρι	0.07
ΥΜΡΣ10	Βασιλικά	0.11	EMP22	Παρόρι	0.14
ΥΜΡΠ7	Παρόρι	0.11	ΥΜΡΣ17	Παρόρι	0.07
ΥΜΡΠ4	Παρόρι	0.11	MP1	Μαυρονέρι	0.25
			MP2	Μαυρονέρι	0.23
			MP3	Μαυρονέρι	0.21

Στο Σχήμα 3.7 φαίνονται οι εμφανίσεις των καρστικών πετρωμάτων στην επιφάνεια (Μαρίνος, 1995) καθώς και οι γεωτρήσεις.

Σύμφωνα με την ΕΣΥΕ (1995), στο Νομό Βοιωτίας η αρδευόμενη έκταση ανέρχεται στα 296854 στρέμματα. Η έκταση αυτή είναι σε συμφωνία με το άθροισμα των αρδευόμενων εκτάσεων του Πίνακα 3.8 (Κάτω Ρους) και της αρδευόμενης έκτασης του Οργανισμού Κωπαΐδας. Οι αρδευόμενες εκτάσεις για το Μέσο και τον Άνω ρου φαίνονται να είναι 50500 και 19300 στρέμματα αντίστοιχα, σύμφωνα με τη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000γ). Πιο αναλυτικά, οι εκτάσεις αυτές φαίνονται στον Πίνακα 3.8. Οι εν λόγω εκτάσεις, σε συνδυασμό με υπολογισμένες ποσότητες δυνητικής εξατμοδιαπνοής, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών οι οποίες, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, καλύπτονται από γεωτρήσεις. Η καταγραφή, όμως, των γεωτρήσεων και του ημερολόγιου λειτουργίας τους δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό, στο παρόν έργο, οι πραγματικές γεωτρήσεις κάθε περιοχής αντικαθίστανται από εικονικές γεωτρήσεις ισοδύναμης λειτουργίας.



Σχήμα 3.7: Εμφανίσεις καρστικών πετρωμάτων στην επιφάνεια και γεωτρήσεις λεκάνης Β. Κηφισού

## 4 Βαθμονόμηση μοντέλου - Παραδοχές

---

### 4.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην εισαγωγή, κατά τη διάρκεια της κατάρτισης του μοντέλου στο παρόν ερευνητικό έργο, ολοκληρώθηκε η «Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης» (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000α). Στη μελέτη εκείνη καταρτίστηκε υδρογεωλογικό μοντέλο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού του οποίου τα αδρά χαρακτηριστικά ήταν τα ακόλουθα:

1. Έγινε χρήση της προσέγγισης του Ισοδύναμου Πορώδους Μέσου με στόχο την προσομοίωση της ροής στο καρστικό σύστημα του Βοιωτικού Κηφισού
2. Το μοντέλο που επιλέχθηκε ήταν το MODFLOW που είναι το πιο καταξιωμένο διεθνώς
3. Το μοντέλο ενσωμάτωσε, σε μεγάλο βαθμό, την παλιότερη, από υδρογεωλογική άποψη, γνώση της περιοχής μελέτης (από μελέτες κυρίως του ΙΓΜΕ)
4. Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου ικανοποιούν σε γενικές γραμμές τις απαιτήσεις του παρόντος ερευνητικού έργου όπως αυτές δόθηκαν σε ξεχωριστό τεύχος (Καραβοκυρός κ.ά., 1999) και σχολιάστηκαν στο κεφάλαιο 2 του παρόντος τεύχους. Εξαίρεση αποτελεί ο αρκετά μεγάλος χρόνος που απαιτεί η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου.

Με δεδομένα τα παραπάνω, στο παρόν ερευνητικό έργο παρουσιάστηκαν δύο δυνατότητες:

1. Να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό το υπάρχον βαθμονομημένο μοντέλο του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) και να γίνει προσπάθεια προσαρμογής του στις επιχειρησιακές ανάγκες της ΕΥΔΑΠ.
2. Να γίνει κατάρτιση νέου μοντέλου και, στη συνέχεια, βαθμονόμησή του.

Με σύμφωνη γνώμη αλλά και προτροπή της ΕΥΔΑΠ, αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η πρώτη προσέγγιση ώστε να διατεθεί ο χρόνος και το σχετικό κονδύλι του ερευνητικού έργου με τρόπο πιο αποδοτικό για την εταιρεία. Έτσι, διατηρήθηκε ουσιαστικά το βαθμονομημένο μοντέλο της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) και δόθηκε βάρος στην προσαρμογή του σε επιχειρησιακό υπολογιστικό περιβάλλον. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι παραδοχές του μοντέλου κατά τη βαθμονόμησή του, ενώ στο κεφάλαιο 5 δίνονται αναλυτικά στοιχεία για την προσαρμογή του σε επιχειρησιακές συνθήκες.

### 4.2 Περιοχή μελέτης

Το μοντέλο καλύπτει το σημαντικότερο μέρος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού όπως αυτή ορίζεται από τον επιφανειακό υδροκρίτη. Ο ορισμός της περιοχής έγινε με τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Τα πλευρικά όρια του μοντέλου αναπαριστούν, όσο αυτό είναι δυνατό, υδρολιθολογικά όρια.
2. Τα πλευρικά όρια είναι αρκετά μακριά από τις περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος (περιοχές πηγών και γεωτρήσεων) έτσι ώστε ενδεχόμενα σφάλματα του μοντέλου στη γειτονιά των ορίων να μην επηρεάζουν σημαντικά τις προβλέψεις του μοντέλου στις περιοχές ιδιαίτερου ενδιαφέροντος.
3. Στις περιοχές όπου δεν εμφανίζεται κορεσμένη ζώνη, όπως στα πολύ ορεινά τμήματα της λεκάνης ελήφθη κατάλληλη μέριμνα, με κατάλληλο χειρισμό των οριακών συνθηκών (βλ. υποκεφάλαιο

4.3), μετά από αφαίρεση ολόκληρων τμημάτων της λεκάνης εντός του επιφανειακού υδροκρίτη, έτσι ώστε να μη διαταράσσεται το υδατικό ισοζύγιο στο πεδίο ροής.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, ως περιοχή μελέτης είχε επιλεγεί, τελικά, το τμήμα της λεκάνης από το ύψος της Γραβιάς ως το ύψος του Ορχομενού διαστάσεων 53×18 km.

### **4.3 Αναπαράσταση της γεωμετρίας του υδροφορέα**

Ένα πολύ κρίσιμο, για την επιτυχία του μοντέλου, στοιχείο ήταν η αναπαράσταση της γεωμετρίας του υδροφορέα. Πρόκειται για εκτεταμένο καρστικό υδροφορέα με κυμαινόμενο πάχος και βαθμό καρστικοποίησης ο οποίος στα πεδινά τμήματα της λεκάνης καλύπτεται από προσχωσιγενείς αποθέσεις κυμαινόμενου πάχους και ποικίλης κοκκομετρικής σύνθεσης. Κατά περιοχές, ο υδροφορέας καλύπτεται από φλύσχη ή πετρώματα σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. Στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α), μετά από εκτεταμένη ανάλυση των γεωλογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, αλλά και επί τόπου παρατηρήσεις, εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικοί τρόποι αναπαράστασης της γεωμετρίας του υδροφορέα:

1. Θεώρηση ενός ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα.
2. Θεώρηση ενός βασικού καρστικού υδροφορέα (με μεταβλητές στο χώρο υδραυλικές ιδιότητες) και πολλαπλών αποσφηνούμενων πλευρικά οριζόντων (προσχώσεων) με κυμαινόμενες υδραυλικές ιδιότητες.
3. Θεώρηση ενός βασικού καρστικού υδροφορέα (με μεταβλητές στο χώρο υδραυλικές ιδιότητες), που λειτουργεί ως ελεύθερος αλλά τοπικά του δίνεται η δυνατότητα να μεταπίπτει σε υδροφορέα υπό πίεση (κάτω από τις προσχώσεις).

Στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α), επιλέχθηκε η τρίτη λύση, πράγμα που υπαγορεύθηκε από τους στόχους της μελέτης εκείνης αλλά και τα διαθέσιμα δεδομένα, όπως εξηγείται αναλυτικά στη σχετική έκθεση.

Ο καρστικός υδροφορέας αναπαρίσταται ως Στρώμα 1 τύπου 2 (ελεύθερος που είναι δυνατό να μεταπίπτει σε υπό πίεση). Η γεωμετρία του ορίζεται πλήρως από τα πλευρικά όρια και το υψόμετρο οροφής σε κάθε θέση. Τα όρια αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Οι υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα είναι η μεταφορικότητα (κατά τις τρεις διευθύνσεις) και η αποθηκευτικότητα (και η ειδική απόδοση). Ο κάρναβος του μοντέλου (που φαίνεται στο Σχήμα 4.2) είναι σχετικά αραιός (800×800 m) στα όρια της περιοχής μελέτης και πυκνότερος στις κεντρικές περιοχές ενδιαφέροντος (150×150 m).

### **4.4 Αναπαράσταση οριακών συνθηκών**

#### **4.4.1 Πλευρικά, άνω και κάτω όρια**

Ως όρια μηδενικής ροής ελήφθησαν τα ακόλουθα:

1. Προς τα βόρεια ο επιφανειακός υδροκρίτης.
2. Προς τα ανατολικά τα γεωγραφικά όρια των προσχώσεων και των ασβεστόλιθων με τους αδιαπέρατους σχηματισμούς. Στην περιοχή Ορχομενού – Πολυγύρας, η ανάπτυξη των αργιλικών αποθέσεων του Κοπαϊδικού Πεδίου θεωρείται ότι διακόπτει πλήρως την υπόγεια ροή.

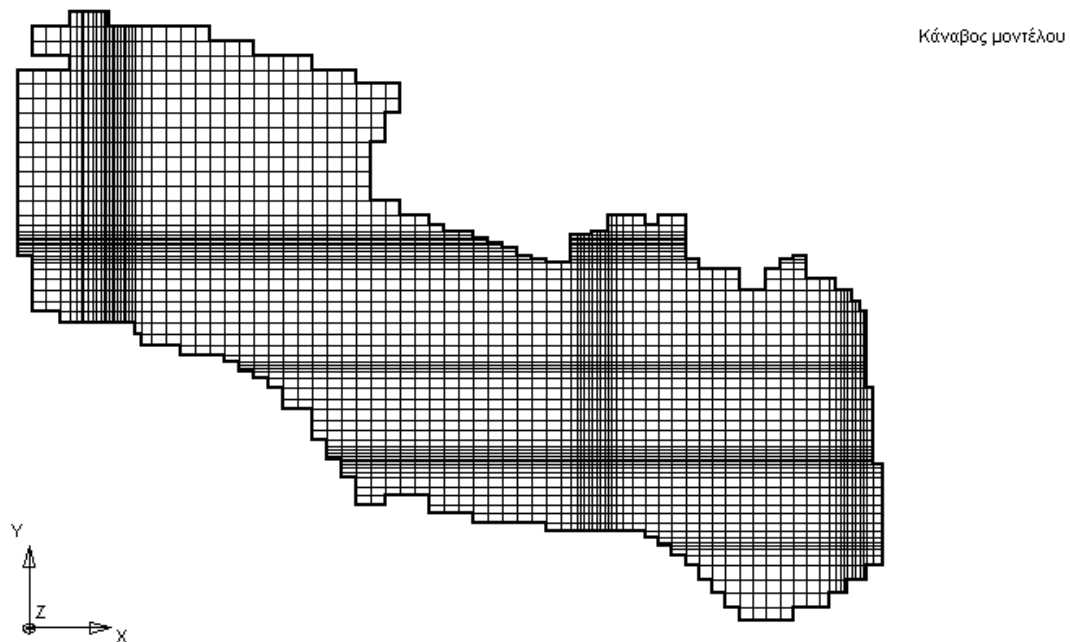
Στο νοτιοδυτικό άκρο της περιοχής μελέτης, στο όρος Παρνασσός, θεωρείται ότι το όριο της περιοχής βρίσκεται εντός της επιφανειακής λεκάνης και μεταγίζονται σε αυτό ποσότητες νερού που προέρχονται, γενικά, από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα σε γειτονική ορεινή λεκάνη πέραν του ορίου του μοντέλου. Στην ενδιάμεση αυτή λεκάνη, δεν αναπτύσσεται, βέβαια, υπόγεια στάθμη και δεν

έχει νόημα η θεώρησή της στο μοντέλο. Η αναπαράσταση της τροφοδοσίας γίνεται με τη θεώρηση κατάλληλης συστοιχίας εικονικών φρεάτων εισπίεσης κατά μήκος του ορίου.

Στο βορειοδυτικό άκρο όπου υπάρχει μετάγγιση ποσοτήτων νερού εκτός της περιοχής μελέτης, θεωρήθηκαν επίσης πηγάδια (άντλησης αυτή τη φορά).



Σχήμα 4.1: Ανάγλυφο οροφής υδροφορέα



Σχήμα 4.2: Κάναβος πεδίου ροής

Τα εικονικά φρέατα του ορίου φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Ως άνω όριο στο μοντέλο θεωρείται η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφορέα ενώ το κάτω όρια συμπίπτει με το βάθος καρστικοποίησης.

#### 4.4.2 Επικοινωνία υδροφορέα και Βοιωτικού Κηφισού

Η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ του υδροφορέα και του Βοιωτικού Κηφισού προσομοιώθηκε με το ειδικό για την περίπτωση αυτή πακέτο River του MODFLOW. Σύμφωνα με το πακέτο αυτό, η παροχή νερού από και προς το ποτάμι εξαρτάται από τη στάθμη του νερού στο ποτάμι, τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα και τον συντελεστή αγωγιμότητας (conductance) της κοίτης  $C$ . Ο τελευταίος εξαρτάται από τις διαστάσεις, το πάχος του υποστρώματος και την υδραυλική αγωγιμότητα της κοίτης του ποταμού. Τα δεδομένα αυτά εκτιμήθηκαν από μετρήσεις και παρατηρήσεις υπαίθρου, τη βιβλιογραφία, και την υψομετρία της κοίτης από χάρτη 1:5000. Στη συνέχεια, έγινε βελτιστοποίησή κυρίως του  $C$  με δοκιμές. Στόχος της βελτιστοποίησης ήταν η, όσο το δυνατό, καλύτερη προσέγγιση των μετρημένων ποσοτήτων που διακινούνται μεταξύ υδροφορέα και ποταμού και όχι η ακριβής αναπαράσταση των επί μέρους παραμέτρων (στάθμες, συντελεστές αγωγιμότητας). Οι μετρημένες ποσότητες που διακινούνται από και προς το ποτάμι εκτιμήθηκαν από τα υφιστάμενα δεδομένα υδρομετρήσεων σε διάφορες θέσεις του ποταμού (βλέπε Πίνακα 3.3). Ο ποταμός χωρίστηκε σε 6 τμήματα (stretches). Σε κάθε ένα από τα τμήματα, θεωρήθηκε μια σταθερή τιμή του συντελεστή αγωγιμότητας τη χειμερινή περίοδο (Σεπτεμβρίου – Μαρτίου) που όμως διαφέρει από τμήμα σε τμήμα. Κατά τη θερινή περίοδο (Απριλίου – Αυγούστου) θεωρείται μηδενικός συντελεστής αγωγιμότητας που επιτρέπει την πλήρη διακοπή της επικοινωνίας ποταμού και υδροφορέα. Οι στάθμες νερού θεωρούνται ότι μεταβάλλονται γραμμικά κατά μήκος του κάθε τμήματος. Η αναπαράσταση του ποταμού στο μοντέλο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

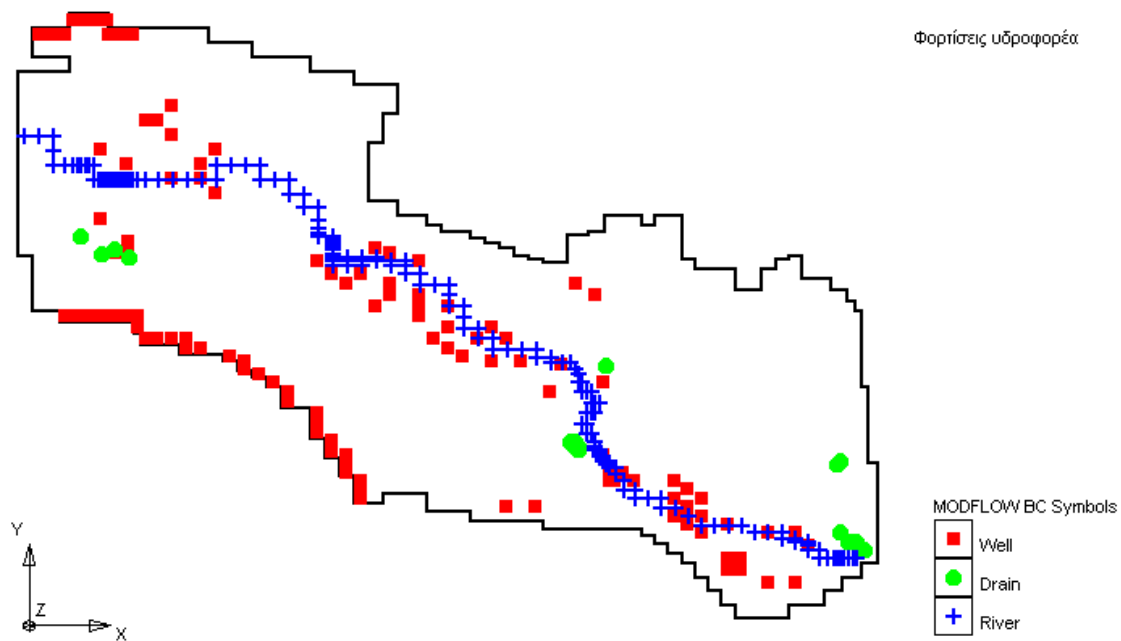
#### 4.4.3 Υδραυλικές ιδιότητες υδροφορέα

Οι υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα (μεταφορικότητα  $T$ , αποθηκευτικότητα  $S$  και ειδική απόδοση  $S_y$ ) θεωρήθηκαν ότι μεταβάλλονται κατά ζώνες της περιοχής μελέτης. Εκτιμήθηκαν αρχικά από γεωλογικά δεδομένα, δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων και βιβλιογραφικές αναφορές και, στη συνέχεια, οι τιμές τους βελτιστοποιήθηκαν έτσι ώστε το μοντέλο να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα τη μετρημένη στάθμη του υδροφορέα σε σημεία ελέγχου όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα στάθμης. Η διακύμανση του  $T$  βρέθηκε να είναι από 100 ως 34000  $m^2/d$ , του  $S$  από  $10^{-9}$  ως  $7.0 \times 10^{-3}$  και του  $S_y$  από  $10^{-3}$  ως 0.12. Οι μικρές τιμές, και για τα τρία μεγέθη, αντιστοιχούν στην περιοχή του Άνω Ρου και οι μεγάλες στον Κάτω Ρου (περιοχή πηγών). Η χωρική κατανομή του  $T$  και του  $S_y$  φαίνεται αντίστοιχα στους χάρτες των σχημάτων 4.4 και 4.5.

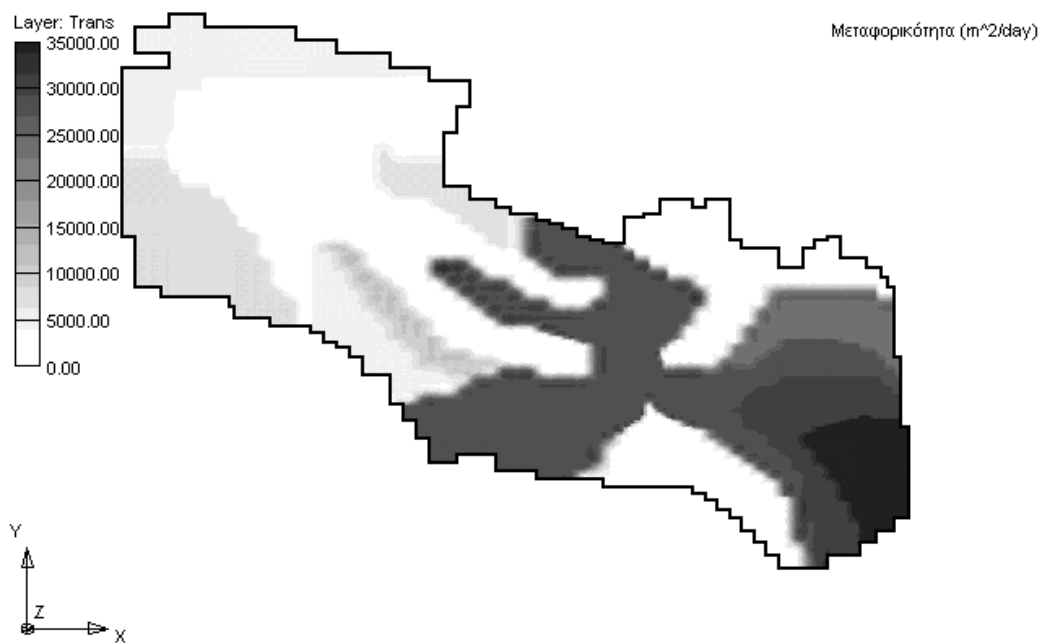
### 4.5 Εξωτερικές διεγέρσεις

Ως εξωτερικές διεγέρσεις θεωρούνται οι ποσότητες νερού που διακινούνται (εισάγονται ή αφαιρούνται) προς τις κυψελίδες του μοντέλου από το εκτός της περιοχής μελέτης περιβάλλον και αντίστροφα. Αυτές διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες:

1. Απολήψεις για ύδρευση
2. Απολήψεις για άρδευση
3. Επαναφόρτιση μέσω κατείσδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων
4. Επαναφόρτιση μέσω κατείσδυσης επιφανειακών νερών
5. Εκφόρτιση του υδροφορέα μέσω πηγών



Σχήμα 4.3: Σημεία εξωτερικών διεγέρσεων (φορτίσεων) του υδροφορέα



Σχήμα 4.4: Χωρική μεταβολή μεταφορικότητας καρστικού υδροφορέα σε  $m^2/d$



Σχήμα 4.5: Χωρική μεταβολή ειδικής απόδοσης καρστικού υδροφορέα

Η εκτίμηση των απολήψεων για άρδευση έγινε για κάθε μια αρδευόμενη περιοχή με βάση δεδομένα από το Υπουργείο Γεωργίας σχετικά με τις καλλιέργειες, τις ανάγκες σε νερό της κάθε καλλιέργειας για κάθε μήνα, την απόδοση των δικτύων, και την έκταση της περιοχής. Στη συνέχεια, η συνολική απόληψη σε κάθε αρδευόμενη περιοχή κατανεμήθηκε σε ιδεατές γεωτρήσεις άντλησης έτσι ώστε να μην προκαλείται σοβαρή αλλοίωση στην πιεζομετρία του υδροφορέα όπως αυτή προκύπτει από υπάρχουσες μετρήσεις. Η ποσότητα του νερού ύδρευσης των οικισμών της περιοχής μελέτης θεωρήθηκε αμελητέα και απλά συνεκτιμήθηκε ως ένα μικρό ποσοστό αύξησης των απολήψεων για άρδευση. Σημειώνεται ότι κατά την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (1984-89) δεν λειτουργούσαν οι γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου και, συνεπώς, δεν υπήρχε ανάγκη θεώρησης αυτών των γεωτρήσεων.

Σε ότι αφορά στην επαναφόρτιση μέσω κατείσδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ακολουθήθηκαν τρία βήματα υπολογισμών: (α) θεωρήθηκαν τρεις ζώνες με διαφορετική επιφανειακή βροχόπτωση (Ανω, Μέσος και Κάτω Ρους Βοιωτικού Κηφισού), (β) σε κάθε κυψελίδα, αφαιρέθηκε από την επιφανειακή βροχόπτωση η πραγματική εξατμοδιαπνοή όπως αυτή υπολογίστηκε από το μοντέλο βροχόπτωσης – απορροής που καταρτίστηκε στα πλαίσια της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α), και (γ) η διαφορά που είναι η καθαρή βροχόπτωση μετατρέπεται σε κατείσδυση με βάση ένα ποσοστό  $a$  που εξαρτάται από τη γεωλογία του επιφανειακού στρώματος. Λήφθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές του  $a$ : 0.90, 0.20 και 0.05 αντίστοιχα για τους ασβεστόλιθους, τις προσχώσεις και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς. Για τους μήνες Απρίλιο ως Σεπτέμβριο, και εφόσον η βροχόπτωση δεν ξεπερνούσε τα 40 mm, θεωρήθηκε μηδενική κατείσδυση.

Σε ότι αφορά στην επαναφόρτιση μέσω κατείσδυσης επιφανειακών νερών, έγινε ήδη λόγος στο εδάφιο 4.4.2. Η εκφόρτιση του υδροφορέα μέσω πηγών αναπαρίσταται στο μοντέλο με στραγγιστήρια. Στον χάρτη του Σχήματος 4.3 φαίνονται οι θέσεις των στραγγιστήριων αυτών.

## 4.6 Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης

Η μεθοδολογία της βαθμονόμησης του μοντέλου ακολούθησε δύο στάδια, πράγμα που είναι κλασσικό σε αυτού του είδους τα προβλήματα. Πρώτα έγινε προσομοίωση της ροής στον υπό μελέτη υδροφορέα σε μόνιμες συνθήκες (steady state), και, στη συνέχεια, αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης σε συνθήκες μη μονιμότητας (transient state) που αποτελεί και το κύριο στάδιο της βαθμονόμησης. Στο κάθε ένα από τα δύο στάδια, έγιναν προσαρμογές των αρχικών εκτιμήσεων των υδραυλικών ιδιοτήτων του υδροφορέα αλλά και άλλων παραμέτρων (όπως οι παράμετροι υδραυλικής επικοινωνία υδροφορέα και ποταμού) με διαδοχικές δοκιμές (trial and error).

Στο πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης (steady state), θεωρήθηκε μια ιδεατή χρονική περίοδος με μέσες υδρολογικές συνθήκες και συνθήκες εκμετάλλευσης του υδροφορέα που αντιστοιχεί στην πενταετία 1984-89. Η χρονική αυτή περίοδος θεωρήθηκε απολύτως αντιπροσωπευτική των μέσων υδρολογικών συνθηκών. Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων του μοντέλου, επιλέχτηκε ο επαναληπτικός αλγόριθμος Pre Conjugate Gradient ή, σε συντομογραφία, PCG (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1999b) και η ανοχή σφάλματος στην εκτίμηση της στάθμης από επανάληψη σε επανάληψη ήταν 0.01 m. Παράλληλα, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή της επανυδροδότησης αποξηρανοθεισών κυψελίδων (rewetting dry cells).

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου ήταν, κατά βάση, δύο:

- Η αναπαραγωγή των μετρημένων τιμών της στάθμης σε 18 σημεία ελέγχου της περιοχής μελέτης
- Η επίτευξη ενός ικανοποιητικού υδατικού ισοζυγίου

Η προσαρμογή του μοντέλου που επετεύχθη θεωρήθηκε ικανοποιητική για τους στόχους της μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα. Η μέγιστη απόκλιση της υπολογισμένης από την μετρημένη στάθμη ήταν 5.0 m, ενώ η μέγιστη απόκλιση στις περιοχές ενδιαφέροντος (κατάντη τμήμα της περιοχής μελέτης) ήταν 0.5 ως 1.0 m.

Στο δεύτερο στάδιο της βαθμονόμησης, έγινε προσομοίωση της ροής στον υπό μελέτη υδροφορέα σε μη μόνιμες συνθήκες (transient state) με αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του πρώτου σταδίου. Οι προσομοιώσεις έγιναν για χρονική περίοδο ίση με μια πενταετία (1984-89), δηλαδή για 60 μηνιαίες χρονικές περιόδους (stress periods). Για τις ανάγκες ευστάθειας της επίλυσης, κάθε περίοδος χωρίστηκε σε 10 άνισες υποπεριόδους με πολλαπλασιαστικό συντελεστή αύξησης της διάρκειας της κάθε υποπεριόδου, σε σχέση με την προηγούμενή της, ίσο με 1.2. Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων του μοντέλου επιλέχτηκε πάλι ο επαναληπτικός αλγόριθμος PCG και η ανοχή σφάλματος στην εκτίμηση της στάθμης από επανάληψη σε επανάληψη ήταν αυστηρότερη από εκείνη του πρώτου σταδίου (τόρα 0.001 m) ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Χρησιμοποιήθηκαν 10 σημεία ελέγχου της στάθμης. Τα κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου ήταν τα ίδια όπως και στο πρώτο στάδιο. Η προσαρμογή του μοντέλου που επετεύχθη θεωρήθηκε πλήρως ικανοποιητική για τους στόχους της μελέτης και τα διαθέσιμα δεδομένα.



## 5 Προετοιμασία του μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση

---

### 5.1 Τοποθέτηση του προβλήματος της επιχειρησιακής χρήσης - Η στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση

Η επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου συνίσταται στη χρήση του ως εργαλείου πρόγνωσης για χρονική περίοδο που ξεκινά από τον παρόντα χρόνο και επεκτείνεται σε ένα χρονικό ορίζοντα στο μέλλον. Η συμπεριφορά του φυσικού συστήματος (που είναι ο υδροφορέας), για ανεξέλεγκτη – και ουσιαστικά άγνωστη - εξωτερική διέγερση, που είναι η βροχόπτωση, είναι, βέβαια, και αυτή ανεξέλεγκτη και άγνωστη. Μπορεί να ελεγχθεί μόνον μερικά ελέγχοντας τις απολήψεις από το σύστημα. Η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος με αποκλειστική χρήση ιστορικών δεδομένων είναι ανεπαρκής για την ασφαλή διαχείριση του. Οι αιτίες γι' αυτό είναι δύο:

- Η ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης έχει πρακτικά μηδενική πιθανότητα ακριβούς επανάληψής της στο μέλλον.
- Αυτή η ιστορική χρονοσειρά είναι μοναδική και δεν επιτρέπει πιθανοτικές εκτιμήσεις για κάθε έτος ξεχωριστά στο μέλλον.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση της μεθόδου της στοχαστικής προσομοίωσης. Αυτή συνίσταται στην παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, πράγμα που επιτρέπει τη μελέτη του συστήματος για οσοδήποτε μεγάλο χρονικό ορίζοντα και τη διερεύνηση πολλαπλών υδρολογικών σεναρίων αντιμετωπίζοντας, έτσι, με επιτυχία τα παραπάνω προβλήματα. Οι παραγόμενες συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης έχουν τα ίδια στατιστικά χαρακτηριστικά με τις ιστορικές (βλέπε Παράρτημα Α) και παράγονται με το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ που περιγράφεται στο οικείο τεύχος (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2000). Συνοπτικά, το πρόγραμμα εκτελεί τα ακόλουθα βήματα υπολογισμών που είναι απαραίτητα για το υπό μελέτη σύστημα:

1. Στατιστική ανάλυση των ιστορικών δεδομένων ύψους επιφανειακής βροχόπτωσης στις υπολεκάνες Άνω, Μέσου και Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Υπολογισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών δεδομένων βροχόπτωσης (βλέπε πίνακες του Παραρτήματος Α)
2. Εκτίμηση των παραμέτρων των στοχαστικών μοντέλων γέννησης συνθετικών χρονοσειρών.
3. Γέννηση 1000 ετήσιων συνθετικών χρονοσειρών στις τρεις υπολεκάνες μήκους 10 ετών.
4. Γέννηση μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης στις τρεις υπολεκάνες με επιμερισμό των ετήσιων.
5. Αναγωγή των συνθετικών χρονοσειρών, ώστε να είναι συνεπείς με τα επίκαιρα και τα ιστορικά δεδομένα επιφανειακής βροχόπτωσης.

Στο τελευταίο βήμα (5) εισάγεται ακριβώς η έννοια της πρόγνωσης που εδώ σημαίνει τη θεώρηση των παρατηρημένων, στον παρόντα χρόνο, τιμών ως αρχικών στην διαδικασία στοχαστικής προσομοίωσης. Χρησιμοποιείται ένα σχήμα τριών μεταβλητών (για το Άνω, το Μέσο και τον Κάτω Ρου) και δύο επίπεδων. Στο πρώτο επίπεδο (υψηλό επίπεδο) παράγονται ετήσιες συνθετικές χρονοσειρές ενώ στο χαμηλό επίπεδο παράγονται συνθετικές χρονοσειρές μηνιαίου βήματος. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των ιστορικών δεδομένων, που διατηρούνται αναλλοίωτα, είναι οι μέσες τιμές, οι διασπορές, οι συντελεστές ασυμμετρίας, οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης πρώτης τάξης και

ετεροσυσχέτισης μηδενικής τάξης καθώς και η εμμονή. Η διατήρηση της τελευταίας καθιστά δυνατή την αναπαραγωγή αλληλουχιών ξηρών ετών παρόμοιων με αυτά που παρατηρήθηκαν κατά την τελευταία μεγάλη ξηρασία.

Μια συγκεκριμένη ομάδα συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης που έχει παραχθεί με ένα μοναδικό σύνολο παραμέτρων των μοντέλων γέννησης χρονοσειρών αναφέρεται ως υδρολογικό σενάριο. Πριν από τη χρήση του μοντέλου υπόγειας υδροφορίας κάθε υδρολογικό σενάριο συνδυάζεται πάντα με ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα απολήψεων νερού για ύδρευση και άρδευση μέσω γεωτρήσεων. Ο συνδυασμός των δύο στοιχείων αναφέρεται ως διαχειριστικό σενάριο. Για συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο, και με τη βοήθεια του μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας υδροφορίας στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού, πραγματοποιείται ένας αριθμός προσομοιώσεων (ίσως με τον αριθμό των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης) και παράγονται συνθετικές χρονοσειρές παροχής των πηγών εκφόρτισης του υδροφορέα και στάθμης υπόγειου νερού σε επιλεγμένες θέσεις. Από το σημείο αυτό και πέρα εμφανίζονται δύο δυνατές προσεγγίσεις αξιοποίησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων:

1. Εκτίμηση της ενδεχόμενης μείωσης (ή αύξησης) της εισροής στην Υλίκη με βάση την παροχή των πηγών εκφόρτισης του υδροφορέα και εισαγωγή της τροποποιημένης εισροής στον πρόγραμμα «Υδρονομέας» το οποίο, με τη σειρά του, θα δώσει, για το συνολικό υδροδοτικό σύστημα, τις τελικές απαντήσεις στα ερωτήματα της μορφής που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 1.2.
2. Κλασική στατιστική επεξεργασία των εξαγόμενων μεγεθών η οποία δίνει, για το συγκεκριμένο διαχειριστικό σενάριο, τη μελλοντική διακύμανση των παροχών των πηγών και της στάθμης του υδροφορέα εκφρασμένων με πιθανοτικούς όρους.

Στην παρούσα πρώτη φάση του ερευνητικού έργου ακολουθείται η δεύτερη προσέγγιση καθόσον δεν έγινε σύνδεση του υπό μελέτη συστήματος με τον Υδρονομέα για λόγους που θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 6.

## 5.2 Αναπαράσταση οριακών συνθηκών

Η αναφορά σε μελλοντική χρονική περίοδο με την οποία συναρτάται η επιχειρησιακή χρήση του μοντέλου, θέτει ορισμένα προβλήματα στη διαχείριση των οριακών συνθηκών. Αιτία γι' αυτό είναι το γεγονός ότι πλήθος παραμέτρων των οριακών συνθηκών αποτέλεσε αντικείμενο βαθμονόμησης στη φάση της βαθμονόμησης του μοντέλου. Από τους διάφορους τύπους των οριακών συνθηκών, μόνον εκείνος της μηδενικής παροχής παρουσιάζει, προφανώς, ευκολία στη διαχείρισή του. Για τους υπόλοιπους τύπους έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης με βάση τα μεγέθη που εκτιμήθηκαν στη φάση της βαθμονόμησης.

Σε ότι αφορά στην επαναφόρτιση μέσω κατεΐσδυσης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ακολουθούνται, όπως και στη βαθμονόμηση, τρία βήματα υπολογισμών: (α) θεωρούνται πάλι οι τρεις ζώνες με διαφορετική επιφανειακή βροχόπτωση (Άνω, Μέσος και Κάτω Ρους), (β) σε κάθε κυψελίδα, αφαιρείται από την επιφανειακή βροχόπτωση η πραγματική εξατμοδιαπνοή η οποία όμως είναι άγνωστη και εκτιμήθηκε ως η μέση τιμή των ιστορικών δεδομένων της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) για την υδρολογικά μέση πενταετία 1984-89, και (γ) η διαφορά βροχόπτωσης μείον εξατμοδιαπνοή που είναι η καθαρή βροχόπτωση μετατρέπεται σε κατεΐσδυση με βάση τις τιμές ενός συντελεστή  $a$  που εξαρτάται από τη γεωλογία του επιφανειακού στρώματος. Λήφθηκαν οι τιμές του  $a$  που χρησιμοποιήθηκαν και στη βαθμονόμηση. Τέλος, για τους μήνες Απρίλιο ως Σεπτέμβριο, εφόσον η βροχόπτωση δεν ξεπερνούσε τα 40 mm, θεωρήθηκε μηδενική κατεΐσδυση.

Σε ότι αφορά τις πλευρικές εισροές στο δυτικό όριο της περιοχής μελέτης (όρος Παρνασσός), πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της δίαιτας των εισροών αυτών όπως προέκυψαν στη φάση της

βαθμονόμησης. Πιο συγκεκριμένα, οι παροχές εισπίεσης των πηγαδιών στις κυψελίδες του ορίου συσχετίστηκαν με την επιφανειακή βροχόπτωση. Προέκυψε η ακόλουθη σχέση

$$Q(t, i, j) = a(i, j)\exp[b(i, j)P(t-s, i, j)] \quad (7)$$

όπου  $Q(t, i, j)$  είναι η εισροή το μήνα  $t$  ( $m^3/d$ ) στην κυψελίδα της γραμμής  $i$  και της στήλης  $j$ ,  $a(i, j)$  και  $b(i, j)$  είναι παράμετροι για τη συγκεκριμένη κυψελίδα,  $s$  η υστέρηση της εισροής ως προς τη βροχόπτωση και  $P(t-s, i, j)$  η βροχόπτωση το μήνα  $t-s$  (mm/μήνα) στη κυψελίδα της γραμμής  $i$  και της στήλης  $j$ . Οι κυψελίδες του ορίου χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες. Η εκτίμηση των παραμέτρων έγινε για μια μόνο ομάδα (ομάδα 1) και οι εισροές των άλλων ομάδων (2 και 3) εκτιμώνται μέσω μιας ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης

$$Q_k(t, i, j) = \beta(k)Q_1(t, i, j) + \gamma(k) \quad (8)$$

όπου ο δείκτης  $k$  ( $=1, 2, 3$ ) δείχνει την ομάδα. Για τους μήνες Απρίλιο ως Σεπτέμβριο, εφόσον η βροχόπτωση δεν ξεπερνούσε τα 40 mm, θεωρήθηκε μηδενική εισροή.

Σε ότι αφορά τις εκροές από το βορειανατολικό όριο (προς το Μαλιακό Κόλπο), βρέθηκε ότι μια ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης της μορφής

$$Q(t, i, j) = a(i, j) + b(i, j)P(t-s, i, j) \quad (9)$$

με παραμέτρους  $a(i, j)$  και  $b(i, j)$ , δίνει την πιο ικανοποιητική αναπαράσταση των εκροών. Πάλι, για τους μήνες Απρίλιο ως Σεπτέμβριο, εφόσον η βροχόπτωση δεν ξεπερνούσε τα 40 mm, θεωρήθηκε μηδενική εκροή.

Η τελευταία οριακή συνθήκη που έπρεπε να μοντελοποιηθεί αφορά στην επικοινωνία υδροφορέα – ποταμού. Στην περίπτωση αυτή, το χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος που θα πρέπει να συσχετιστεί με τη βροχόπτωση (σε mm/μήνα), είναι η στάθμη  $h(t, i, j)$  (σε m) στην αρχή και το τέλος κάθε τμήματος του ποταμού. Βρέθηκε μια σχέση της μορφής

$$h(t, i, j) = a(i, j) + \sum_{k=0}^{k=s} b(i, j, k)P(t-k, i, j) \quad (10)$$

όπου  $a(i, j)$  και  $b(i, j, k)$  παράμετροι. Ένα δεύτερο μέγεθος που υπεισέρχεται είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας (conductance) (σε  $m^2/d$ ) ο οποίος θεωρήθηκε όπως ακριβώς και στη βαθμονόμηση: μηδενικός για τους μήνες Ιούνιο ως Σεπτέμβριο, οπότε διακόπτεται η επικοινωνία υδροφορέα – ποταμού για όλα τα τμήματα, (πλην του πλέον κατάντη στο οποίο η επικοινωνία δεν διακόπτεται). Οι τιμές των παραμέτρων για τις εξισώσεις των οριακών συνθηκών (7) ως (9) φαίνονται στον Πίνακα 5.1 ενώ αντίστοιχα οι παράμετροι της εξίσωσης (10) φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντελοποίησης οριακών συνθηκών (εξισώσεις 7, 8 και 9).

Εξίσωση	Παράμετροι				
	Υστέρηση $s$	$a$	$b$	$\beta$	$\gamma$
(7) ομάδα 1	3	2725.3	0.0056		
(8) ομάδα 2	3			0.4653	0.0
(8) ομάδα 3	3			0.6269	0.0
(9)	0	-195.0	-6.632		

Πίνακας 5.2: Παράμετροι μοντελοποίησης οριακών συνθηκών (εξίσωση 10) ( $s = 1$ )

$i, j$	$b(I, j, k), k =$		$a(i, j)$
	1	0	
10,4	0.0002	0.00133	0.10128
13,32	0.00018	0.00108	0.1074
22,41	0.00038	0.00035	0.03985
36,52	0.00022	0.00108	0.04993
56,69	0.00029	0.00169	0.04606
63,75	0.00027	0.00149	0.08655
69,93	0.00062	0.0034	0.12554

### 5.3 Ανάλυση απαιτήσεων επιχειρησιακού πακέτου

#### 5.3.1 Γενικά

Από όσα εκτέθηκαν στα κεφάλαια 4 και 5 (ως τώρα) θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι αρκεί η επιλογή ενός πακέτου προγραμμάτων της αγοράς με οπτικοποιημένο προσαρμοστικό χρήστη που να τρέχει το κλασικό πρόγραμμα MODFLOW του USGS. Πράγματι, εξετάστηκαν τα πακέτα GMS (Groundwater Modeling System) (U.S. Department of Defense, 1998) και Visual Modflow (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1999a, b). Αποδείχτηκε ότι τα πακέτα αυτά δεν προσφέρονται για τον μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων που απαιτεί η μεθοδολογία της στοχαστικής προσομοίωσης καθόσον απαιτούν χρονοβόρα χειροκίνητη διαδικασία εισαγωγής των μεγεθών που αφορούν στις οριακές συνθήκες. Από την άλλη, όμως, πλευρά τα πακέτα αυτά είναι ιδιαίτερα εύχρηστα σε ότι αφορά στην εισαγωγή των στατικών δεδομένων και την οπτικοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις μας οδήγησαν να προτείνουμε διαδικασία σειριακής εφαρμογής περισσότερων από ένα προγραμμάτων που περιλαμβάνει οκτώ βήματα:

1. Εισαγωγή των στατικών δεδομένων (χρονικά αμετάβλητων) μέσω του πακέτου GMS που είχε χρησιμοποιηθεί και στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α)
2. Επιλογή του υδρολογικού σεναρίου
3. Παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης μέσω του προγράμματος ΚΑΣΤΑΛΙΑ
4. Κατάρτιση του διαχειριστικού σεναρίου
5. Προετοιμασία των δεδομένων για όλες τις χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες και εγγραφή τους σε αρχεία MODFLOW μέσω κατάλληλου λογισμικού
6. Τρέξιμο του MODFLOW ως μεμονωμένου προγράμματος
7. Ανάκτηση των αποτελεσμάτων από αρχεία του MODFLOW μέσω κατάλληλου λογισμικού
8. Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μέσω του GMS και του MS-Excel

Σε ότι αφορά το πρόγραμμα MODFLOW αλλά και το σχετικό πακέτο GMS σε MS-WINDOWS έγινε εκτεταμένη αναφορά σε ότι αφορά στη συμμόρφωσή τους με την ανάλυση απαιτήσεων (Κεφάλαιο 2). Το πρόγραμμα ΚΑΣΤΑΛΙΑ εξετάζεται σε ξεχωριστό τεύχος (Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2000). Τα βήματα 5 και 7 (αλλά και το 6) απαιτούν την κατάρτιση νέου εξειδικευμένου λογισμικού καθόσον αυτό δεν υπάρχει στην αγορά. Στη συνέχεια του υποκεφαλαίου, περιγράφονται συνοπτικά η ανάλυση απαιτήσεων, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του ιδιαίτερα εξειδικευμένου αυτού λογισμικού που αναφέρεται ως «επιχειρησιακό πακέτο».

#### 5.3.2 Γενικές απαιτήσεις

- (1) Σε αυτή την φάση του έργου, το επιχειρησιακό πακέτο θα λειτουργεί σε περιβάλλον DOS.

- (2) Σε αυτή την φάση του έργου, το πακέτο θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει με ένα μέρος της υπολογιστικής ισχύος ενός κοινού προσωπικού Η/Υ.
- (3) Το πακέτο υπολογίζει, για κάθε κυψελίδα του καννάβου, και κάθε μήνα, την κατείδουση.
- (4) Το πακέτο υπολογίζει, για κάθε κυψελίδα του ορίου του καννάβου όπου υπάρχουν πηγάδια, και κάθε μήνα, την εισροή προς (ή την εκροή από) το πεδίο ροής.
- (5) Το πακέτο εγγράφει όλα τα υπολογισμένα μεγέθη των οριακών συνθηκών για κάθε κυψελίδα του καννάβου, και κάθε μήνα, σε αρχεία με format εισόδου του MODFLOW.
- (6) Το πακέτο τρέχει το MODFLOW σε DOS με τα παραπάνω αρχεία. Όλα τα υπόλοιπα αρχεία εισόδου είναι αμετάβλητα και έχουν προετοιμαστεί με επεξεργαστή κειμένου (text editor).

### 5.3.3 Απαιτήσεις σε δεδομένα

Το υπό μελέτη πακέτο θα πρέπει να δέχεται τα ακόλουθα δεδομένα:

- (7) Τις συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης για τον Άνω, το Μέσο και τον Κάτω Ρου του Βοιωτικού Κηφισού.
- (8) Το πρόγραμμα απολήψεων από τις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης περιλαμβανομένων των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου.

### 5.3.4 Απαιτήσεις σε εξαγόμενα

Στο τέλος κάθε κύκλου προσομοίωσης, το πακέτο θα δίνει τα ακόλουθα εξαγόμενα:

- (9) Τη διακύμανση της μηνιαίας απορροής των πηγών εκφόρτισης του φυσικού συστήματος.
- (10) Τη χωροχρονική διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου.
- (11) Συναθροισμένα στο χρόνο μεγέθη των παραπάνω με τη μορφή υδατικού ισοζυγίου για όλη τη διάρκεια προσομοίωσης.

### 5.3.5 Μη λειτουργικές απαιτήσεις

- (12) Ο χρόνος εκτέλεσης των αριθμητικών υπολογισμών ενός κύκλου προσομοίωσης διάρκειας 10 ετών θα παραμένει χαμηλός (της τάξης του λεπτού της ώρας).
- (13) Η εκτέλεση του προγράμματος θα γίνεται σε μορφή batch ως μεμονωμένου (stand alone) υπολογιστικού πακέτου.

## 5.4 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Σε εφαρμογή των παραπάνω απαιτήσεων, σχεδιάστηκε ένα εκτελέσιμο αρχείο mdfmun.exe που τρέχει με τη σειρά τα ακόλουθα εκτελέσιμα αρχεία:

1. mdfrch.exe για την προετοιμασία του αρχείου \*.rch των δεδομένων κατείδουσης του MODFLOW σε κάθε χρονικό βήμα και κάθε ενεργό κυψελίδα, με βάση τα δεδομένα βροχόπτωσης.
2. mdfwel.exe για την προετοιμασία του αρχείου \*.wel των δεδομένων των πηγαδιών του MODFLOW σε κάθε χρονικό βήμα με βάση τα δεδομένα βροχόπτωσης.
3. mdftrin.exe για την προετοιμασία του αρχείου \*.trin των δεδομένων που αφορούν στην επικοινωνία υδροφορέα και ποταμού.

4. MODFLOW.EXE (επίλυση του συστήματος των εξισώσεων 3).
5. mdf1st.exe για την ανάκτηση των επιθυμητών εξαγόμενων από το αρχείο \*.lst του MODFLOW.

Τα παραπάνω προγράμματα υλοποιήθηκαν σε γλώσσα προγραμματισμού ANSI C η οποία παράγει μεταφρασμένο (compiled) κώδικα με ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα εκτέλεσης. Ο χρόνος εκτέλεσης ενός κύκλου προσομοίωσης για ένα διαχειριστικό σενάριο με χρονικό ορίζοντα 10 έτη και 10 χρονοσειρές είναι 90 min.

## 5.5 Οδηγίες χρήσης προγραμμάτων

### 5.5.1 Εισαγωγή

Το πρόγραμμα mdfrun αναλαμβάνει να τρέξει το MODFLOW τόσες φορές όσες είναι οι συνθετικές χρονοσειρές βροχόπτωσης. Για κάθε χρονοσειρά, τρέχει τρία υποπρογράμματα παραγωγής αρχείων εισόδου του MODFLOW, τρέχει το ίδιο το MODFLOW καθώς και το πρόγραμμα ανάσυρσης αποτελεσμάτων.

Το mdfrun και τα υποπρογράμματα του mdfrch, mdfwel, mdfriv και mdf1st έχουν ορισμένες προκαθορισμένες ρυθμίσεις-δεδομένα που δεν μπορούν να αλλάξουν από τον χρήστη και αναφέρονται στην προσομοίωση του συγκεκριμένου υδροφορέα του Βοιωτικού Κηφισού. Αντίθετα άλλες ρυθμίσεις-δεδομένα αποθηκεύονται με την μορφή αρχείων σε συγκεκριμένους ταξινομημένους καταλόγους.

### 5.5.2 Δομή καταλόγων

Όλα τα δεδομένα που χρειάζονται για να λειτουργήσει το πρόγραμμα, αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό κατάλογο που αναφέρεται και ως <path of data files>. Το όνομα αυτού του καταλόγου ορίζεται από τον χρήστη μέσω ορίσματος των προγραμμάτων. Για να αποφευχθεί το χάος μέσα στον κατάλογο αυτό από την πληθώρα των αρχείων, γίνεται ταξινόμηση σε πέντε υποκαταλόγους για την ύπαρξη των οποίων πρέπει να έχει μεριμνήσει ο χρήστης. Εργαλείο για την κατασκευή της δομής καταλόγων είναι το πρόγραμμα δέσμης εντολών mdfdir.bat το οποίο πρέπει να τρέξει εφάπαξ με όρισμα το <path of data files>. Οι πέντε υποκατάλογοι είναι:

modflow:

Περιέχει τα αρχεία που είναι απαραίτητα για το τρέξιμο του MODFLOW καθώς και τα αρχεία εξόδου του.

rains:

Περιέχει όλες τις συνθετικές βροχοπτώσεις οι οποίες πρέπει να ακολουθούν την εξής ονοματολογία rain1.txt, rain2.txt, rain3.txt, ...Επιπλέον, περιέχει τους συντελεστές κατείδυσης ξεχωριστά για τη λεκάνη του Άνω, του Μέσου και του Κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού.

results:

Εδώ αποθηκεύεται μέρος από τα αποτελέσματα των τρεξιμάτων του MODFLOW. Η ονοματολογία που ακολουθείται είναι out1.txt, out2.txt, ... για την καταγραφή στάθμης γεωτρήσεων και παροχής πηγών και budget.txt για την καταγραφή των ισοζυγίων όλων των τρεξιμάτων.

river:

Περιέχει το αρχείο περιγραφής του ποταμού.

wells:

Σε αυτόν το κατάλογο βρίσκεται το αρχείο που δηλώνει τις αντλητικές και εικονικές γεωτρήσεις και τα αρχεία με τα προγράμματα άντλησης.

### 5.5.3 Ορίσματα προγραμμάτων

Τα υποπρογράμματα mdfrch, mdfwel, mdfriv και mdflst χρειάζονται ως όρισμα τον κεντρικό κατάλογο αποθήκευσης δεδομένων <path of data files>\* και το όνομα βάσης\*\* των αρχείων MODFLOW <modules basename>. Επιπλέον, τα τρία πρώτα χρειάζονται και τον αύξοντα αριθμό του αρχείου της συνθετικής βροχοπτώσης <synth rain num>. Πρώτο αρχείο συνθετικής βροχοπτώσης θεωρείται το rain1.txt, δεύτερο το rain2.txt κλπ

Τα τέσσερα παραπάνω προγράμματα καλούνται για κάθε συνθετική βροχοπτώση. Την πολλαπλή κλήση τους αναλαμβάνει το mdfrun το οποίο είναι και το πρόγραμμα που χρησιμοποιεί ο τελικός χρήστης. Τα ορίσματα που δέχεται είναι ο κεντρικός κατάλογος αποθήκευσης δεδομένων, το όνομα βάσης των αρχείων MODFLOW και το πλήθος των συνθετικών βροχοπτώσεων <synthetic rains>

\*Οι διαδρομές πρέπει να είναι απόλυτες στο δέντρο των καταλόγων.

\*\*Παράδειγμα: Αν 10chron.bas είναι το αρχείο bas του MODFLOW τότε το όνομα βάσης όλων των αρχείων του είναι 10chron.

### 5.5.4 Προκαθορισμένα δεδομένα

Τα προκαθορισμένα δεδομένα-ρυθμίσεις για τα υποπρογράμματα είναι:

mdfrch

- Διακριτοποίηση υδρολογικής λεκάνης σε 74x98 κυψελίδες
- Χωρισμός της λεκάνης σε τρεις υπολεκάνες
- Μηνιαία εξαμηνιαία των τριών υπολεκάνων (Ύψω, Μέσος, Κάτω Ρους)
- Μέγιστο μήκος μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς 10 χρόνια

mdfwel

- Εξίσωση συσχέτισης βροχοπτώσης με παροχή γεωτρήσεων προσομοίωσης οριακών συνθηκών όπως δίνεται στον Πίνακα 5.1
- Αρδευτικές γεωτρήσεις που κατατάσσονται σε τέσσερα προγράμματα άντλησης με το πολύ 125 γεωτρήσεις ανά πρόγραμμα
- Μέγιστος αριθμός γεωτρήσεων 500
- Μέγιστο μήκος μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς 10 χρόνια

mdfriv

- Έξη τμήματα ποταμού με προγραμματισμένη χρονική διακύμανση όρου αγωγιμότητας (conductance) και συσχέτιση βροχοπτώσης-βάθους ροής όπως δίνονται στον Πίνακα 5.2.
- Μέγιστο μήκος μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς 10 χρόνια

mdflst

- Αναζήτηση από αρχείο lst του MODFLOW, της παροχής των πηγών Μαυρονερίου, Ορχομενού και Πολύγυρας και στάθμης γεωτρήσεων EAP3, ΥΜΡΣ10, και ΑΚ4
- Μέγιστο μήκος μηνιαίας συνθετικής χρονοσειράς 10 χρόνια

mdfrun

- Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί-ρυθμίσεις
- Απόκτηση από το αρχείο εξόδου lst του MODFLOW και αποθήκευση στο αρχείο budget.txt της τελευταίας αναφοράς ισοζυγίου κάθε προσομοίωσης

### 5.5.5 Μεταβλητά δεδομένα (αρχεία εισόδου προγραμμάτων)

Παρατίθενται τα αρχεία αποθήκευσης δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το mdfrun και τα υποπρογράμματα του.

#### mdfrch

- Τα αρχεία anw.txt, mesw.txt, katw.txt, rain<synth rain num>.txt πρέπει να βρίσκονται κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/rains. Το anw.txt είναι το αρχείο με τους συντελεστές κατείδυσης στην άνω υπολεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού πολλαπλασιασμένους με έναν συντελεστή μετατροπής μονάδων έντασης βροχόπτωσης από mm/μήνα σε m/ημέρα ( $1/1000 * 1/30$ ). Τα mesw.txt και katw.txt είναι τα αντίστοιχα αρχεία για την υπολεκάνη του μέσου και κάτω ρου. Τα rain<synth rain num>.txt (rain1.txt, rain2.txt, ...) είναι η αριθμημένη συνθετική χρονοσειρά με μονάδες mm/μήνα.

#### mdfwel

- Τα αρχεία bor\_I.txt, bor\_II.txt, bor\_III.txt, emr.txt, wells.txt πρέπει να υπάρχουν κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/wells και το αρχείο rain<synth rain num>.txt κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/rains
- Το αρχείο bor\_I.txt περιέχει το πρόγραμμα άντλησης των αρδευτικών γεωτρήσεων που ανήκουν στην ομάδα 1. Οι μονάδες είναι m<sup>3</sup>/ημέρα. Τα αρχεία bor\_II.txt, bor\_III.txt, αντιστοιχούν στις ομάδες 2 και 3. Το αρχείο emr.txt περιλαμβάνει το αντλητικό πρόγραμμα των υδρευτικών γεωτρήσεων της ΕΥΔΑΠ στην περιοχή Βασιλικών-Παρορίου. Οι μονάδες είναι m<sup>3</sup>/ημέρα. Το αρχείο wells.txt περιέχει την περιγραφή κάθε γεώτρησης (πραγματικής ή εικονικής) που εισάγεται στο μοντέλο. Κάθε εγγραφή του αρχείου αντιστοιχεί σε μια γεώτρηση. Οι τρεις πρώτοι αριθμοί κάθε εγγραφής είναι οι συντεταγμένες της γεώτρησης στον κάρναβο διακριτοποίησης. Ο τέταρτος αριθμός είναι ο κωδικός της κατηγορίας της γεώτρησης δηλαδή σε ποια ομάδα ανήκει.

#### mdfriv

- Το αρχείο river.txt πρέπει να βρίσκεται κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/river και το αρχείο rain<synth rain num>.txt πρέπει να βρίσκεται κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/rains.
- Το αρχείο river.txt περιέχει την αλληλουχία των κυψελίδων που αναπαριστούν το ποτάμι. Κάθε εγγραφή αντιστοιχεί σε μία κυψελίδα. Οι τρεις πρώτοι αριθμοί είναι οι συντεταγμένες της κυψελίδα στον κάρναβο διακριτοποίησης. Ο τέταρτος αριθμός είναι το απόλυτο υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού.

#### mdflst

- Το αρχείο rain1.txt πρέπει να βρίσκεται κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/rains και το αρχείο <modules basename>.lst πρέπει να βρίσκεται κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/modflow. Το αρχείο rain1.txt διαβάζεται μόνο για να μετρηθεί ο αριθμός των μηνών της προσομοίωσης. Το αρχείο <modules basename>.lst είναι το αρχείο εξόδου του MODFLOW

#### mdfrun

- Οι απαιτήσεις των τεσσάρων υποπρογραμμάτων. Τα αρχεία του MODFLOW nam, bas, bcf, pcg, drn και οποιοδήποτε άλλο πακέτο φόρτισης ή περιγραφής του υδροφορέα που μένει σταθερό σε κάθε τρέξιμο του MODFLOW, πρέπει να υπάρχουν κάτω από τον κατάλογο <path of data files>/modflow

## 5.6 Πιλοτική εφαρμογή επιχειρησιακού πακέτου

Μετά την επιχειρησιακή προσαρμογή του μοντέλου MODFLOW, όπως αυτή περιγράφηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια, έγινε εφαρμογή σε συγκεκριμένο αντιπροσωπευτικό πρόβλημα πρόγνωσης της συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.

Το υδρολογικό σενάριο που επιλέχθηκε συνίσταται στη διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών για τη συνολική διάρκεια των διατιθέμενων δειγμάτων βροχόπτωσης (1967-98) που παρουσιάζονται στο τέλος των πινάκων του Παραρτήματος Α. Οι συνθετικές χρονοσειρές είναι 1000 τον αριθμό και αναφέρονται στη δεκαετία 1998-99 ως 2007-08. Εξετάστηκαν δύο διαχειριστικά σενάρια: (α) το διαχειριστικό σενάριο 1 στο οποίο οι απολήψεις από τις γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου θεωρήθηκαν μηδενικές, όπως, άλλωστε, είναι στις σημερινές συνθήκες, και (β) το διαχειριστικό σενάριο 2 με εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου με πρόγραμμα απολήψεων τις ιστορικές απολήψεις το έτος 1994. Και στα δύο διαχειριστικά σενάρια θεωρήθηκαν οι απολήψεις για άρδευση που είχαν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) για την πενταετία 1984-89 και μάλιστα οι μεγαλύτερες τιμές τους (για το έτος 1988).



Τα εξαγόμενα του MODFLOW μέσω του προγράμματος mdf1st, υφίστανται περαιτέρω στατιστική επεξεργασία και τα αποτελέσματα δίνονται υπό τη μορφή στατιστικών χαρακτηριστικών ενός ορισμένου αριθμού μεγεθών μαρτύρων. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν έτσι ώστε να δίνουν μια εύληπτη πληροφορία στον χρήστη του όλου υπολογιστικού συστήματος είναι:

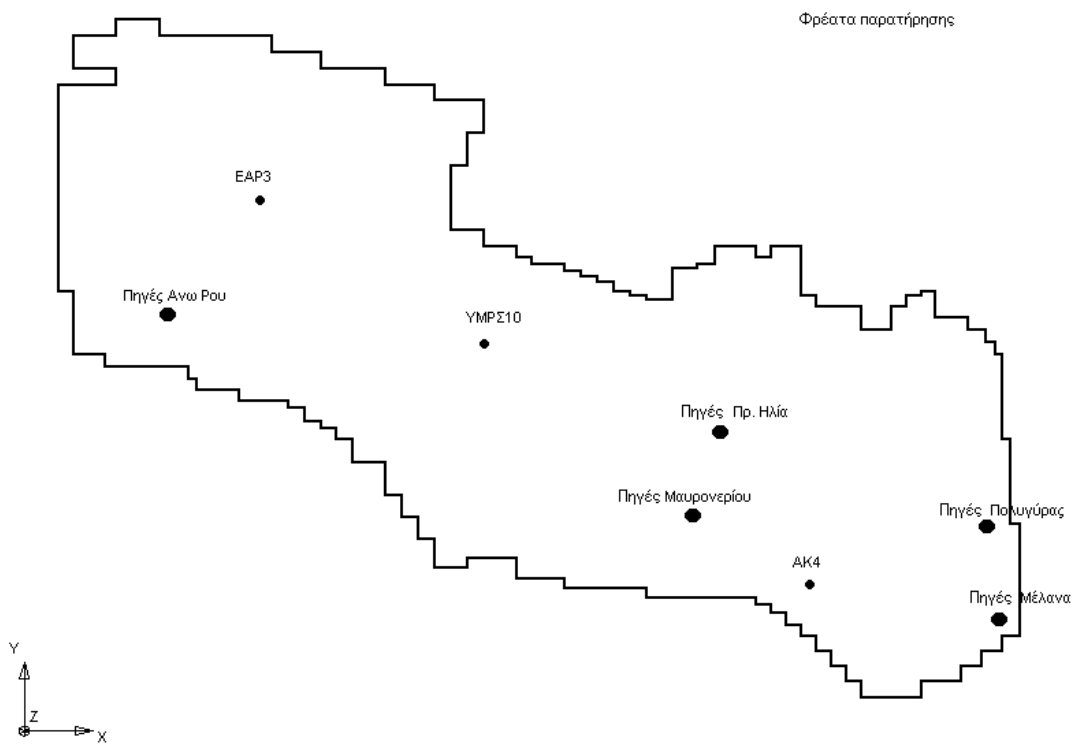
1. Τροχιά της μέσης τιμής του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.
2. Τροχιά του ποσοστημορίου 10% του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.
3. Τροχιά του ποσοστημορίου 90% του μεγέθους μάρτυρα για όλους τους μήνες του χρονικού ορίζοντα.

Οι τροχιές αυτές απεικονίζουν την αναμενόμενη μέση συμπεριφορά του υπόψη μεγέθους μάρτυρα καθώς και μια ζώνη μέσα στην οποία αναμένεται να εξελιχθεί το υπόψη μέγεθος με πιθανότητα 10% να πέσει προς τα κάτω και 10% να υπερβεί το όριο της ζώνης προς τα πάνω. Τα μεγέθη μάρτυρες που επιλέχθηκαν είναι:

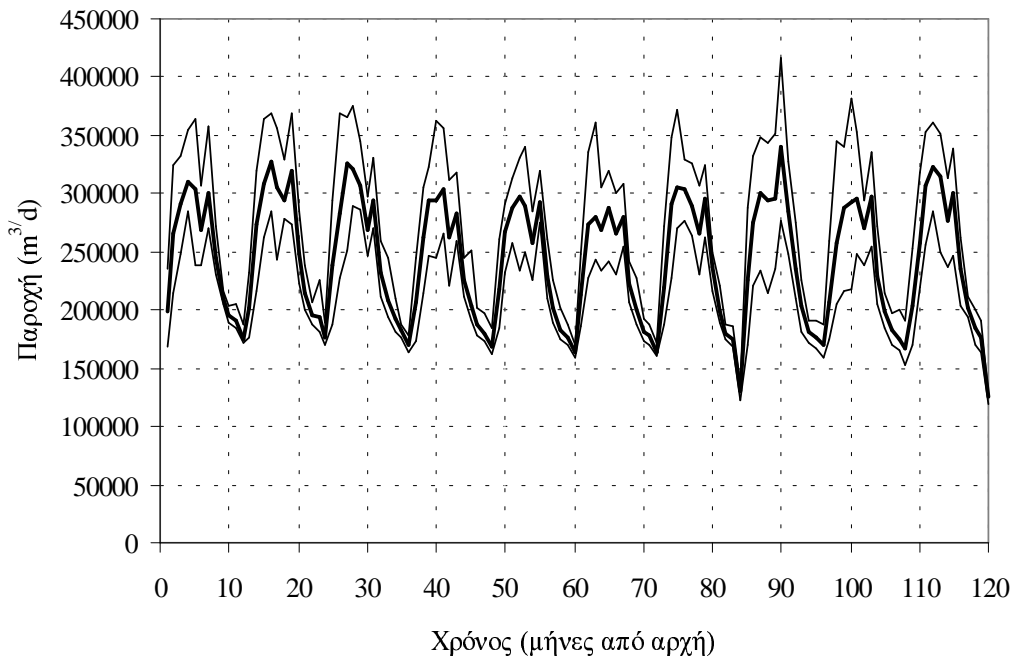
1. Παροχή πηγών Μέλανα (Ορχομενού)
2. Παροχή πηγών Μαυρονερίου
3. Παροχή πηγών Πολυγύρας
4. Στάθμη του υδροφορέα στη γεώτρηση ΕΑΡ3 στον Άνω Ρου
5. Στάθμη στη γεώτρηση ΥΜΡΣ10 στο Μέσο Ρου
6. Στάθμη στη γεώτρηση και ΑΚ4 στον Κάτω Ρου

Η θέση στο χώρο των σημείων στα οποία αναφέρονται τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται στο Σχήμα 5.1. Τα κριτήρια επιλογής ήταν η παρακολούθηση της πιεζομετρίας σε αντιπροσωπευτικές θέσεις της περιοχής μελέτης και των σημαντικότερων, από την άποψη όγκου νερού, εκφορτίσεων του φυσικού συστήματος. Στα σχήματα 5.2, 5.3, και 5.4 φαίνεται η χρονική διακύμανση των μεγεθών μαρτύρων της παροχής των πηγών Μέλανα, Μαυρονερίου και Πολυγύρας αντίστοιχα για το διαχειριστικό σενάριο 1. Χαρακτηριστική είναι η πτωτική τάση που είναι έντονη για την ομάδα πηγών Μαυρονερίου, και πολύ ηπιότερη για τις πηγές Πολυγύρας. Στα σχήματα 5.5, 5.6 και 5.7 δίνεται, για το διαχειριστικό σενάριο 1, η χρονική διακύμανση των μεγεθών μαρτύρων της στάθμης σε τρία φρέατα παρατήρησης: ΕΑΡ3, ΥΜΡΣ10 και ΑΚ4 αντίστοιχα. Στο χάρτη του Σχήματος 5.8 δίνεται η πιεζομετρία του υδροφορέα για ένα μήνα της περιόδου προσομοίωσης (Απρίλιος 2008). Τα αποτελέσματα για το για το διαχειριστικό σενάριο 2 παρουσιάζονται στα σχήματα 5.9 ως 5.15. Επισημαίνεται όλες οι εκτιμήσεις των ποσοστημορίων 10% και 90% είναι χονδροειδείς καθώς οι εκτιμήθηκαν ως οι ακραίες τιμές από 10 συνθετικές χρονοσειρές. Υδατικά ισοζύγια για κάθε χρονική περίοδο 10 ετών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β, για κάθε μια από τις 10 χρονοσειρές ξεχωριστά και για τα δύο διαχειριστικά σενάρια. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων μας οδηγεί σε συμπεράσματα απολύτως ανάλογα, από ποιοτική άποψη, με αυτά που είχαν εξαχθεί στη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α) για τη χρονική περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου:

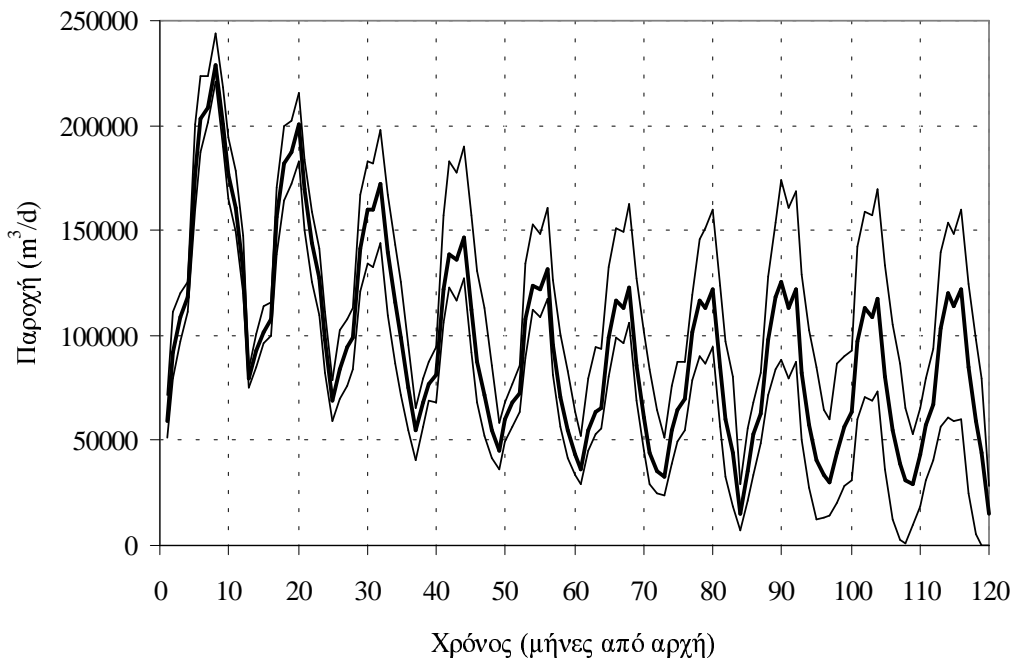
1. Η εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου για μια δεκαετία στο μέλλον θα έχει σημαντική επίδραση στην παροχή των κύριων πηγών του καρστικού συστήματος. Η επίδραση είναι μεγάλη για τις πηγές Μαυρονερίου – οι οποίες στερεύουν προσωρινά, προς τι τέλος της δεκαετίας – και πολύ μικρότερη για τις πηγές Μέλανα.
2. Η εντατική εκμετάλλευση των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου για μια δεκαετία στο μέλλον θα έχει σημαντική επίδραση στην πιεζομετρία του καρστικού συστήματος. Η επίδραση είναι μεγαλύτερη στον Άνω Ρου και μειώνεται προοδευτικά προς τον Κάτω Ρου όπου το φυσικό σύστημα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στις συνθήκες εντατικής εκμετάλλευσης που εξετάστηκαν.



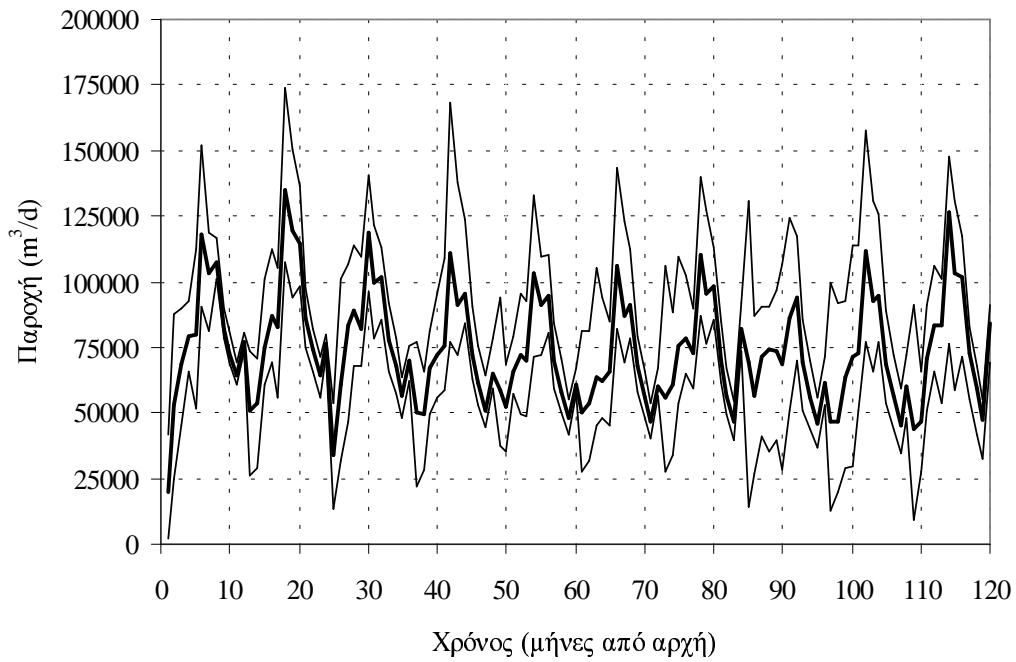
Σχήμα 5.1: Φρέατα παρατήρησης και πηγές που χρησιμοποιούνται για τα μεγέθη μάρτυρες της πιλοτικής εφαρμογής



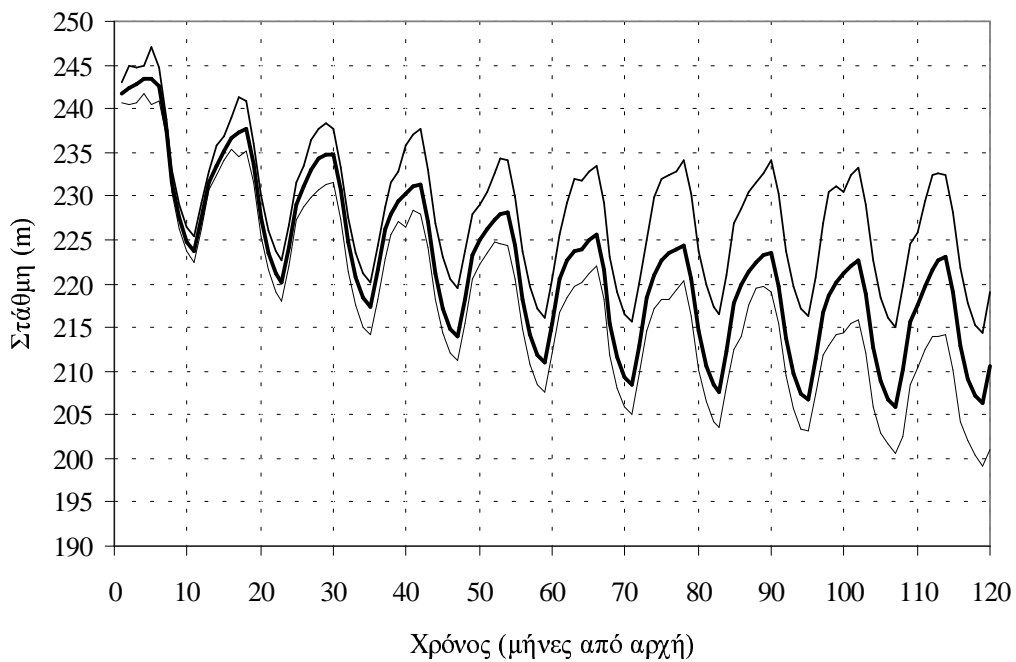
Σχήμα 5.2: Διακύμανση παροχής πηγών Μέλανα (μέση τιμή και ποσοστημότητα 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



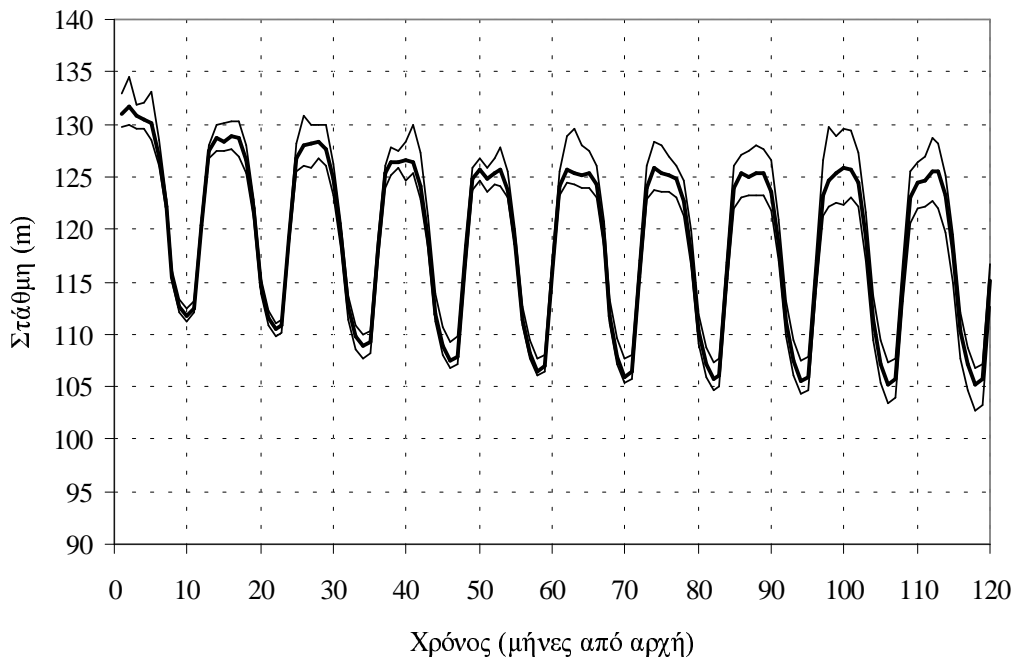
Σχήμα 5.3: Διακύμανση παροχής πηγών Μαυροβερίου (μέση τιμή και ποσοστημότητα 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



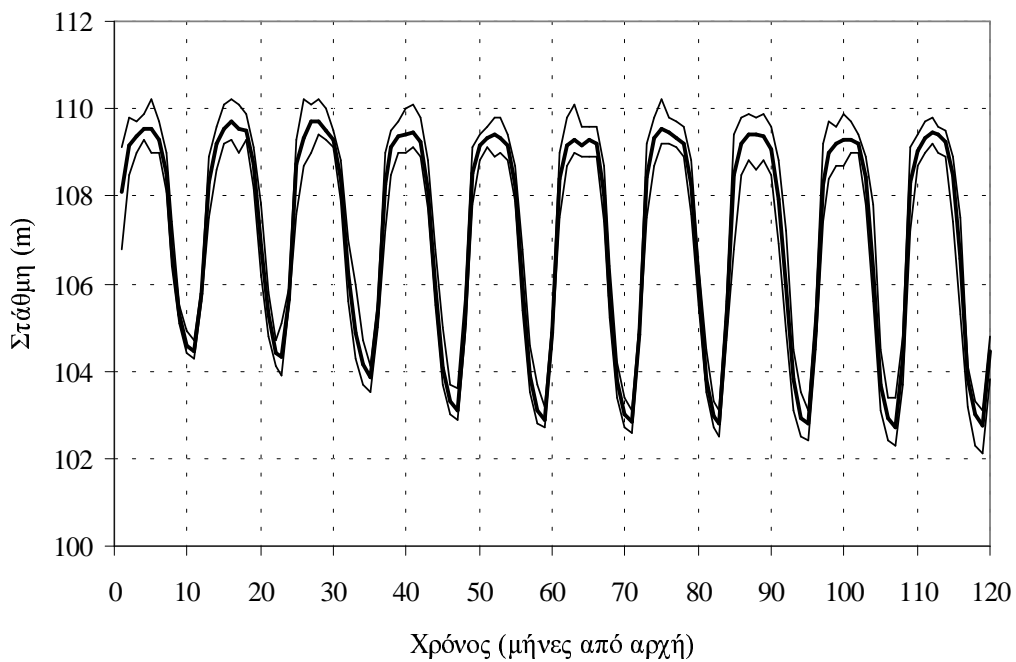
Σχήμα 5.4: Διακύμανση παροχής πηγών Πολυγύρας (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



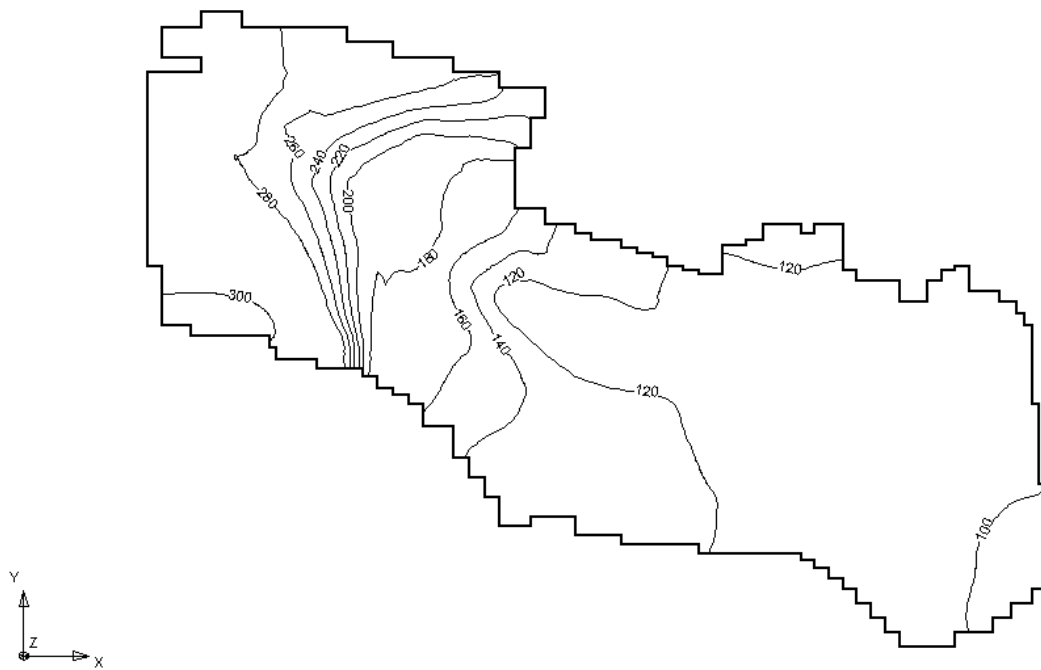
Σχήμα 5.5: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης ΕΑΡ3 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



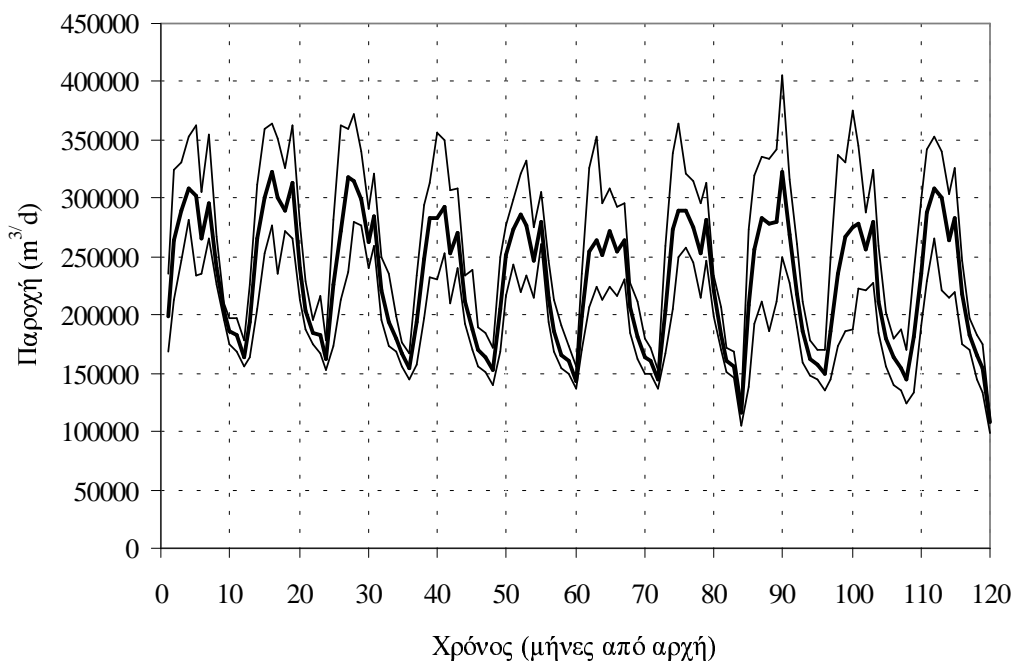
Σχήμα 5.6: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης ΥΜΡΣ10 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



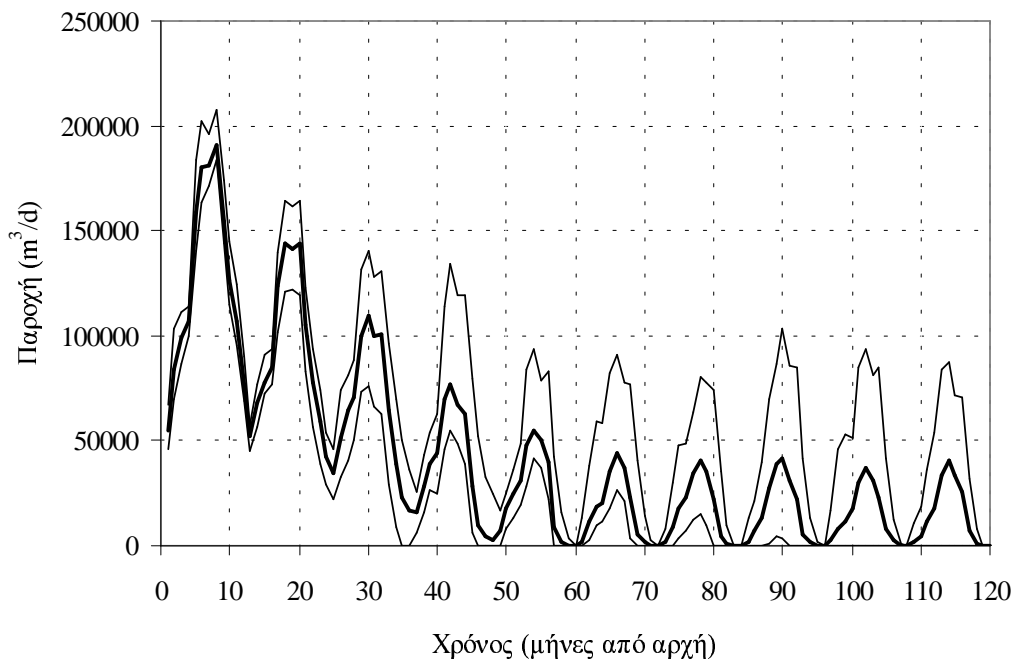
Σχήμα 5.7: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης ΑΚ4 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 1



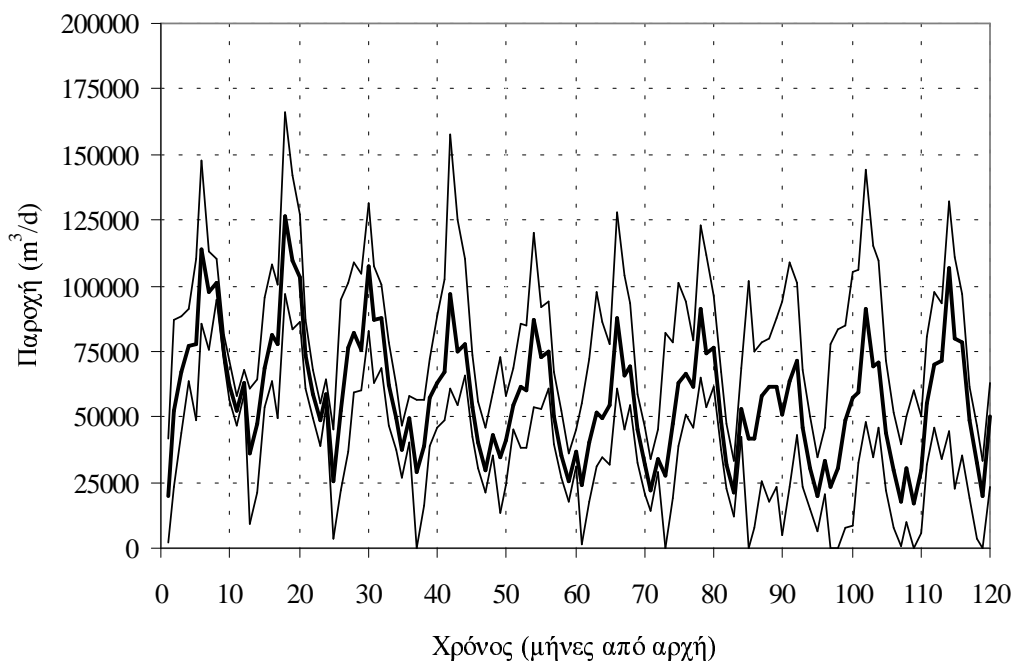
Σχήμα 5.8: Χωρική κατανομή πιεζομετρικού φορτίου για μια συνθετική χρονοσειρά βροχόπτωσης και τον μήνα Απρίλιο 2008 για το διαχειριστικό σενάριο 1



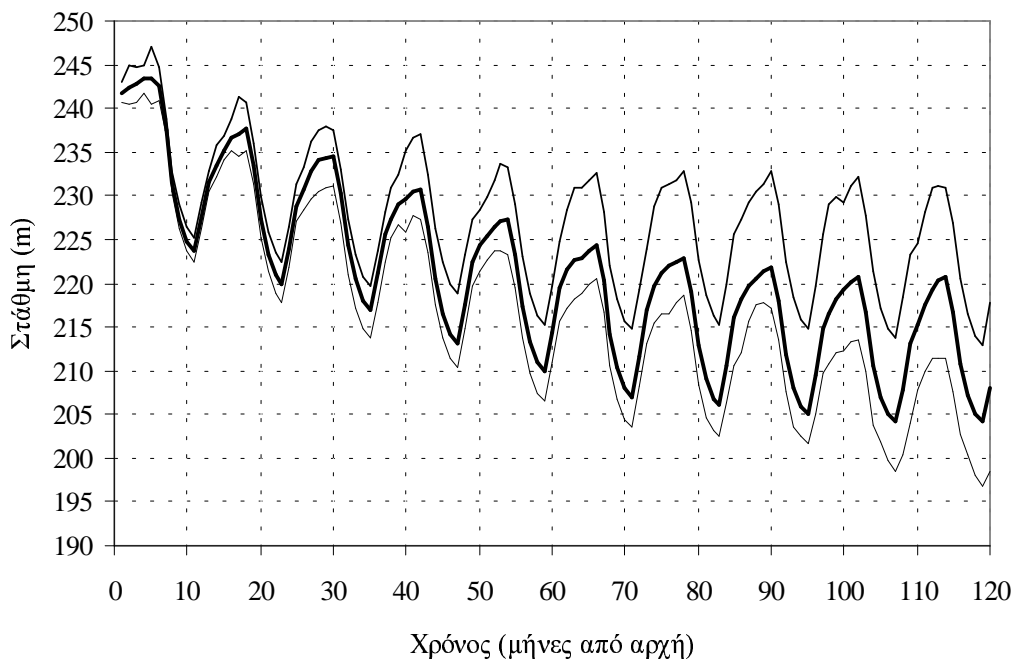
Σχήμα 5.9: Διακύμανση παροχής πηγών Μέλανα (μέση τιμή και ποσοστημότητα 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2



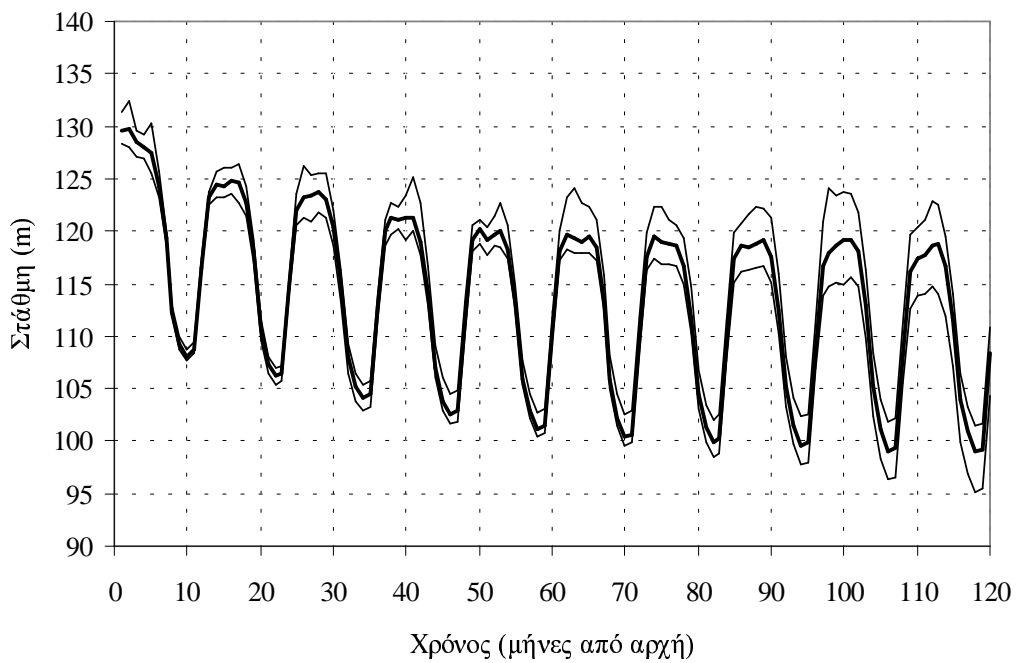
Σχήμα 5.10: Διακύμανση παροχής πηγών Μαυρονερίου (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2



Σχήμα 5.11: Διακύμανση παροχής πηγών Πολυγύρας (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2

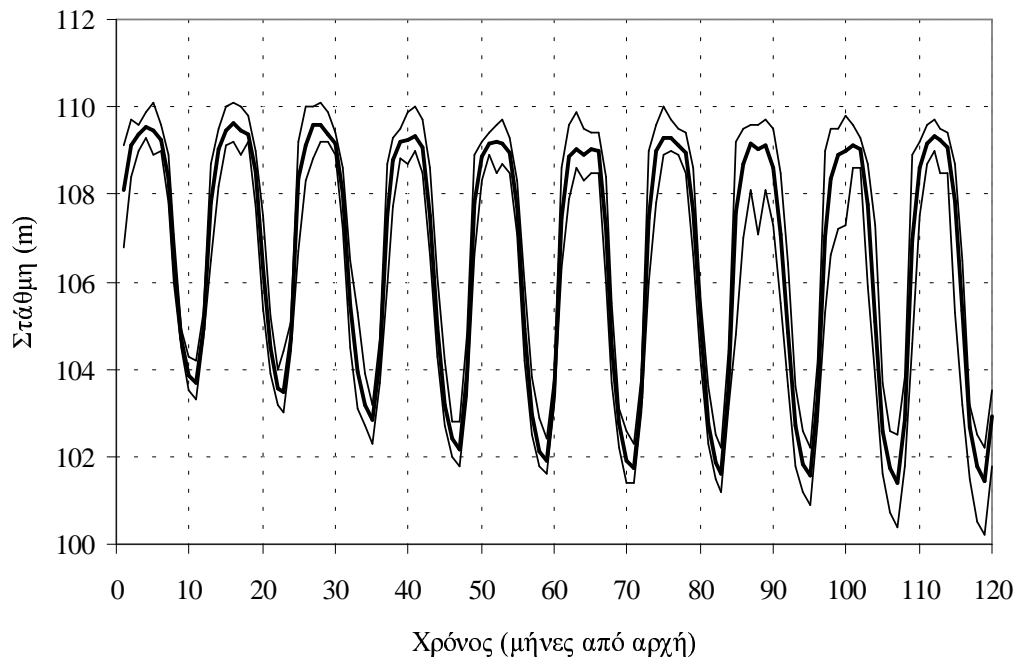


Σχήμα 5.12: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης EAP3 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2

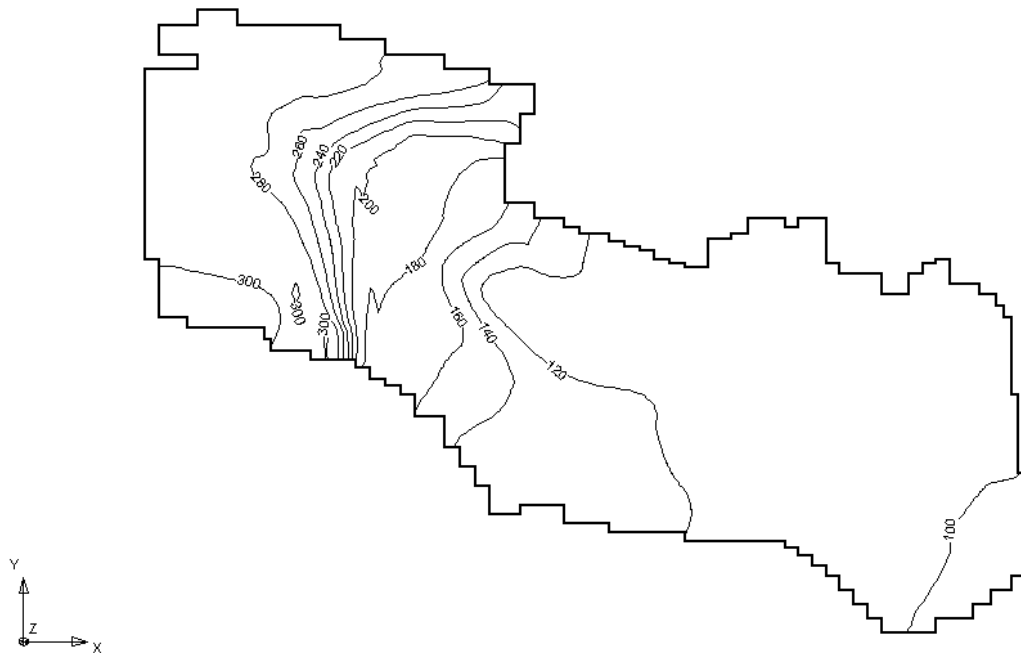


Σχήμα 5.13: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης YMPΣ10 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2





Σχήμα 5.14: Διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου στο φρέαρ παρατήρησης AK4 (μέση τιμή και ποσοστημόρια 10% και 90%) για το διαχειριστικό σενάριο 2



Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή πιεζομετρικού φορτίου για μια συνθετική χρονοσειρά βροχόπτωσης και τον μήνα Απρίλιο 2008 για το διαχειριστικό σενάριο 2

## 6 Σύνοψη – Συμπεράσματα

---

Το παρόν τεύχος πραγματεύεται το σχεδιασμό και τη υλοποίηση ενός υπολογιστικού συστήματος για τη στοχαστική προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού –Υλίκης. Αποκλειστικός στόχος ήταν η υποβολή του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας με την ονομασία «Υδρονομέας» που καταρτίστηκε στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου. Η απόληψη υπόγειου νερού μέσω των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου στο Μέσο Ρου του Βοιωτικού Κηφισού είναι σημαντική πηγή για την ΕΥΔΑΠ: αυτή τη στιγμή, μαζί με τον υδροφορέα Μαυροσουβάλας, αποτελεί την κύρια εφεδρική πηγή για την αντιμετώπιση έκτακτων συνθηκών υδροδότησης (περιπτώσεις βλαβών στα υδραγωγεία και συνθήκες αυξημένης κατανάλωσης) (ΕΥΔΑΠ, 1996, Ξανθάκης, 2000). Στο μέλλον, μάλιστα, δεν αποκλείεται η εμφάνιση της ανάγκης συνεχών απολήψεων από τις γεωτρήσεις αυτές. Οι γεωτρήσεις στην περίμετρο της Υλίκης (με εξαίρεση αυτές στην περιοχή Ούγγρων) δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την εταιρεία καθόσον αντλούν ουσιαστικά το νερό της λίμνης. Για τον λόγο αυτό, αποφασίστηκε η Υλίκη να εξεταστεί στη δεύτερη φάση του έργου.

Οι βασικές απαιτήσεις από το υπόψη υπολογιστικό σύστημα είναι δύο: (α) να δίνει τις επιπτώσεις των απολήψεων από τις γεωτρήσεις Βασιλικών – Παρορίου στην παροχή των πηγών της λεκάνης και, κατά συνέπεια, και στην εισροή στην Υλίκη, και (β) να εκτιμά τις επιπτώσεις των απολήψεων αυτών στη στάθμη του υπόγειου νερού.

Το υπολογιστικό σύστημα περιλαμβάνει, πρώτα-πρώτα, ένα έτοιμο πακέτο της αγοράς με το κύριο μαθηματικό μοντέλο και άλλα βοηθητικά προγράμματα Η/Υ που καταρτίστηκαν στο παρόν έργο. Ως κύριο μοντέλο που επιλύει τη διαφορική εξίσωση της υπόγειας ροής στην περιοχή μελέτης επιλέχτηκε το MODFLOW της Αμερικανικής υπηρεσίας USGS που αναφέρεται σε πορώδεις γεωλογικούς σχηματισμούς αλλά χρησιμοποιείται διεθνώς και σε καρστικούς υδροφορείς όταν αυτοί είναι μεγάλης έκτασης και μεγάλου πλήθους αγωγών (όπως ο υπό μελέτη υδροφορέας) και, επιπλέον, δεν ενδιαφέρουν τα τοπικά υδραυλικά μεγέθη της υπόγειας ροής αλλά η περιγραφή της γενικής κίνησης του νερού (όπως στο παρόν έργο). Η επιλογή υπαγορεύτηκε, ακόμη, από τα διαθέσιμα δεδομένα που δεν επιτρέπουν αξιόπιστη και ακριβή αναπαράσταση της ροής σε ρηγματωμένα μέσα. Προηγήθηκε σχετική ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 1999) που συντάχτηκε σύμφωνα με τη σύμβαση του ερευνητικού έργου (Παράρτημα Ι της σύμβασης ανάθεσης, ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, 1999β) και ακολούθησε η επιλογή του πακέτου GMS (Groundwater Modeling System) του αμερικανικού υπουργείου Άμυνας.

Στο παρόν έργο αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα παλιότερης μελέτης (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000α) στην οποία είχε βαθμονομηθεί το ίδιο μοντέλο. Στη μελέτη εκείνη είχε επιτευχθεί ικανοποιητική βαθμονόμηση του MODFLOW στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού αξιοποιώντας μεγάλη ποσότητα πληροφορίας που έχει συσσωρευθεί για την λεκάνη. Η πληροφορία αυτή περιλαμβάνει: (α) δεδομένα ερευνητικών γεωτρήσεων του ΙΓΜΕ, (β) αποτελέσματα δοκιμαστικών αντλήσεων που έγιναν από το ΙΓΜΕ, (γ) γεωλογικούς χάρτες 1:50 000 του ΙΓΜΕ, (δ) υδρομετρήσεις σε υδατορεύματα και πηγές, (ε) δεδομένα βροχόπτωσης και άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών, (στ) δεδομένα διάρθρωσης καλλιεργειών και συνθηκών άρδευσης.

Στο παρόν ερευνητικό έργο έγινε αρκετά εκτεταμένη συλλογή και επικαιροποίηση (σε σχέση με τη μελέτη του ΥΠΕΧΩΔΕ) των δειγμάτων βροχόπτωσης, παροχής υδατορευμάτων, πηγών και γεωτρήσεων, στάθμης υπόγειου νερού, μετεωρολογικών μεταβλητών και αρδευόμενων και

αρδευθεισών εκτάσεων. Από τα παραπάνω πρωτογενή δεδομένα αξιοποιήθηκαν ουσιαστικά μόνον τα δεδομένα ύψους βροχόπτωσης, ενώ για τα άλλα μεγέθη χρησιμοποιήθηκαν τα επεξεργασμένα δεδομένα της μελέτης του ΥΠΕΧΩΔΕ (2000α). Το κύριο βάρος των καθαρά ερευνητικών εργασιών δόθηκε στην προσαρμογή του μοντέλου μέσω της κατασκευής κατάλληλου εξειδικευμένου λογισμικού έτσι ώστε αυτό να χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης της βροχόπτωσης. Η προσαρμογή περιλάμβανε την κατασκευή νέων προγραμμάτων Η/Υ για την υλοποίηση της μεθόδου πρόγνωσης των μεγεθών των οριακών συνθηκών στο μοντέλο και την προετοιμασία των κατάλληλων αρχείων του MODFLOW. Το υπολογιστικό σύστημα που καταρτίστηκε εφαρμόστηκε πιλοτικά στο καρστικό σύστημα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για μέσες υδρολογικές συνθήκες από την άποψη της βροχόπτωσης, μέσες συνθήκες εκμετάλλευσης του υδροφορέα για αρδευτικούς και υδρευτικούς σκοπούς εντός της λεκάνης και ακραίες συνθήκες εκμετάλλευσης των γεωτρήσεων της ΕΥΔΑΠ στο Μέσο Ρου (με απολήψεις μηδενικές αλλά και υψηλές, ίσες με αυτές του έτους 1994).

Η όλη διερεύνηση για την επιχειρησιακή προσαρμογή του μοντέλου επιτρέπει να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

1. Η μέθοδος της στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης αποδείχτηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη της μελλοντικής συμπεριφοράς του καρστικού συστήματος υπόγεια υδροφορίας στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Το κύριο πλεονέκτημά της σε σχέση προς τις πιο συμβατικές μεθόδους είναι η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας στην εξέλιξη των μεγεθών ενδιαφέροντος.
2. Η εφαρμογή της μεθόδου με βάση το μοντέλο MODFLOW αποδείχτηκε πλήρως εφικτή.
3. Οι εκτιμήσεις των χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών των οριακών συνθηκών βάσει γνωστών μεγεθών που απαιτεί η στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση δεν αντιμετωπίζονται από τα υπολογιστικά πακέτα της αγοράς. Συνεπώς, έπρεπε να καταρτιστούν κατάλληλα μοντέλα πρόγνωσης για τα μεγέθη αυτά.
4. Οι απλές αλγεβρικές παραμετρικές σχέσεις που επιλέχθηκαν με ως ανεξάρτητη μεταβλητή τη βροχόπτωση και ως εξαρτημένη μεταβλητή το ζητούμενο, κάθε φορά, μέγεθος, απέδωσαν, μετά τη βαθμονόμησή τους, τη γενική τάση των ζητούμενων μεγεθών και όχι ακριβώς τις τιμές παραπλήσιες σε αυτές των 'μετρημένων' μεγεθών.
5. Η κατείσδυση εκτιμήθηκε πολύ ικανοποιητικά από τη μελλοντική συνθετική βροχόπτωση, την πραγματική εξατμοδιαπνοή, και κατάλληλο συντελεστή κατείσδυσης που μεταβάλλεται ανάλογα με το γεωλογικό υπόβαθρο.
6. Η εισροή (ή εκροή) από εκτάσεις εκτός του πεδίου ροής εκτιμήθηκε πιο προσεγγιστικά ως παροχή συναρτήσει της βροχόπτωσης με εισαγωγή κατάλληλης χρονικής υστέρησης.
7. Η εκτίμηση της στάθμης του νερού στον Βοιωτικό Κηφισό που ρυθμίζει την επικοινωνία υδροφορέα – ποταμού, ήταν το μέγεθος που εκτιμήθηκε με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα (σε σχέση με τα άλλα μεγέθη) συναρτήσει της βροχόπτωσης και κατά τμήματα του ποταμού.
8. Τα υδατικά ισοζύγια του καρστικού υδροφορέα της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού που προσομοιώθηκαν κατά την επιχειρησιακή εφαρμογή του μοντέλου ήταν απόλυτα λογικά και συμβατά με εκείνα της βαθμονόμησης του μοντέλου MODFLOW.
9. Η διερεύνηση των συνθηκών εντατικής εκμετάλλευσης (από την ΕΥΔΑΠ) του υδροφορέα μέσω των γεωτρήσεων Βασιλικών – Παρορίου για μια δεκαετία στο μέλλον έδειξε ότι η εκμετάλλευση αυτή θα έχει σημαντική επίδραση στην παροχή των κύριων πηγών του καρστικού συστήματος: οι πηγές Μαυρονερίου σε μερικές περιπτώσεις στερεύουν προσωρινά (προς το τέλος της δεκαετίας) ενώ οι πηγές Μέλανα επηρεάζονται πολύ λιγότερο. Σε ότι αφορά την πιεζομετρία του καρστικού συστήματος, η επίδραση είναι μεγαλύτερη στον Άνω Ρου και μειώνεται προοδευτικά προς τον Κάτω Ρου όπου το φυσικό σύστημα παρουσιάζει μικρή ευαισθησία στις συνθήκες εκμετάλλευσης.

10. Το πακέτο GMS είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ως προεπεξεργαστής και μεταεπεξεργαστής των δεδομένων, κυρίως για οπτικοποίησή τους.
11. Το τρέξιμο του MODFLOW μέσα από το περιβάλλον GMS αποδείχτηκε πλήρως απρόσφορο για επιχειρησιακή χρήση. Γι' αυτό και απαιτήθηκε η κατασκευή νέων προγραμμάτων Η/Υ που προετοιμάζουν τα αρχεία εισόδου του MODFLOW και ανακτούν τα αποτελέσματα.
12. Ο χρόνος εκτέλεσης του MODFLOW είναι απαγορευτικός δεν επιτρέπει την ταχεία εκτέλεση του μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων που απαιτούνται για την εφαρμογή της μεθόδου της στοχαστικής προσομοίωσης. Στην πιλοτική εφαρμογή, έγιναν μόνον χονδροειδείς εκτιμήσεις των πιθανοτικών μεγεθών που ζητούνται (παροχές πηγών, στάθμες υπόγειου νερού).

Τα προβλήματα που προγραμματίζεται να αντιμετωπιστούν στη δεύτερη φάση του έργου είναι τα ακόλουθα:

1. Η θεώρηση της υδροφορίας στη λεκάνη της Υλίκης.
2. Η διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης του χρόνου εκτέλεσης ενός κύκλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.
3. Η σύνδεση του επιχειρησιακού πακέτου με τον Υδρονομέα
4. Η θεώρηση και των υπολοίπων, εκτός της λεκάνης Βοιωτικού – Κηφισού – Υλίκης, υπόγειων υδροφορέων ως πηγών υδροδότησης που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας. Η θεώρηση αυτή θα γίνει υπό την έννοια της συμπερίληψης των σχετικών ποσοτήτων νερού στα υδατικά ισοζύγια του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας και όχι υπό την έννοια της μοντελοποίησης.

## Αναφορές

---

- Καραβοκυρός, Γ., Ι. Ναλμπάντης, Ν. Μαμάσης, Α. Κουκουβίνος, και Α. Ευστρατιάδης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 1, Ανάλυση απαιτήσεων, 1999.
- ΕΣΥΕ, *Στατιστική επετηρίδα της Ελλάδος 1992-93*, Αθήνα, 1995.
- ΕΥΔΑΠ, *Διαχειριστικό Σχέδιο Υδρευσης* (Μετάφραση από το αγγλικό πρωτότυπο), τεχνική υποστήριξη: Knight Piésold, Δεκέμβριος 1996.
- ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Σύμβαση ερευνητικού έργου, Αθήνα, 1999α.
- ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, *Εκσυγχρονισμός της Εποπτείας και Διαχείρισης του Συστήματος των Υδατικών Πόρων Υδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος προδιαγραφών, Αθήνα, 1999β.
- Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, *Εκσυγχρονισμός της Εποπτείας και Διαχείρισης του Συστήματος των Υδατικών Πόρων Υδρευσης της Αθήνας*, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου εκτίμησης και πρόγνωσης των εισροών και απωλειών των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, Τεύχος 8, Αθήνα, 2000.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Ρόζος, και Δ. Σακελλαριάδης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Περιγραφή υδατικών συστημάτων, Τεύχος 36, 1999.
- Κουκουβίνος, Α., και Α. Χριστοφίδης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Ανάπτυξη συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας για την υδρολογία, τις χρήσεις, και τα έργα αξιοποίησης υδατικών πόρων, Τεύχος 38, 1998.
- Μαρίνος, Π., *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Χάρτης ανάπτυξης καρστικών υδροφοριών, Αρ. Σχεδίου 6, 1995.
- Ξανθάκης, Α., Προσωπική επικοινωνία, 2000.
- Παγούνης, Μ., Υδρογεωλογική έρευνα Νομού Βοιωτίας, ΙΓΜΕ, Αθήνα, 1994.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης*, Υδρογεωλογικό μοντέλο λεκάνης πηγών Βοιωτικού Κηφισού, 2000α.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης* Ανάλυση υδρομετεωρολογικών δεδομένων, Έκθεση Β Φάσης, 2000β.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης* Έκθεση Γ Φάσης, 2000γ.
- Hestenes, M. R., and E. Stiefel, Methods of conjugate gradients for solving linear systems, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 49, 409-436, 1952.
- U.S. Department of Defense, *GMS (Groundwater Modelling System) v. 2.1, Reference Manual*, 1998.

Waterloo Hydrogeologic Inc., *Modflow packages – User`s Guide*, 1999a.

Waterloo Hydrogeologic Inc., *Modflow packages – Reference Manual*, 1999b.

## Κατάλογος συμβόλων

---

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$	Υδραυλική αγωγιμότητα στους κύριους άξονες [ $L T^{-1}$ ]
$h$	Πιεζομετρικό φορτίο [L]
$W$	Όρος πηγής ή καταβόθρας [ $T^{-1}$ ]
$S_s$ (ή SS)	Ειδική αποθήκευση [ $L^{-1}$ ]
$CX, CY, CZ$	Όροι υδραυλικής αγωγιμότητας (conductance) [ $L^2 T^{-1}$ ]
$p, Q$	Όροι εξωτερικής φόρτισης [ $L^3 T^{-1}$ ]
$\Delta V$	Μεταβολή όγκου αποθηκευμένου νερού σε κυψελίδα [ $L^3$ ]
<b>A, M, N</b>	Πίνακες μεθόδου PCG
<b>x, b, s, r, p, a</b>	Διανύσματα μεθόδου PCG
$Q$	Παροχή [ $L^3 T^{-1}$ ]
$P$	Ύψος Βροχόπτωσης [L]
$a, b, \beta, \gamma$	Συντελεστές εξισώσεων οριακών συνθηκών

## Παράρτημα Α – Πίνακες δεδομένων επιφανειακής βροχόπτωσης

Πίνακας Α.1: Μηνιαίο και ετήσιο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης Άνω Ρου Β. Κηφισού (mm).

Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
1966-67				60.5	59.2	81.4	32.2	23.6	3.9	34.6	13.3	62.9	
1967-68	46.1	79.5	149.5	205.4	85.1	91.8	9.2	52.8	21.0	0.0	18.1	17.5	776.0
1968-69	201.7	124.0	356.3	133.7	83.8	104.4	8.5	6.7	6.0	1.6	6.3	57.8	1090.9
1969-70	13.0	55.1	231.0	91.3	79.8	88.5	4.8	71.2	34.8	46.3	3.3	23.4	742.4
1970-71	118.9	40.4	106.6	124.4	159.1	169.4	57.1	11.4	12.5	60.8	26.8	53.2	940.7
1971-72	102.8	67.9	68.7	151.3	106.1	55.3	126.3	30.2	11.0	48.2	61.0	27.6	856.4
1972-73	166.2	76.7	43.9	171.0	81.4	108.1	17.2	12.2	20.3	24.5	34.0	7.6	763.2
1973-74	155.3	90.8	124.4	74.0	183.7	100.2	60.2	36.2	4.1	2.0	3.1	11.5	845.6
1974-75	76.2	111.9	36.1	31.3	213.8	40.0	17.7	42.8	82.4	17.2	53.7	4.3	727.4
1975-76	18.1	91.5	196.7	85.6	169.1	79.7	65.4	26.3	19.2	7.4	22.1	6.5	787.9
1976-77	106.4	84.6	74.1	23.1	24.8	25.0	70.7	8.8	18.0	1.1	3.9	58.8	499.3
1977-78	20.0	115.1	192.2	229.5	94.1	65.8	72.4	14.1	2.9	1.2	4.9	91.8	904.0
1978-79	92.7	127.7	111.7	101.9	79.9	26.4	43.9	75.7	18.4	48.4	14.2	5.9	746.7
1979-80	223.9	183.0	152.2	149.1	95.8	122.9	59.0	34.3	25.2	0.5	5.8	15.2	1066.9
1980-81	273.9	65.5	143.3	283.4	74.2	5.8	76.9	8.6	20.5	0.7	10.2	64.5	1027.5
1981-82	105.3	112.7	143.9	60.8	161.7	203.5	118.9	96.4	29.7	4.8	12.1	24.9	1074.6
1982-83	28.0	160.4	89.4	16.7	64.2	87.5	23.1	19.5	88.8	45.5	32.5	0.9	656.6
1983-84	58.2	96.3	260.3	71.2	169.6	108.2	165.1	23.2	13.2	17.3	39.8	6.0	1028.3
1984-85	25.1	121.8	204.1	184.6	42.3	99.2	52.2	49.6	6.7	14.1	1.2	22.9	823.8
1985-86	113.5	183.6	48.2	80.4	139.6	69.5	14.7	68.5	61.5	38.9	17.3	10.7	846.4
1986-87	163.4	48.8	81.7	141.0	68.1	194.0	100.7	11.5	12.5	1.3	20.5	0.1	843.7
1987-88	116.5	102.7	43.6	78.6	158.8	100.2	34.5	27.4	15.1	0.0	0.2	2.1	679.8
1988-89	55.7	204.2	150.1	16.5	78.0	186.9	21.1	39.3	16.5	46.8	5.5	18.6	839.4
1989-90	92.9	102.3	110.6	11.7	52.3	27.7	59.8	27.1	21.4	6.8	131.0	53.1	696.8
1990-91	42.7	169.7	251.0	152.4	65.4	91.1	122.8	53.8	0.6	16.4	66.3	4.6	1036.9
1991-92	78.7	105.6	52.1	22.4	71.3	51.8	58.7	80.7	74.2	6.7	5.5	5.5	613.1
1992-93	31.7	58.1	91.4	47.7	129.4	61.3	23.5	93.5	5.7	0.0	0.1	2.3	544.7
1993-94	2.4	265.8	77.4	144.0	160.3	51.4	55.7	57.9	15.0	27.3	26.7	0.6	884.4
1994-95	171.4	117.0	116.1	120.8	9.7	157.3	34.0	12.7	5.3	48.3	33.9	39.4	866.0
1995-96	50.4	76.4	162.2	161.7	159.5	147.0	20.9	32.6	2.4	10.0	31.4	23.7	878.3
1996-97	72.7	45.3	127.6	225.5	44.6	117.3	65.4	29.6	10.7	0.7	42.2	7.8	789.5
Μ. Τιμή	94.1	109.5	133.2	111.3	102.1	94.2	54.6	38.0	21.9	18.7	24.1	23.6	829.2
Τυπ. Απ..	67.5	51.8	74.8	70.6	52.0	50.8	39.3	25.9	23.2	19.7	26.9	24.3	152.6
Ασυμ.	0.865	1.180	1.068	0.480	0.375	0.514	1.041	0.821	1.903	0.730	2.352	1.190	-0.102
Αυτοσυσ.	0.121	-0.067	0.093	0.085	-0.209	-0.208	-0.100	-0.057	-0.208	0.116	0.185	0.155	-0.137



Πίνακας Α.2: Μηνιαίο και ετήσιο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης Μέσου Ρου Β. Κηφισού (mm).

Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
1966-67				26.6	35.8	95.6	36.3	61.7	7.5	33.6	34.5	90.8	
1967-68	59.3	91.3	95.1	84.1	73.4	77.5	9.9	47.2	17.0	0.0	27.5	8.9	591.3
1968-69	139.0	126.5	256.2	107.3	51.9	63.1	9.9	3.9	3.2	7.4	1.4	92.6	862.6
1969-70	6.1	34.8	173.2	57.3	59.7	83.9	7.0	68.4	34.3	33.2	1.0	31.1	590.1
1970-71	92.7	23.2	92.4	54.9	117.6	92.9	44.6	14.7	18.5	18.8	58.8	31.4	660.5
1971-72	70.7	50.3	97.2	180.4	130.8	40.5	146.1	42.0	1.8	80.6	57.6	25.7	923.7
1972-73	141.6	7.5	27.1	129.5	38.5	67.6	11.4	10.1	15.7	50.3	0.3	32.2	531.7
1973-74	117.5	88.7	64.0	83.3	110.0	101.8	28.9	27.7	8.6	0.5	0.7	3.0	634.6
1974-75	81.3	93.5	49.4	20.0	116.1	56.7	32.0	39.3	84.5	15.5	20.6	7.5	616.4
1975-76	16.5	78.0	181.6	56.8	184.8	76.0	55.2	30.4	27.8	18.4	14.8	4.8	745.3
1976-77	81.8	59.7	58.9	18.4	19.1	7.8	53.7	1.8	23.0	4.0	1.7	37.0	367.0
1977-78	21.8	50.0	150.2	163.1	72.2	17.4	69.6	17.5	0.9	1.1	6.7	58.3	628.8
1978-79	66.6	67.9	147.3	69.2	65.2	22.5	40.4	72.1	1.8	33.0	36.1	4.7	626.8
1979-80	208.5	109.4	119.7	93.2	85.2	103.4	54.7	31.1	20.6	0.2	15.5	10.7	852.4
1980-81	244.5	29.9	103.3	225.2	42.8	5.1	62.3	5.0	6.3	2.3	19.0	36.3	782.0
1981-82	53.9	102.8	100.0	61.5	135.1	156.3	128.0	87.5	6.6	4.7	5.7	10.4	852.5
1982-83	22.0	122.3	56.9	11.6	30.4	71.0	10.0	16.7	74.4	56.5	28.3	0.0	500.0
1983-84	51.9	75.3	185.2	60.1	135.9	105.8	117.4	17.4	8.5	10.9	56.4	1.4	826.3
1984-85	17.8	53.2	208.5	115.9	23.1	93.2	36.2	25.2	0.0	1.5	0.0	39.7	614.3
1985-86	95.9	123.5	56.8	39.6	86.1	42.3	5.7	52.0	18.2	16.3	3.7	6.3	546.5
1986-87	192.9	47.8	19.2	103.3	60.6	152.2	114.3	7.0	6.9	0.7	20.5	0.2	725.5
1987-88	109.8	86.1	46.4	109.5	101.3	90.5	29.0	3.8	16.1	0.1	0.1	1.1	593.8
1988-89	48.9	161.0	96.5	8.2	34.3	89.4	14.3	16.9	3.2	16.3	8.6	3.4	501.0
1989-90	26.5	70.1	105.3	8.1	33.3	17.1	45.2	38.8	2.4	5.0	57.4	37.1	446.3
1990-91	28.7	150.7	143.3	130.8	61.2	107.7	77.8	24.9	2.5	14.5	37.4	0.2	779.8
1991-92	71.4	62.0	28.2	23.4	61.8	49.1	45.1	62.0	72.4	7.4	14.6	2.7	500.1
1992-93	32.0	42.5	81.7	81.8	90.2	27.7	19.1	67.4	4.7	0.0	3.6	0.2	450.9
1993-94	0.6	240.3	24.9	149.6	198.6	37.3	46.4	58.7	13.1	49.3	9.9	0.0	828.6
1994-95	244.4	91.6	79.8	70.5	2.3	140.8	20.4	4.5	0.8	18.6	23.3	19.7	716.8
1995-96	30.0	44.8	212.0	162.4	143.3	70.4	18.4	46.1	0.0	13.0	53.3	53.3	847.1
1996-97	95.6	13.2	83.7	143.8	60.0	118.2	52.8	12.9	10.3	5.9	32.9	3.9	633.2
Μ. Τιμή	82.3	79.9	104.8	85.5	79.4	73.6	46.5	32.7	16.5	16.8	21.0	21.1	659.2
Τυπ. Απ..	67.8	49.0	61.7	56.1	48.2	40.8	37.0	24.2	22.0	19.8	19.7	25.4	146.5
Ασυσμ.	1.143	1.260	0.708	0.535	0.745	0.144	1.280	0.537	2.179	1.657	0.757	1.531	0.022
Αυτοσυσ.	0.043	-0.049	0.126	-0.026	-0.389	-0.182	-0.183	-0.232	-0.092	0.113	0.133	0.062	-0.152

Πίνακας Α.3: Μηνιαίο και ετήσιο ύψος επιφανειακής βροχόπτωσης Κάτω Ρου Β. Κηφισού (mm).

Έτος	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
1966-67				40.3	94.3	128.8	36.8	21.3	11.4	13.9	26.7	33.6	
1967-68	107.2	80.9	155.0	127.2	92.2	100.4	13.5	33.3	39.9	0.0	16.3	31.9	797.9
1968-69	188.3	124.4	276.5	105.3	33.9	86.7	16.6	1.7	3.2	1.8	1.2	29.9	869.5
1969-70	4.8	35.8	193.6	52.2	60.0	86.5	2.1	69.2	39.6	52.5	1.2	37.7	635.2
1970-71	111.2	32.2	88.3	71.3	107.0	116.8	41.7	10.6	10.9	28.1	55.1	37.4	710.4
1971-72	98.3	70.3	63.4	177.6	82.0	43.1	95.6	34.4	5.9	52.1	58.2	20.6	801.3
1972-73	100.4	37.0	38.8	155.2	58.6	52.4	12.9	12.0	22.8	50.0	10.6	35.1	585.9
1973-74	66.9	73.7	68.5	101.6	150.7	90.3	31.8	32.2	20.7	0.4	1.1	11.4	649.4
1974-75	33.1	90.7	35.3	60.1	153.4	49.1	11.6	35.0	59.2	6.6	17.5	20.2	572.0
1975-76	17.7	81.1	184.8	76.1	177.4	51.1	55.6	13.4	5.7	7.5	16.6	4.0	690.9
1976-77	85.7	61.1	52.8	17.9	10.3	19.0	48.0	0.6	35.3	0.6	3.1	44.6	379.0
1977-78	22.4	62.5	227.4	154.4	91.2	41.1	64.1	15.1	3.5	0.0	7.9	71.0	760.6
1978-79	67.2	72.7	157.2	75.0	70.9	22.1	33.1	42.5	8.3	28.2	33.5	12.8	623.4
1979-80	225.1	124.8	97.8	110.9	95.1	105.9	69.2	44.3	20.8	0.1	8.6	14.5	917.0
1980-81	146.4	57.0	123.0	251.9	48.5	5.0	67.2	7.4	4.4	0.1	9.6	36.4	756.9
1981-82	61.0	94.4	80.9	65.6	142.1	152.3	147.6	65.4	11.9	8.0	7.8	11.4	848.3
1982-83	34.9	131.2	56.3	27.6	114.4	40.6	4.3	12.1	99.3	19.6	13.3	0.0	553.6
1983-84	34.5	85.3	172.5	84.1	115.7	119.6	136.6	15.1	1.4	6.5	53.1	1.0	825.3
1984-85	4.6	80.0	165.7	136.7	77.3	76.1	33.8	20.9	1.2	1.0	0.6	15.7	613.6
1985-86	99.4	114.7	62.7	40.0	95.8	39.4	10.9	51.4	12.9	12.4	2.0	1.9	543.7
1986-87	201.8	24.4	73.4	90.0	77.7	172.7	85.3	5.6	9.4	4.5	17.0	0.1	761.9
1987-88	84.6	64.9	61.2	105.7	126.9	108.5	32.0	11.3	20.6	0.0	0.1	9.8	625.6
1988-89	66.5	175.2	165.9	5.0	34.0	112.6	15.1	21.6	7.9	10.3	4.1	5.3	623.4
1989-90	85.3	66.8	97.4	4.4	30.5	29.6	39.6	14.7	10.5	2.2	80.2	15.1	476.2
1990-91	47.3	108.3	153.5	129.4	75.2	90.5	87.8	38.1	0.7	9.7	40.7	0.2	781.5
1991-92	65.7	102.1	100.5	34.6	48.0	49.9	33.7	54.1	28.6	1.1	2.1	1.6	522.0
1992-93	33.3	51.1	74.2	72.3	88.6	38.8	14.4	94.5	1.7	0.1	2.5	1.5	472.9
1993-94	0.4	228.8	43.9	164.9	183.1	62.2	32.3	61.2	6.0	15.0	10.6	0.2	808.6
1994-95	193.7	113.3	73.7	160.5	6.0	118.5	30.4	3.5	5.8	8.9	3.6	22.5	740.5
1995-96	29.6	64.7	137.8	139.4	127.0	89.6	15.1	51.0	0.8	3.5	10.7	29.6	698.8
1996-97	65.6	24.4	90.8	174.0	45.5	111.4	46.9	24.8	5.9	0.3	10.9	1.1	601.6
Μ. Τιμή	79.4	84.5	112.4	97.1	87.5	77.8	44.0	29.6	16.6	11.1	17.0	18.0	674.9
Τ. Απ.	60.5	44.1	60.7	58.5	45.6	41.5	36.1	23.0	20.7	15.5	20.3	17.2	131.1
Ασυμ.	0.965	1.361	0.886	0.459	0.273	0.269	1.412	0.946	2.559	1.844	1.716	1.065	-0.207
Αυτο..	0.014	-0.055	0.184	0.113	-0.161	-0.166	-0.155	-0.032	-0.190	0.356	0.135	0.366	-0.143

Πίνακας Α.4: Ετεροσυσχέτιση μηνιαίου και ετήσιου ύψους επιφανειακής βροχόπτωσης Άνω (1), Μέσου (2) και Κάτω Ρου (3) Β. Κηφισού.

	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Έτος
r12	0.920	0.902	0.871	0.870	0.851	0.843	0.928	0.853	0.898	0.697	0.667	0.790	0.818
r13	0.854	0.925	0.878	0.892	0.843	0.861	0.938	0.891	0.775	0.712	0.783	0.810	0.871
r23	0.876	0.933	0.848	0.931	0.840	0.914	0.931	0.841	0.818	0.821	0.850	0.704	0.888

## Παράρτημα Β – Υδατικά ισοζύγια υδροφορέα

### Υδατικά ισοζύγια διαχειριστικού σεναρίου 1

\*\*\*\* Simulation number 1 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1200700544.0000	STORAGE =	333096.7812
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	563874304.0000	WELLS =	108591.8750
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	450636768.0000	RIVER LEAKAGE =	46799.9805
RECHARGE =	1341751168.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3556962816.0000	TOTAL IN =	488488.6250
OUT:		OUT:	
STORAGE =	990347712.0000	STORAGE =	58231.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	701817984.0000	WELLS =	179877.7031
DRAINS =	1751308160.0000	DRAINS =	250380.2031
RIVER LEAKAGE =	113487424.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3556961280.0000	TOTAL OUT =	488488.9062
IN - OUT =	1536.0000	IN - OUT =	-0.2812
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1  
 \*\*\*\* Simulation number 2 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1211115648.0000	STORAGE =	276909.3750
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000

WELLS =	537642368.0000	WELLS =	119437.8828
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	433290496.0000	RIVER LEAKAGE =	52915.1562
RECHARGE =	1135320448.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3317368832.0000	TOTAL IN =	449262.4062
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	916819968.0000	STORAGE =	56421.6836
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	695962880.0000	WELLS =	185393.8594
DRAINS =	1609779328.0000	DRAINS =	207448.1406
RIVER LEAKAGE =	94805184.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3317367552.0000	TOTAL OUT =	449263.6875
IN - OUT =	1280.0000	IN - OUT =	-1.2812
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1  
 \*\*\*\* Simulation number 3 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
----		----	
STORAGE =	1251240064.0000	STORAGE =	324439.9062
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	560842752.0000	WELLS =	110431.6172
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	438800288.0000	RIVER LEAKAGE =	46799.9805
RECHARGE =	1349561472.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3600444416.0000	TOTAL IN =	481671.5000
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	1025703168.0000	STORAGE =	57867.7773
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	700265856.0000	WELLS =	182635.7812
DRAINS =	1745936512.0000	DRAINS =	241169.9375
RIVER LEAKAGE =	128539576.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3600445184.0000	TOTAL OUT =	481673.5000
IN - OUT =	-768.0000	IN - OUT =	-2.0000
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 4 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1271568512.0000	STORAGE =	342320.3750
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	570519680.0000	WELLS =	111675.4141
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	445762496.0000	RIVER LEAKAGE =	47642.3359
RECHARGE =	1413719040.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3701569792.0000	TOTAL IN =	501638.1250
OUT:		OUT:	
STORAGE =	1071701952.0000	STORAGE =	62916.5938
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	701531968.0000	WELLS =	183696.5781
DRAINS =	1796241536.0000	DRAINS =	255024.6875
RIVER LEAKAGE =	132093000.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3701568512.0000	TOTAL OUT =	501637.8750
IN - OUT =	1280.0000	IN - OUT =	0.2500
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 5 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1226977024.0000	STORAGE =	349461.1250
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	561489664.0000	WELLS =	111675.4141

DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	445661888.0000	RIVER LEAKAGE =	46799.9805
RECHARGE =	1394826880.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3628955648.0000	TOTAL IN =	507936.5000
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	1046367872.0000	STORAGE =	65905.4453
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	701347648.0000	WELLS =	180514.1719
DRAINS =	1765222656.0000	DRAINS =	261516.8281
RIVER LEAKAGE =	116016288.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3628954624.0000	TOTAL OUT =	507936.4375
IN - OUT =	1024.0000	IN - OUT =	6.2500E-02
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\*

Simulation number 6

\*\*\*\*

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
----		----	
STORAGE =	1282957440.0000	STORAGE =	356600.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	579379328.0000	WELLS =	107985.4375
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	448721856.0000	RIVER LEAKAGE =	46799.9805
RECHARGE =	1513706880.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3824765440.0000	TOTAL IN =	511385.4062
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	1117847680.0000	STORAGE =	67396.7734
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	703460800.0000	WELLS =	180514.1719
DRAINS =	1863945984.0000	DRAINS =	263475.4688
RIVER LEAKAGE =	139514704.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3824769024.0000	TOTAL OUT =	511386.4062
IN - OUT =	-3584.0000	IN - OUT =	-1.0000
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 7 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1194309760.0000	STORAGE =	237279.8125
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	525792768.0000	WELLS =	136619.0625
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	426842688.0000	RIVER LEAKAGE =	51199.2031
RECHARGE =	1046433152.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3193378304.0000	TOTAL IN =	425098.0625
OUT:		OUT:	
STORAGE =	865215808.0000	STORAGE =	51804.3320
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	694084992.0000	WELLS =	184333.0625
DRAINS =	1545716992.0000	DRAINS =	188960.6250
RIVER LEAKAGE =	88362080.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3193379840.0000	TOTAL OUT =	425098.0000
IN - OUT =	-1536.0000	IN - OUT =	6.2500E-02
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 8 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1204281472.0000	STORAGE =	301161.5312
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	537514944.0000	WELLS =	109814.9375
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000

RIVER LEAKAGE =	429048128.0000	RIVER LEAKAGE =	55941.5977
RECHARGE =	1175154176.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3345998592.0000	TOTAL IN =	466918.0625
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	929776000.0000	STORAGE =	55709.9180
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	695593984.0000	WELLS =	186242.5000
DRAINS =	1620019072.0000	DRAINS =	224963.6094
RIVER LEAKAGE =	100610080.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3345999104.0000	TOTAL OUT =	466916.0312
IN - OUT =	-512.0000	IN - OUT =	2.0312
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 9 \*\*\*\*

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
----		----	
STORAGE =	1275476224.0000	STORAGE =	313476.8750
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	553376320.0000	WELLS =	112933.2188
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	440277632.0000	RIVER LEAKAGE =	54506.2305
RECHARGE =	1274216192.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3543346432.0000	TOTAL IN =	480916.3125
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	1030535936.0000	STORAGE =	58929.1719
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	698533248.0000	WELLS =	185606.0156
DRAINS =	1701577600.0000	DRAINS =	236380.6875
RIVER LEAKAGE =	112700584.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3543347456.0000	TOTAL OUT =	480915.8750
IN - OUT =	-1024.0000	IN - OUT =	0.4375
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00



TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 10 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1390555904.0000	STORAGE =	332502.6562
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	608785664.0000	WELLS =	129178.6641
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	453055712.0000	RIVER LEAKAGE =	46799.9805
RECHARGE =	1717245184.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	4169642496.0000	TOTAL IN =	508481.2812
OUT:		OUT:	
STORAGE =	1238737152.0000	STORAGE =	66645.5234
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	707851840.0000	WELLS =	179877.7031
DRAINS =	2034639104.0000	DRAINS =	261957.7188
RIVER LEAKAGE =	188415328.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	4169643264.0000	TOTAL OUT =	508480.9375
IN - OUT =	-768.0000	IN - OUT =	0.3438
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

## Υδατικά ισοζύγια διαχειριστικού σεναρίου 2

\*\*\*\* Simulation number 1 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	

```

---
STORAGE = 1255071104.0000
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 563874304.0000
DRAINS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 476416064.0000
RECHARGE = 1341751168.0000

TOTAL IN = 3637112832.0000

OUT:
----
STORAGE = 956313152.0000
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 1194968704.0000
DRAINS = 1425952896.0000
RIVER LEAKAGE = 59877848.0000
RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 3637112832.0000

IN - OUT = 0.0000

PERCENT DISCREPANCY = 0.00

```

```

---
STORAGE = 371855.8438
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 108591.8750
DRAINS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 39499.1836
RECHARGE = 0.0000

TOTAL IN = 519946.9062

OUT:
----
STORAGE = 19871.8711
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 316863.6875
DRAINS = 183210.9219
RIVER LEAKAGE = 0.0000
RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 519946.5000

IN - OUT = 0.4062

PERCENT DISCREPANCY = 0.00

```

```

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120
          SECONDS      MINUTES      HOURS      DAYS      YEARS
-----
TIME STEP LENGTH 5.15209E+05  8586.8    143.11    5.9631    1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME 2.59200E+06  43200.    720.00    30.000    8.21356E-02
TOTAL TIME 3.11041E+08  5.18402E+06  86400.    3600.0    9.8563

```

```

1
**** Simulation number 2 ****
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120
-----

```

```

CUMULATIVE VOLUMES      L**3      RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
-----
IN:
---
STORAGE = 1276186752.0000
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 537642368.0000
DRAINS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 453262912.0000
RECHARGE = 1135320448.0000

TOTAL IN = 3402412544.0000

OUT:
----
STORAGE = 879701824.0000
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 1189112192.0000
DRAINS = 1282708096.0000
RIVER LEAKAGE = 50889240.0000
RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 3402411520.0000

IN - OUT = 1024.0000

```

```

IN:
---
STORAGE = 322840.2500
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 119437.8828
DRAINS = 0.0000
RIVER LEAKAGE = 52915.1562
RECHARGE = 0.0000

TOTAL IN = 495193.2812

OUT:
----
STORAGE = 28599.9395
CONSTANT HEAD = 0.0000
WELLS = 322379.8438
DRAINS = 144213.1719
RIVER LEAKAGE = 0.0000
RECHARGE = 0.0000

TOTAL OUT = 495192.9375

IN - OUT = 0.3438

```

PERCENT DISCREPANCY = 0.00 PERCENT DISCREPANCY = 0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 3 \*\*\*\*

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1314990592.0000	STORAGE =	364112.5000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	560842752.0000	WELLS =	110431.6172
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	463347520.0000	RIVER LEAKAGE =	45364.6172
RECHARGE =	1349561472.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3688742400.0000	TOTAL IN =	519908.7500
OUT:		OUT:	
STORAGE =	997359808.0000	STORAGE =	21376.6348
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1193414400.0000	WELLS =	319621.7812
DRAINS =	1423285632.0000	DRAINS =	178910.6562
RIVER LEAKAGE =	74682176.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3688742144.0000	TOTAL OUT =	519909.0625
IN - OUT =	256.0000	IN - OUT =	-0.3125
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 4 \*\*\*\*

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
---		---	

STORAGE =	1326052736.0000	STORAGE =	378188.6875
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	570519680.0000	WELLS =	111675.4141
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	468834912.0000	RIVER LEAKAGE =	47642.3359
RECHARGE =	1413719040.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3779126272.0000	TOTAL IN =	537506.4375
OUT:		OUT:	
-----		-----	
STORAGE =	1042192576.0000	STORAGE =	24526.5332
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1194681728.0000	WELLS =	320682.5938
DRAINS =	1467786240.0000	DRAINS =	192299.1094
RIVER LEAKAGE =	74464368.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3779124736.0000	TOTAL OUT =	537508.2500
IN - OUT =	1536.0000	IN - OUT =	-1.8125
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1  
 \*\*\*\* Simulation number 5 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
-----		-----	
IN:		IN:	
---		---	
STORAGE =	1279822848.0000	STORAGE =	384877.0312
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	561489664.0000	WELLS =	111675.4141
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	470277504.0000	RIVER LEAKAGE =	37034.3086
RECHARGE =	1394826880.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3706416640.0000	TOTAL IN =	533586.7500
OUT:		OUT:	
-----		-----	
STORAGE =	1018964160.0000	STORAGE =	23939.9492
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1194497024.0000	WELLS =	317500.1875
DRAINS =	1432288128.0000	DRAINS =	192143.8125
RIVER LEAKAGE =	60664876.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3706414080.0000	TOTAL OUT =	533583.9375
IN - OUT =	2560.0000	IN - OUT =	2.8125
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 6 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1332564608.0000	STORAGE =	391068.9688
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	579379328.0000	WELLS =	107985.4375
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	472315200.0000	RIVER LEAKAGE =	35786.3008
RECHARGE =	1513706880.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3897966080.0000	TOTAL IN =	534840.6875
OUT:		OUT:	
STORAGE =	1094182016.0000	STORAGE =	26874.6621
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1196609664.0000	WELLS =	317500.1875
DRAINS =	1535514112.0000	DRAINS =	190466.0625
RIVER LEAKAGE =	71662368.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3897968128.0000	TOTAL OUT =	534840.8750
IN - OUT =	-2048.0000	IN - OUT =	-0.1875
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 7 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1270055424.0000	STORAGE =	285625.6250

CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	525792768.0000	WELLS =	136619.0625
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	446832448.0000	RIVER LEAKAGE =	51199.2031
RECHARGE =	1046433152.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3289113600.0000	TOTAL IN =	473443.8750
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	824384896.0000	STORAGE =	30673.4746
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1187233920.0000	WELLS =	321319.0625
DRAINS =	1228533504.0000	DRAINS =	121450.6953
RIVER LEAKAGE =	48960884.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3289113088.0000	TOTAL OUT =	473443.2188
IN - OUT =	512.0000	IN - OUT =	0.6562
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1

\*\*\*\* Simulation number 8 \*\*\*\*  
VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
----		----	
STORAGE =	1274186880.0000	STORAGE =	343667.4062
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	537514944.0000	WELLS =	109814.9375
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	446999936.0000	RIVER LEAKAGE =	55941.5977
RECHARGE =	1175154176.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3433856000.0000	TOTAL IN =	509423.9375
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	894213184.0000	STORAGE =	26595.7676
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1188743680.0000	WELLS =	323228.5000
DRAINS =	1295391872.0000	DRAINS =	159600.3906
RIVER LEAKAGE =	55507648.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3433856256.0000	TOTAL OUT =	509424.6875
IN - OUT =	-256.0000	IN - OUT =	-0.7500
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1  
 \*\*\*\* Simulation number 9 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	
STORAGE =	1334383872.0000	STORAGE =	356191.2188
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	553376320.0000	WELLS =	112933.2188
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	461460736.0000	RIVER LEAKAGE =	54506.2305
RECHARGE =	1274216192.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	3623437056.0000	TOTAL IN =	523630.6562
OUT:		OUT:	
STORAGE =	996977856.0000	STORAGE =	24672.9141
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1191684096.0000	WELLS =	322592.0312
DRAINS =	1374087168.0000	DRAINS =	176364.0938
RIVER LEAKAGE =	60685468.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	3623434752.0000	TOTAL OUT =	523629.0312
IN - OUT =	2304.0000	IN - OUT =	1.6250
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1  
 \*\*\*\* Simulation number 10 \*\*\*\*  
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

CUMULATIVE VOLUMES	L**3	RATES FOR THIS TIME STEP	L**3/T
IN:		IN:	

STORAGE =	1441165824.0000	STORAGE =	370728.5000
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	608785664.0000	WELLS =	129178.6641
DRAINS =	0.0000	DRAINS =	0.0000
RIVER LEAKAGE =	473989024.0000	RIVER LEAKAGE =	38531.5625
RECHARGE =	1717245184.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL IN =	4241185792.0000	TOTAL IN =	538438.7500
OUT:		OUT:	
----		----	
STORAGE =	1220117632.0000	STORAGE =	24812.5254
CONSTANT HEAD =	0.0000	CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	1201002112.0000	WELLS =	316863.6875
DRAINS =	1716330496.0000	DRAINS =	196762.1875
RIVER LEAKAGE =	103735816.0000	RIVER LEAKAGE =	0.0000
RECHARGE =	0.0000	RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	4241186048.0000	TOTAL OUT =	538438.3750
IN - OUT =	-256.0000	IN - OUT =	0.3750
PERCENT DISCREPANCY =	0.00	PERCENT DISCREPANCY =	0.00

TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD120

	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	5.15209E+05	8586.8	143.11	5.9631	1.63260E-02
STRESS PERIOD TIME	2.59200E+06	43200.	720.00	30.000	8.21356E-02
TOTAL TIME	3.11041E+08	5.18402E+06	86400.	3600.0	9.8563

1