



ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΚΑΙ
ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών
και Θαλάσσιων Έργων

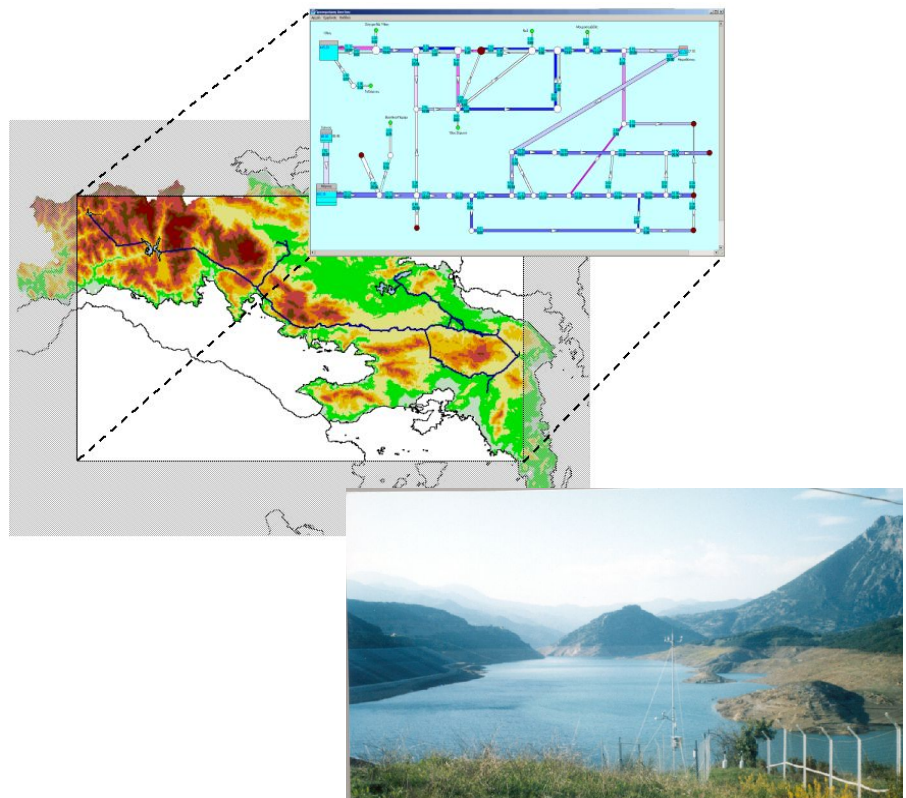
ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Τεύχος 21:

Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου
στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης

Επιστημονικός
υπεύθυνος:
Δ. Κουτσογιάννης,
Αν. Καθηγητής

Σύνταξη:
Α. Ευστρατιάδης,
Ι. Ναλμπάντης,
Ε. Ρόζος



Αθήνα, Ιανουάριος 2004

Περίληψη

Αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο πληροφορικό σύστημα που επιτρέπει την προσομοίωση των κύριων διεργασιών του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του ποταμού Βοιωτικού Κηφισού. Πρόκειται για τις διεργασίες τόσο του επιφανειακού νερού (βροχόπτωση, διήθηση, άμεση απορροή), όσο και για του υπόγειου νερού (κατεισδυσή, βαθιά διήθηση, απορροή πηγών, εκροές προς θάλασσα). Το μοντέλο της επιφανειακής υδρολογίας αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του γνωστού από τη βιβλιογραφία μοντέλου του Thornthwaite. Η μοντελοποίηση των επιφανειακών διεργασιών γίνεται σε κλίμακα ενός τμήματος της λεκάνης, τη μονάδα υδρολογικής απόκρισης (MYA), που είναι ομογενές ως προς τις υδρολογικές εισόδους (βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή). Η υπόγεια ροή προσομοιώνεται με σύστημα δεξαμενών διασυνδεδεμένων με αγωγούς στους οποίους η ροή ακολουθεί την εξίσωση Darcy. Τα δύο μοντέλα συμπληρώνονται από τρίτο μοντέλο που, με απλό τρόπο, πραγματοποιεί την κατανομή των απολήψεων από τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά για την ικανοποίηση της ζήτησης σε διάφορα σημεία κατανάλωσης. Το πληροφορικό σύστημα περιλαμβάνει τέσσερα υποσυστήματα: (α) εισαγωγής και αποθήκευσης δεδομένων, (β) οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων, (γ) προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών, και (δ) βαθμονόμησης παραμέτρων. Σε παράρτημα, δίνονται εκτεταμένες οδηγίες χρήσης του συστήματος. Αυτό εφαρμόστηκε πιλοτικά στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού για την οποία βαθμονομήθηκαν και επικυρώθηκαν τα μοντέλα. Το τεύχος περιλαμβάνει εκτεταμένες αναλύσεις της υδρομετεωρολογικής και υδρολογικής πληροφορίας στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, οι οποίες είχαν ως στόχο την παραγωγή όσο το δυνατό καλύτερη πληροφορίας εισόδου στο σύστημα που αναπτύχθηκε. Τέλος, πολύ μεγάλη προσπάθεια καταβλήθηκε για τη διερευνητική ανάλυση των δεδομένων στη λεκάνη της Υλίκης τα οποία, όμως, δεν επέτρεπαν την κατάρτιση μοντέλου – ούτε, έστω, ημικατανεμημένου. Η ανάλυση οδήγησε στην κατάρτιση απλού μοντέλου των διαφυγών της λίμνης που είναι σημαντικά βελτιωμένο σε σχέση με τις απλές σχέσεις που είχαν προταθεί στο παρελθόν. Ακόμη, γίνονται σχόλια για το υδατικό δυναμικό των υπολοίπων, πλην εκείνου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, υδροφορέων του εντάσσονται στους υδατικού πόρους για ύδρευση της Αθήνας.

Abstract

An integrated information system is developed for simulating main processes of the hydrological cycle in Boeoticos Kephisos Basin. Both surface (rainfall, evapotranspiration, direct runoff) and subsurface processes (percolation, spring runoff, outflow to the sea) are modeled. The surface hydrology model is an enhanced version of the well-known model of Thornthwaite. The Hydrological Response Unit (HRU) serves as the basis for modeling. This is a hydrologically homogeneous part of the basin (in regard to inputs). Groundwater flow is Darcian and is supposed to take place between tanks that are linked to each other through conduits. Besides the two models, a third model that allocates water demand - which is supposed concentrated at some consumption points - between various water resources. The information system consists of four subsystems: (a) the subsystem for entry and storage of data, (b) the subsystem for organizing and visualising data, (c) the subsystem for simulation of hydrological processes, and (d) the parameter calibration subsystem. In an annex, extensive guidelines for the system's users are given. The models were calibrated and validated for the Boeoticos Kephisos Basin. This volume contains also extensive analyses of the hydrometeorological and hydrological information in the Boeoticos Kephisos Basin which led to maximising the quality of inputs to the system. Last, great effort was put in an exploratory analysis of various data of both Lake Yliki and its own basin which could not support any detailed model – even a semi-distributed one. Analysis led to a simple model for the lake's leakages which is significantly ameliorated in regard to older approaches. Also, comments are made on the potential of aquifers other than that of the Boeoticos Kephisos Basin. These aquifers are reserved mostly for water supply of the Athens Metropolitan Area.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορικό	1
1.2	Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους	1
2	Θεωρητικό υπόβαθρο	5
2.1	Γενικά	5
2.1.1	Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων	5
2.1.2	Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων	6
2.2	Ανάπτυξη ολοκληρωμένου πλαισίου προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών	7
2.2.1	Προσομοίωση επιφανειακών διεργασιών	7
2.2.2	Προσομοίωση υπόγειων διεργασιών	11
2.2.3	Σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών	13
2.2.4	Μοντέλο κατανομής απολήψεων	15
2.3	Βαθμονόμηση μοντέλου	17
2.3.1	Τοποθέτηση του προβλήματος	17
2.3.2	Θεμελιώδεις έννοιες σχήματος βελτιστοποίησης	18
2.3.3	Περιγραφή του αλγορίθμου	20
3	Δεδομένα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού	23
3.1	Γεωγραφικά δεδομένα	23
3.1.1	Γεωγραφική τοποθέτηση	23
3.1.2	Υδρογραφικό δίκτυο	24
3.1.3	Καρστικές πηγές	25
3.2	Δεδομένα επιφανειακής υδρολογίας	26
3.2.1	Βροχομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	26
3.2.2	Ανάλυση μακροχρόνιας εξέλιξης βροχοπτώσεων	28
3.2.3	Διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου	29
3.2.4	Χρονική μετατόπιση ημερήσιων δειγμάτων βροχόπτωσης	30
3.2.5	Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχοπτώσεων	31
3.2.6	Μετρήσεις χιονόπτωσης	32
3.2.7	Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	34
3.2.8	Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων στην έξοδο της λεκάνης	35
3.2.9	Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού	37
3.2.10	Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων πηγών	45
3.3	Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας	57
3.3.1	Παρατηρήσεις στάθμης υπόγειου νερού	57
3.3.2	Γεωτρήσεις	58
3.4	Δεδομένα υδατικών αναγκών	61
3.4.1	Αρδευτικές ανάγκες	61

3.4.2	Απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας.....	64
3.4.3	Λοιπές χρήσεις νερού.....	64
4	Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών	65
4.1	Ανάλυση απαιτήσεων και συμμόρφωση προς αυτές.....	65
4.1.1	Γενικά.....	65
4.1.2	Γενικές απαιτήσεις του συστήματος.....	65
4.1.3	Γενικές απαιτήσεις μαθηματικού μοντέλου.....	66
4.1.4	Απαιτήσεις σε δεδομένα.....	67
4.1.5	Απαιτήσεις σε εξαγόμενα.....	68
4.1.6	Συμμόρφωση στις μη λειτουργικές απαιτήσεις.....	69
4.2	Δομή και συνιστώσες υπολογιστικού συστήματος.....	70
4.2.1	Υποσύστημα ανάκτησης και αποθήκευσης δεδομένων.....	72
4.2.2	Υποσύστημα οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων.....	73
4.2.3	Υποσύστημα προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών.....	73
4.2.4	Υποσύστημα βαθμονόμησης παραμέτρων.....	73
5	Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού	74
5.1	Σκοπός και περιορισμοί του μοντέλου.....	74
5.2	Μαθηματική δομή μοντέλου προσομοίωσης.....	74
5.2.1	Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής.....	75
5.2.2	Σχηματοποίηση υδροφορέα.....	75
5.2.3	Σχηματοποίηση υδροσυστήματος.....	78
5.3	Ιστορικές χρονοσειρές.....	80
5.3.1	Περίοδος ελέγχου.....	80
5.3.2	Υδρολογικές χρονοσειρές.....	81
5.3.3	Χρονοσειρές υδατικών αναγκών.....	81
5.3.4	Χρονοσειρές ελέγχου.....	82
5.4	Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης.....	83
5.4.1	Μεταβλητές ελέγχου.....	83
5.4.2	Αντικειμενική συνάρτηση.....	84
5.4.3	Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης.....	87
5.4.4	Εμπειρικά κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων.....	87
5.4.5	Επιλογή πλέον συμβιβαστικής λύσης.....	88
5.5	Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης.....	89
5.5.1	Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών.....	89
5.5.2	Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων διεργασιών.....	91
5.5.3	Κριτήρια καλής προσαρμογής.....	92
5.5.4	Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης.....	95
6	Προετοιμασία μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση	97
6.1	Τοποθέτηση του προβλήματος της επιχειρησιακής χρήσης - Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης.....	97
6.2	Ρύθμιση αρχικών συνθηκών.....	98

6.3	Ένταξη του συστήματος στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων – Σύνδεση με τα προγράμματα Κασταλία και Υδρονομείας	99
7	Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών Υλίκης	101
7.1	Τοποθέτηση του προβλήματος	101
7.2	Περιοχή μελέτης και δεδομένα.....	101
7.2.1	Φυσιογραφία περιοχής μελέτης	101
7.2.2	Βροχομετρικοί σταθμοί.....	102
7.2.3	Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης.....	103
7.2.4	Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας	103
7.2.5	Μετρήσεις παροχής.....	105
7.3	Μοντέλο υπόγειων διαφυγών Υλίκης.....	105
7.3.1	Γενικά.....	105
7.3.2	Κατάρτιση χρονοσειράς υπόγειων διαφυγών.....	105
7.3.3	Ιστορικό συσχέτισης υπόγειων διαφυγών - στάθμης.....	106
7.3.4	Εντοπισμός συστηματικών σφαλμάτων.....	108
7.3.5	Στατιστική διερεύνηση ιστορικού δείγματος διαφυγών.....	109
7.3.6	Επικαιροποίηση καμπυλών στάθμης – υπόγειων διαφυγών	112
7.3.7	Γενικευμένο μοντέλο υπόγειων διαφυγών Υλίκης	114
7.4	Απορροή λεκάνης Υλίκης	116
7.4.1	Ιστορικό.....	116
7.4.2	Περαιτέρω διερεύνηση.....	117
7.4.3	Ανάπτυξη μοντέλου καθαρών απωλειών Υλίκης	118
7.4.4	Τελική εκτίμηση απορροής Υλίκης	119
8	Λοιποί υδροφορείς (εκτός Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης)	120
	Αναφορές	122
	Παράρτημα Α: Επεξεργασμένες χρονοσειρές λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης	127
	Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης	127
	Χρονοσειρές απορροής Βοιωτικού Κηφισού και πηγών	129
	Χρονοσειρές λίμνης Υλίκης	134
	Παράρτημα Β: Χρονοσειρές μοντέλου προσομοίωσης	137
	Χρονοσειρές δεξαμενών εδαφικής υγρασίας.....	137
	Χρονοσειρές δεξαμενών υπόγειου νερού	142
	Χρονοσειρές θέσεων ζήτησης νερού	144
	Χρονοσειρές απορροής.....	147
	Χρονοσειρές υδατικού ισοζυγίου λεκάνης	152
	Παράρτημα Γ: Οδηγίες χρήσης υπολογιστικού συστήματος	159

1. Εκκίνηση προγράμματος	159
2. Κύρια οθόνη.....	159
3. Δημιουργία νέου σεναρίου προσομοίωσης.....	159
4. Εισαγωγή σεναρίου προσομοίωσης.....	161
5. Αποθήκευση σεναρίου προσομοίωσης.....	162
6. Κλείσιμο σεναρίου προσομοίωσης.....	163
7. Μονάδες υδρολογικής απόκρισης.....	163
8. Τοπολογία υδροφορέα	164
9. Δεξαμενές υπόγειου νερού.....	165
10. Πηγές	167
11. Γεωτρήσεις.....	168
12. Θέσεις ζήτησης νερού.....	169
13. Επιλογές μοντέλου προσομοίωσης.....	170
14. Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης.....	171
15. Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης	172
16. Χρονοσειρές εισόδου	173
17. Χρονοσειρές εξόδου	176
18. Αντικειμενική συνάρτηση.....	177
19. Επιλογές βελτιστοποίησης.....	178
20. Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών λεκάνης.....	181
21. Βαθμονόμηση παραμέτρων	181
22. Χρονοσειρές απορροής.....	182
23. Σύνολο Pareto λύσεων	183
24. Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο.....	185
25. Παραγωγή σεναρίων πρόγνωσης.....	187
26. Απεικόνιση ισοπίθανων καμπυλών πρόγνωσης.....	188
27. Τερματισμός προγράμματος	190
28. Οδηγίες χρήσης.....	190
29. Ομάδα ανάπτυξης	190

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια της δεύτερης φάσης 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 ολοκληρωμένου πληροφορικού συστήματος για τη μοντελοποίηση των κύριων διεργασιών του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και η βελτίωση της σχέσης στάθμης και υπόγειων διαφυγών της Υλίκης. Το σύστημα που υλοποιήθηκε ακολουθεί πιστά τη σχετική ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 2000). Η τελευταία έχει συνταχθεί σύμφωνα με το Παράρτημα Ι της σύμβασης ανάθεσης του ερευνητικού έργου (ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, 1999).

1.2 Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους

Στο Παράρτημα Ι της Σύμβασης του έργου (ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, 1999) 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 καταναμημένο στο χώρο μοντέλο με αδρομερή κάναβο 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 διευκρίνηση 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 - στην ουσία τρία μοντέλα - που επιτρέπουν την επίλυση των εξισώσεων της ροής του επιφανειακού και υπόγειου νερού. Το υπολογιστικό σύστημα μέσω του οποίου υλοποιείται το μοντέλο αναφέρεται και ως «Σύστημα» και περιλαμβάνει το σύνολο του λογισμικού που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων, τρέξιμο του μοντέλου και οπτικοποίηση και εκτύπωση των αποτελεσμάτων. Σε ότι αφορά στο μοντέλο και το υπολογιστικό σύστημα έχει ήδη συνταχθεί σχετική ανάλυση απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 2000). Στην φάση αυτή, η ανάλυση απαιτήσεων εμπλουτίστηκε και δίνεται εκ νέου στο παρόν τεύχος.

Το υπολογιστικό σύστημα αποτελεί, μαζί με το υποσύστημα πρόγνωσης των εισροών στους ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα (πρόγραμμα *Κασταλία*), ένα καίριο βοηθητικό εργαλείο

για το σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (πρόγραμμα *Υδρονομίας*), 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 ποιον τρόπο αντιμετωπίζονται τα περιστατικά αυτά;

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4 του τεύχους προδιαγραφών, το σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας (*Υδρονομίας*) περιλαμβάνει την πλήρη και λεπτομερή προσομοίωση της διακίνησης του νερού στα εξωτερικά υδραγωγεία (μέχρι τα διυλιστήρια), τους ταμειυτήρες και τα άλλα έργα που συνδέονται με το εξωτερικό δίκτυο ύδρευσης της Αθήνας. Πραγματοποιεί βελτιστοποίηση των κανόνων λειτουργίας του συστήματος ταμειυτήρων, 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. 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
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 τον 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. Βέβαια, για τα σημερινά επίπεδα ζήτησης νερού και με απρόσκοπτη λειτουργία των εξωτερικών υδραγωγείων, τα υπόγεια νερά του Βοιωτικού Κηφισού παραμένουν ως εφεδρική πηγή.

Στην πρώτη φάση του έργου έγινε μοντελοποίηση της υπόγειας υδροφορίας της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού με βάση το πακέτο MODFLOW και κατάρτιση κατάλληλου λογισμικού για επιχειρησιακή χρήση. Στα συμπεράσματα του οικείου τεύχους (Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000) αναφέρεται επί λέξει:

- 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.
- 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).

Επίσης αναφέρεται το αντικείμενο των εργασιών της δεύτερης φάσης που είναι:

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

- Η θεώρηση της υδροφορίας στη λεκάνη της Υλίκης.
- Η διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης του χρόνου εκτέλεσης ενός κύκλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού.
- Η σύνδεση του επιχειρησιακού πακέτου με τον Υδρονομέα
- Η θεώρηση και των υπολοίπων, εκτός της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης, υπόγειων υδροφορέων που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας.

Το παρόν τεύχος αναφέρεται στις εργασίες που δίνονται παραπάνω. Συγκεκριμένα:

- Η υδροφορία στη λεκάνη της Υλίκης αντιμετωπίστηκε με στόχο την κατάρτιση μια όσο το δυνατό πιο αξιόπιστης καμπύλης στάθμης-διαφυγών της λίμνης, καθόσον η λεπτομερής (ημικατανεμημένη ή πλήρως κατανεμημένη) στον χώρο μοντελοποίηση αποδείχτηκε ανέφικτη. Πάντως, οι επιχειρησιακοί στόχοι του παρόντος έργου εξυπηρετούνται πλήρως από την προσέγγιση που ακολουθήθηκε.
- Σε ότι αφορά τη διερεύνηση της δυνατότητας μείωσης του χρόνου εκτέλεσης ενός κύκλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, έγιναν εκτεταμένες εργασίες που απορρόφησαν το μεγαλύτερο μέρος των πόρων του έργου που είχαν προβλεφθεί για το συνολικό αντικείμενο του τεύχους. Το βάρος δόθηκε στην κατάρτιση ενός νέου ημικατανεμημένου μοντέλου προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη. Για την υλοποίηση του μοντέλου, κατασκευάστηκε από το μηδέν πληροφορικό σύστημα που το υποστηρίζει.
- Η σύνδεση με τον Υδρονομέα πραγματοποιήθηκε με έμμεσο τρόπο μέσω της επικοινωνίας του νέου πληροφορικού συστήματος με την βάση δεδομένων ORACLE, με την οποία επικοινωνεί και ο Υδρονομέας. Η μεθοδολογία της συνδυασμένης χρήσης των δύο συστημάτων περιγράφεται σε οικείο κεφάλαιο του τεύχους και συμπληρώνεται από πιλοτική εφαρμογή σε υποθετικά σενάρια στα οποία προκύπτει αναγκαιότητα συνδυασμένης απόληψης επιφανειακών και υπόγειων νερών.
- Τέλος, η θεώρηση και των υπολοίπων, εκτός της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης, υπόγειων υδροφορέων που συνδέονται με το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας πραγματοποιήθηκε μόνον σε επίπεδο συνοπτικής αναφοράς στα αποτελέσματα παλιότερων μελετών, όπως, άλλωστε, είχε προδιαγραφεί.

Το παρόν τεύχος περιλαμβάνει πέντε κεφάλαια από τα οποία το πρώτο είναι η παρούσα εισαγωγή. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο το μοντέλου προσομοίωσης που αναπτύχθηκε και συγκεκριμένα το μοντέλο προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών, το μοντέλο υπόγειων νερών, το μοντέλο κατανομής των απολήψεων, το ολοκληρωμένο σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων νερών και η μέθοδος βελτιστοποίησης των παραμέτρων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού που χρησιμοποιήθηκαν (γεωγραφικά δεδομένα, δεδομένα επιφανειακής υδρολογίας, δεδομένα υπόγειας υδρολογίας, υδατικές ανάγκες) καθώς και σχετικές επεξεργασίες τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά το λογισμικό προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών που αναπτύχθηκε. Δίνονται η ανάλυση απαιτήσεων, η αρχιτεκτονική δομή του υπολογιστικού συστήματος, και σχολιάζεται η επικοινωνία του με βάσεις δεδομένων. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργασίες και τα αποτελέσματα της προσαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και συγκεκριμένα γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης, δίνεται η μαθηματική δομή μοντέλου προσομοίωσης, συνοψίζονται τα δεδομένα εισόδου των σχετικών μοντέλων και παρουσιάζονται τα κριτήρια και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για την προετοιμασία των μοντέλων για επιχειρησιακή χρήση, με αναφορά στη στοχαστική προσομοίωση και πρόγνωση, την ρύθμιση των αρχικών συνθηκών και την ολοκληρωμένη ένταξη του μοντέλου στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων *Υδρονομέας*. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνεται η σχετική πιλοτική εφαρμογή. Στο έβδομο κεφάλαιο δίνονται όλες οι αναλύσεις που αφορούν τη λεκάνη της Υλίκης ενώ στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους λοιπούς υδροφορείς. Τέλος, το ένατο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο σε συμπεράσματα. Το τεύχος συμπληρώνεται με αναφορές και τρία παραρτήματα. Το πρώτο παράρτημα περιλαμβάνει πίνακες διαφόρων δεδομένων διαφόρων υδρολογικών μεγεθών. Στο δεύτερο παράρτημα παρουσιάζονται πίνακες αποτελεσμάτων της λειτουργίας του συστήματος που καταρτίστηκε. Τέλος, στο τρίτο παράρτημα δίνονται αναλυτικές οδηγίες χρήσης του συστήματος προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Γενικά

2.1.1 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης, εκτιμούν τη δίατά της σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα εν λόγω μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1989).

Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών αναγκών αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των διεργασιών. Στην πρώτη περίπτωση, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, με σκοπό την εκτίμηση του επιφανειακού δυναμικού της λεκάνης. Στην δεύτερη περίπτωση, προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας. Ωστόσο, αν και η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών σπανίζει, αυτή θεωρείται επιβεβλημένη όταν υπάρχουν συνδυασμένες χρήσεις νερού και σημαντική συνεισφορά του υπόγειου δυναμικού στην συνολική απορροή της λεκάνης.

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική δομή τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη εντάσσονται τα *εννοιολογικά* (conceptual) μοντέλα (συγκεντρωτικά ή ημικατανομημένα), τα οποία αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες είτε της συνολικής λεκάνης ή των υπολεκανών της, θεωρώντας μια προκαθορισμένη μαθηματική δομή που βασίζεται σε εμπειρικές υποθέσεις. Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους, η οποία επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού σχετικά πλήθους παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν φυσική σημασία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ορισμένων μέσων χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα κατανομημένα μοντέλα φυσικής βάσης που αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ότι η χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών της λεκάνης (τοπογραφικών, εδαφολογικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών, κλπ.) είναι γνωστή. Ωστόσο, η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών επιβάλλει τη γνώση των εν λόγω χαρακτηριστικών σε εξαιρετικά λεπτομερή χωρική κλίμακα, κάτι που στην πράξη καθίσταται συνήθως αδύνατο. Από τα παραπάνω, καθίσταται προφανής ο λόγος που, στις περισσότερες εφαρμογές, προτιμάται η χρήση των εννοιολογικών έναντι των φυσικής βάσης υδρολογικών μοντέλων.

2.1.2 Το πρόβλημα της βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων

Οι παράμετροι των εννοιολογικών υδρολογικών μοντέλων εκτιμώνται έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται *βαθμονόμηση* (calibration). Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου αναφέρεται σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης της λεκάνης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Η βαθμονόμηση ακολουθείται από την λεγόμενη *επαλήθευση* (validation) του μοντέλου, βάσει της οποίας ελέγχεται η προγνωστική του ικανότητα για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη) χρονική περίοδο.

Είναι γνωστό ότι η αξιοπιστία των εννοιολογικών μοντέλων εξαρτάται σε εξαιρετικά σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση χαρακτηρίζεται επιτυχής όταν ικανοποιεί τα ακόλουθα δύο κριτήρια: (α) το μοντέλο διαθέτει επαρκή προγνωστική ικανότητα, ή αλλιώς μπορεί να αναπαράγει όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης με ικανοποιητική ακρίβεια, και (β) οι εκτιμημένες τιμές των παραμέτρων κυμαίνονται σε λογικά πλαίσια. Τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων (Wang, 1991· Duan et al., 1992· Gan and Biftu, 1996· Pan and Wu, 1998· Tyer et al., 1999· Madsen et al., 2002). Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται: (α) ο καθορισμός ενός μέτρου καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων σε σχέση με τις παρατηρημένες χρονοσειρές απόκρισης της λεκάνης (κατά κανόνα της απορροής στην έξοδο αυτής), το οποίο συνιστά την αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου βελτιστοποίησης, και (β) ο προσδιορισμός του επιθυμητού πεδίου τιμών των παραμέτρων, ήτοι του χώρου των εφικτών λύσεων (βλ. 2.3.1).

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εκτίμηση των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου συνιστά ένα από τα πλέον δύσκολα προβλήματα που απαντά ένας υδρολόγος στην πράξη. Η επιτυχία της βαθμονόμησης, άρα και την προγνωστικής ικανότητας ενός μοντέλου, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- την μαθηματική δομή του μοντέλου και το πλήθος των παραμέτρων του (Perrin et al., 2001)·
- την ποιότητα και επάρκεια των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, είτε πρόκειται για δεδομένα εισόδου είτε για χρονοσειρές απόκρισης που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών λύσεων (Paturel et al., 1995· Yapo et al., 1996· Andréassian et al., 2001)·
- την διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, ήτοι της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών (Kuczera and Mroczkowski, 1998)·
- την αξιοπιστία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, δηλαδή την ικανότητα αυτού να χειρίζεται έντονα μη γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις με πολλαπλά ακρότατα και να εντοπίζει την ολικά βέλτιστη λύση (Duan et al., 1992).

Η κύρια δυσκολία στη βαθμονόμηση ενός μοντέλου έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών τιμών των παραμέτρων, οι οποίες παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα των μοντέλων, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, άρα και η πολυπλοκότητα του μοντέλου. Παρόλο που το εν λόγω πρόβλημα απασχολεί την επιστημονική κοινότητα εδώ και τρεις δεκαετίες (Johnston and Pilgrim, 1976· Sorooshian and Gupta, 1983· Beven and Binley, 1992· Gupta et al., 1998· Boyle et al., 2000· Wagener et al., 2001), δεν έχει βρεθεί ένα κοινά αποδεκτό κριτήριο αξιολόγησης των εν λόγω συνδυασμών παραμέτρων, ώστε να επιλέγεται ο αντικειμενικά βέλτιστος. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει στραφεί προς την διαμόρφωση διανυσματικών αντικειμενικών συναρτήσεων με χρήση πολλαπλών μέτρων καλής προσαρμογής, αναφερόμενα είτε στα διαφορετικά

χαρακτηριστικά μιας μεμονωμένης απόκρισης είτε σε διαφορετικές αποκρίσεις, και ακολούθως την εφαρμογή πολυκριτηριακών τεχνικών βελτιστοποίησης (Yapo et al., 1998· Kuczera and Mroczkowski, 1998· Madsen, 2000· Vrugt et al., 2002). Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η εύρεση διαφόρων συνδυασμών παραμέτρων που, αν και δεν βελτιστοποιούν όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα (κάτι που από τη φύση του προβλήματος είναι αδύνατο), παρέχουν λύσεις κάθε μία από τις οποίες υπερτερεί τουλάχιστον ως προς ένα κριτήριο σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες¹. Στην περίπτωση αυτή αναζητείται η λεγόμενη πλέον συμβιβαστική (best-compromise) λύση του προβλήματος, ήτοι ένας μοναδικός συνδυασμός παραμέτρων που θεωρείται αποδεκτός ως τελική λύση του προβλήματος, με βάση την κρίση του μελετητή (Cohon, 1978, pp. 76-78).

2.2 Ανάπτυξη ολοκληρωμένου πλαισίου προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών

Για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο μοντέλο ολοκληρωμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών της λεκάνης. Στη συνέχεια περιγράφεται η μαθηματική δομή των επιμέρους συνιστωσών του μοντέλου, καθώς και η ολοκλήρωση αυτών σε ένα συνδυασμένο σχήμα προσομοίωσης.

2.2.1 Προσομοίωση επιφανειακών διεργασιών

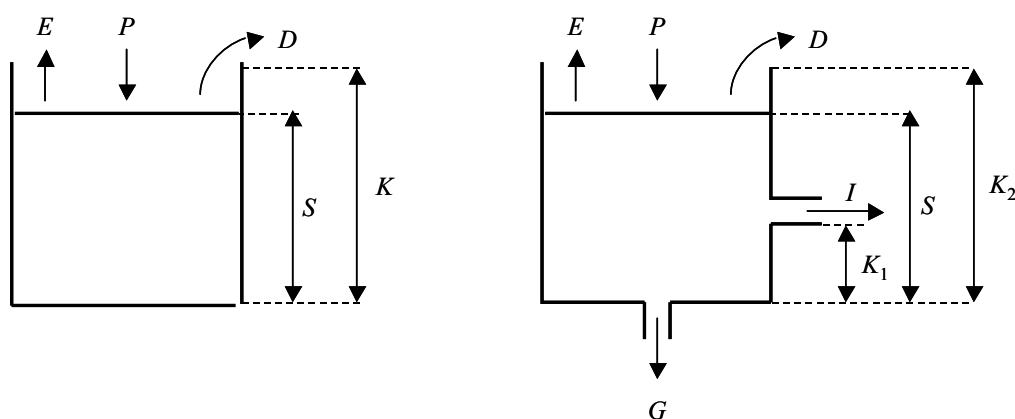
Η προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών της λεκάνης, η οποία αποσκοπεί στον επιμερισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, απώλειες εξάτμισης και διαπνοής, και κατείσδυση (βαθιά διήθηση), γίνεται μέσω ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας, που αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου Thornthwaite (Dingman, 1994, pp. 299-301· Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 236-243). Σύμφωνα με το αρχικό μοντέλο, η υδρολογική λειτουργία μιας λεκάνης εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας χωρητικότητας K , η οποία συνιστά την μοναδική παράμετρο του μοντέλου (Σχήμα 2.1, αριστερά). Στοιχεία εισόδου του μοντέλου είναι η βροχόπτωση, P_t , και η δυναμική εξατμοδιαπνοή², E_{P_t} . Σημειώνεται ότι με t συμβολίζεται ο δείκτης που αναφέρεται στο χρονικό διάστημα $[t, t + \Delta t]$, όπου Δt το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, που κατά κανόνα θεωρείται μοναδιαίο (π.χ., μία ημέρα, ένας μήνας, κλπ.). Το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας, S_t . Εφόσον η βροχόπτωση υπερβαίνει την δυναμική εξατμοδιαπνοή ($P_t > E_{P_t}$), η πραγματική εξατμοδιαπνοή ταυτίζεται με τη δυναμική, και το περίσσειμα $P_t - E_{P_t}$ αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία. Η δεξαμενή υπερχειλίζει όταν το απόθεμα υπερβεί τη χωρητικότητά της, K . Συνεπώς, η υπερχειλίση αναπαριστά την επιφανειακή απορροή, D_t , η οποία πραγματοποιείται μόνο εφόσον γεμίσει η δεξαμενή, ή αλλιώς κορεστεί το έδαφος. Στην περίπτωση που προκύπτει έλλειμμα εξατμοδιαπνοής ($P_t < E_{P_t}$), μέρος αυτού καλύπτεται μέσω της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται η παραδοχή ότι ο ρυθμός της επιπλέον εξατμοδιαπνοής (εδαφική εξατμοδιαπνοή) είναι ανάλογος του ελλείμματος $E_{P_t} - P_t$ και του λόγου πλήρωσης της δεξαμενής, S_t / K , ήτοι:

¹ Οι εν λόγω συνδυασμοί παραμέτρων συνιστούν αυτό που στη μαθηματική ορολογία είναι γνωστό ως *σύνολο μη κατωτέρων* (non-inferior) λύσεων ή *σύνολο Pareto*.

² Ο όρος περιγράφει την ποσότητα της εξατμοδιαπνοής (ήτοι του συνόλου των πραγματικών απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας) που δυναμικά θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί από εδαφικές επιφάνειες πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, εφόσον υπήρχαν συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού, σε αντιστοιχία, δηλαδή, με την εξάτμιση υδάτινων επιφανειών.

$$\frac{dE_{S_t}}{dt} = \frac{E_{P_t} - P_t}{K} S_t \quad (2.1)$$

Η προσέγγιση του Thornthwaite είναι επαρκής μόνο για απλές υδρολογικές λεκάνες χειμαρρικής δίαιτας και χωρίς αξιόλογη υπόγεια αποθήκευση, καθώς δεν μπορεί να αναπαραστήσει ούτε μόνιμες ροές ούτε τις διεργασίες βαθιάς διήθησης και κατείδυσης. Επιπλέον, με την εφαρμογή του μοντέλου σε μηνιαία κλίμακα (που είναι η συνήθης κλίμακα προσομοίωσης των επιφανειακών υδρολογικών μοντέλων), η υπόθεση ότι το σύνολο της βροχόπτωσης μπορεί να μετασηματιστεί σε άμεση εξάτμιση είναι μη ρεαλιστική. Συνήθως, η μηνιαία βροχόπτωση πραγματοποιείται στα πλαίσια περιορισμένου αριθμού επεισοδίων βροχής, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε μικρές χρονικές κλίμακες (ωριαία, ημερησία). Είναι προφανές ότι σε τέτοιες κλίμακες, η βροχόπτωση υπερβαίνει την αντίστοιχη ζήτηση για εξάτμιση, κάτι που μπορεί να μην ισχύει εφόσον τα μεγέθη συναθροιστούν σε μηνιαία κλίμακα.



Σχήμα 2.1: Αρχικό, κατά Thornthwaite (αριστερά) και τροποποιημένο (δεξιά) μοντέλο εδαφικής υγρασίας.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω μειονεκτημάτων, έγιναν διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό μοντέλο του Thornthwaite, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, δεξιά. Στο τροποποιημένο μοντέλο, η ολική απορροή Q_t , επιμερίζεται σε δύο συνιστώσες, μια άμεση συνιστώσα, D_t , η οποία εμφανίζεται κατά την διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, και μια ταχεία υποδερμική ροή, I_t , η οποία συνιστά την συνιστώσα της απορροής που πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση. Η άμεση (πλημμυρική) απορροή πραγματοποιείται εφόσον η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας ξεπεράσει τη χωρητικότητα της δεξαμενής, που συμβολίζεται πλέον K_2 με αντί για K . Αντίστοιχα, η υποδερμική ροή λαμβάνει χώρα μέσω μιας οριζόντιας οπής που κείται σε ύψος $K_1 < K_2$, και ο ρυθμός της θεωρείται ανάλογος της διαθέσιμης υγρασίας $S_t - K_1$ και ενός συντελεστή στείρευσης λ , ήτοι $dI_t / dt = \lambda (S_t - K_1)$. Επιπλέον, η δεξαμενή περιέχει και μια κατακόρυφη οπή, η οποία αναπαριστά την φυσική διεργασία της κατείδυσης προς τον υπόγειο υδροφόρα. Όμοια με την υποδερμική ροή, η κατείδυση θεωρείται ανάλογη της διαθέσιμης υγρασίας S_t κι ενός συντελεστή στείρευσης μ , ήτοι $dG_t / dt = \mu S_t$. Υποθέτοντας μοναδιαίο χρονικό βήμα ($\Delta t = 1$), οι συντελεστές στείρευσης θεωρούνται αδιάστατα μεγέθη¹. Τέλος, το μοντέλο επιβάλλει ένα άνω όριο, ε , που εκφράζει το μέγιστο ποσοστό της βροχόπτωσης που μπορεί να εξατμιστεί άμεσα. Συνεπώς, ο ρυθμός της πραγματικής εξατμοδιαπνοής εκτιμάται ως:

$$\frac{dE_{S_t}}{dt} = \frac{E_{P_t} - \varepsilon P_t}{K_2} S_t = v_t S_t \quad (2.1)$$

Για $\varepsilon = 1$, η παραπάνω σχέση ταυτίζεται με την αντίστοιχη του μοντέλου Thornthwaite.

¹ Στην γενική περίπτωση, αν υποθεθεί ότι το χρονικό βήμα Δt εκφράζεται στην μονάδα χρόνου $[T]$, τότε οι συντελεστές στείρευσης εκφράζονται στην μονάδα $[T]^{-1}$.

Μια βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι η υπερχειλίση πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των υπόλοιπων υδρολογικών διεργασιών, γεγονός που συνεπάγεται ότι κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος επιτρέπεται στην εδαφική υγρασία να ξεπεράσει τη χωρητικότητα της δεξαμενής. Πρακτικά, η περίσσεια εδαφικής υγρασίας πάνω από το όριο υπερχειλίσης αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το κορεσμένο έδαφος, οπότε αφήνεται να λιμνάσει και ακολούθως να εξατμιστεί ή να κατεισδύσει. Η εν λόγω υπόθεση επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων της λεκάνης όσον αφορά τις υδρολογικές απώλειες, η μεταβλητότητα των οποίων οφείλει να είναι συνεπής με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης¹.

Η υπολογιστική διαδικασία εφαρμογής του μοντέλου έχει ως εξής: Έστω ότι στην αρχή της περιόδου t είναι γνωστές οι είσοδοι του μοντέλου, ήτοι η βροχόπτωση, P_t , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή, E_{Pt} . Αρχικά εκτιμάται η άμεση εξατμοδιαπνοή από την σχέση:

$$E_{Dt} = \min (E_{Pt}, E_{Pt}) \quad (2.2)$$

Κατά συνέπεια, η διαθέσιμη εδαφική υγρασία, S_{init} , προκύπτει ως άθροισμα της αποθηκευμένης εδαφικής υγρασίας, S_{t-1} , και της περίσσειας βροχόπτωσης, ήτοι:

$$S_{init} = S_{t-1} + P_t - E_{Dt} \quad (2.3)$$

Στη συνέχεια, ένα μέρος της διαθέσιμης υγρασίας, S_{init} , εκρέει ως υποδερμική ροή, I_t , κατείσδυση, G_t , και εδαφική εξάτμιση, E_{St} . Το ισοζύγιο της εδαφικής υγρασίας περιγράφεται μαθηματικά από μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης της μορφής:

$$\frac{dS_t}{dt} = -\frac{dI_t}{dt} - \frac{dG_t}{dt} - \frac{dE_{St}}{dt} \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις αναλυτικές εκφράσεις των επιμέρους συνιστωσών της διαφορικής εξίσωσης προκύπτει η τελική έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου της δεξαμενής¹:

$$\frac{dS_t}{dt} = -\lambda (S_t - K_1) - \mu S_t - \nu S_t \quad (2.5)$$

Στο σημείο αυτό προκύπτουν δύο δυνατές περιπτώσεις. Η απλούστερη προκύπτει όταν $S_{init} \leq K_1$, γεγονός που επιτρέπει την απαλοιφή του όρου υποδερμικής ροής από την διαφορική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου. Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2.5) στο χρονικό διάστημα $[\tau, \tau + \Delta\tau]$, προκύπτει:

$$S_t = S_{init} e^{-(\mu + \nu) \Delta\tau} \quad (2.6)$$

Αντίστοιχα, οι απώλειες λόγω κατείσδυσης και εδαφικής εξατμοδιαπνοής δίνονται από τις σχέσεις:

$$G_t = \frac{\mu}{\mu + \nu} S_{init} (1 - e^{-(\mu + \nu) \Delta\tau}) \quad (2.7)$$

¹ Ας υποθεθούν δύο σενάρια, όπου στο πρώτο η περίσσεια εδαφικής υγρασίας είναι πρακτικά αμελητέα και στο δεύτερο πολύ σημαντική. Πραγματοποιώντας την υπερχειλίση κατά προτεραιότητα, οι ποσότητες εξάτμισης και κατείσδυσης θα προκύψουν ίσες για τα δύο σενάρια, αφού και στις δύο περιπτώσεις η φόρτιση θα είναι η ίδια ($S_t = K_2$). Αντίθετα, με την υπερχειλίση να λαμβάνει χώρα μετά το πέρας των υπόλοιπων διεργασιών, αναμένεται να προκύψουν διαφορετικές έξοδοι του μοντέλου, όπως είναι λογικό να συμβαίνει και στην πραγματικότητα.

$$E_{S_t} = \frac{\nu}{\mu + \nu} S_{\text{init}} (1 - e^{-(\mu + \nu)\Delta\tau}) \quad (2.8)$$

Η δεύτερη περίπτωση, η οποία είναι πιο πολύπλοκη, προκύπτει όταν η διαθέσιμη εδαφική υγρασία ξεπερνάει την στάθμη έναρξης της υποδερμικής ροής, δηλαδή $S_{\text{init}} > K_1$. Τότε, η λύση της (2.5) δίνεται από την σχέση:

$$S_t = \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} + \left(S_{\text{init}} - \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} \right) e^{-(\lambda + \mu + \nu)\Delta\tau} \quad (2.9)$$

Οι υδρολογικές απώλειες υπολογίζονται ως:

$$I_t = -\lambda K_1 \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu + \nu} - 1 \right) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu + \nu} \left(S_{\text{init}} - \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} \right) [1 - e^{-(\lambda + \mu + \nu)\Delta\tau}] \quad (2.10)$$

$$G_t = -\frac{\mu \lambda}{\lambda + \mu + \nu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu + \nu} \left(S_{\text{init}} - \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} \right) [1 - e^{-(\lambda + \mu + \nu)\Delta\tau}] \quad (2.11)$$

$$E_{S_t} = -\frac{\nu \lambda}{\lambda + \mu + \nu} + \frac{\nu}{\lambda + \mu + \nu} \left(S_{\text{init}} - \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} \right) [1 - e^{-(\lambda + \mu + \nu)\Delta\tau}] \quad (2.12)$$

Στο σημείο αυτό μας ενδιαφέρει αν η μείωση της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας ξεπερνά την ποσότητα $S_{\text{init}} - K_1$, γεγονός που σημαίνει ότι η διεργασία της υποδερμικής ροής πραγματοποιείται σε διάστημα μικρότερο από το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, $\Delta\tau$. Αυτό ελέγχεται εύκολα θέτοντας $S_t = K_1$ και επιλύοντας την (2.9) ως προς τον χρόνο. Με τον τρόπο αυτόν υπολογίζεται ότι η εδαφική υγρασία μειώνεται κάτω από την στάθμη K_1 μετά από χρόνο:

$$\Delta\tau^* = -\frac{1}{\lambda + \mu + \nu} \ln \left(S_{\text{init}} - \frac{\lambda K_1}{\lambda + \mu + \nu} \right) \quad (2.13)$$

Αν η ποσότητα $\Delta\tau^*$ είναι μεγαλύτερη από το χρονικό βήμα της προσομοίωσης², τότε η αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας δίνεται από την (2.9), διαφορετικά εκτιμάται από την σχέση:

$$S_t = K_1 e^{-(\mu + \nu)(\Delta\tau - \Delta\tau^*)} \quad (2.14)$$

Προφανώς, αν το χρονικό διάστημα $\Delta\tau^*$ ισούται με το βήμα της προσομοίωσης, $\Delta\tau$, τότε η εδαφική υγρασία στο τέλος της χρονικής περιόδου $[\tau, \tau + \Delta\tau]$ ισούται ακριβώς με το κατώφλι K_1 .

Η εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών γίνεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, η υποδερμική ροή, η κατείδυση και η εδαφική εξατμοδιαπνοή υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.10), (2.11) and (2.12), αντίστοιχα, για όσο διάστημα η τρέχουσα εδαφική υγρασία ξεπερνά το κατώφλι K_1 , θέτοντας αντί για $\Delta\tau$ την ποσότητα $\Delta\tau^*$. Στη συνέχεια, η υποδερμική ροή διακόπτεται ($S_t < K_1$), και οι επιπλέον απώλειες λόγω κατείδυσης και εδαφικής εξατμοδιαπνοής προκύπτουν από τις σχέσεις (2.7) και (2.8), αντίστοιχα, για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα $\Delta\tau - \Delta\tau^*$.

¹ Σημειώνεται ότι ο συντελεστής στείρευσης της εδαφικής εξάτμισης, ν , δεν είναι σταθερά του μοντέλου αλλά διαφοροποιείται σε κάθε χρονικό βήμα (βλ. εξίσωση 2.2). Ωστόσο, στη συνέχεια, ο δείκτης t που αναφέρεται στο χρονικό βήμα παραλείπεται για λόγους απλούστευσης.

² Με την παραδοχή αδιάστατου χρονικού βήματος ($\Delta\tau = 1$), η ποσότητα $\Delta\tau^*$ εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διεργασίας υποδερμικής ροής.

Μετά την ολοκλήρωση όλων των υπολογισμών, εκτιμάται η άμεση (πλημμυρική) απορροή από την σχέση:

$$D_t = \max(0, S_t - K_2) \quad (2.15)$$

Η παραπάνω ποσότητα αφαιρείται από την τρέχουσα εδαφική υγρασία, S_t . Τέλος, η συνολική εξατμοδιαπνοή και απορροή προκύπτουν ως:

$$E_t = E_{D_t} + E_{S_t} \quad (2.16)$$

$$Q_t = I_t + D_t \quad (2.17)$$

Συμπερασματικά, το σχήμα προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στη βάση του κλασικού μοντέλου εδαφικής υγρασίας του Thornthwaite, εκτός από την άμεση (πλημμυρική) απορροή και την πραγματική εξατμοδιαπνοή, εκτιμά ακόμη την υποδερμική ροή και την κατείδυση, χρησιμοποιώντας πέντε συνολικά παραμέτρους, ήτοι την στάθμη πραγματοποίησης της υποδερμικής ροής K_1 , την χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας K_2 , τους συντελεστές στέρεισης λ και μ , και το άνω όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής, ε .

2.2.2 Προσομοίωση υπόγειων διεργασιών

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979), και υλοποιήθηκε ως ειδική περίπτωση του γενικευμένου σχήματος που περιγράφουν οι Rozos and Koutsoyiannis (2002). Σύμφωνα με αυτό, ο υδροφορέας αναπαρίσταται ως ένα ορθογωνικό δίκτυο (κάναβος) αποτελούμενο από στοιχεία αποθήκευσης (δεξαμενές) και στοιχεία μεταφοράς (αγωγοί). Η τοπολογία του δικτύου ορίζεται αποκλειστικά από τις γεωγραφικές συντεταγμένες (x_i, y_i) του κέντρου βάρους των δεξαμενών.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής i είναι το εμβαδόν της βάσης, F_i , και το ύψος της οροφής της, b_i . Το εμβαδόν της βάσης της δεξαμενής προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια του αντίστοιχου υδροφορέα επί την ειδική απόδοση αυτού, S_Y , ενώ το ύψος της οροφής ισούται με το πάχος του υδροφορέα. Αν W_i είναι η στάθμη νερού στην δεξαμενή, τότε ο αντίστοιχος αποθηκευμένος όγκος νερού υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_i = p w_i F_i \quad (2.18)$$

όπου p το πορώδες του υδροφορέα (αδιάστατο). Η μεταβλητότητα της στάθμης εξαρτάται από την τιμή του πορώδους. Αν η τιμή του πορώδους είναι μικρή, τότε απαιτείται μεγάλη μεταβολή στάθμης για την αποθήκευση συγκεκριμένου όγκου νερού, ενώ, αντίστροφα, αν η τιμή του πορώδους είναι μεγάλη, τότε απαιτείται μικρή μεταβολή στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου.

Το υδραυλικό φορτίο, H_i , κάθε δεξαμενής i υπολογίζεται από την σχέση:

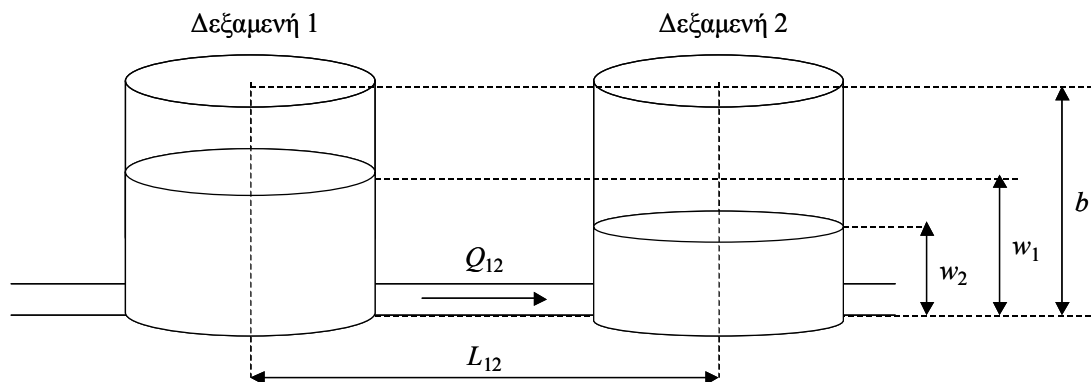
$$H_i = \begin{cases} W_i & W_i \leq b_i \\ b_i + (W_i - b_i) \theta & W_i > b_i \end{cases} \quad (2.19)$$

όπου θ είναι ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης. Ο άνω κλάδος στην σχέση (2.19) αντιστοιχεί σε φρεάτιες συνθήκες στον υδροφορέα, ενώ ο κάτω κλάδος αντιστοιχεί σε συνθήκες πίεσης. Συνεπώς, το πάχος b_i εκφράζει και το όριο μεταξύ των φρεάτιων και των υπό πίεση συνθηκών.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε αγωγού (i, j) είναι ο όρος υδραυλικής αγωγιμότητας (conductance), c_{ij} , που ορίζεται σε μονάδες παροχής, και το μήκος του, L_{ij} , το οποίο υπολογίζεται ως η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των διασυνδεόμενων δεξαμενών i και j , ήτοι:

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.20)$$

Η φορά κίνησης του νερού κατά μήκος του αγωγού (i, j) , δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη, αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε διαφορά στάθμης μεταξύ των διασυνδεόμενων δεξαμενών i και j . Εφόσον το πρόσημο της διαφοράς $W_i - W_j$ είναι θετικό, η μεταφορά νερού γίνεται από την δεξαμενή i προς την δεξαμενή j , και αντίστροφα.



Σχήμα 2.2: Δεξαμενές μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται δυο γειτονικές δεξαμενές 1 και 2, οι οποίες αντιστοιχούν στις περιοχές 1 και 2 ενός υποθετικού υδροφορέα. Η επιφάνειες των βάσεων των δύο δεξαμενών είναι F_1 και F_2 , οι στάθμες νερού είναι w_1 και w_2 , ενώ τα υδραυλικά φορτία, όπως υπολογίζονται από την σχέση (2.19), είναι h_1 και h_2 αντίστοιχα. Αφού $W_1 > W_2$, η μεταφορά νερού γίνεται από την δεξαμενή 1 προς την δεξαμενή 2. Αν c_{12} είναι ο όρος αγωγιμότητας και L_{12} το μήκος του αγωγού $(1, 2)$, τότε η ειδική παροχή q_{12} , δηλαδή ο ανά μονάδα επιφάνειας μεταφερόμενος όγκος νερού από την δεξαμενή 1 προς την δεξαμενή 2 υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy, ήτοι:

$$q_{12} = c_{12} \frac{H_1 - H_2}{L_{12}} \quad (2.21)$$

Μετά από μικρό χρονικό διάστημα δ , κατά τη διάρκεια του οποίου η τιμή του υδραυλικού φορτίου στις δύο δεξαμενές θεωρείται πρακτικά αμετάβλητη, η μεταβολή στάθμης είναι $\Delta W_1 \approx -q_{12} \delta / F_1$ και $\Delta W_2 \approx q_{12} \delta / F_2$, αντίστοιχα.

Οι δεξαμενές τροφοδοτούνται από την κατείσδυση των υπερκείμενων λεκανών, η λειτουργία των οποίων προσομοιώνεται μέσω των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας που περιγράφονται στο εδάφιο 2.2.1. Μια άλλη μορφή φόρτισης είναι η άντληση, η οποία επιβάλλεται για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών από το μοντέλο κατανομής των απολήψεων (βλ. 2.2.4). Όπως είναι προφανές, οι φορτίσεις (κατείσδυση, αντλήσεις) επιφέρουν αλλαγές (αύξηση και μείωση, αντίστοιχα) στην στάθμη των δεξαμενών. Για δεδομένες αρχικές στάθμες και δεδομένες χρονοσειρές κατείσδυσης και άντλησης, είναι δυνατή η αναπαράσταση της κίνησης του υπόγειου νερού μεταξύ των δεξαμενών σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των διασυνδεόμενων δεξαμενών, προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων κίνησης του νερού της μορφής της (2.21). Το εν λόγω σύστημα επιλύεται μέσω ενός ρητού αριθμητικού σχήματος, με υιοθέτηση ενός κατάλληλου υπολογιστικού βήματος, δ , κατά την διάρκεια του οποίου η διακύμανση της στάθμης του νερού στις δεξαμενές θεωρείται αμελητέα. Επισημαίνεται ότι, κατά κανόνα, η χρονική διακριτότητα των χρονοσειρών φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το βήμα επίλυσης, δηλαδή $\Delta t \gg \delta$.

Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του μοντέλου, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης Δt χωρίζεται σε n ίσα διαστήματα, και οι φορτίσεις X_t επιμερίζονται σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα:

$$\Delta X_{tk} = \begin{cases} 2X_t / n & k \leq n / 2 \\ 0 & k > n / 2 \end{cases} \quad (2.22)$$

Κατά συνέπεια, η φόρτιση κάθε δεξαμενής μοιράζεται ομοιόμορφα κατά το πρώτο ήμισυ του χρονικού βήματος, ενώ κατά το δεύτερο ήμισυ η φόρτιση θεωρείται μηδενική.

Για την επίτευξη καλύτερης ταχύτητας και σταθερότητας της αριθμητικής επίλυσης, το υπολογιστικό βήμα δ αυτορυθμίζεται κατά την προσομοίωση. Για τον σκοπό αυτό εισάγονται δύο υπολογιστικές παράμετροι, ήτοι η μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή της στάθμης του νερού στις δεξαμενές ανά χρονικό βήμα, ΔW_{\max} , και ο πολλαπλασιαστής χρονικού βήματος, β . Εφόσον η μέγιστη μεταβολή στάθμης στις δεξαμενές, ήτοι $\max\{\Delta W_i\}$ είναι ίση κατά προσέγγιση με την ποσότητα ΔW_{\max} , το χρονικό βήμα δεν μεταβάλλεται. Σε διαφορετική περίπτωση, αν $\max\{\Delta W_i\} < \Delta W_{\max}$ το χρονικό βήμα πολλαπλασιάζεται επί β , ενώ αν $\max\{\Delta W_i\} > \Delta W_{\max}$ το χρονικό βήμα διαιρείται με β .

Οι οριακές συνθήκες αντιμετωπίζονται με την επιλογή κατάλληλων χαρακτηριστικών των δεξαμενών. Συγκεκριμένα, οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού φορτίου προσομοιώνονται μέσω μιας δεξαμενής πολύ μεγάλης βάσης. Λόγω της μεγάλης βάσης, η στάθμη του νερού της δεξαμενής (και κατ' επέκταση το υδραυλικό φορτίο) πρακτικά δεν μεταβάλλεται. Η εκφόρτιση ενός υδροφορέα μέσω μιας πηγής μοντελοποιείται μέσω μιας δεξαμενής που έχει πολύ μεγάλη (θεωρητικά άπειρη) βάση, και η οποία επιτρέπεται μόνο να τροφοδοτηθεί από τις γειτονικές της δεξαμενές. Με τον τρόπο αυτό, οι απειροελάχιστες μεταβολές στάθμης στην εν λόγω δεξαμενή μπορούν να μετασχηματιστούν στο υδρογράφημα της πηγής.

Συνοψίζοντας, τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου προσομοίωσης είναι:

- η τοπολογία και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών, δηλαδή οι συντεταγμένες (x_i, y_i) των κέντρων βάρους τους, η επιφάνεια, F_i , και το πάχος, b_i , των τμημάτων του υδροφορέα στα οποία αντιστοιχούν, και η ταυτότητα της δεξαμενής του επιφανειακού μοντέλου από την κατεύθυνση της οποίας τροφοδοτείται κάθε μία·
- οι υδραυλικές παράμετροι, δηλαδή οι όροι υδραυλικής αγωγιμότητας, c_{ij} , μεταξύ των δεξαμενών, η ειδική απόδοση του υδροφορέα, S_Y , ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα σε συνθήκες πίεσης, θ , και το πορώδες, p ·
- οι υπολογιστικές παράμετροι, δηλαδή το υπολογιστικό βήμα, δ , η μέγιστη επιτρεπόμενη μεταβολή στάθμης νερού στις δεξαμενές, ΔW_{\max} , και ο πολλαπλασιαστής χρονικού βήματος, β ·
- τα υδρολογικά δεδομένα, ήτοι οι αρχικές στάθμες νερού στις δεξαμενές και οι χρονοσειρές φόρτισης.

Έξοδοι του μοντέλου είναι οι χρονοσειρές στάθμης και αποθέματος όλων των δεξαμενών, καθώς και οι χρονοσειρές παροχής σε όλους τους αγωγούς, συμπεριλαμβανομένων και αυτών των δεξαμενών που προσομοιώνουν την λειτουργία πηγών.

2.2.3 Σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών

Τα δύο μοντέλα που αναπτύχθηκαν ολοκληρώθηκαν σε ένα συνδυασμένο σχήμα προσομοίωσης που βασίζεται σε μια ημικαταναεμημένη προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτή, η συνολική λεκάνη απορροής χωρίζεται σε χωρικές ενότητες που έχουν παρόμοια γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά. Οι εν λόγω ενότητες, οι οποίες καλούνται *μονάδες υδρολογικής απόκρισης* (hydrological response units), δεν αντιστοιχούν κατ' ανάγκη σε φυσικές υπολεκάνες. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για εννοιολογικές οντότητες, οι υδρολογικές διεργασίες των οποίων αναπαρίστανται μέσω των εννοιολογικών δεξαμενών συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας που

περιγράφηκαν στο εδάφιο 2.2.1. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ) είναι η έκταση, A , οι παράμετροι της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (K_1, K_2, λ, μ), η αρχική εδαφική υγρασία, S_0 , και οι χρονοσειρές εισόδου, ήτοι η βροχόπτωση, P_t , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή, $E_{p,t}$, εκφρασμένες σε ισοδύναμα ύψη. Σημειώνεται ότι η παράμετρος ε , ήτοι το άνω όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής, θεωρείται κοινή για όλες τις ΜΥΑ¹.

Από την άλλη πλευρά, το μοντέλο του υδροφορέα διαμορφώνεται ως ένας κানাβος κελιών, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί μια δεξαμενή υπόγειου νερού. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε κελιού είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους (X, Y), η επιφάνεια, E , και η αρχική στάθμη νερού, w_0 , της αντίστοιχης δεξαμενής υπόγειου νερού, οι όροι υδραυλικής αγωγιμότητας κατά τις δύο διευθύνσεις (c_x, c_y), και οι χρονοσειρές εισόδου, ήτοι οι υδατικές ανάγκες, D_t . Σημειώνεται ότι το πορώδες θεωρείται κοινό σε όλη την έκταση του υδροφορέα².

Κάθε υπόγεια δεξαμενή τροφοδοτείται από την κατείσδυση μιας συγκεκριμένης ΜΥΑ. Αντίθετα, κάθε ΜΥΑ μπορεί να τροφοδοτεί περισσότερες από μια δεξαμενές υπόγειου νερού. Το χαρακτηριστικό αυτό αυξάνει την ευελιξία του μοντέλου, επιτρέποντας την χρήση διαφορετικής χωρικής ανάλυσης για τις επιφανειακές και υπόγειες υδρολογικές διεργασίες. Συνεπώς, ένα λεπτομερές σχήμα προσομοίωσης της υπόγειας κίνησης του νερού μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με ένα αδρομερές σχήμα προσομοίωσης της επιφανειακής ροής.

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.2, για την επίτευξη πρακτικά σταθερής στάθμης στις δεξαμενές υπόγειου νερού (προϋπόθεση που είναι απαραίτητη για την ευστάθεια του αριθμητικού σχήματος επίλυσης), υιοθετείται ένα μικρό υπολογιστικό βήμα που είναι πολύ μικρότερο από το σύνηθες βήμα της προσομοίωσης (ημερήσιο, μηνιαίο). Συνεπώς, οι φορτίσεις του μοντέλου υπόγειων νερών, ήτοι η κατείσδυση και η άντληση, που είναι γνωστές σε αδρή χρονική διακριτικότητα, επιμερίζονται ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια του βήματος προσομοίωσης, ώστε να είναι συνεπείς με το υιοθετούμενο υπολογιστικό βήμα³. Ομοίως, οι χρονοσειρές εξόδου του πολυκυτταρικού μοντέλου (απορροή πηγών, απώλειες προς τη θάλασσα) συναθροίζονται στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό, δεν τίθενται περιορισμοί ούτε ως προς την χρονική κλίμακα της προσομοίωσης, καθώς οι υπολογιστικές παράμετροι του μοντέλου υπόγειων νερών ρυθμίζονται αυτόματα.

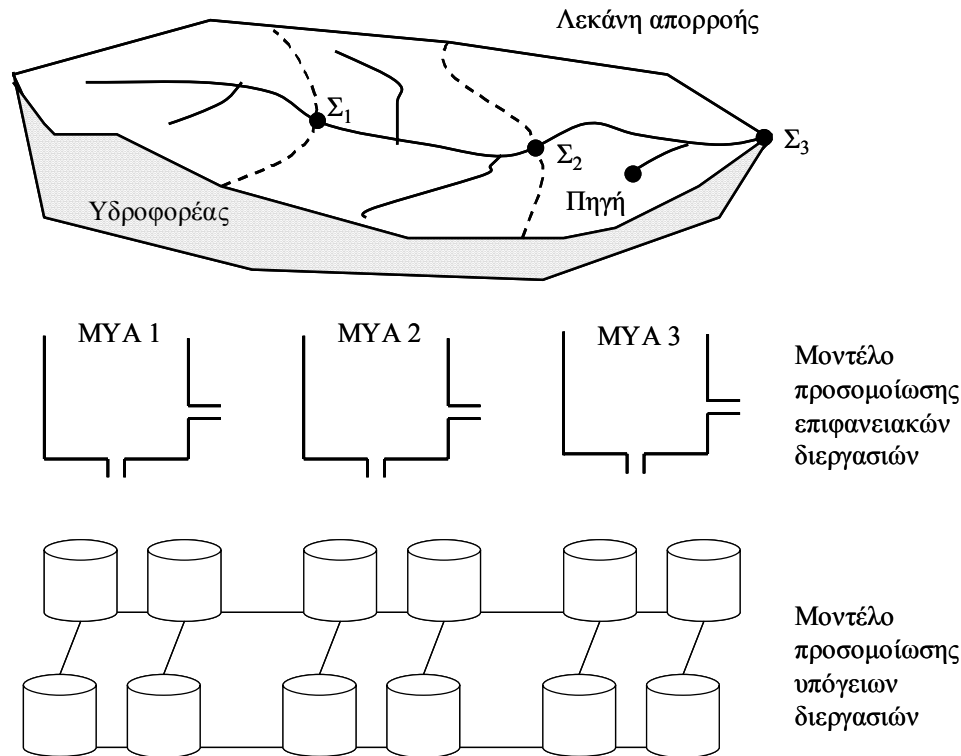
Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται μια υποθετική λεκάνη απορροής, η οποία έχει διαμεριστεί σε τρεις ΜΥΑ που, στην προκειμένη περίπτωση, αντιστοιχούν σε πραγματικές υπολεκάνες. Στην έξοδο κάθε υπολεκάνης υπάρχει ένας υδρομετρικός σταθμός, ο οποίος μετρά τη συνολική ανάντη απορροή. Η εν λόγω σχηματοποίηση εξασφαλίζει μια συνεπή βαθμονόμηση των παραμέτρων των εννοιολογικών δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, καθώς για κάθε έξοδο του μοντέλου υπάρχει μια αντίστοιχη παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής. Από την άλλη πλευρά, ο υποκείμενος υδροφορέας έχει διαμεριστεί σε 12 κύτταρα, 6 κατά το μήκος της λεκάνης και 2 κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Η πηγή που βρίσκεται στο κατάντη τμήμα της λεκάνης παρέχει σημαντική πληροφορία σχετικά με τις

¹ Η παράμετρος ε σχετίζεται με την κατανομή της βροχόπτωσης στον μήνα, που είναι λογικό να θεωρηθεί ενιαία για όλη την λεκάνη απορροής.

² Η παραδοχή γίνεται μόνο για λόγους οικονομίας των παραμέτρων του μοντέλου. Γενικά, η τιμή του πορώδους παρουσιάζει σημαντική ετερογένεια στον χώρο.

³ Δεδομένου ότι η κατανομή της κατείσδυσης ακολουθεί το σχήμα της κατανομής της βροχόπτωσης, η υπόθεση του ομοιόμορφου επιμερισμού της κατείσδυσης στην μηνιαία κλίμακα προσομοίωσης δεν είναι συμβατή με την πραγματικότητα. Στις αναλύσεις που έγιναν, θεωρήθηκε ότι οι φορτίσεις των υπόγειων δεξαμενών κατανέμονται ομοιόμορφα στο πρώτο ήμισυ του βήματος προσομοίωσης (μήνας), ενώ στο υπόλοιπο διάστημα δεν υπάρχουν φορτίσεις.

ιδιότητες του υδροφορέα, όπως αυτές εκφράζονται μέσω των υδραυλικών παραμέτρων των εννοιολογικών δεξαμενών του μοντέλου προσομοίωσης του υπόγειου νερού. Δεδομένου ότι η συνεισφορά της πηγής περιλαμβάνεται στο υδρογράφημα της εξόδου της λεκάνης, οι παράμετροι του μοντέλου υπόγειων νερών μπορούν επίσης να εκτιμηθούν μέσω βαθμονόμησης.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα συνδυσμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής και του υποκείμενου υδροφορέα αυτής.

2.2.4 Μοντέλο κατανομής απολήψεων

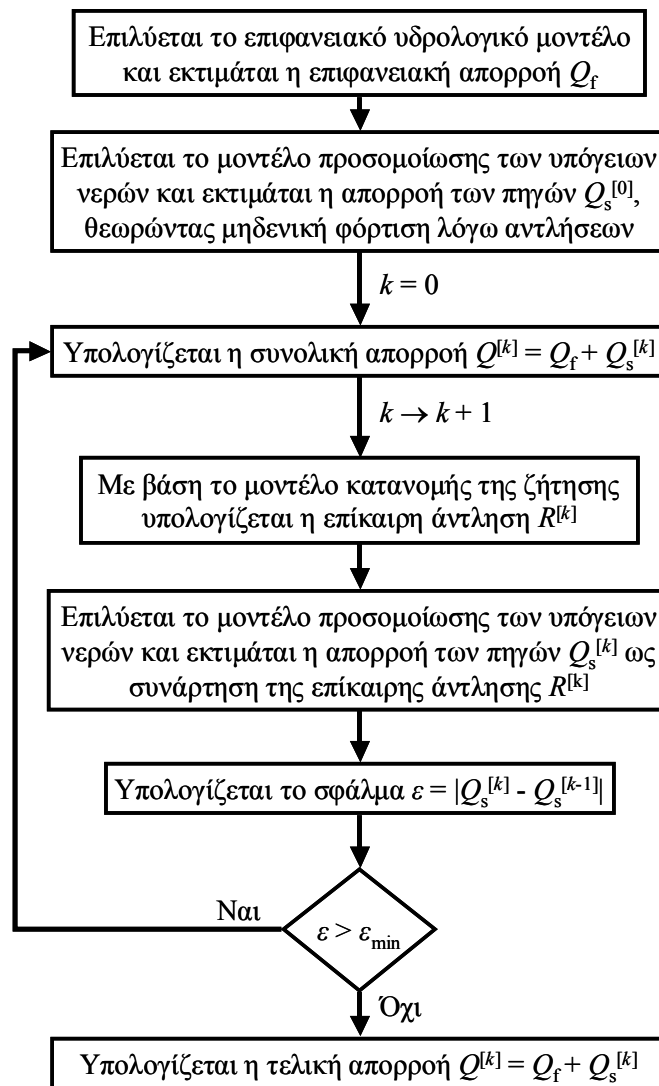
Στο συνδυασμένο σχήμα προσομοίωσης, οι απολήψεις νερού πραγματοποιούνται τόσο από επιφανειακά όσο και από υπόγεια νερά (αντλήσεις). Δεδομένου όμως ότι η απορροή των πηγών επηρεάζεται από τις αντλήσεις, για την εκτίμηση των απολήψεων αλλά και του πραγματικού δυναμικού των πηγών απαιτείται η εφαρμογή ενός μοντέλου κατανομής της ζήτησης που εκτελείται σε κύκλους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Αρχικά, επιλύεται το μοντέλο προσομοίωσης των επιφανειακών διεργασιών και εκτιμάται η επιφανειακή απορροή της λεκάνης Q_f , ως άθροισμα των απορροών των επιμέρους ΜΥΑ. Ομοίως, επιλύεται το μοντέλο προσομοίωσης των υπόγειων διεργασιών και εκτιμάται η πηγαία απορροή Q_s , ως άθροισμα των εκροών των επιμέρους πηγών, θεωρώντας μηδενική φόρτιση λόγω αντλήσεων. Η συνολική απορροή της λεκάνης, Q , προκύπτει αθροίζοντας τα μεγέθη Q_f και Q_s . Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα μοντέλο κατανομής της ζήτησης, το οποίο εκτιμά τις απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά συναρτήσεως των επιμέρους υδατικών αναγκών. Συγκεκριμένα, οι υδατικές ανάγκες σε κάθε κελί ικανοποιούνται με τρεις δυνατούς τρόπους:

- άντληση από την υποκείμενη δεξαμενή υπόγειου νερού·
- απόληψη επιφανειακών νερών ανάντη πηγής·
- απόληψη επιφανειακών νερών λεκάνης.

Οι απολήψεις γίνονται κατά προτεραιότητα, σύμφωνα με την σειρά που ορίζει ο χρήστης. Για κάθε κελί είναι γνωστή η χρονοσειρά των υδατικών αναγκών, D_t , και οι πηγές απόληψης. Το μοντέλο προσπαθεί να ικανοποιήσει την ζήτηση από την πρώτη πηγή. Εφόσον οι υδατικοί πόροι δεν επαρκούν, το έλλειμμα καλύπτεται από την επόμενη πηγή απόληψης κοκ. Αν η απόληψη γίνεται από τα επιφανειακά νερά της λεκάνης, αυτή αφαιρείται από την συνολική απορροή. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εκτίμηση της πραγματικής κατανομής των επιφανειακών και υπόγειων απολήψεων, με βάση μόνο τις θεωρητικές ανάγκες σε νερό στις διάφορες περιοχές της λεκάνης.

Εφόσον πραγματοποιούνται απολήψεις από υπόγεια νερά, το δυναμικό των πηγών και, ως εκ τούτου, το συνολικό δυναμικό της λεκάνης, είναι μικρότερο από αυτό που υποτέθηκε κατά την εφαρμογή του μοντέλου κατανομής της ζήτησης, καθώς η επίκαιρη στάθμη των δεξαμενών υπόγειου νερού μειώνεται εξαιτίας των αντλήσεων. Για τον λόγο αυτόν, επαναλαμβάνεται η επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών, θεωρώντας ως επίκαιρη φόρτιση τις αντλήσεις που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται η εκτέλεση του μοντέλου κατανομής της ζήτησης για τον υπολογισμό των απολήψεων. Προφανώς, επειδή η επικαιροποιημένη απορροή των πηγών είναι μικρότερη από προηγουμένως, το μοντέλο επιβάλλει περαιτέρω αντλήσεις. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επέλθει σύγκλιση, η οποία ελέγχεται ορίζοντας μια μέγιστη ανοχή μεταξύ της εκτιμημένης πηγαίας απορροής δύο διαδοχικών κύκλων. Συνήθως, η σύγκλιση επιτυγχάνεται σε δύο μόλις κύκλους.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ροής μοντέλου κατανομής της ζήτησης νερού.

2.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

2.3.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Η εκτίμηση των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου μπορεί να διατυπωθεί ως ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned} & \text{minimise } f(\mathbf{x}) \\ & \mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max} \end{aligned} \quad (2.23)$$

όπου f ένα βαθμωτό μέτρο επίδοσης που συνιστά την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης¹, $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$ το διάνυσμα των παραμέτρων (μεταβλητών ελέγχου), n η διάσταση του προβλήματος (πλήθος παραμέτρων), και \mathbf{x}^{\min} , \mathbf{x}^{\max} τα όρια διακύμανσης των παραμέτρων (εφικτός χώρος). Η επίδοση του μοντέλου ελέγχεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες με τις παρατηρημένες αποκρίσεις, με βάση τα όσα αναφέρονται στο εδάφιο 2.3.3.

Στα περισσότερα προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης ο χώρος αναζήτησης, ήτοι η επιφάνεια απόκρισης της αντικειμενικής συνάρτησης, είναι μη κυρτός, γεγονός που έχει ως συνέπεια την ύπαρξη πολλών τοπικών ακροτάτων². Οι τυπικές δυσχέρειες που απαντώνται σε τέτοιου είδους προβλήματα είναι:

- ο εγκλωβισμός της διαδικασίας αναζήτησης σε τοπικό ακρότατο·
- το μεγάλο πλήθος δοκιμών που απαιτείται για τον εντοπισμό του ολικού ακροτάτου, δεδομένου ότι για την αποφυγή των τοπικών ακροτάτων απαιτείται λεπτομερής διερεύνηση του χώρου αναζήτησης·
- η λεγόμενη *κατάρα των διαστάσεων* (curse of dimensionality), ήτοι η εκθετική αύξηση του απαιτούμενου πλήθους δοκιμών με την αύξηση του πλήθους των μεταβλητών ελέγχου.

Ειδικότερα, η βαθμονόμηση των παραμέτρων υδρολογικών μοντέλων συνιστά ένα από τα πλέον απαιτητικά προβλήματα ολικής βελτιστοποίησης, καθώς στην περίπτωση αυτή ο χώρος αναζήτησης είναι έντονα τραχύς και περιέχει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό τοπικών ακροτάτων, σε διάφορες μάλιστα κλίμακες (Duan et al., 1992). Επιπλέον, εξαιτίας των εγγενών σφαλμάτων του μαθηματικού μοντέλου και των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, η εύρεση της πραγματικά ολικά βέλτιστης λύσης δεν είναι ποτέ εφικτή στην πράξη. Συνεπώς, αυτό που επιζητείται είναι η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό πλήθος δοκιμών. Συχνά, το πλήθος των δοκιμών απαιτεί το κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης. Κατά κανόνα, πολύπλοκες δομές μοντέλων με πολλές παραμέτρους απαιτούν μεγάλο φόρτο υπολογισμών. Από την άλλη πλευρά, το μεγάλο πλήθος μεταβλητών ελέγχου δυσχεραίνει σημαντικά τη διαδικασία αναζήτησης, τόσο εξαιτίας της κατάρας των διαστάσεων όσο και λόγω τυχόν αλληλεπιδράσεων των παραμέτρων, οι οποίες αποτελούν σύνηθες αίτιο μη ομαλής γεωμετρίας του χώρου αναζήτησης.

Για την επίλυση των προβλημάτων ολικής βελτιστοποίησης έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο φάσμα μεθοδολογιών, εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση των οποίων γίνεται από τον *Ευστρατιάδη* (2001). Η πλέον σύγχρονη τάση συνίσταται στην ανάπτυξη υβριδικών αλγοριθμικών σχημάτων, τα οποία συνδυάζουν στοιχεία από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις ώστε να εκμεταλλευτούν τα ισχυρά χαρακτηριστικά τους. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η μέθοδος της *ανασηματιζόμενης σύνθετης εξέλιξης* (shuffled complex evolution), η οποία αναπτύχθηκε από ομάδα ερευνητών του

¹ Συμβατικά, θα θεωρείται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας συνάρτησης $f(\mathbf{x})$ που είναι ισοδύναμο με την μεγιστοποίηση της $-f(\mathbf{x})$.

² Εξαιτίας της ύπαρξης πολλών ακροτάτων εκ των οποίων ζητείται η εύρεση του ολικά βέλτιστου εξ αυτών, η βελτιστοποίηση μη κυρτών συναρτήσεων αποκαλείται συνήθως *ολική βελτιστοποίηση* (global optimisation).

Πανεπιστημίου της Αριζόνα (*Duan et al.*, 1992) και αποτελεί σήμερα την πλέον διαδομένη μέθοδο σε προβλήματα βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων. Αν και η μέθοδος θεωρείται ευρέως καταξιωμένη, οι ιδιαιτερότητες των προβλημάτων βελτιστοποίησης που προέκυψαν στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού έργου ώθησαν στην αναζήτηση ακόμη πιο βελτιωμένων σχημάτων, όπως αυτό που περιγράφεται στα εδάφια που ακολουθούν.

2.3.2 Θεμελιώδεις έννοιες σχήματος βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου αναπτύχθηκε μια γενική μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων ολικής βελτιστοποίησης, η οποία εφαρμόζεται τόσο για την βαθμονόμηση των παραμέτρων του παρόντος υδρολογικού μοντέλου όσο και για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (*Καραβοκυρός κ.ά.*, 2004).

Ο λεγόμενος *εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου* είναι μια ευρετική τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, στην οποία επιχειρείται σύζευξη διαφορετικών μεθοδολογικών προσεγγίσεων και ορισμένων πρωτότυπων στοιχείων (*Ευστρατιάδης*, 2001· *Efstratiadis and Koutsoyiannis*, 2002). Το υπόβαθρο του αλγορίθμου βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις έννοιες:

(α) μια στρατηγική *εξελικτικής αναζήτησης* για την διερεύνηση του εφικτού χώρου·

(β) ένα σύνολο κανόνων εξέλιξης που χρησιμοποιούν ως βάση ένα κατάλληλα τροποποιημένο σχήμα *κατερχόμενου απλόκου*·

(γ) μια τεχνική *προσομοιωμένης ανόπτησης*, βάσει της οποίας ρυθμίζεται ο βαθμός τυχαιότητας στην αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων κατά την διαδικασία αναζήτησης.

Πριν την περιγραφή του αλγορίθμου, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των παραπάνω θεμελιωδών εννοιών.

Η έννοια της εξελικτικής αναζήτησης

Η *εξελικτική αναζήτηση* (evolutionary search) είναι μια γενική στρατηγική, η οποία αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων σύγχρονων μεθόδων ολικής βελτιστοποίησης. Συνίσταται στην διερεύνηση του χώρου αναζήτησης πάνω στη βάση ενός προκαθορισμένου πλήθους σημείων που καλείται *πληθυσμός* (population). Ο πληθυσμός γεννάται τυχαία στον εφικτό χώρο και στην συνέχεια εξελίσσεται βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά του, όπως αυτά εκφράζονται μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Για την εξέλιξη του πληθυσμού χρησιμοποιούνται κανόνες που βασίζονται σε πιθανοτικά ή προσδιοριστικά κριτήρια ή συνδυασμούς αυτών. Σταδιακά, ο πληθυσμός συγκλίνει προς μια μεμονωμένη λύση, η οποία θεωρείται ως η ολικά βέλτιστη του προβλήματος.

Ο πλέον διαδεδομένος εκπρόσωπος των εξελικτικών μεθόδων είναι οι *γενετικοί αλγόριθμοι*¹ (*Goldberg*, 1989· *Michalewicz*, 1992).

Η μέθοδος κατερχόμενου απλόκου

Η μέθοδος *κατερχόμενου απλόκου*² (downhill simplex) αποτελεί μια από τις πλέον κλασσικές τεχνικές αναζήτησης τοπικών ακροτάτων και έχει αναπτυχθεί από τους *Nelder and Mead* (1965). Βάσει της

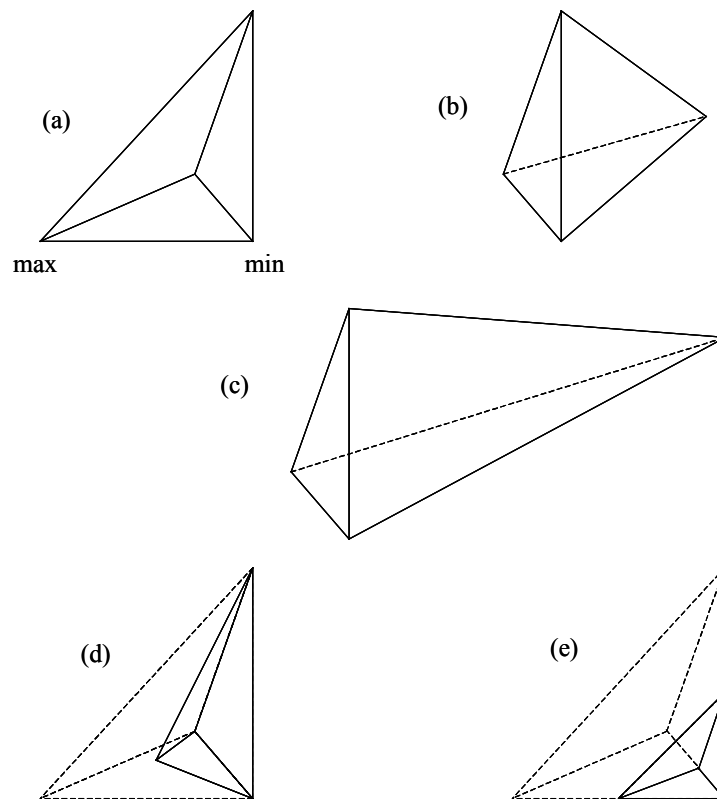
¹ Ο *γενετικοί αλγόριθμοι* (genetic algorithms) αναφέρονται σε υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούν το πρότυπο των φυσικών εξελικτικών διαδικασιών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές έχουν ως κοινή εννοιολογική βάση την προσομοίωση της εξέλιξης ατόμων-λύσεων μέσω διαδικασιών που είναι εμπνευσμένες από τη φυσική διαλογή και την αναπαραγωγή.

² Η ονομασία *άπλοκο* (simplex) προέρχεται από το ομώνυμο γεωμετρικό σχήμα, ήτοι ένα πολύεδρο $n + 1$ κορυφών στον n -διάστατο χώρο.

μεθόδου αυτής, η αναζήτηση γίνεται μέσω $n + 1$ γραμμικά ανεξάρτητων σημείων, τα οποία συνιστούν ένα άπλοκο σχήμα που διερευνά τον εφικτό χώρο εκτελώντας τις τεσσάρων ειδών κινήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5:

- ανάκλαση της τρέχουσας χειρότερης κορυφής ως προς το κεντροειδές του απλόκου·
- επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης·
- συμπίεση αντίθετα προς την διεύθυνση ανάκλασης·
- συρρίκνωση όλων των κορυφών γύρω από το καλύτερο σημείο.

Αποδεικνύεται ότι με κατάλληλη αλληλουχία των παραπάνω κινήσεων το άπλοκο συγκλίνει πάντα προς το πλησιέστερο τοπικό ακρότατο, προσαρμόζοντας το σχήμα του στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας απόκρισης της συνάρτησης. Σε περίπτωση έντονης μεταβολής του αναγλύφου, η κίνηση του απλόκου είναι πολύ γρήγορη, ενώ αντίθετα η κίνηση γίνεται πολύ αργά όταν το ανάγλυφο είναι σχεδόν επίπεδο. Σημειώνεται ότι σε κάθε βήμα το σχήμα του απλόκου καθορίζεται πλήρως από τις συντεταγμένες των κορυφών του προηγούμενου σχήματος και την σχετική διάταξη των τιμών της συνάρτησης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τις ίδιες τις τιμές.



Σχήμα 2.5: Δυνατές κινήσεις του απλόκου για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης στον χώρο των τριών διαστάσεων: (α) αρχικό σχήμα, (β) ανάκλαση της χειρότερης κορυφής (σημείο μεγίστου) περί το κεντροειδές των υπόλοιπων κορυφών, (γ) επέκταση κατά μήκος της διεύθυνσης ανάκλασης, (δ) εσωτερική συμπίεση, και (ε) συρρίκνωση γύρω από την καλύτερη κορυφή (σημείο ελαχίστου).

Προσομοιωμένη απόπτωση

Ανόπτωση (annealing) καλείται η διαδικασία ανακατανομής των ατόμων κατά την σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου (ή υγρού). Καθώς ένα μέταλλο ψύχεται, η θερμική κινητικότητα των μορίων του περιορίζεται, ενώ όταν η θερμοκρασία μειωθεί αρκετά, τα άτομα στοιχίζονται και δημιουργούν καθαρούς κρυστάλλους. Η κρυσταλλική μορφή αποτελεί την κατάσταση ελάχιστης ενέργειας του συστήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία κρυστάλλων είναι ο αργός ρυθμός ψύξης.

Εφόσον η ψύξη πραγματοποιηθεί γρήγορα, το σύστημα καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική ή άμορφη δομή, η οποία έχει μεγαλύτερη ενέργεια.

Η περιγραφή της παραπάνω διεργασίας γίνεται με νόμους της στατιστικής μηχανικής. Η ενέργεια E ενός συστήματος που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία και έχει θερμοκρασία T θεωρείται τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κατανομή πιθανότητας Boltzman, δηλαδή:

$$p(E) \sim \exp\left(-\frac{E}{\kappa T}\right) \quad (2.24)$$

όπου κ η σταθερά του Boltzman. Η σχέση υποδηλώνει ότι, ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία, υπάρχει έστω και μικρή πιθανότητα κατά την ψύξη του μετάλλου να επιτευχθεί κατάσταση υψηλότερης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτόν δίνεται στο σύστημα η ευκαιρία να εξέλθει από ένα τοπικό ενεργειακό ελάχιστο και να βρεθεί σε μια ισορροπία χαμηλότερης ενέργειας. Κατά την πορεία ψύξης η ενέργεια μπορεί είτε να μειωθεί είτε να αυξηθεί, αλλά καθώς μειώνεται η θερμοκρασία περιορίζεται η πιθανότητα να επιτευχθεί αύξηση της ενέργειας.

Η *προσομοιωμένη απόπτωση* (simulated annealing) είναι μια γενική μεθοδολογία ολικής βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από την ομώνυμη θερμοδυναμική διεργασία, η οποία εισήχθη από τους *Kirkpatrick et al.* (1983). Με τον όρο περιγράφονται σχήματα αναζήτησης που χρησιμοποιούν πιθανοτικά κριτήρια αντίστοιχα με την (2.24), βάσει των οποίων δίνεται η δυνατότητα “αναρρίχησης” (θεωρώντας πάντα ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης) ώστε να είναι εφικτή η διαφυγή από τοπικά ελάχιστα. Στα εν λόγω σχήματα εισάγεται μια παράμετρος ελέγχου αντίστοιχη της θερμοκρασίας και ένα *χρονοδιάγραμμα απόπτωσης* (annealing cooling schedule), το οποίο περιγράφει την στρατηγική μείωσης της θερμοκρασίας.

Αποδεικνύεται ότι με τη θεώρηση μιας υψηλής τιμής της αρχικής θερμοκρασίας και την υιοθέτηση ενός κατάλληλου χρονοδιαγράμματος απόπτωσης, μια διαδικασία προσομοιωμένης απόπτωσης συγκλίνει ασυμπτωτικά προς την ολικά βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια, αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την παραπάνω στρατηγική ενδείκνυνται για δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς μπορούν να διαφεύγουν εύκολα από περιοχές έλξης τοπικών ακροτάτων. Ωστόσο, τέτοιοι αλγόριθμοι είναι συνήθως πολύ αργοί, δεδομένου ότι η μέθοδος εγγυάται την εύρεση του ολικού ακροτάτου μετά από θεωρητικά άπειρο πλήθος δοκιμών. Η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται από τον ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας. Όσο πιο αργά μειώνεται η θερμοκρασία, τόσο πιο αργή είναι η σύγκλιση αλλά και τόσο πιο πιθανή είναι η εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης.

Γενικά, η μέθοδος της προσομοιωμένης απόπτωσης έχει βρει εφαρμογή σε προβλήματα ακέραιων τιμών, ενώ σχετικά περιορισμένες είναι οι αναφορές της βιβλιογραφίας για προβλήματα συνεχών τιμών, όπως είναι ένα πρόβλημα βαθμονόμησης παραμέτρων (*Press et al.*, 1992, pp. 444-455).

2.3.3 Περιγραφή του αλγορίθμου

Ο εξελικτικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε συνδυάζει την ευρωστία της προσομοιωμένης απόπτωσης σε τραχέα προβλήματα βελτιστοποίησης, με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων κλίσης σε απλούς χώρους αναζήτησης. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τέσσερις παραμέτρους, ήτοι το μέγεθος του πληθυσμού, m , δύο παραμέτρους του χρονοδιαγράμματος απόπτωσης, ξ και ψ , και την πιθανότητα μετάλλαξης¹, p_m . Αρχικά παράγεται ένας πληθυσμός $m \geq n + 1$ τυχαίων σημείων, ομοιόμορφα κατανομημένων στον εφικτό χώρο που ορίζεται από τα διανύσματα \mathbf{x}^{\min} και \mathbf{x}^{\max} (όρια διακύμανσης παραμέτρων). Οι συντεταγμένες των σημείων γεννώνται μέσω της σχέσης:

¹ Η ονομασία *μετάλλαξη* (mutation) προέρχεται από την ορολογία των γενετικών αλγορίθμων και υποδηλώνει λύσεις οι οποίες γεννώνται με εντελώς τυχαίο τρόπο.

$$x_i = x_i^{\min} + u (x_i^{\max} - x_i^{\min}), \text{ για κάθε } i = 1, \dots, n \quad (2.25)$$

όπου u τυχαίος αριθμός που παράγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Ο πληθυσμός αυτός εξελίσσεται σταδιακά, μέχρι να συγκλίνει στην ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, ορισμένα (κατά κανόνα ένα) μέλη του πληθυσμού αντικαθίσταται από νέα σημεία. Ο αλγόριθμος αναζητά βελτιωμένες λύσεις, αν όμως δεν μπορεί να βρει τέτοιες επιδιώκει να διερευνήσει νέες περιοχές του εφικτού χώρου, αποδεχόμενος λύσεις που μπορεί να είναι χειρότερες από τις προηγούμενες. Η πιθανότητα αποδοχής τέτοιων λύσεων ρυθμίζεται μέσω του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης.

Ένας τυπικός επαναληπτικός κύκλος του αλγορίθμου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Εντοπίζονται τα σημεία με την καλύτερη (ελάχιστη) και χειρότερη (μέγιστη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και επαναπροσδιορίζεται η θερμοκρασία T του συστήματος ώστε να μην ξεπερνά την τιμή $\zeta (f_{\max} - f_{\min})$, όπου $\zeta \geq 1$ η πρώτη παράμετρος του χρονοδιαγράμματος ανόπτησης. Ο εν λόγω περιορισμός εμποδίζει την θερμοκρασία να λάβει υπερβολικά υψηλές τιμές, κάτι που θα επιβράδυνε σημαντικά τον αλγόριθμο καθώς η διαδικασία αναζήτησης θα γινόταν υπερβολικά τυχαία.

Βήμα 2ο: Διαμορφώνεται ένα άπλοκο $S = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n+1}\}$ με τυχαία επιλογή των κορυφών από τον τρέχοντα πληθυσμό, όπου η κορυφή \mathbf{x}_1 αντιστοιχεί στην καλύτερη (μικρότερη) και \mathbf{x}_{n+1} στην χειρότερη (υψηλότερη) τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Βήμα 3ο: Από το υποσύνολο $\{\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n+1}\}$, επιλέγεται μια κορυφή \mathbf{w} ως υποψήφια για να αντικατασταθεί. Πρόκειται για το σημείο που μεγιστοποιεί το κριτήριο επιλογής:

$$g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + u T \quad (2.26)$$

όπου u τυχαίος αριθμός που παράγεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Στην πραγματικότητα, το κριτήριο επιλογής είναι η αντικειμενική συνάρτηση στην οποία προστίθεται ένας τυχαίος όρος που εξαρτάται από την τιμή της επίκαιρης θερμοκρασίας. Στα αρχικά στάδια της αναζήτησης, ο βαθμός τυχειότητας κατά την επιλογή του μέλους που αντικαθίσταται είναι σημαντικός, καθώς η θερμοκρασία είναι υψηλή. Σταδιακά, η θερμοκρασία μειώνεται οπότε μειώνεται και η επίδραση του τυχαίου όρου.

Βήμα 4ο: Γεννάται ένα νέο σημείο \mathbf{r} ανακλώντας το άπλοκο ως προς την κορυφή \mathbf{w} , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{r} = \mathbf{g} + (0.5 + u) (\mathbf{g} - \mathbf{w}) \quad (2.27)$$

όπου \mathbf{g} το κεντροειδές του υποσυνόλου $S - \{\mathbf{w}\}$.

Βήμα 5ο: Εφόσον $f(\mathbf{r}) < f(\mathbf{w})$, το νέο σημείο \mathbf{r} αντικαθιστά την κορυφή \mathbf{w} . Στη συνέχεια, προκύπτουν δύο περιπτώσεις. Αν $f(\mathbf{r}) < f(\mathbf{x}_1)$, δηλαδή το νέο σημείο είναι καλύτερο από την βέλτιστη κορυφή του απλόκου, η διαφορά $\mathbf{r} - \mathbf{g}$ υποδηλώνει την διεύθυνση της κλίσης, ή ισοδύναμα την κατεύθυνση ελαχιστοποίησης της συνάρτησης. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς επιτρέπει στον αλγόριθμο να κατευθυνθεί προς ένα τοπικό ακρότατο. Γενικά, ο εντοπισμός της κλίσης σε μια μη ομαλή επιφάνεια απόκρισης είναι δύσκολος, ειδικά όταν το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου είναι μεγάλο. Εφόσον ο αλγόριθμος εντοπίσει την κλίση της συνάρτησης, πραγματοποιείται μια ακολουθία βημάτων επέκτασης στην κατεύθυνσή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} + \varphi[s] (\mathbf{r} - \mathbf{g}) \quad (2.28)$$

όπου $\varphi[s] = \varphi[s - 1] + u$, με $\varphi[0] = 1$. Η επέκταση του απλόκου συνεχίζεται όσο βελτιώνεται η τιμή της συνάρτησης, επιταχύνοντας έτσι σημαντικά την διαδικασία αναζήτησης.

Η δεύτερη περίπτωση προκύπτει όταν $f(\mathbf{r}) > f(\mathbf{x}_1)$, οπότε το άπλοκο συμπιέζεται εξωτερικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} + (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{r} - \mathbf{g}) \quad (2.29)$$

Εφόσον επιτευχθεί βελτίωση της συνάρτησης, το σημείο \mathbf{x}_{new} αντικαθιστά το \mathbf{r} .

Βήμα 6ο: Αν $g(\mathbf{r}) > g(\mathbf{w})$, το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} απορρίπτεται και το άπλοκο συμπιέζεται εσωτερικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{g} - (0.25 + 0.5 u) (\mathbf{g} - \mathbf{r}) \quad (2.30)$$

Αν $f(\mathbf{x}_{\text{new}}) > f(\mathbf{x}_{n+1})$, δηλαδή το νέο σημείο είναι χειρότερο ακόμη και από την χειρότερη κορυφή του απλόκου, το τελευταίο συρρικνώνεται γύρω από την καλύτερη κορυφή \mathbf{x}_1 , ώστε $\mathbf{x}'_i = 0.5 (\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_i)$ για κάθε $i = 2, \dots, n+1$. Η μείωση του όγκου, που σημειωτέον είναι η μοναδική περίπτωση αντικατάστασης περισσοτέρων του ενός μελών του πληθυσμού, υποδηλώνει ότι το άπλοκο περικυκλώνει ένα τοπικό ακρότατο. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία μειώνεται κατά έναν συντελεστή ψ (δεύτερη παράμετρος χρονοδιαγράμματος ανόπτησης), η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0.90-0.99. Ο μικρός ρυθμός μείωσης εμποδίζει τον υπερβολικά γρήγορο μηδενισμό της θερμοκρασίας (άρα και του βαθμού τυχαιότητας της διαδικασίας αναζήτησης), κάτι που θα οδηγούσε σε γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου σε ένα τοπικό ακρότατο.

Βήμα 7ο: Αν $g(\mathbf{r}) < g(\mathbf{w})$, το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} γίνεται αποδεκτό παρόλο που χειροτερεύει την τιμή της συνάρτησης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένα δεδομένο πλήθος βημάτων επέκτασης σύμφωνα με την (2.28), με τη διαφορά ότι τώρα η αναζήτηση γίνεται προς την κατεύθυνση μεγιστοποίησης της συνάρτησης (η εν λόγω διαδικασία ονομάζεται αναρρίχηση). Η διαφορά των τιμών της συνάρτησης σε δύο διαδοχικά σημεία αποτελεί μέτρο της κλίσης της. Εφόσον η κλίση γίνει αρνητική, γεγονός που υποδηλώνει ότι το νέο σημείο υπερπηδά την περιοχή έλξης όπου έχει εγκλωβιστεί το άπλοκο, το σημείο που προκύπτει αντικαθιστά το \mathbf{r} . Η παραπάνω στρατηγική, η οποία βασίζεται σε μια ελαφρά τροποποίηση του σχήματος ανόπτησης-απλόκου που προτείνουν οι *Pan and Wu* (1998), επιτρέπει στο άπλοκο να ξεφεύγει εύκολα από τα ήδη εντοπισμένα τοπικά ακρότατα και να διερευνά περιοχές γειτονικών ακροτάτων.

Βήμα 8ο: Εφόσον με κανέναν από τους παραπάνω τρόπου δεν βρεθεί λύση που να είναι καλύτερη από το σημείο ανάκλασης \mathbf{r} , γεννάται ένα νέο σημείο στην ευρύτερη περιοχή σύγκλισης του πληθυσμού, με βάση μια πιθανότητα μετάλλαξης p_m . Η γέννηση του τυχαίου σημείου γίνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\mathbf{x}_{\text{new}} = \mathbf{c} + d \mathbf{y} / \|\mathbf{y}\| \quad (2.31)$$

όπου \mathbf{c} το κεντροειδές του πληθυσμού, d η μέγιστη Ευκλείδεια απόσταση όλων των σημείων από το \mathbf{c} και \mathbf{y} μια τυχαία διεύθυνση στον n -διάστατο χώρο.

Ο αλγόριθμος διακόπτεται εφόσον η σχετική διαφορά ως προς την τιμή της συνάρτησης μεταξύ του καλύτερου και χειρότερου σημείου του πληθυσμού είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή. Διαφορετικά, διακόπτεται αν ξεπεραστεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος δοκιμών, ήτοι των σημείων που διερευνώνται.

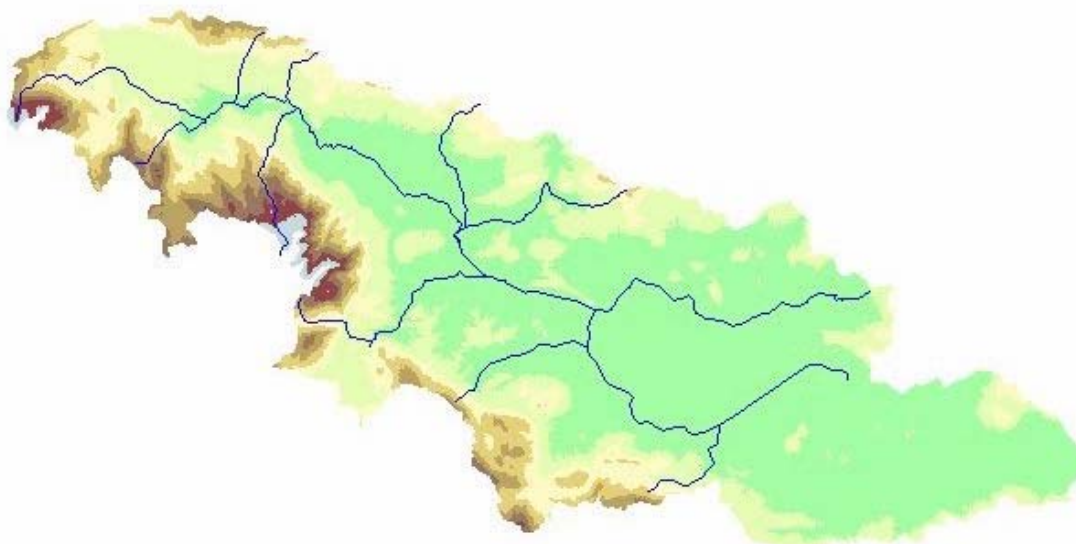
Έως τώρα, το προτεινόμενο σχήμα βελτιστοποίησης έχει εξεταστεί σε ένα ευρύ φάσμα τυπικών συναρτήσεων της βιβλιογραφίας καθώς και σε πολύπλοκα προβλήματα από τον χώρο της υδρολογίας, έχοντας αποδειχθεί πολύ αξιόπιστο ως προς τον εντοπισμό του ολικού βελτίστου με λογικό πλήθος δοκιμών (*Ευστρατιάδης*, 2001).

3 Δεδομένα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

3.1 Γεωγραφικά δεδομένα

3.1.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

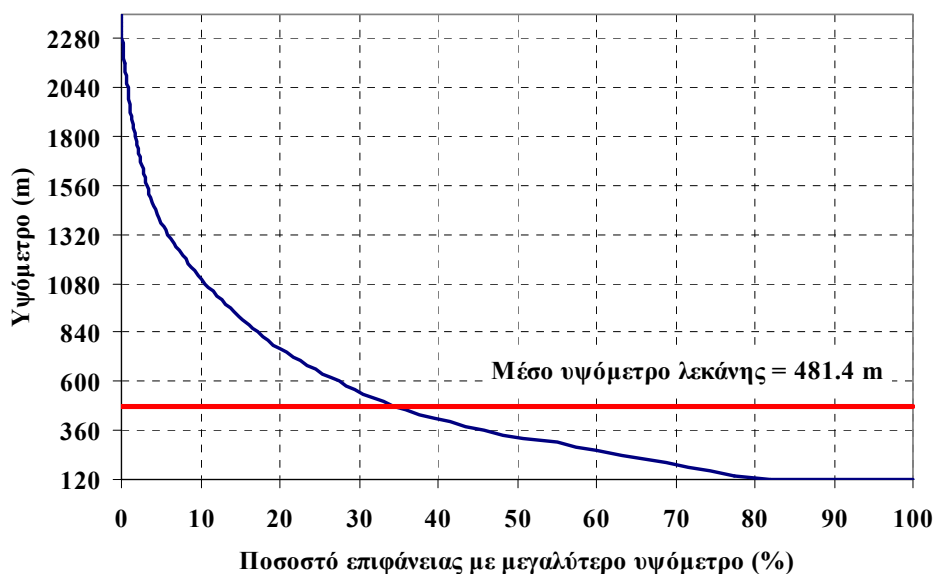
Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (Σχήμα 3.1) είναι η μεγαλύτερη και σημαντικότερη, από πλευράς υδατικού δυναμικού, της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας. Ο υδροκρίτης της ορίζεται βόρεια και βορειοανατολικά από τα όρη Οίτη, Καλλίδρομο, Σφίγγιο και Χλωμό, και νότια και νοτιοδυτικά από τα όρη Γκιώνα, Παρνασσός και Ελικώνας. Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού συνορεύει νοτιοανατολικά με τη λεκάνη της Υλίκης και νότια με τις λεκάνες των Βαγίων και του Ασωπού. Ως έξοδος της λεκάνης θεωρείται η Διώρυγα Καρδίτσας, μέσω της οποίας τα επιφανειακά νερά της οδηγούνται προς τη λίμνη Υλίκη.



Σχήμα 3.1: Ψηφιακό μοντέλο λεκάνης απορροής Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης.

Η γεωλογική-τεκτονική δομή της λεκάνης χαρακτηρίζεται από την πτύχωση και την διάρρηξη των πετρωμάτων, αλλά και από την κλιμακωτή τοποθέτηση των διαφόρων τεμαχών κατά μήκος της. Οι πολλαπλές παρεμβολές των υδατοστεγανών σχηματισμών στα ασβεστολιθικά τεμάχη είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία ποικίλων γεωμορφολογικών δομών, και ειδικότερα την διαμόρφωση πολλαπλών υδρογεωλογικών ενοτήτων που μπορεί να είναι ανεξάρτητες ή και να επικοινωνούν μεταξύ τους. Οι ασβεστόλιθοι αποτελούν τον κύριο γεωλογικό σχηματισμό της λεκάνης (~ 40% της επιφάνειας), μέσα στον οποίο διαμορφώνονται οι υδροφόροι ορίζοντες. Η συνηθέστερη κατάσταση είναι η ύπαρξη ενός ανώτερου υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε τεταρτογενείς αποθέσεις και νεογενή, καθώς και ενός κατώτερου (κυρίου) καρστικού υδροφόρου ορίζοντα μέσα σε ασβεστόλιθους διαφόρων ηλικιών και τύπων (Παγούνης κ.ά., 1994).

Η λεκάνη καταλαμβάνει συνολική έκταση 2042.6 km². Το μέσο υψόμετρό της ανέρχεται σε 481.4 m, ενώ το μέγιστο υψόμετρό της, που είναι η κορυφή Λιάκουρα του Παρνασσού, φτάνει τα +2457 m. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η σχέση επιφάνειας-υψομέτρου (υψογραφική καμπύλη) της λεκάνης.



Σχήμα 3.2: Υψογραφική καμπύλη λεκάνης απορροής Βοιωτικού Κηφισού.

3.1.2 Υδρογραφικό δίκτυο

Ο Βοιωτικός Κηφισός, που είναι το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης, πηγάζει από το Καλλίδρομο όρος και τον Παρνασσό και εκβάλλει στη λίμνη Υλίκη. Ο κύριος κλάδος του έχει μήκος 102 km, συμπεριλαμβανομένων και των τοπικών διακοπών της κοίτης του. Στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού αναπτύσσονται δύο μεγάλες χαράδρες (μία στην περιοχή Μοδίου-Αμφίκλειας και μία στην περιοχή Ανθοχωρίου-Μαυρονερίου), μέσω των οποίων διαμορφώνονται τρεις χαρακτηριστικές υδρογεωλογικές ενότητες, του άνω, μέσου και κάτω ρου. Αν και ο διαχωρισμός των υπολεκανών δεν είναι κοινός σε όλες τις μελέτες, συνήθως ως κατάντη όριο του άνω ρου θεωρείται το φράγμα Αμφίκλειας, ενώ ως κατάντη όριο του μέσου ρου θεωρείται η γέφυρα Ανθοχωρίου (η διάκριση αυτή έχει υιοθετηθεί από το ΙΓΜΕ). Ο μεγαλύτερος κλάδος του Βοιωτικού Κηφισού ξεκινά από τις υπώρειες του όρους Καλλίδρομο (κοντά στο χωριό Καλοσκοπή) και εμπλουτίζεται από τα νερά των χειμάρρων Γραβιάς και Αγοριανίτου, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις πηγές του Παρνασσού (πηγές Σουβάλας και Λιλαίας). Κατά μήκος του μέσου ρου, ιδιαίτερα στην περιοχή Αμφίκλειας-Μοδίου, πραγματοποιούνται σημαντικές διηθήσεις, με συνέπεια τη σημαντική μείωση (έως και μηδενισμό) της παροχής του ποταμού στο ύψος της γέφυρας Ανθοχωρίου. Στη συνέχεια, ο Βοιωτικός Κηφισός διέρχεται από τα στενά Μαυρονερίου και εισέρχεται στο Κωπαϊδικό Πεδίο. Μετά τη θέση του φράγματος αναρρύθμισης ΒΟΟΤ (κοντά στο χωριό Ρωμαίικο), ο ποταμός ακολουθεί την τεχνητή κοίτη του (Μεγάλη Τάφρος - Τάφρος Τέλματος - Συγκεντρωτική Τάφρος), η οποία διανοίχτηκε στα πλαίσια των έργων αποξήρανσης της Κωπαΐδας.

Το δεύτερο σημαντικότερο υδατόρευμα της λεκάνης είναι ο Μέλανας. Ο Μέλανας πηγάζει από τις ομώνυμες πηγές που αναπτύσσονται στους πρόποδες του Ακοντίου όρους και ενισχύεται από τις πηγές Πολυγύρας. Στη μέση του βόρειου άκρου της Κωπαΐδας η ροή του Μέλανα διχάζεται, καθώς τμήμα του κατευθύνεται μέσω διευθετημένης κοίτης (Τάφρος Μέλανα) προς τη Συγκεντρωτική Τάφρο και τη Διώρυγα Καρδίτσας, ενώ το υπόλοιπο τμήμα, ακολουθώντας την παλιά κοίτη του ποταμού, κατευθύνεται προς το Κάστρο και καταλήγει στις καταβάθρες του Αγίου Ιωάννη, στην περιοχή Τοπόλια (ΒΑ του χωριού Κόκκινο). Με τον τρόπο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος του υδατικού δυναμικού του Μέλανα εκτρέπεται προς τον Βοιωτικό Κηφισό, ενώ το υπόλοιπο χάνεται εκτός λεκάνης, προς τον Ευβοϊκό Κόλπο.

Άλλος ποταμός με μόνιμη ροή είναι ο Έρκυνας, ο οποίος πηγάζει από τις πηγές Κρύας στη Λειβαδιά και καταλήγει στον Βοιωτικό Κηφισό. Από τα υπόλοιπα υδατορεύματα της λεκάνης, η διαίτα των οποίων είναι χειμαρρική, κυριότερα είναι ο Λόφιος, ο Πόντζας, η Πλατανιά, το ρέμα Αγίου Βλασίου (Βαθύρεμα), το Μπογδανόρεμα και οι χειμαρροί Γραβιάς και Αγοριανίτου. Στους παραποτάμους του Βοιωτικού Κηφισού εντάσσεται και η τεχνητή τάφρος του Μαυρονερίου, μέσω της οποίας αποστραγγίζονται τα νερά των ομώνυμων πηγών.

3.1.3 Καρστικές πηγές

Λόγω της ιδιόμορφης γεωλογικής και υδρογεωλογικής της δομής (κυριαρχία ασβεστολιθικών πετρωμάτων), η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού διαθέτει πολύ αξιόλογο υπόγειο και πηγαίο υδατικό δυναμικό. Ακολουθώντας το συμβατικό διαχωρισμό της λεκάνης στις τρεις υδρογεωλογικές ενότητες του άνω, μέσου και κάτω ρου, οι κυριότερες πηγές που αναπτύσσονται ανά υπολεκάνη είναι:

Πηγές άνω ρου

Οι σημαντικότερες πηγές του άνω ρου είναι γνωστές με την ονομασία πηγές Λιλαίας ή Σουβάλας. Πρόκειται για ανερχόμενες καρστικές πηγές που αναβλύζουν στις υπώρειες του Παρνασσού, σε υψόμετρα περί τα +300 m, κατά μήκος του άξονα Μαριολάτα - Λιλαία - Πολύδροσο. Οι κυριότερες εμφανίσεις τους είναι στις θέσεις Αγία Ελεούσα (+306.2 m), Γκατσινός (+301.2 m), Άβυσσος (+295.6 m), Κάτω Αγόριανη ή Ανατολικό Κεφαλόβρυσο (+296.1 m), Δυτικό Κεφαλόβρυσο (+298.8 m) και Μαριολάτα (+298.4 m). Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, αναπτύσσονται τα συγκροτήματα των πηγών της Άνω Σουβάλας (από +640 ως +745 m) και της Άνω Αγόριανης (από +725 ως +755 m).

Πηγές μέσου ρου

Οι κυριότερες πηγές του μέσου ρου είναι οι καρστικές πηγές Μαυρονερίου, οι οποίες αναβλύζουν στις ανατολικές υπώρειες του Παρνασσού (Φιλοβοιωτό όρος), και σε υψόμετρο +120-124 m. Οι πηγές Μαυρονερίου διαθέτουν πολύ πλούσιο υδατικό δυναμικό, το οποίο καταδεικνύει ότι τα όρια της υδρογεωλογικής τους λεκάνης εκτείνονται πολύ πέρα από τα όρια της αντίστοιχης υδρολογικής. Πριν την κατασκευή των έργων της ΒΟΟΤ, τα νερά των πηγών τροφοδοτούσαν το μόνιμο έλος Δαύλειας, ενώ τώρα σχηματίζουν ένα μικρό τέλμα, και στη συνέχεια διοχετεύονται στον Βοιωτικό Κηφισό μέσω της ομώνυμης αποστραγγιστικής τάφρου, στην οποία συμβάλλουν και οι χειμαρροί Αγίου Βλασίου και Πλατανιάς.

Άλλες αξιόλογες πηγές στην υπολεκάνη του μέσου ρου είναι αυτές της Δαύλειας (δυτικά του ομώνυμου χωριού), την Αγίας Παρασκευής και του Προφήτη Ηλία, σε υψόμετρο +130 m. Σημειώνεται ότι αν και οι πηγές Μαυρονερίου και Δαύλειας ανήκουν γεωγραφικά στην υπολεκάνη του κάτω ρου, θεωρείται ότι τροφοδοτούνται από κατεισδύσεις που πραγματοποιούνται στο μέσο ρου, οπότε εντάσσονται σε αυτή την υδρογεωλογική ενότητα.

Πηγές κάτω ρου

Οι κυριότερες πηγές, όχι μόνο του κάτω ρου αλλά και ολόκληρης της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, είναι αυτές του Μέλανα (ή πηγές Χαρίτων), οι οποίες αναβλύζουν κατά μήκος των βόρειων προπόδων του όρους Ακόντιο, σε υψόμετρα που κυμαίνονται από +101.2 m μέχρι +97.9 m. Συνολικά, έχουν καταγραφεί 69 εμφανίσεις των πηγών Μέλανα που εκτείνονται σε μήκος άνω των 2 km. Χαρακτηριστικό των εν λόγω πηγών είναι οι πολύ υψηλές παροχές που εμφανίζουν και οι οποίες παρουσιάζουν μικρές μόνο διακυμάνσεις, τόσο σε ετήσια όσο και σε υπερετήσια βάση. Ο μηχανισμός τροφοδοσίας των πηγών Μέλανα δεν είναι γνωστός. Αρκετά παλιότερα είχε διατυπωθεί η εκδοχή ότι οι πηγές τροφοδοτούνται από έναν υπόγειο καρστικό ποταμό, με ροή από δυτικά προς ανατολικά, δηλαδή από τον Παρνασσό προς την Κοπαΐδα. Νεότερες απόψεις αναφέρουν ότι πρόκειται για

καρστικές πηγές υπερχείλισης, τα σημεία εκροής των οποίων συμπίπτουν με διασταυρώσεις δευτερευόντων ρηγμάτων με το κύριο ρήγμα του Ακοντίου όρους και όχι με καρστικούς αγωγούς (Παπαγιαννοπούλου και Λέτσιος, 1971).

Άλλες σημαντικές πηγές της υπολεκάνης του κάτω ρου είναι αυτές της Πολυγύρας και του Έρκυνα. Οι τέσσερις πηγές Πολυγύρας αναπτύσσονται λίγο χαμηλότερα από τις πηγές Μέλανα, σε υψόμετρα περί τα +96 m, ενώ λόγω της γεωλογικής διαμόρφωσης της ευρύτερης περιοχής, θεωρείται αδύνατη η υδραυλική επικοινωνία τους με τις πηγές Μέλανα. Οι πηγές Έρκυνα (ή πηγές Κρύας) αναβλύζουν πάνω ακριβώς από την πόλη της Λειβαδιάς, στις υπώρειες του Ελικώνα, τροφοδοτώντας τον ομώνυμο ποταμό. Τέλος, μικρότερης σημασίας πηγές στην περιοχή του κάτω ρου είναι οι πηγές του Λόφι, οι οποίες αναπτύσσονται νότια του χωριού Μάζι και τροφοδοτούν τον ομώνυμο χείμαρρο, του Αγίου Ιωάννη, οι οποίες αναβλύζουν νοτιοανατολικά του χωριού Λαφύστιο, και Υψηλάντη, κοντά στο χωριό Σωληνάριο.

3.2 Δεδομένα επιφανειακής υδρολογίας

3.2.1 Βροχομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Στη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού λειτουργούν σήμερα 10 βροχομετρικοί σταθμοί που, με εξαίρεση το σταθμό Αλιάρτου της ΕΜΥ, ανήκουν στο ΥΠΕΧΩΔΕ. Για την ασφαλέστερη εκτίμηση των κατακρημνισμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τριών ακόμη βροχομετρικών σταθμών, οι οποίοι βρίσκονται εκτός λεκάνης, ήτοι της Αταλάντης, της Πυράς και της Συκίας. Οι δύο τελευταίοι, οι οποίοι ανήκουν στην λεκάνη απορροής του Μόρνου, επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί ορεινοί σταθμοί, δεδομένου ότι στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού υπάρχει ανεπάρκεια μετρήσεων βροχόπτωσης σε υψηλά υψόμετρα. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται οι θέσεις όλων των βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου.



Σχήμα 3.3: Θέσεις βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης.

Τα χαρακτηριστικά των 13 συνολικά βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Τα βροχομετρικά δεδομένα των εν λόγω σταθμών συλλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν κατά την Α' φάση του ερευνητικού έργου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2000), ενώ επικαιροποιήθηκαν στα πλαίσια της Β' φάσης (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004).

Παλιότερα, στη λεκάνη είχαν λειτουργήσει και άλλοι βροχομετρικοί σταθμοί, οι οποίοι έχουν έκτοτε εγκαταλειφθεί. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω σταθμών, παρμένα από τις μελέτες των *Αλτηγού κ.ά* (1964) και *Λαδόπουλου και Χωραφά* (1974), δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών περιοχής Βοιωτικού Κηφισού.

Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Διαθέσιμο δείγμα	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Αγία Τριάδα	ΥΠΕΧΩΔΕ	400	1/1963 – 12/2000	998.8
Αλιάρτος ⁽¹⁾	ΕΜΥ	110	1/1907 – 12/2000	576.2
Άνω Μπράλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	600	12/1969 – 12/2000	971.4
Αταλάντη	ΥΠΕΧΩΔΕ	110	1/1967 – 12/2000	558.7
Γραβιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	450	1/1955 – 12/2000	916.6
Δαύλεια	ΥΠΕΧΩΔΕ	380	10/1962 – 12/2000	839.6
Δρυμαία	ΥΠΕΧΩΔΕ	580	11/1962 – 12/2000	724.1
Επτάλοφος	ΥΠΕΧΩΔΕ	830	12/1969 – 12/2000	1105.4
Κάτω Τιθορέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	170	11/1962 – 12/2000	670.8
Λειβαδιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	200	12/1954 – 12/2000	760.8
Παύλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	200	11/1962 – 12/2000	497.3
Πυρά	ΥΠΕΧΩΔΕ	1140	8/1963 – 10/2000	1325.6
Συκέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	780	1/1967 – 12/2000	1237.5

(1) Από τα τέλη του έτους 2000, η λειτουργία του βροχομετρικού σταθμού Αλιάρτου, που είναι ο παλιότερος της περιοχής μελέτης και από τους παλιότερους στην Ελλάδα, έχει ουσιαστικά διακοπεί.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά παλιότερων βροχομετρικών σταθμών λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (Πηγές: *Αλτηγός κ.ά.*, 1964· *Λαδόπουλος και Χωραφάς*, 1974).

Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Περίοδος μετρήσεων	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Ακραιφνιο	Οργ. Κωπαΐδας	92	1928-42	682.1
Ακραιφνιο	Οργ. Κωπαΐδας	92	1950-59	557.1
Λειβαδιά	Ε.Α.	130	1907-42	810.1
Άνω Αγόριανη ⁽¹⁾	Ε.Ε.Υ.	840	1924-47	
Άνω Σουβάλα (Πολύδροσο) ⁽²⁾	Ε.Υ.Δ.Α.	700	1933-55	1311.3
Γραβιά	Ε.Υ.Δ.Α.	400	1933-41	1136.1
Ορχομενός	Οργ. Κωπαΐδας	–	1955-58	–
Στροβίκι	Οργ. Κωπαΐδας	–	1952-58	–
Μεγάλη Γραμμή	Οργ. Κωπαΐδας	–	1952-58	–
Υλίκη	Υπ. Δημ. Έργων	–	–	–
Θήβα	Υπ. Δημ. Έργων	161	1907-28	482.4

(1) Οι *Αλτηγός κ.ά.* (1964) αναφέρουν ότι ο σταθμός λειτούργησε μόνο την περίοδο 1933-41. Ωστόσο, οι *Λαδόπουλος και Χωραφάς* (1974) παραθέτουν δεδομένα από το 1924 μέχρι το 1947, με κενούς ορισμένους μήνες των υδρολογικών ετών 1945-46 και 1947-48.

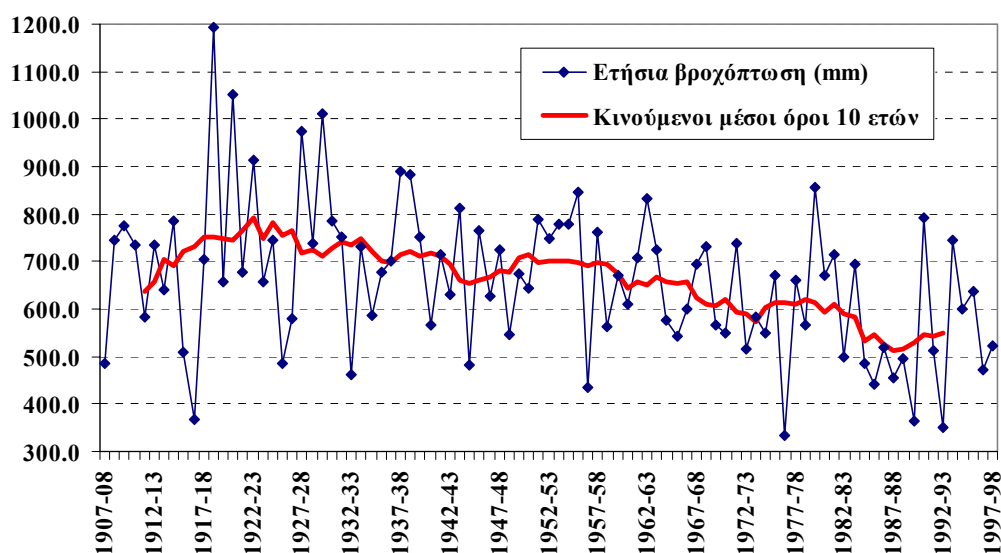
(2) Οι *Αλτηγός κ.ά.* (1964) αναφέρουν ότι ο σταθμός λειτούργησε μόνο την περίοδο 1933-41. Ωστόσο, οι *Λαδόπουλος και Χωραφάς* (1974) παραθέτουν δεδομένα μέχρι το έτος 1955, με κενούς ορισμένους μήνες των υδρολογικών ετών 1942-43, 1943-44 και 1947-48.

Βάσει της μελέτης των *Αλτηγού κ.ά.* (1964), στα μέσα της δεκαετίας του 1950, οι βροχομετρικοί σταθμοί Λειβαδιάς και Γραβιάς μεταφέρθηκαν σε άλλη θέση και επαναλειτούργησαν υπό την

εποπτεία του τότε Υπουργείου Δημοσίων Έργων και νυν ΥΠΕΧΩΔΕ. Ωστόσο, είναι βέβαιο ότι οι θέσεις των οργάνων έχουν αλλάξει κι άλλες φορές έκτοτε, δεδομένου ότι το υψόμετρο που αναφέρεται στη μελέτη (+151 m για τη Λειβαδιά, +230 m για τη Γραβιά) είναι διαφορετικό από το τωρινό τους υψόμετρο (+200 m και +450 m, αντίστοιχα). Το ίδιο συνέβη με τους σταθμούς Άνω Αγόριανης, ο οποίος επαναλειτούργησε μετά από 30 σχεδόν έτη διακοπής (1941-69) με την ονομασία Επτάλοφος, και Άνω Σουβάλας (Πολύδροσου), ο οποίος επαναλειτούργησε από το 1964, σε λίγο μεγαλύτερο υψόμετρο (+720 m έναντι +700 m).

3.2.2 Ανάλυση μακροχρόνιας εξέλιξης βροχοπτώσεων

Στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού λειτουργεί ένας από τους παλιότερους βροχομετρικούς σταθμούς της Ελλάδας, ο σταθμός Αλιάρτου, για τον οποίο διατίθενται μηνιαία δεδομένα από το 1907, με ελάχιστα κενά (κατά κανόνα αναφέρονται σε ελλείπουσες τιμές λίγων ημερών). Η εξέλιξη της ετήσιας βροχόπτωσης στην Αλιάρτο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Από το διάγραμμα διακρίνεται ότι υπάρχει μια σαφής μείωση του ύψους βροχόπτωσης, η οποία πιθανώς εξηγεί, εν μέρει, τη σημαντική μείωση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης.



Σχήμα 3.4: Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στον σταθμό Αλιάρτου και κινούμενοι μέσοι όροι 10 ετών.

Πίνακας 3.3: Μέσες τιμές ετήσιας βροχόπτωσης για διάφορες χρονικές περιόδους.

Ονομασία σταθμού	Μέση τιμή ετών 1933-41 (mm)	Μέση τιμή ετών 1980-99 (mm)
Αλιάρτος	722.4	545.5
Λειβαδιά	810.1	753.0
Άνω Αγόριανη (Επτάλοφος)	1270.5	1025.7
Γραβιά	1136.1	885.9
Μέσος όρος	984.8	802.5

Η μείωση των ετήσιων βροχοπτώσεων αποδεικνύεται και με βάση τα, έστω και περιορισμένα, δεδομένα των τριών σταθμών που λειτούργησαν παλιότερα στη λεκάνη, και ενεργοποιήθηκαν ξανά στα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Λειβαδιά, Γραβιά και Άνω Αγόριανη, νυν Επτάλοφος). Στον Πίνακα 3.3 συγκρίνεται ο μέσος όρος των ετήσιων τιμών για την κοινή περίοδο λειτουργίας τους (1933-41) με τον αντίστοιχο μέσο όρο των τελευταίων 20 περίπου ετών. Λαμβάνοντας υπόψη και τα

δεδομένα του σταθμού Αλιάρτου, η μέση μείωση των βροχοπτώσεων στη λεκάνη ανέρχεται στα επίπεδα του 20% (802.5 έναντι 984.8 mm).

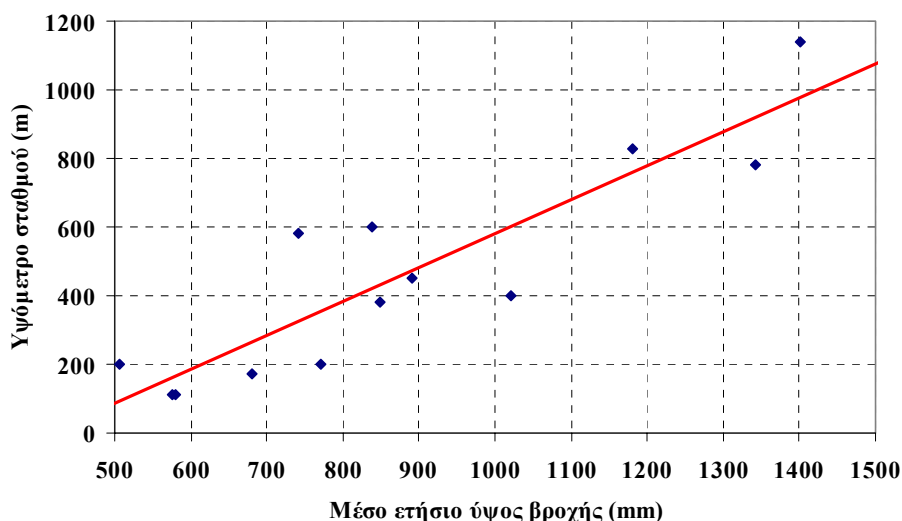
3.2.3 Διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου

Για τη διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του συνόλου των σταθμών της λεκάνης, τα οποία αναφέρονται στην κοινή περίοδο λειτουργίας τους, με έναρξη το υδρολογικό έτος 1966-67. Στον Πίνακα 3.4 απεικονίζονται οι τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου των σταθμών. Από το διάγραμμα του Σχήματος 3.5 φαίνεται ότι η γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι αρκετά ικανοποιητική, με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.800$. Η ετήσια βροχοβαθμίδα της λεκάνης, δηλαδή η αύξηση του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης ανά μέτρο αύξησης του υψομέτρου ανέρχεται σε $\beta = 0.809$ mm/m.

Πίνακας 3.4: Τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και υψομέτρου σταθμών περιοχής μελέτης.

Όνομασία	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)
Αταλάντη	110	575.7
Αλιάρτος	110	580.8
Κάτω Τιθορέα	170	681.1
Λειβαδιά	200	771.9
Πάυλος	200	507.2
Δαύλεια	380	848.0
Γραβιά	450	890.1
Αγία Τριάδα	400	1021.6
Δρυμαία	580	741.7
Άνω Μπράλος	600	837.3
Συκέα	780	1341.6
Επτάλοφος	830	1180.5
Πυρά	1140	1402.2

Σημείωση: Οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις έχουν υπολογιστεί για την περίοδο 1966-67 έως 1993-94.

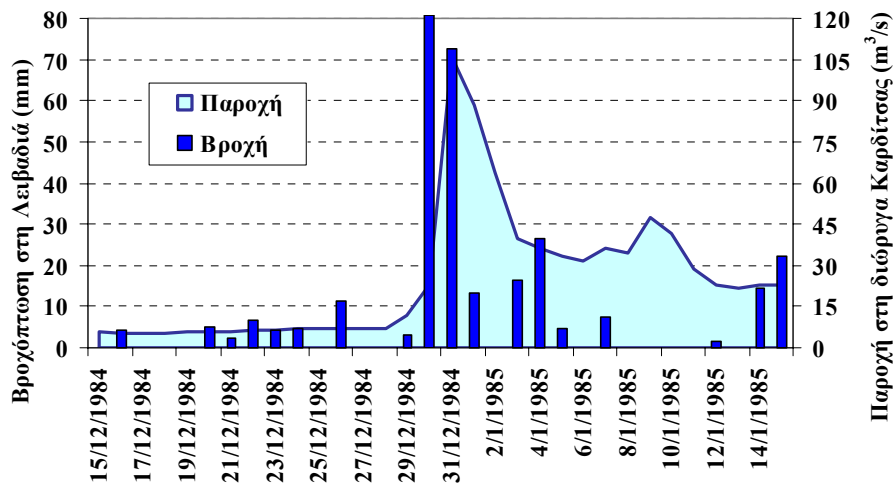


Σχήμα 3.5: Γραφική απεικόνιση της σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου, για τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης.

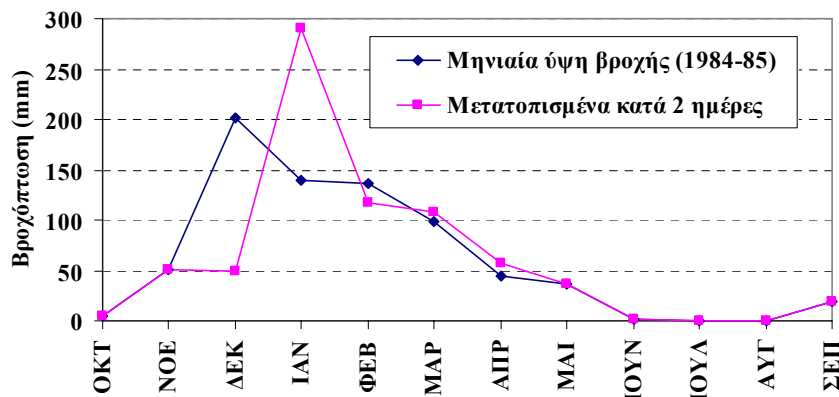
3.2.4 Χρονική μετατόπιση ημερήσιων δειγμάτων βροχόπτωσης

Ο υπολογισμός των μηνιαίων σημειακών δειγμάτων όλων των σταθμών έγινε μετατοπίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές κατά δύο ημέρες και εν συνεχεία αθροίζοντάς τις. Αυτό έγινε ώστε να αποφευχθούν τυχόν ασυμβατότητες μεταξύ φόρτισης (επιφανειακή βροχόπτωση) και απόκρισης της λεκάνης (ήτοι της απορροής στην έξοδο αυτής) κατά την προσομοίωση, δεδομένου ότι το χρονικό βήμα των υπολογισμών είναι μηνιαίο.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζονται οι ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης στον σταθμό Λειβαδιάς και παροχής στην Διώρυγα Καρδίτσας για την περίοδο 15 Δεκεμβρίου 1984 έως 15 Ιανουαρίου 1985. Η έντονη βροχόπτωση που λαμβάνει χώρα στις 30 και 31 Δεκεμβρίου επιδρά στο υδρογράφημα του Βοιωτικού Κηφισού με υστέρηση. Συγκεκριμένα, η αιχμή του υδρογραφήματος εμφανίζεται μετά από μία ημέρα, ενώ σε πιο απομακρυσμένους σταθμούς ο χρόνος υστέρησης, ήτοι ο χρόνος συρροής της λεκάνης, φτάνει τις δύο ημέρες. Για τον λόγο αυτόν, θεωρήθηκε σκόπιμη η χρονική μετατόπιση όλων των ημερήσιων δειγμάτων βροχής κατά δύο ημέρες, ώστε να μην διαταράσσεται η σχέση μηνιαίας βροχόπτωσης και μηνιαίας απορροής στις περιπτώσεις έντονων πλημμυρικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην αλλαγή του μήνα.



Σχήμα 3.6: Γραφική απεικόνιση υετογράμματος (ημερήσια βροχόπτωση στον σταθμό Λειβαδιάς) και υδρογραφήματος (ημερήσια μέτρηση παροχής στην διώρυγα Καρδίτσας) για την εκτίμηση του χρόνου συρροής της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 3.7: Σύγκριση μηνιαίων υψών βροχής περιόδου 1984-85, που προκύπτουν με βάση τις πρωτογενείς και μετατοπισμένες κατά 2 ημέρες τιμές της ημερήσιας βροχής στον σταθμό Λειβαδιάς.

Η διαφοροποίηση των μηνιαίων τιμών που υπολογίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο σε σχέση με τα πρωτογενή (μη μετατοπισμένα) ημερήσια δείγματα μπορεί να είναι σημαντική, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 3.7, το οποίο αναφέρεται στα δεδομένα του σταθμού Λειβαδιάς κατά το υδρολογικό έτος 1984-85. Αντίθετα, η επίδραση στις ετήσιες τιμές είναι μηδαμινή, δεδομένης της πολύ μικρής πιθανότητας πραγματοποίησης έντονων καταιγίδων τις τελευταίες δύο ημέρες του Σεπτεμβρίου, οπότε αλλάζει το υδρολογικό έτος.

3.2.5 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχοπτώσεων

Για την μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών της περιοχής μελέτης, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού χωρίστηκε σε δύο ζώνες, όπου η πρώτη περιλαμβάνει τους ορεινούς καρστικούς όγκους, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τα πεδινά τμήματα της λεκάνης (βλ. 5.1).

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι μηνιαίες τιμές των σημειακών βροχοπτώσεων με συνάθροιση των διαθέσιμων ημερήσιων δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης, μετατοπισμένων κατά δύο ημέρες. Σημειώνεται ότι διαθέσιμα στοιχεία σε ημερήσια κλίμακα διατίθενται μόνο για τα υδρολογικά έτη 1966-67 έως 1993-94, οπότε όλοι οι υπολογισμοί αναφέρονται στην εν λόγω περίοδο.

Η επιφανειακή βροχόπτωση στις δύο ζώνες εκτιμήθηκε ως ο μέσος όρος των μηνιαίων δειγμάτων των ορεινών και πεδινών σταθμών, αντίστοιχα. Ως ορεινοί θεωρήθηκαν οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 350 m, ήτοι οι σταθμοί Δαύλειας, Αγίας Τριάδας, Γραβιάς, Δρυμαίας, Συκέας Επταλόφου και Πυράς. Από την άλλη πλευρά, ως πεδινοί θεωρήθηκαν οι σταθμοί που βρίσκονται σε υψόμετρο μικρότερο των 350 m, ήτοι οι σταθμοί Αταλάντης, Αλιάρτου, Κάτω Τιθορέας, Λειβαδιάς και Παύλου.

Στη συνέχεια, έγινε υψομετρική αναγωγή των αρχικών επιφανειακών βροχοπτώσεων με τη μέθοδο του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής. Ο εν λόγω συντελεστής υπολογίζεται από την σχέση:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (3.1)$$

όπου z_s είναι το μέσο υψόμετρο της κάθε ζώνης σε m (το οποίο εκτιμάται με βάση την υψογραφική καμπύλη της λεκάνης), z_σ το μέσο υψόμετρο των σταθμών σε m (το οποίο υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των υψομέτρων των σταθμών), h_s το επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής προ της αναγωγής, και β η βροχοβαθμίδα σε mm/m (θεωρήθηκε κοινή τιμή για τις δύο ζώνες). Οι υψομετρικά ανηγμένες επιφανειακές βροχοπτώσεις προέκυψαν πολλαπλασιάζοντας τα αρχικά επιφανειακά δείγματα επί τον συντελεστή λ . Στον Πίνακα 3.5 συνομίζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών υψομετρικής αναγωγής, ενώ στους Πίνακες 3.6 και 3.7 δίνονται τα βασικά στατιστικά μεγέθη των τελικών δειγμάτων επιφανειακής βροχόπτωσης. Τέλος, στο Σχήμα 3.8 απεικονίζονται οι ετήσιες χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης στις δύο ζώνες της λεκάνης. Τόσο από τα στατιστικά μεγέθη όσο και από τα διαγράμματα είναι εμφανές ότι υπάρχει πολύ μεγάλη ανομοιογένεια στην κατανομή της βροχόπτωσης στη λεκάνη, καθώς οι πεδινές περιοχές δέχονται τα μισά περίπου κατακρημνίσματα σε σχέση με τις ορεινές.

Πίνακας 3.5: Στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής.

	Ορεινή ζώνη	Πεδινή ζώνη
Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	970.3	239.8
Μέσο υψόμετρο σταθμών (m)	651.4	158.0
Επιφανειακό ετήσιο ύψος βροχής ⁽¹⁾ (mm)	1058.0	624.4
Βροχοβαθμίδα (mm/m)	0.809	0.809
Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής	1.244	1.106

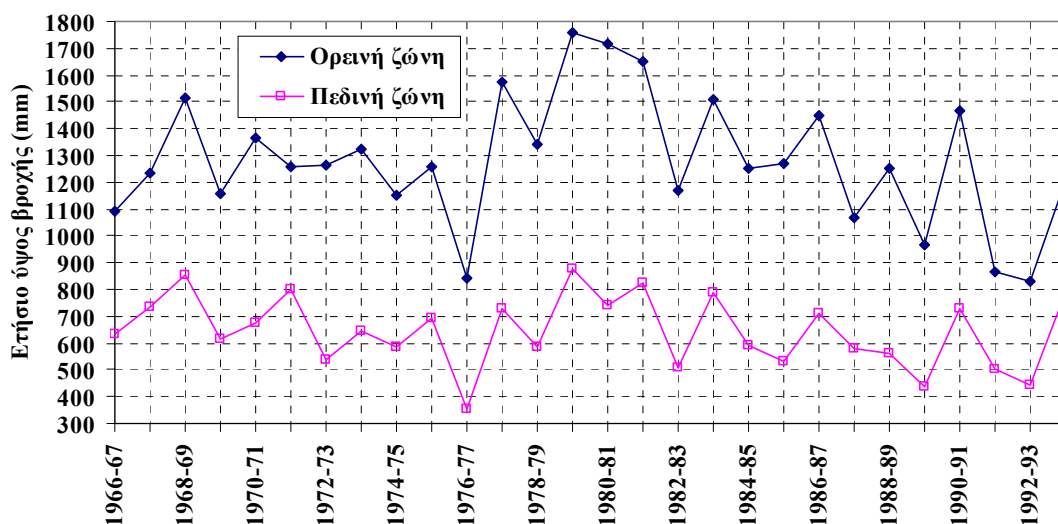
(1) Υπολογίζεται χωρίς υψομετρική αναγωγή.

Πίνακας 3.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης ορεινής ζώνης λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1966-67 έως 1993-94 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	123.9	170.2	223.2	195.8	172.9	158.7	88.6	55.4	37.7	25.6	30.8	33.4	1316.1
Τυπ. απόκλ.	80.9	70.2	115.7	133.7	72.7	81.7	51.5	42.5	35.9	24.4	32.4	28.2	245.0
Μέγιστο	343.3	324.5	469.8	566.8	292.2	326.9	216.1	198.3	151.1	76.9	154.3	129.8	1757.6
Ελάχιστο	4.7	77.3	51.0	17.0	52.5	34.0	10.5	8.7	2.5	0.0	0.0	3.6	832.2

Πίνακας 3.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης πεδινής ζώνης λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1966-67 έως 1993-94 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	71.4	83.5	107.6	89.0	79.8	74.5	48.7	26.0	19.3	12.9	19.3	21.0	652.8
Τυπ. απόκλ.	50.5	42.9	61.0	60.0	43.5	40.4	35.7	23.4	21.0	15.9	19.8	17.6	134.6
Μέγιστο	189.9	225.1	266.9	239.0	183.5	158.7	134.5	91.5	93.9	56.4	74.6	70.5	875.7
Ελάχιστο	1.3	27.2	25.0	3.5	5.4	6.4	1.5	0.8	0.5	0.0	0.1	0.0	354.7



Σχήμα 3.8: Διακύμανση ετήσιας επιφανειακής βροχόπτωσης στις ζώνες διαχωρισμού της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

3.2.6 Μετρήσεις χιονόπτωσης

Στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού δεν πραγματοποιούνται μετρήσεις χιονόπτωσης, παρόλο που η εν λόγω συνιστώσα δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, λόγω της ύπαρξης εκτεταμένων περιοχών με πολύ μεγάλο υψόμετρο (π.χ., Παρνασσός).

Μια χονδροειδής εκτίμηση της συνεισφοράς της χιονόπτωσης στα συνολικά κατακρημνίσματα της λεκάνης πραγματοποιήθηκε συλλέγοντας τις μετρήσεις χιονιού στον σταθμό Πυράς που, όπως προαναφέρθηκε, βρίσκεται σε υψόμετρο 1140 m και ανήκει στην γειτονική λεκάνη του Μόρνου. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν ημερήσιες μετρήσεις ύψους χιονιού σε χιονοτράπεζα, για την περίοδο 1/10/1980 έως 31/12/1996. Η αναγωγή του μετρημένου χιονιού (σε cm) σε καθαρό ισοδύναμο ύψος νερού (σε mm) έγινε μέσω της σχέσης:

$$h_n = \max(0, 0.1 h_s - 15) \quad (3.2)$$

όπου ο συντελεστής 0.1 είναι ο τυπικός λόγος της πυκνότητας του χιονιού προς την πυκνότητα του νερού (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σελ. 94), ενώ η αφαίρεση των 15 mm από την πρωτογενή μέτρηση έγινε μετά από υπόδειξη του παρατηρητή, λαμβάνοντας υπόψη ότι η εν λόγω ποσότητα έχει καταγραφεί ήδη ως βροχόπτωση στο βροχόμετρο του σταθμού.

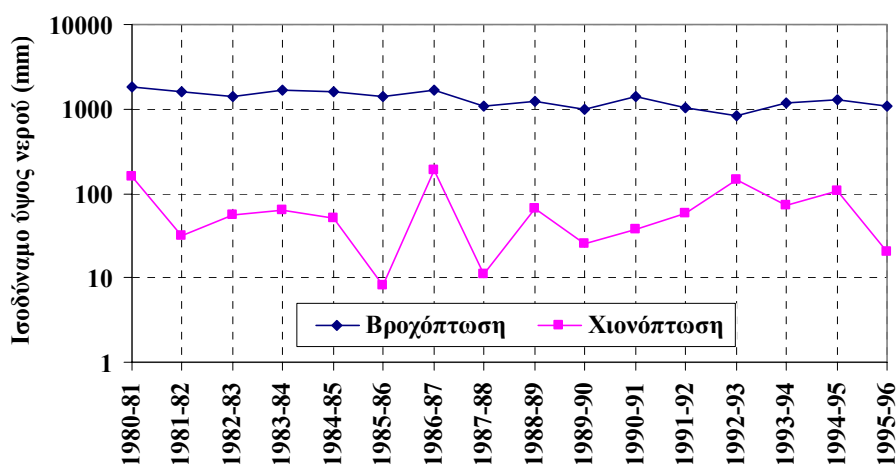
Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μηνιαίων δειγμάτων βροχόπτωσης και καθαρής χιονόπτωσης δίνονται στους Πίνακες 3.8 και 3.9, αντίστοιχα. Η χιονόπτωση στον σταθμό παρατηρείται, ως επί το πλείστον, τους μήνες Δεκέμβριο έως Μάρτιο. Η μέση ετήσια τιμή της ανέρχεται σε 68.3 mm και παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις από έτος σε έτος (συντελεστής μεταβλητότητας 79%), σε αντίθεση με την βροχόπτωση που παρουσιάζει πολύ μικρότερες υπερετήσιες διακυμάνσεις (μέση τιμή 1337.6 mm, συντελεστής μεταβλητότητας 22%).

Πίνακας 3.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς βροχόπτωσης σταθμού Πυράς για την περίοδο 1980-81 έως 1995-96 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	101.5	171.9	215.4	185.1	191.6	177.7	97.8	74.0	38.0	32.1	30.2	22.3	1337.6
Τυπ. απόκλ.	95.7	67.8	111.1	185.9	95.1	107.6	37.4	47.6	35.8	24.0	30.7	16.1	295.6
Μεταβλητ.	0.94	0.39	0.52	1.00	0.50	0.61	0.38	0.64	0.94	0.75	1.01	0.72	0.22
Μέγιστο	344.5	320.6	469.0	640.5	379.3	399.5	170.9	171.4	138.0	79.9	121.5	50.0	1859.1

Πίνακας 3.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς καθαρής χιονόπτωσης σταθμού Πυράς για την περίοδο 1980-81 έως 1995-96 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.6	1.3	11.8	18.6	19.7	16.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	68.3
Τυπ. απόκλ.	2.5	5.0	16.9	39.1	29.5	30.7	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	54.1
Μεταβλητ.	4.00	4.00	1.44	2.10	1.50	1.89	4.00	4.00	-	-	-	-	0.79
Μέγιστο	10.0	20.0	46.0	149.0	101.0	120.0	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	186.0



Σχήμα 3.9: Διακύμανση ετήσιας βροχόπτωσης και χιονόπτωσης στον σταθμό Πυράς.

Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζονται οι ετήσιες χρονοσειρές των δύο μεγεθών. Από το διάγραμμα είναι εμφανής η έντονη μεταβλητότητα της χιονόπτωσης, σε αντίθεση με την ετήσια βροχόπτωση. Επιπλέον, τα δύο δείγματα παρουσιάζουν περιορισμένη συσχέτιση, με τον συντελεστή ετεροσυσχέτισης να ανέρχεται μόλις στο 28%. Χαρακτηριστικό είναι ότι το υδρολογικό έτος 1992-93 που καταγράφηκε η ελάχιστη τιμή της βροχόπτωσης (845.0 mm), η αντίστοιχη τιμή της χιονόπτωσης

(146.0 mm) ήταν από τις υψηλότερες που παρατηρήθηκαν. Το οξύμωρο αυτό γεγονός αιτιολογεί την θεαματική ανάκαμψη που παρατηρήθηκε στις πηγές του άνω ρου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού την άνοιξη του 1993, και η οποία δεν θα μπορούσε σε καμία περίπτωση να οφείλεται στις σχετικά χαμηλές βροχοπτώσεις της περιόδου εκείνης (βλ. 3.2.10). Αν και, κατά μέσο όρο, η συμβολή της χιονόπτωσης στα συνολικά κατακρημνίσματα ανέρχεται στο 4.9%, κατά το συγκεκριμένο υδρολογικό έτος ανήλθε στο 14.7%.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι η συνεισφορά της χιονόπτωσης στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής, γενικά, υδροφορίας. Δυστυχώς, η πλήρης έλλειψη μετρήσεων στην λεκάνη καθιστά αδύνατη την αξιοποίηση της εν λόγω πληροφορίας.

3.2.7 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Με εξαίρεση την έξοδο της λεκάνης, όπου υπάρχει εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός όπου διατίθενται δεδομένα παροχής του Βοιωτικού Κηφισού σε ημερήσια κλίμακα από το 1907, στην περιοχή μελέτης υπάρχει έλλειψη συστηματικών υδρομετρικών δεδομένων.

Αναλυτικές πληροφορίες για τα διαθέσιμα στοιχεία επιφανειακής απορροής μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970 δίνονται από τους *Λαδόπουλο και Χωραφά* (1974). Οι μελετητές διακρίνουν τρεις κατηγορίες δεδομένων. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσουν μεμονωμένες μετρήσεις στάθμης και παροχής σε χαρακτηριστικές θέσεις του Βοιωτικού Κηφισού και των παραποτάμων του, οι οποίες έχουν εκτελεστεί από διάφορες υπηρεσίες και οργανισμούς. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσουν συστηματικές μετρήσεις παροχής στις κυριότερες πηγές του άνω ρου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν υπό την εποπτεία της ΕΕΥ κατά την περίοδο 1933-53. Τέλος, στην τρίτη κατηγορία εντάσσουν τις καθημερινές μετρήσεις παροχής στην είσοδο της Συγκεντρωτικής Διώρυγας Καρδίτσας.



Σχήμα 3.10: Θέσεις υδρομετρικών σταθμών σε πηγές (κύκλοι) και υδατορεύματα (τρίγωνα) της περιοχής μελέτης.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, το ΙΓΜΕ υλοποίησε ένα εκτεταμένο πρόγραμμα υδρομετρήσεων στα πλαίσια της *Υδρογεωλογικής έρευνας της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού* (Παγούνης κ.ά., 1994). Συνολικά επελέγησαν 22 θέσεις υδρομέτρησης στη λεκάνη, οι οποίες βρίσκονται κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού και στη έξοδο των κυριότερων παραποτάμων και πηγών του. Οι θέσεις των σταθμών απεικονίζονται στο Σχήμα 3.10. Στους περισσότερους σταθμούς πραγματοποιούνται μετρήσεις παροχής ανά 15 περίπου ημέρες. Η χρονική αυτή κλίμακα κρίνεται

ανεπαρκής για την εξαγωγή αξιόπιστων δειγμάτων απορροής, καθώς οι υδρομετρήσεις δεν αξιοποιούνται για την κατάρτιση σχέσεων στάθμης-παροχής που να συνοδεύονται από παρατηρήσεις στάθμης πυκνότερης χρονικής κλίμακας (κατ' ελάχιστον ημερήσιας). Παρόλα αυτά, θεωρούνται χρήσιμες για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την χωρική κατανομή του επιφανειακού και πηγαίου υδατικού δυναμικού της λεκάνης (βλ. 3.2.9).

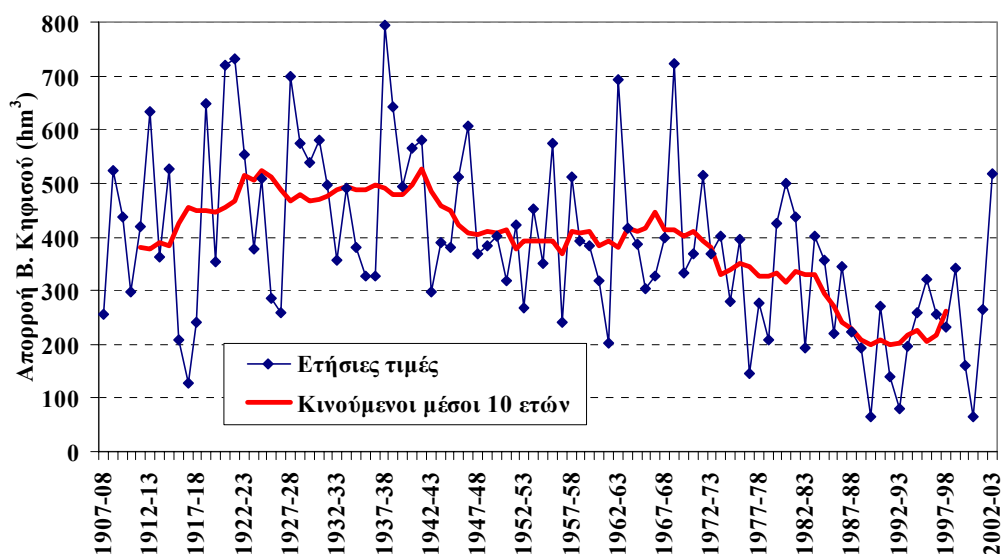
3.2.8 Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων στην έξοδο της λεκάνης

Από το 1907, διατίθενται συνεχείς και συστηματικές μετρήσεις της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, οι οποίες πραγματοποιούνται επί της Συγκεντρωτικής Διώρυγας. Στο σημείο αυτό υπάρχει εγκατεστημένο σταθμήμετρο της ΕΥΔΑΠ, όπου μετράται η στάθμη του ποταμού κάθε πρωί, ενώ η αντίστοιχη παροχή εκτιμάται με βάση την εξίσωση ομοιόμορφης ροής του Manning. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 υπήρχε και δεύτερο σταθμήμετρο, το οποίο λειτουργούσε υπό την εποπτεία του ΥΠΕΧΩΔΕ. Γενικά, στη μακρά περίοδο λειτουργίας του σταθμού υπήρξαν πολλές μεταβολές, τόσο στη διατομή της διώρυγας όσο και στη θέση και λειτουργία των διαφόρων σταθμημέτρων, τα οποία είχαν κατά καιρούς τοποθετηθεί (κυρίως από τον Οργανισμό Κωπαΐδας).

Η αξιολόγηση και επεξεργασία των ημερήσιων δεδομένων στάθμης για την εξαγωγή ενός αξιόπιστου δείγματος ημερήσιων απορροών έχει γίνει από τους Ρώτη κ.ά. (1990). Σημειώνεται ότι κατά την περίοδο Σεπτεμβρίου 1964 – Νοεμβρίου 1967, οπότε η διώρυγα παρέμεινε κλειστή λόγω επισκευών, καθώς και κατά τη διάρκεια όλου του υδρολογικού έτους 1976-77, οπότε κατασκευάστηκε η νέα διώρυγα, δεν υπάρχουν μετρήσεις. Τα κενά αυτά έχουν συμπληρωθεί μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με τις μηνιαίες βροχοπτώσεις του σταθμού Αλιάρτου, στα πλαίσια της Α' φάσης του ερευνητικού έργου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2000). Μετά και την επικαιροποίηση των δεδομένων, το τελικό δείγμα απορροών καλύπτει μια περίοδο 94 ολοκληρωμένων υδρολογικών ετών και είναι το μεγαλύτερο στον ελληνικό χώρο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των ημερήσιων παροχών βασίζεται στην υπόθεση σταθερής υδραυλικής τραχύτητας (συντελεστής Manning). Ο εν λόγω συντελεστής έχει προκύψει βάσει μίας και μοναδικής υδρομέτρησης, η οποία πραγματοποιήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το γεγονός αυτό δημιουργεί υποψίες, καθώς ενδέχεται να υπάρχει συστηματικό σφάλμα στο δείγμα απορροών, λόγω μεταβολής της τιμής (πιθανόν αύξησης) του παραπάνω συντελεστή.

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται η χρονοσειρά ετήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης και οι κινούμενοι μέσοι όροι 10 ετών. Στο διάγραμμα είναι εμφανής η δραματική μείωση του υδατικού δυναμικού του ποταμού. Συγκεκριμένα, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1940, η μέση ετήσια απορροή κυμαινόταν κοντά στα 500 hm^3 . Εν συνεχεία, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970, η μέση ετήσια απορροή μειώθηκε στα επίπεδα των 400 hm^3 , ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 έχει κατέλθει μόλις στα $200 \text{ hm}^3/\text{έτος}$. Τα αίτια της έντονης αυτής υποβάθμισης του επιφανειακού υδατικού δυναμικού του Βοιωτικού Κηφισού είναι εν μέρει φυσικά (οφειλόμενα στις κλιματολογικές συνθήκες) και εν μέρει ανθρωπογενή. Η μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών προκύπτει από τη σημαντική μείωση των βροχοπτώσεων στη λεκάνη, που στην περίπτωση του βροχομετρικού σταθμού Αλιάρτου ανέρχεται στο 20-30% (Nalbantis et al., 1993). Ο ανθρώπινος παράγοντας υπεισέρχεται στην υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, με συνέπεια τη σταδιακή μείωση των υπόγειων αποθεμάτων της λεκάνης και, ως εκ τούτου, του υδατικού δυναμικού των μεγάλων καρστικών πηγών (π.χ., πηγές Μέλανα και Μαυρονερίου), οι οποίες είναι βασικοί τροφοδότες του Βοιωτικού Κηφισού.



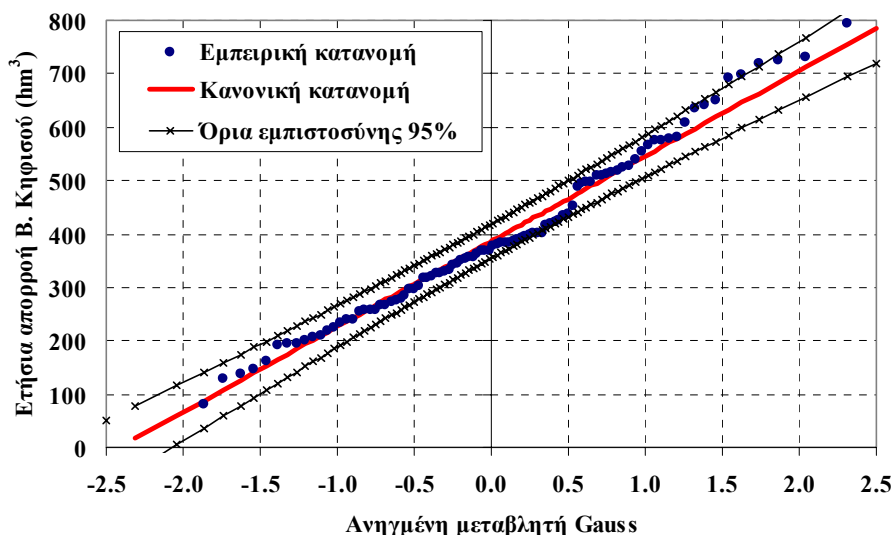
Σχήμα 3.11: Διακύμανση ετήσιας απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης και κινούμενοι μέσοι 10 ετών.

Στον Πίνακα 3.10 δίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού για τρεις χαρακτηριστικές χρονικές περιόδους λειτουργίας του υδρομετρικού σταθμού Καρδίτσα, μήκους 30 περίπου ετών. Η ενδιάμεση περίοδος, η οποία καλύπτει τα έτη 1940-1969 είναι αντιπροσωπευτική του συνόλου του δείγματος, τουλάχιστον ως προς τις μέσες μηνιαίες τιμές. Είναι χαρακτηριστικό ότι, σε σχέση με την περίοδο 1908-1939, την τριακονταετία 1940-1969 η μέση ετήσια απορροή του ποταμού μειώνεται κατά ποσοστό 9% (από 459.7 σε 416.6 hm^3), με τη διαφορά των 43.1 hm^3 να κατανέμεται ανομοιόμορφα στη διάρκεια του έτους. Από την άλλη πλευρά, μεταξύ της τριακονταετίας 1940-1969 και της πλέον πρόσφατης περιόδου, η μείωση ανέρχεται στα επίπεδα του 31% (από 416.6 σε 285.9 hm^3) και είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένη στο χρόνο.

Πίνακας 3.10: Μέσες τιμές απορροής Βοιωτικού Κηφισού για διάφορες χρονικές περιόδους (hm^3).

Περίοδος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1908-2003	21.4	30.7	46.1	59.5	62.4	66.8	46.5	24.2	11.9	4.1	3.5	12.8	386.5
1908-1939	24.1	36.6	54.4	69.5	76.8	77.4	57.0	30.8	19.5	5.5	3.1	13.6	459.7
1940-1969	26.3	34.5	52.7	63.6	61.9	65.9	42.4	25.2	12.1	6.5	6.8	18.7	416.6
1970-2003	14.4	21.3	31.9	45.5	48.1	56.7	39.4	16.6	4.0	0.5	0.9	6.4	285.9

Η ελάχιστη τιμή της ετήσιας απορροής (64.5 hm^3) εμφανίστηκε το υδρολογικό έτος 2000-01, ενώ παρόμοια σχεδόν ακραία τιμή (66.8 hm^3) εμφανίστηκε κατά την περίοδο 1989-90. Από την άλλη πλευρά, το απόλυτο ρεκόρ υδροφορίας (793.1 hm^3) καταγράφηκε το έτος 1937-38. Αυτό σημαίνει ότι στο δείγμα των 96 υδρολογικών ετών, η σχέση μεταξύ ελαχίστου και μεγίστου είναι 1:12. Για την εκτίμηση της περιόδου επαναφοράς των δύο ακραίων τιμών πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση του δείγματος των ετήσιων απορροών, θεωρώντας ότι οι εν λόγω μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή, με μέση τιμή 386.5 hm^3 και τυπική απόκλιση 159.7 hm^3 . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12, η προσαρμογή της κανονικής στην εμπειρική (κατά Weibull) κατανομή είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Με την υπόθεση της κανονικής κατανομής εκτιμάται ότι η ελάχιστη τιμή των 64.5 hm^3 έχει περίοδο επαναφοράς 46 έτη, ενώ η μέγιστη τιμή των 793.1 hm^3 έχει περίοδο επαναφοράς 185 έτη.



Σχήμα 3.12: Στατιστική ανάλυση ετήσιων όγκων απορροής Βοιωτικού Κηφισού.

Με βάση τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι μόνο η τελευταία τριακονταετία μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτική της δίαιτας των απορροών του Βοιωτικού Κηφισού για τη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης. Αυτό σημαίνει ότι το μέσο ετήσιο υδατικό δυναμικό του ποταμού είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με προγενέστερες εκτιμήσεις, καθώς ανέρχεται στα επίπεδα μόλις των 286 hm³, ήτοι 140 mm. Επιπλέον, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η τιμή αυτή δεν είναι φυσικοποιημένη, δεδομένου ότι κατά τη θερινή περίοδο η κοίτη του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και ορισμένων παραποτάμων του (π.χ., τάφος Μαυρονερίου) φράσσονται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Μάλιστα, σε περιόδους χαμηλής υδροφορίας, αυτό μπορεί να γίνει από τους μήνες Απρίλιο ή ακόμη και Μάρτιο. Το γεγονός αυτό καθιστά αδύνατη την μοντελοποίηση του φυσικού συστήματος καθεαυτού, αφού κατά την προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ανθρώπινες επεμβάσεις (απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, και μάλιστα με διαφορετική κατανομή από έτος σε έτος, εξαρτώμενη από τις εκάστοτε υδρολογικές συνθήκες). Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 συνοψίζονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	14.4	21.3	31.9	45.5	48.1	56.7	39.4	16.6	4.0	0.5	0.9	6.4	285.9
Τυπ. απόκλ.	10.7	10.4	13.5	25.6	27.6	28.2	24.9	15.4	5.6	1.1	2.0	7.0	125.5
Μέγιστο	42.1	49.7	60.9	115.0	125.0	111.0	88.3	55.0	22.6	4.2	8.1	23.1	527.5
Ελάχιστο	0.0	6.5	9.0	14.9	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5

3.2.9 Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού

Μέχρι τη δεκαετία του 1980, οπότε ξεκίνησε το ΙΓΜΕ το συστηματικό πρόγραμμα υδρομετρήσεων σε όλη την έκταση της λεκάνης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, διατίθενται πολύ περιορισμένα δεδομένα παροχών του ποταμού σε ανάντη της Σήραγγας Καρδίτσας θέσεις. Ωστόσο, το πλήθος αλλά και η ποιότητα των μετρήσεων δεν επιτρέπουν την εξαγωγή αξιόπιστων δειγμάτων απορροής.

Το σύνολο σχεδόν των υδρομετρήσεων προ του 1980 έχουν πραγματοποιηθεί στην υπολεκάνη του άνω ρου. Συγκεκριμένα, πρόκειται για 49 μετρήσεις παροχής στη γέφυρα του Σιδηροδρομικού Σταθμού Λιλαίας, οι οποίες εκτελέστηκαν από την ΕΕΥ, κατά την περίοδο 1933-1941. Στα τέλη του 1969, το ΥΔΕ εγκατέστησε τρεις υδρομετρικούς σταθμούς, εξοπλισμένους με σταθμήμετρο και σταθμηγράφο, οι οποίοι λειτούργησαν το πολύ μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Οι εν λόγω σταθμοί εγκαταστάθηκαν στις θέσεις Καστέλι (στην έξοδο της υπολεκάνης Καλοσκοπής, έκτασης 57 km²), Αποστολιά (στην έξοδο του ομώνυμου χειμάρρου, η λεκάνη του οποίου καλύπτει έκταση 24 km²) και Σταθμού Λιλαίας. Ο τελευταίος σταθμός ήταν ο πιο σημαντικός, καθώς βρισκόταν κοντά στην έξοδο της υπολεκάνης του άνω ρου, έκτασης 330 km². Οι *Λαδόπουλος και Χωραφάς* (1974), οι οποίοι επεξεργάστηκαν τα δεδομένα των παραπάνω σταθμών και ανέλαβαν οι ίδιοι την εκτέλεση ορισμένων υδρομετρήσεων, αναφέρουν ότι τα διαθέσιμα στοιχεία είχαν μεγάλο βαθμό αναξιοπιστίας, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η κατάρτιση αξιόπιστων καμπυλών στάθμης-παροχής.

Πίνακας 3.12: Θέσεις υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού.

Σημείο ⁽¹⁾	Θέση	Χιλιομετρική θέση (km)
16	Σήραγγα Καρδίτσας	0.0
10	Γέφυρα Ορχομενού	34.7
9	Άγιος Βασίλειος (Γέφυρα Χαιρώνειας)	42.9
6	Γέφυρα Σταθμού Δαύλειας	45.5
3	Γέφυρα Ανθοχωρίου	50.2
2	Γέφυρα Μοδίου	70.5
1	Γέφυρα Μύλου Παπαλουκά	78.5

(1) Πρόκειται για τον αύξοντα αριθμό που έχει δώσει το ΙΓΜΕ στις διάφορες θέσεις υδρομέτρησης.

Στις αρχές του 1980, το ΙΓΜΕ εγκατέστησε υδρομετρικούς σταθμούς σε επτά χαρακτηριστικές θέσεις του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και στην έξοδο των κυριότερων πηγών της λεκάνης του. Τα χαρακτηριστικά των υδρομετρικών σταθμών του ΙΓΜΕ κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού δίνονται στον Πίνακα 3.12.

Στην συνέχεια του εδαφίου επιχειρείται μια ολοκληρωμένη ανάλυση των υδρομετρικών δεδομένων του ΙΓΜΕ, τα οποία καλύπτουν μια περίοδο δέκα περίπου ετών (1983-1992).

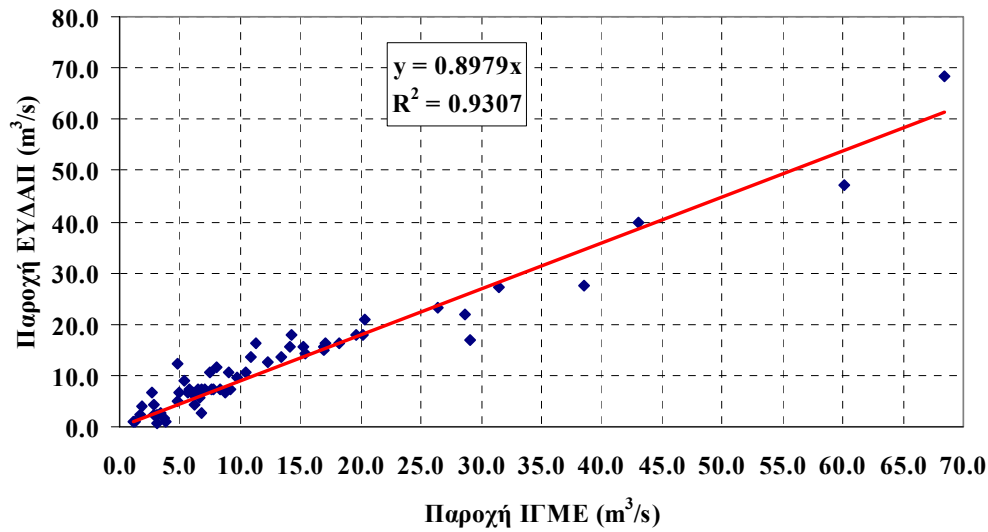
Υδρομετρήσεις στη Σήραγγα Καρδίτσας

Η θέση υδρομέτρησης βρίσκεται ακριβώς στην έξοδο της σήραγγας, οπότε ελέγχει το σύνολο της επιφανειακής απορροής της λεκάνης.

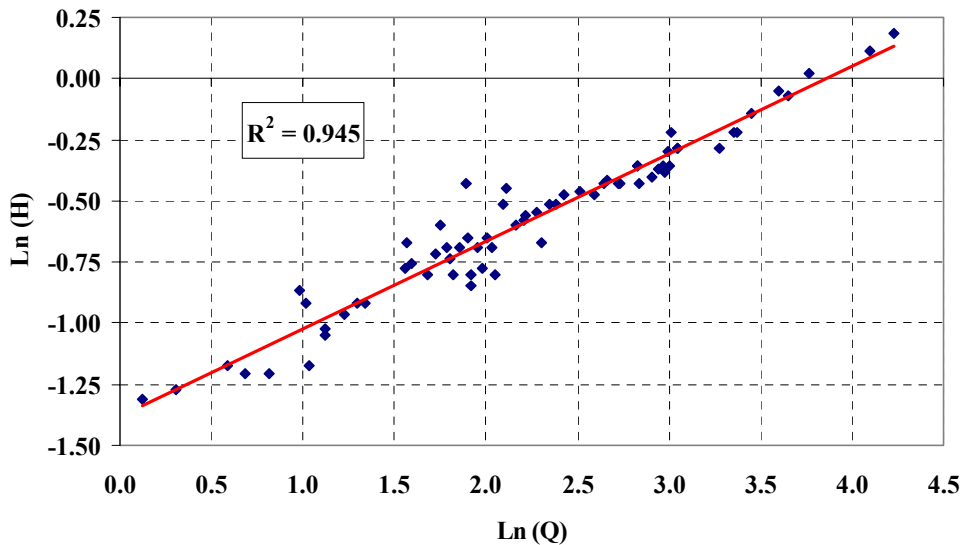
Για την αξιολόγηση των δεδομένων του ΙΓΜΕ, συγκρίθηκαν οι μετρημένες παροχές με τις αντίστοιχες που εκτιμώνται από την ΕΥΔΑΠ, για την περίοδο 1986-1989. Σημειώνεται ότι κατά τους θερινούς μήνες της παραπάνω περιόδου δεν αναφέρονται μετρήσεις στάθμης από την ΕΥΔΑΠ λόγω κλεισίματος των θυροφραγμάτων. Από την άλλη πλευρά, το ΙΓΜΕ έχει καταγράψει παροχές έως και 2.25 m³/s (29/6/88), καθώς η θέση του υδρομετρικού σταθμού είναι ανάντη των θυροφραγμάτων.

Όπως προκύπτει από τη σχέση διασποράς των παροχών, στην οποία προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά η ομογενής γραμμική ευθεία (Σχήμα 3.13), το ΙΓΜΕ εκτιμά μεγαλύτερες παροχές σε σχέση με την ΕΥΔΑΠ, με τη διαφορά να κυμαίνεται περί το 10%. Το γεγονός αυτό προκαλεί έκπληξη, καθώς θα ανέμενε κανείς μια ελαφρά υπερεκτίμηση (και όχι υποεκτίμηση) της παροχής που εκτιμάται από την ΕΥΔΑΠ, δεδομένου ότι η τιμή του συντελεστή απωλειών της διώρυγας θεωρείται η

ίδια με αυτή που μετρήθηκε πριν από 25 περίπου έτη. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται ότι υπάρχει κάποιο συστηματικό σφάλμα, είτε στα δεδομένα του ΙΓΜΕ είτε σε αυτά της ΕΥΔΑΠ¹.



Σχήμα 3.13: Συσχέτιση παροχών Σήραγγας Καρδίτσας, όπως μετρώνται από το ΙΓΜΕ και της ΕΥΔΑΠ.



Σχήμα 3.14: Γραφική απεικόνιση, σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα, των μετρήσεων στάθμης (H) και παροχής (Q), στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Σήραγγας Καρδίτσας του ΙΓΜΕ (στάθμη σε m, παροχή σε m^3/s).

Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα η σχέση στάθμης-παροχής, με βάση τα δεδομένα υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ για την περίοδο 1986-1989. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η συσχέτιση της μετρημένης στάθμης με την εκτιμημένη παροχή είναι πλήρως ικανοποιητική, με

¹ Στην υδρομέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 29/1/2003 στα πλαίσια του έργου, η παροχή στην διώρυγα Καρδίτσας εκτιμήθηκε σε $61.6 m^3/s$, με παρατηρημένη στάθμη 2.58 m. Η αντίστοιχη τιμή που προκύπτει από την σχέση στάθμης-παροχής που χρησιμοποιεί η ΕΥΔΑΠ ανέρχεται σε $58.5 m^3/s$, είναι δηλαδή υποεκτιμημένη κατά 5%. Φαίνεται λοιπόν να επιβεβαιώνεται η ύπαρξη συστηματικού σφάλματος που οδηγεί σε υποεκτίμηση της πραγματικής παροχής στην έξοδο της λεκάνης, θα απαιτηθεί όμως μεγαλύτερο δείγμα υδρομετρήσεων και σε ευρύ φάσμα τιμών στάθμης ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα,.

συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.945$. Πιθανόν λοιπόν το σφάλμα να είναι στα στις εκτιμήσεις της ΕΥΔΑΠ, αν και το ζήτημα αυτό χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Στην συνέχεια της ανάλυσης, για την συσχέτιση των μετρημένων παροχών κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στην έξοδο της λεκάνης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του ΙΓΜΕ και όχι αυτές της ΕΥΔΑΠ.

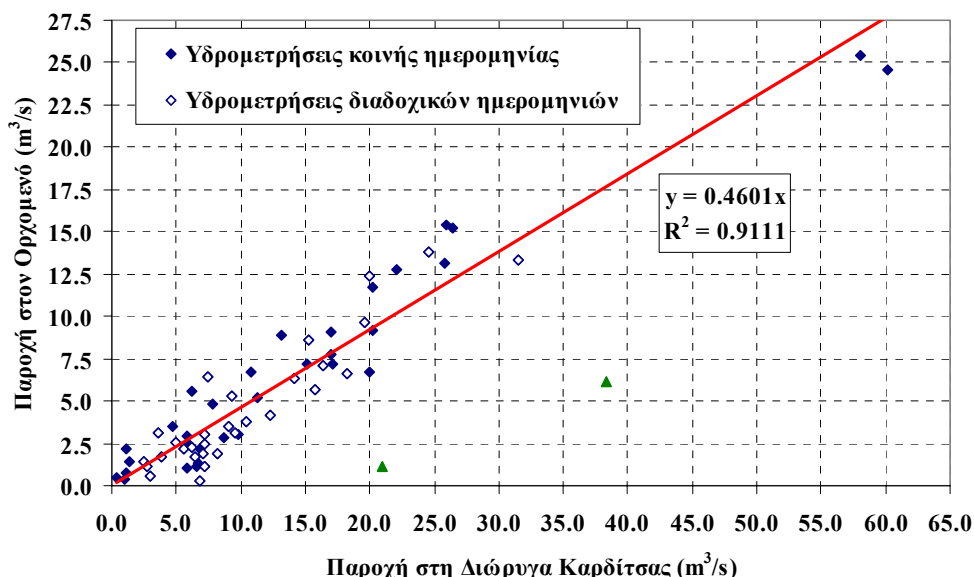
Υδρομετρήσεις στη θέση Γέφυρα Ορχομενού

Ο υδρομετρικός σταθμός της Γέφυρας Ορχομενού βρίσκεται στο ανάντη όριο της λεκάνης της Κωπαΐδας. Εκτός από τον Βοιωτικό Κηφισό, η Κωπαΐδα τροφοδοτείται σε μόνιμη βάση από τα νερά των πηγών Μέλανα, Πολυγύρας και Έρκυνα, και περιστασιακά από τις πλημμυρικές απορροές των χειμάρρων Λόφι και Πόντζα.

Επιχειρώντας μια στατιστική συσχέτιση των παροχών που μετρώνται στον Ορχομενό με τις παροχές που μετρώνται στη Διώρυγα Καρδίτσας, αναζητήθηκαν οι ημερομηνίες εκείνες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν από το ΙΓΜΕ σχεδόν ταυτόχρονες υδρομετρήσεις στις δύο θέσεις (Σχήμα 3.15). Συνολικά εντοπίστηκαν 65 ζεύγη μετρήσεων, εκ των οποίων οι 33 αναφέρονται είτε στην ίδια ενώ οι 32 σε διαδοχικές ημερομηνίες. Από το παραπάνω δείγμα εξαιρέθηκαν δύο τιμές που θεωρήθηκαν εξωκείμενες. Μετά από διερεύνηση, προέκυψε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η ομογενής γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{\text{ΟΡΧΟΜΕΝΟΣ}} = 0.46 Q_{\text{ΚΑΡΔΙΤΣΑ}} \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.3) είναι $r^2 = 0.911$ και θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Σημειώνεται ότι η εφαρμογή της τυπικής γραμμικής παλινδρόμησης δίνει ίδιο r^2 , με μηδενική πρακτικά τομή. Παρατηρείται ότι η συσχέτιση των δύο δειγμάτων είναι σχετικά καλή ακόμη και για υψηλές τιμές παροχής στη Διώρυγα Καρδίτσας, της τάξης των $60 m^3/s$. Η σχέση παλινδρόμησης (3.3) υποδηλώνει ότι, αφού η παροχή που μετράται στον Ορχομενό ισούται με το 46% της παροχής που μετράται στην Καρδίτσα, οι πηγές Μέλανα, Πολυγύρας και Έρκυνα, καθώς και οι χείμαρροι Λόφι και Πόντζα, συνεισφέρουν πάνω από το ήμισυ της απορροής της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.



Σχήμα 3.15: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Διώρυγα Καρδίτσας και Γέφυρα Ορχομενού. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης, ενώ με τρίγωνα απεικονίζονται τα εξωκείμενα σημεία.

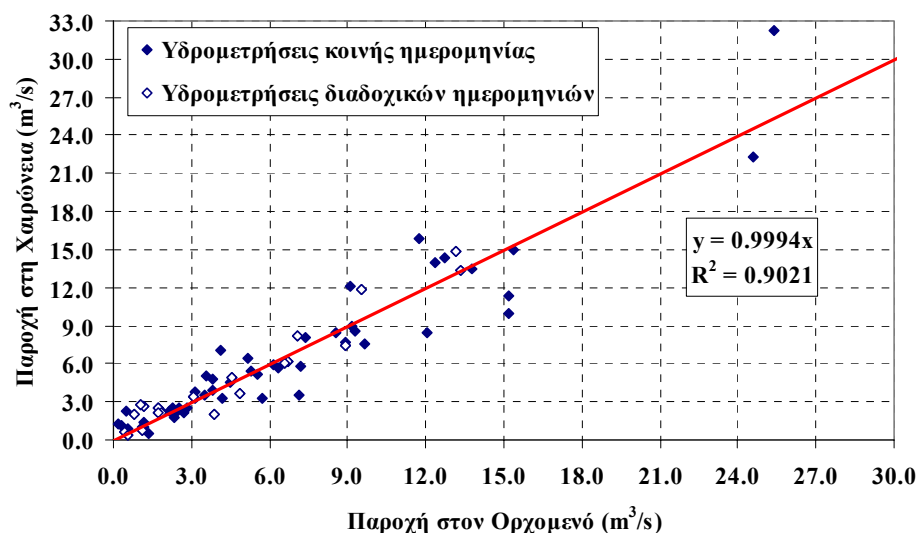
Υδρομετρήσεις στη θέση Άγιος Βασίλειος Χαιρώνειας

Ο υδρομετρικός σταθμός Αγίου Βασιλείου βρίσκεται στη γέφυρα Χαιρώνειας-Ακοντίου, πολύ κοντά στον σιδηροδρομικό σταθμό Χαιρώνειας. Στην υπολεκάνη μεταξύ των θέσεων υδρομέτρησης Ορχομενού και Χαιρώνειας δεν υπάρχουν αξιόλογα ρέματα ή πηγές. Με βάση τις απόψεις του ΙΓΜΕ, κατά μήκος της ροής του Βοιωτικού Κηφισού παράλληλα με το Ακόντιο όρος, πραγματοποιούνται απώλειες νερού λόγω διήθησης. Τα νερά αυτά εικάζεται ότι τροφοδοτούν τις πηγές του Μέλανα καθώς και τον προσχωματικό υδροφορέα της Κωπαΐδας.

Για την εκτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της υπολεκάνης Ορχομενού-Χαιρώνειας, πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των μετρημένων παροχών του ΙΓΜΕ στις δύο θέσεις υδρομέτρησης (Σχήμα 3.16). Εντοπίστηκαν 53 ζεύγη ταυτόχρονων μετρήσεων, καθώς και 20 ζεύγη μετρήσεων που απείχαν το πολύ δύο ημέρες. Από τις παραπάνω εξαιρέθηκε μία μέτρηση η οποία πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια πλημμύρας και θεωρήθηκε εξωκείμενο σημείο, καθώς η παροχή που μετρήθηκε ανάντη ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την κατάντη τιμή. Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η ομογενής γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{ΧΑΙΡΩΝΕΙΑ} = 0.999 Q_{ΟΡΧΟΜΕΝΟΣ} \quad (3.4)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.4) είναι $r^2 = 0.902$ και θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση αυτή, η τυπική γραμμική παλινδρόμηση δίνει πρακτικά ίδιο συντελεστή προσδιορισμού, με σχεδόν μηδενική τομή. Το γεγονός ότι στις δύο θέσεις μετράται πρακτικά η ίδια παροχή επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι κατά μήκος της διαδρομής μεταξύ Ορχομενού και Χαιρώνειας πραγματοποιούνται διηθήσεις του ποταμού. Ωστόσο, οι απώλειες νερού δεν φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς το επιφανειακό υδατικό δυναμικό της ενδιάμεσης υπολεκάνης είναι λογικά πολύ μικρό, όπως καταδεικνύεται από την απουσία ανεπτυγμένου υδρογραφικού δικτύου στην περιοχή.



Σχήμα 3.16: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Γέφυρα Ορχομενού και Άγιος Βασίλειος Χαιρώνειας. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης.

Υδρομετρήσεις στη θέση Σταθμός Δαύλειας

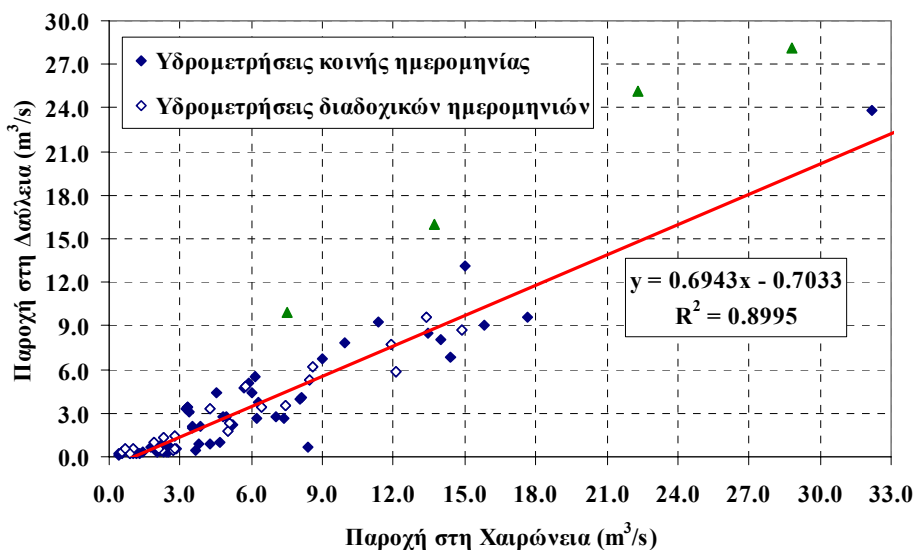
Οι υδρομετρήσεις στη θέση Σταθμός Δαύλειας πραγματοποιούνται στην μικρή γέφυρα που οδηγεί στο Ηδύλειο όρος και τους Αγίους Αποστόλους. Η υπολεκάνη μεταξύ των υδρομετρικών σταθμών

Χαιρώνειας και Δαύλειας διαθέτει πλούσιο υδατικό δυναμικό, κυρίως λόγω των καρστικών πηγών Μαυρονερίου αλλά και των χειμάρρων Πλατανιάς και Αγίου Βλασίου.

Για την εκτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της υπολεκάνης Χαιρώνειας-Δαύλειας, πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των μετρημένων παροχών του ΙΓΜΕ στις δύο θέσεις υδρομέτρησης (Σχήμα 3.17). Εντοπίστηκαν 64 ζεύγη ταυτόχρονων μετρήσεων, καθώς και 25 ζεύγη μετρήσεων που απείχαν το πολύ δύο ημέρες. Από τις παραπάνω εξαιρέθηκαν 4 υδρομετρήσεις που θεωρήθηκαν εξωκείμενα σημεία, καθώς η παροχή που μετρήθηκε ανάντη ήταν αρκετά μεγαλύτερη από την κατάντη τιμή (δύο μάλιστα από αυτές αναφέρονται σε πλημμυρικά επεισόδια). Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{\Delta\Delta\Upsilon\Lambda\Upsilon\Lambda\Upsilon\Lambda} = 0.694 Q_{\chi\alpha\iota\rho\omega\nu\epsilon\iota\alpha} - 0.70 \quad (3.5)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.5) είναι $r^2 = 0.900$ και θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Η σχέση παλινδρόμησης υποδηλώνει ότι το επιφανειακό δυναμικό της υπολεκάνης Χαιρώνειας-Δαύλειας ισοδυναμεί με το 30% της απορροής της ανάντη υπολεκάνης, με την προσθήκη μιας σταθερής ποσότητας της τάξης των $0.70 m^3/s$. Η σταθερή αυτή ποσότητα οφείλεται, ως επί το πλείστον, στην σταθερή συνεισφορά των πηγών Μαυρονερίου. Σημειώνεται ότι κατά την περίοδο εκτέλεσης του προγράμματος των υδρομετρήσεων από το ΙΓΜΕ (1981-1995), οι εν λόγω πηγές είχαν παροχή μεγαλύτερη των $0.70 m^3/s$ σε 164 από τις 195 περιπτώσεις, ήτοι ποσοστό 84%.



Σχήμα 3.17: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Άγιος Βασίλειος Χαιρώνειας και Σταθμός Δαύλειας. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης, ενώ με τρίγωνα απεικονίζονται τα εξωκείμενα σημεία.

Υδρομετρήσεις στη θέση Γέφυρα Ανθοχωρίου

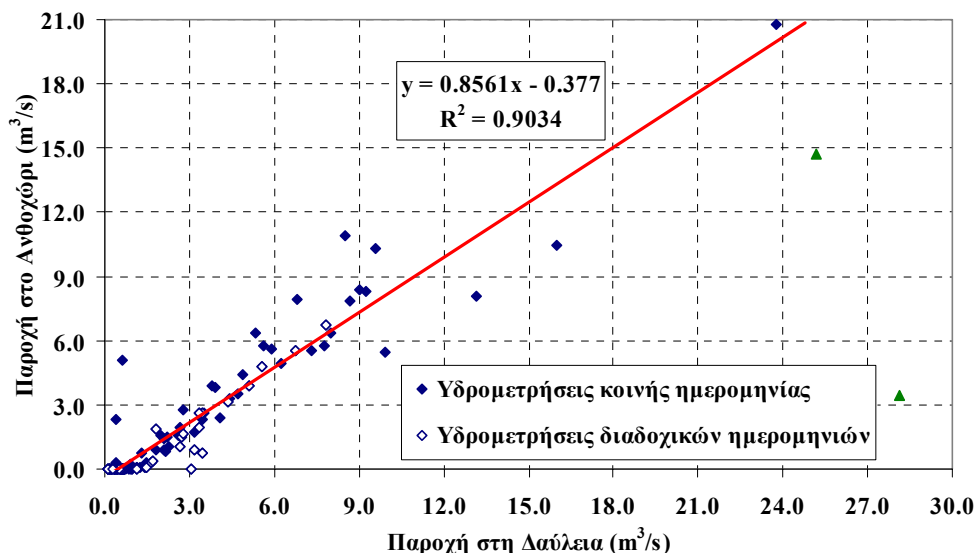
Η γέφυρα Ανθοχωρίου, όπου ο ομώνυμος υδρομετρικός σταθμός, βρίσκεται στον κύριο κλάδο του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και τον κλάδο συμβολής των χειμάρρων Μπογδανόρεμα και Κινέτα. Ο τελευταίος ρέει για ορισμένο διάστημα παράλληλα στον Βοιωτικό Κηφισό, ενώ λίγο κατάντη της γέφυρας Ανθοχωρίου οι δύο κλάδοι ενώνονται. Μεταξύ των υδρομετρικών σταθμών Δαύλειας και Ανθοχωρίου, ο Βοιωτικός Κηφισός ρέει κατά μήκος της λεγόμενης Κάτω Χαράδρας, που είναι και το φυσικό όριο μεταξύ του κάτω και του μέσου ρου. Η σχηματιζόμενη υπολεκάνη είναι πολύ μικρή σε έκταση και ασήμαντη σε υδατικούς πόρους. Κατά συνέπεια, η διαφορά των παροχών που μετρώνται

στις θέσεις Ανθοχώρι και Δαύλεια αντιστοιχούν σχεδόν εξ ολοκλήρου στο επιφανειακό δυναμικό των ρεμάτων Μπογδανόρεμα και Κινέτα.

Για την εκτίμηση του εν λόγω επιφανειακού υδατικού δυναμικού, πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των μετρημένων παροχών του ΙΓΜΕ στις δύο θέσεις υδρομέτρησης (Σχήμα 3.18). Εντοπίστηκαν 82 ζεύγη ταυτόχρονων μετρήσεων, καθώς και 35 ζεύγη μετρήσεων που απείχαν το πολύ δύο ημέρες. Από τις παραπάνω εξαιρέθηκαν 2 μετρήσεις που θεωρήθηκαν εξωκείμενα σημεία, καθώς εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια πλημμυρών. Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{\text{ΑΝΘΟΧΩΡΙ}} = 0.856 Q_{\text{ΔΑΥΛΕΙΑ}} - 0.38 \quad (3.6)$$

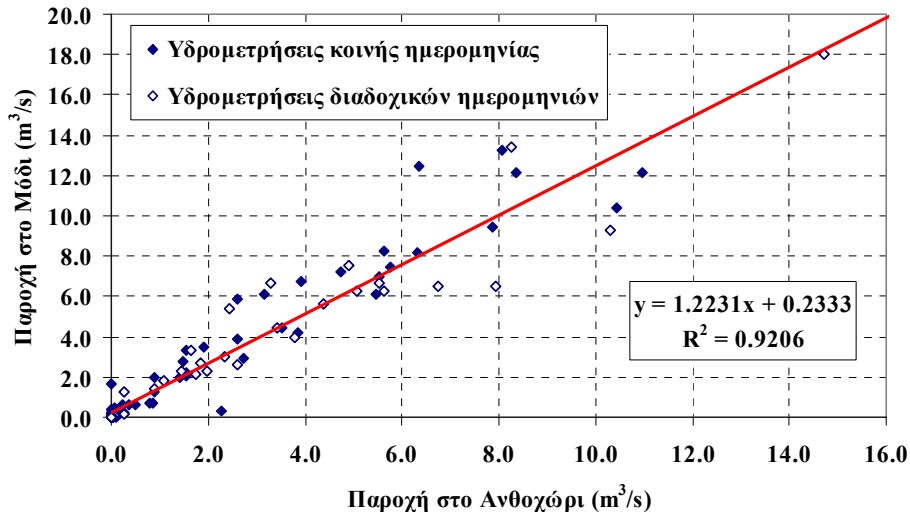
Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.6) είναι $r^2 = 0.903$ και θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικός. Η σχέση (3.6) υποδηλώνει ότι το 15% σχεδόν της παροχής που μετράται στο Σταθμό Δαύλειας προέρχεται από την επιφανειακή απορροή των ρεμάτων Μπογδανόρεμα και Κινέτα. Μάλιστα, ακόμη και σε περιόδους κατά τις οποίες μηδενίζεται πλήρως η παροχή του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της υπολεκάνης του μέσου ρου, τα παραπάνω ρέματα διατηρούν μια χαμηλή έστω ροή που οφείλεται, όπως φαίνεται, στην τροφοδοσία τους από τις πηγές του Προφήτη Ηλία.



Σχήμα 3.18: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Σταθμός Δαύλειας και Γέφυρα Ανθοχωρίου. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης, ενώ με τρίγωνα απεικονίζονται τα εξωκείμενα σημεία.

Υδρομετρήσεις στη θέση Γέφυρα Μοδίου

Ο υδρομετρικός σταθμός Μοδίου βρίσκεται στην έξοδο της Άνω Χαράδρας (χαράδρα Αμφίκλειας), η οποία είναι το φυσικό όριο μεταξύ του μέσου και άνω ρου. Χαρακτηριστικό της ροής του Βοιωτικού Κηφισού κατά μήκος της υπολεκάνης που αναπτύσσεται μεταξύ των θέσεων Ανθοχώρι και Μόδι (λεκάνη Τιθορέας) είναι οι μεγάλες απώλειες λόγω διήθησεων. Σύμφωνα με τις πλέον πρόσφατες απόψεις του ΙΓΜΕ, τα νερά που χάνονται λόγω διήθησης μεταγγίζονται εκτός λεκάνης, τροφοδοτώντας τις πηγές του Ευβοϊκού κόλπου (Καμένα Βούρλα, Θερμοπύλες). Παλιότερα, το ΙΓΜΕ συνέδεε τα νερά των διηθήσεων αποκλειστικά και μόνο με την τροφοδοσία των πηγών Μαυρονερίου, Μέλανα και Πολυγύρας.



Σχήμα 3.19: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Γέφυρα Ανθοχωρίου και Γέφυρα Μοδίου. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης.

Για την εκτίμηση των απωλειών λόγω διήθησης πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των μετρημένων παροχών του ΙΓΜΕ στις δύο θέσεις υδρομέτρησης (Σχήμα 3.19). Εντοπίστηκαν 72 ζεύγη ταυτόχρονων μετρήσεων, καθώς και 44 ζεύγη μετρήσεων που απείχαν το πολύ δύο ημέρες. Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{\text{ΜΟΔΙ}} = 1.223 Q_{\text{ΑΝΘΟΧΩΡΙ}} + 0.23 \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.7) είναι $r^2 = 0.921$ και θεωρείται πολύ ικανοποιητικός. Η σχέση παλινδρόμησης (3.7) επιβεβαιώνει το γεγονός ότι πραγματοποιούνται απώλειες νερού λόγω διήθησης, οι οποίες μάλιστα είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Πράγματι, ακόμη και αν θεωρηθεί μηδενική πλευρική τροφοδοσία του ποταμού (υπόθεση εύλογη, αν ληφθεί υπόψη ότι στην περιοχή δεν αναπτύσσονται αξιόλογα ρέματα ή πηγές), οι εν λόγω απώλειες ανέρχονται στα επίπεδα του 25%.

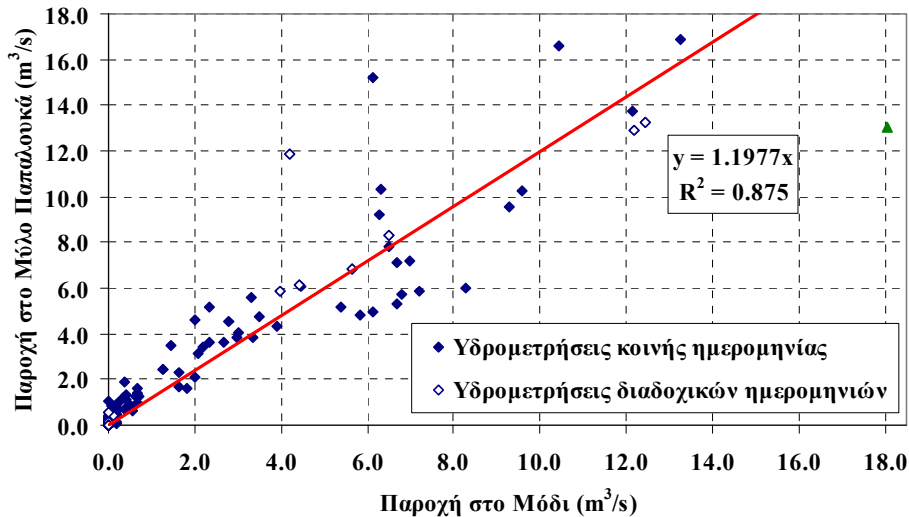
Υδρομετρήσεις στη θέση Γέφυρα Μύλου Παπαλουκά

Ο υδρομετρικός σταθμός Γέφυρας Μύλου Παπαλουκά βρίσκεται στην είσοδο της Άνω Χαράδρας. Κατά συνέπεια, η διαφορά των παροχών μεταξύ Μοδίου και Μύλου Παπαλουκά αποτελεί ένδειξη του μεγέθους των διηθήσεων κατά μήκος της χαράδρας.

Για την εκτίμηση των απωλειών πραγματοποιήθηκε στατιστική συσχέτιση των μετρημένων παροχών του ΙΓΜΕ στις δύο θέσεις υδρομέτρησης (Σχήμα 3.20). Εντοπίστηκαν 106 ζεύγη ταυτόχρονων μετρήσεων, καθώς και 17 ζεύγη μετρήσεων που απείχαν το πολύ δύο ημέρες. Από το παραπάνω δείγμα απορρίφθηκε μία μέτρηση, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια πλημμύρας, και έδωσε σημαντικά μεγαλύτερη παροχή στην κατάντη θέση. Η στατιστική ανάλυση κατέδειξε ότι η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων παροχής, εκφρασμένων σε m^3/s , είναι η ομογενής γραμμική και δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_{\text{ΠΑΠΑΛΟΥΚΑ}} = 1.198 Q_{\text{ΜΟΔΙ}} \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού της (3.8) είναι $r^2 = 0.875$ και θεωρείται αρκετά ικανοποιητικός. Η σχέση παλινδρόμησης υποδηλώνει ότι το μέγεθος των απωλειών κατά μήκος της χαράδρας της Αμφίκλειας λόγω διηθήσεων είναι πολύ σημαντικό, της τάξης του 20%.



Σχήμα 3.20: Συσχέτιση μετρημένων παροχών Βοιωτικού Κηφισού στις θέσεις υδρομέτρησης Γέφυρα Μοδίου και Γέφυρα Μύλου Παπαλουκά. Με συνεχή γραμμή απεικονίζεται η εξίσωση παλινδρόμησης, ενώ με τρίγωνο απεικονίζεται το εξωκείμενο σημείο.

3.2.10 Ανάλυση υδρομετρικών δεδομένων πηγών

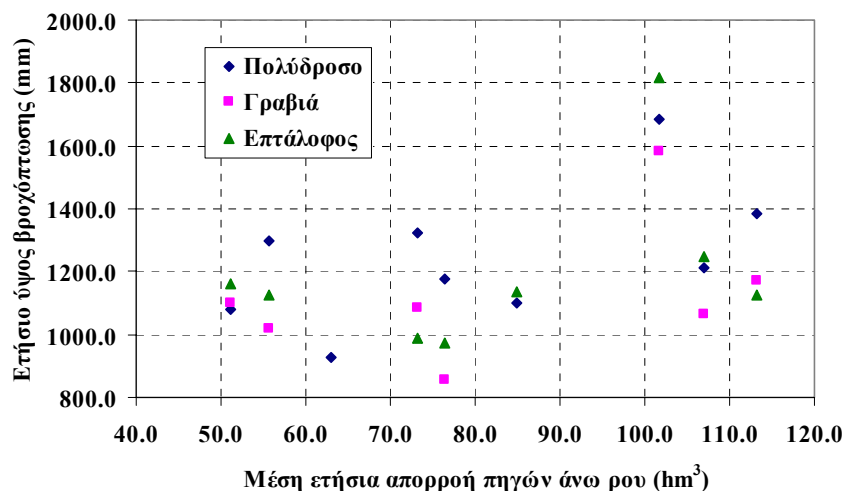
Οι διαθέσιμες μετρήσεις παροχής των πηγών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού αναφέρονται, σχεδόν στο σύνολό τους, σε τρεις χρονικές περιόδους. Η πρώτη καλύπτει την περίοδο 1933-1942 και 1945-1953, στη διάρκεια της οποίας πραγματοποιήθηκαν από την ΕΕΥ συστηματικές υδρομετρήσεις στις κύριες πηγές του άνω ρου (σε ημερήσιο βήμα) και μεμονωμένες υδρομετρήσεις στις υπόλοιπες πηγές της λεκάνης. Οι υδρομετρήσεις διακόπηκαν για μια μεγάλη περίοδο, και συνεχίστηκαν κατά το διάστημα 1969-1973 από τους *Λαδόπουλο και Χωραφά* (1974). Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, συστηματικές μετρήσεις των πηγαιών παροχών εκτελούνται από το ΙΓΜΕ, στα πλαίσια της *Υδρογεωλογικής έρευνας της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού* (*Παγούνης κ.ά.*, 1994). Στη συνέχεια επιχειρείται η ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων.

Πηγές άνω ρου

Για τα έτη 1933-1942 και 1945-1953, διατίθενται από την ΕΕΥ ημερήσια δεδομένα παροχής των πηγών Αγίας Ελεούσας, Αβύσσου, Γκατσινού, Άνω και Κάτω Αγόριανης, Άνω Σουβάλας και Μαριολάτας. Η συνολική μέση ετήσια απορροή των παραπάνω πηγών για την εν λόγω περίοδο ανέρχεται σε 61.5 hm^3 , με μέγιστο τα 113.3 hm^3 (1938-39) και ελάχιστο τα 51.1 hm^3 (1936-37). Στον Πίνακα 3.13 δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής των πηγών, όπως προέκυψαν με αναγωγή των ημερήσιων δεδομένων της ΕΕΥ σε μηνιαίο δείγμα. Χαρακτηριστική είναι η έντονη ενδοετήσια διακύμανση της παροχής των πηγών, καθώς από την αρχή της άνοιξης (Μάρτιος) έως το πέρας του καλοκαιριού (Σεπτέμβριος), το μέσο μηνιαίο υδατικό δυναμικό τους μειώνεται από 11.9 από σε 2.1 hm^3 .

Πίνακας 3.13: Στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής πηγών άνω ρου περιόδου 1933-1953 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	3.5	4.2	8.8	10.1	10.4	11.9	11.5	7.6	4.8	3.7	2.7	2.1	81.5
Τυπ. απόκλ.	3.3	3.0	3.0	3.5	2.8	3.9	3.9	3.6	2.2	2.2	0.9	0.5	32.8



Σχήμα 3.21: Συσχέτιση ετήσιας απορροής πηγών άνω ρου και ετήσιων βροχοπτώσεων των σταθμών Πολύδροσου, Γραβιάς και Επτάλοφου για την περίοδο 1933-1953.

Οι Αλτηγός κ.ά. (1964) επιχείρησαν να συσχετίσουν τις απορροές των πηγών με τα βροχομετρικά δεδομένα της λεκάνης του άνω ρου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, κατά την περίοδο 1933-1953, στην περιοχή λειτουργούσαν τρεις βροχομετρικοί σταθμοί και συγκεκριμένα οι σταθμοί Πολύδροσου, Γραβιάς και Άνω Αγόριανης (Επτάλοφου). Από την διερεύνηση που έγινε προέκυψε ότι δεν υφίσταται καμία συσχέτιση μεταξύ της ετήσιας απορροής των πηγών και των αντίστοιχων βροχοπτώσεων στη λεκάνη, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στο Σχήμα 3.21. Οι μελετητές θεώρησαν ότι η εκροές των πηγών δεν επηρεάζονται τόσο από τις βροχοπτώσεις όσο από παράγοντες όπως η πραγματική έκταση της υδρογεωλογικής τους λεκάνης, η διήθηση, η κατανομή των χιονοπτώσεων, ο χρόνος τήξης του χιονιού, η θερμοκρασία και οι πνέοντες άνεμοι. Στην πραγματικότητα, μια από τις κύριες αιτίες της κακής συσχέτισης των δειγμάτων βροχής και απορροής είναι η ανεπάρκεια των δεδομένων, τόσο εξαιτίας της έλλειψης ορεινών σταθμών όσο και λόγω αδυναμίας μέτρησης της χιονόπτωσης, που στην περίπτωση του άνω ρου αποτελεί σημαντική συνιστώσα των κατακρημνισμάτων.

Μεταξύ των ετών 1953, οπότε διακόπηκαν οι μετρήσεις της ΕΕΥ, και 1969, κατασκευάστηκαν στην περιοχή του άνω ρου διάφορα υδροληπτικά έργα, τα οποία αλλοίωσαν τη φυσική δίαιτα των πηγών. Κατά την περίοδο 1969-1973, ξεκίνησε νέο πρόγραμμα υδρομετρήσεων από τους Λαδόπουλο και Χωραφά (1974). Ωστόσο, οι μετρήσεις ήταν λιγότερο τακτικές (δύο έως τρεις ανά μήνα) και πραγματοποιήθηκαν μόνο κατά τους θερινούς μήνες.

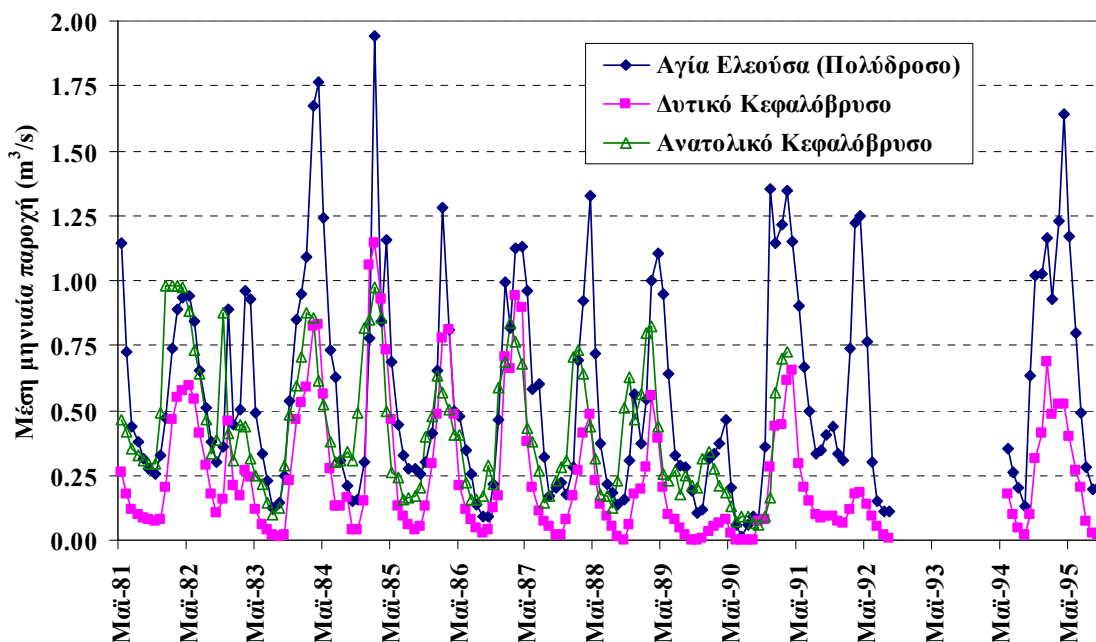
Συστηματικές μετρήσεις στις κύριες πηγές του άνω ρου πραγματοποιούνται πλέον από το ΙΓΜΕ. Για τα υδρολογικά έτη 1981-82 έως 1983-84 διατίθενται ετήσιες τιμές απορροής για εννέα πηγές, οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 3.14. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η ολική μέση ετήσια απορροή της τριετίας 1981-1983 ανέρχεται σε 59.7 hm³, εκ των οποίων τα 43.4 hm³ (δηλαδή ποσοστό 73%) προέρχονται από τις πηγές Αγίας Ελεούσας (Πολύδροσου), Ανατολικού και Δυτικού Κεφαλόβρυσου Λιλαίας. Για τις παραπάνω θέσεις διατίθενται συστηματικές μετρήσεις παροχής ανά 15 περίπου ημέρες για την περίοδο 1981-1992. Βάσει των παραπάνω δεδομένων, και με την παραδοχή ότι οι παροχές των πηγών παρουσιάζουν μικρή μόνο διακύμανση στο μήνα (κάτι που ωστόσο δεν επιβεβαιώνεται πάντοτε από τις υδρομετρήσεις), εξήχθησαν μηνιαία δείγματα απορροής μέσω χρονικής ολοκλήρωσης, θεωρώντας ότι η παροχή μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων (Σχήμα 3.22). Τα δείγματα που προέκυψαν παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ τους, γεγονός αναμενόμενο καθώς οι τρεις πηγές τροφοδοτούνται από την ίδια υδρογεωλογική λεκάνη.

Πίνακας 3.14: Ετήσιες απορροές (σε hm^3) των κύριων πηγών του άνω ρου, με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ (Πηγή: Παγούνης κ.ά., 1986).

Θέση	1981-82	1982-83	1983-84	Μέση τιμή
Κεφαλόβρυσο Καλοσκοπής	2.426	1.625	3.668	2.573
Γωνιά Καλοσκοπής	0.587	0.320	0.855	0.587
Μάνα Επταλόφου	3.149	2.171	5.171	3.497
Αγ. Ανάργυροι Επταλόφου	0.630	0.576	0.776	0.661
Αγ. Ελεούσα (Πολύδροσο)	19.073	14.132	24.629	19.278
Αγ. Βαρβάρα	1.035	0.745	1.759	1.180
Δυτικό Κεφαλόβρυσο Λιλαίας	8.515	5.014 ⁽¹⁾	12.358	8.629
Ανατ. Κεφαλόβρυσο Λιλαίας	21.130	11.048	14.183	15.454
Γέφυρα Λιλαίας	10.726	5.678	7.254	7.886
ΣΥΝΟΛΟ	67.271	41.309	70.653	59.744

(1) Στην έκθεση του ΙΓΜΕ υπήρχε κενό, το οποίο συμπληρώθηκε εκτιμώντας την απορροή με βάσει τις μετρήσεις παροχών του αντίστοιχου υδρολογικού έτους.

Θεωρώντας ότι οι το υδατικό δυναμικό των τριών κύριων πηγών του άνω ρου αντιστοιχεί στο 73% του ολικού πηγαίου δυναμικού της υπολεκάνης, έγινε επέκταση του ετήσιου δείγματος της περιόδου 1981-1983 έως και το υδρολογικό έτος 1991-92, για τα οποία υπάρχουν επαρκή στοιχεία (Πίνακας 3.15). Η μέση ετήσια τιμή της εν λόγω περιόδου ανέρχεται σε 51.9 hm^3 , είναι δηλαδή σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τη μέση ετήσια απορροή των ετών 1933-1953, που εκτιμάται σε 81.5 hm^3 . Αν και μέρος της υποβάθμισης του πηγαίου δυναμικού του άνω ρου οφείλεται στην μείωση των κατακρημνισμάτων στη λεκάνη, σημαντική αιτία της εν λόγω υποβάθμισης είναι και η λειτουργία των υδροληπτικών έργων που κατασκευάστηκαν μετά την δεκαετία του 1950.



Σχήμα 3.22: Μέσες μηνιαίες παροχές κύριων πηγών άνω ρου περιόδου 1981-1995, εκτιμημένες με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ. Από τον Οκτώβριο του 1992 έως τον Μάιο του 1994 δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις.

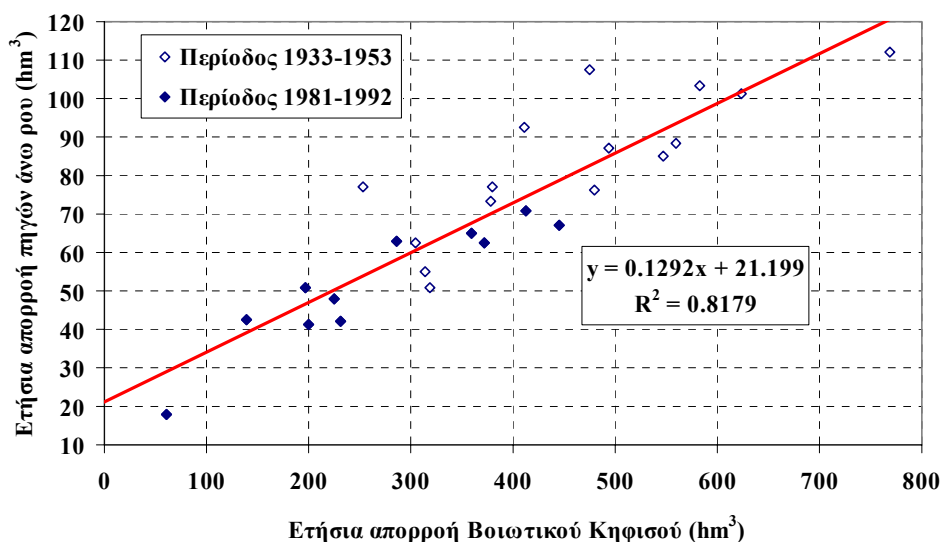
Πίνακας 3.15: Ετήσιες απορροές (σε hm^3) πηγών του άνω ρου.

Υδρ. έτος	Αγ. Ελεούσα, Ανατ. και Δυτ. Κεφαλόβρυσο	Σύνολο πηγών άνω ρου
1981-82	50.4	67.3 ⁽¹⁾
1982-83	31.0	41.3 ⁽¹⁾
1983-84	55.1	70.7 ⁽¹⁾
1984-85	47.3	65.1 ⁽²⁾
1985-86	34.7	47.7 ⁽²⁾
1986-87	45.3	62.4 ⁽²⁾
1987-88	30.6	42.1 ⁽²⁾
1988-89	36.8	50.6 ⁽²⁾
1989-90	13.0	17.9 ⁽²⁾
1990-91	45.6	62.9 ⁽²⁾
1991-92	30.8	42.4 ⁽²⁾
Μέση τιμή	38.2	51.9

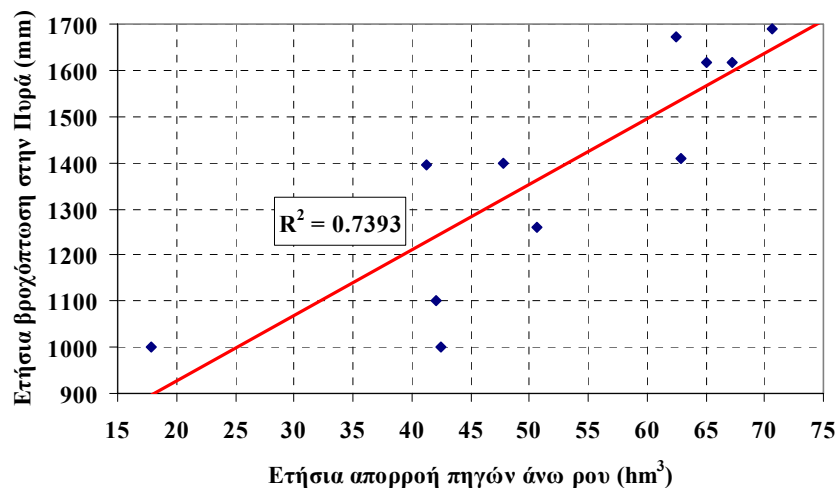
(1) Προκύπτει με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ στο σύνολο των πηγών.

(2) Προκύπτει με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ στις πηγές Αγίας Ελεούσας, Ανατολικού και Δυτικού Κεφαλόβρυσου, θεωρώντας ότι οι τελευταίες συνεισφέρουν το 73% της ολικής πηγαίας απορροής.

Η υδρολογική δίαιτα των πηγών του άνω ρου είναι αντιπροσωπευτική της δίαιτας του Βοιωτικού Κηφισού. Στο Σχήμα 3.23 απεικονίζεται η ετήσια απορροή των πηγών του άνω ρου συναρτήσει της ετήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης. Σημειώνεται ότι το δείγμα των πηγαίων απορροών προέρχεται από τις υδρομετρήσεις της ΕΕΥ (περίοδος 1933-1953) και του ΙΓΜΕ (περίοδος 1981-1992). Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η απορροή των πηγών του άνω ρου παρουσιάζει ισχυρή γραμμική συσχέτιση με την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού, με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού να ανέρχεται σε $r^2 = 0.818$. Αυτό σημαίνει ότι η σημαντική μείωση του υδατικού δυναμικού του Βοιωτικού Κηφισού ακολουθεί με συνέπεια την αντίστοιχου μεγέθους υποβάθμιση του πηγαίου δυναμικού της υπολεκάνης του άνω ρου.



Σχήμα 3.23: Συσχέτιση ετήσιας απορροής Βοιωτικού Κηφισού και πηγών άνω ρου για τις περιόδους 1933-1953 (υδρομετρήσεις της ΕΕΥ) και 1981-1992 (υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ).



Σχήμα 3.24: Συσχέτιση ετήσιας απορροής πηγών άνω ρου και ετήσιας βροχόπτωσης σταθμού Πυράς για την περίοδο 1981-1992.

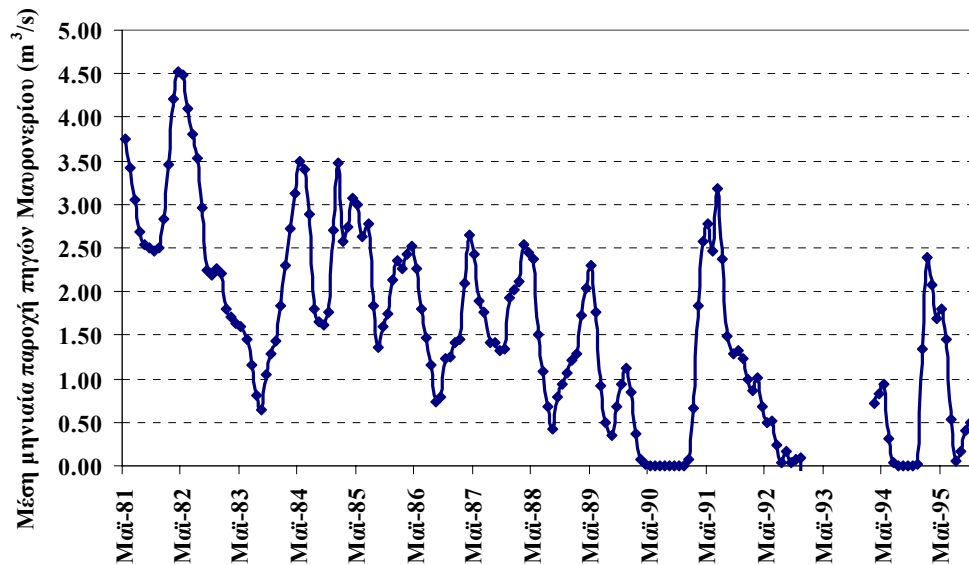
Για το πρόσφατο δείγμα ετήσιας απορροής των πηγών του άνω ρου, το οποίο προέρχεται από τις μετρήσεις του ΙΓΜΕ, διερευνήθηκε η ύπαρξη γραμμικής συσχέτισης με τα βροχομετρικά δεδομένα της λεκάνης. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι *Αλτηγός κ.ά.* (1964) επιχείρησαν μια παρόμοια διερεύνηση για το δείγμα της περιόδου 1933-1953, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως δεν υφίσταται καμία συσχέτιση. Η διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-πηγαίας απορροής για την περίοδο 1981-1992 πραγματοποιήθηκε με χρήση των δειγμάτων ετήσιας βροχόπτωσης των σταθμών Επταλόφου, Πυράς και Συκέας, που είναι οι υψηλότεροι της ευρύτερης περιοχής. Η ανάλυση κατέδειξε ότι μόνο το δείγμα του σταθμού Πυράς εμφανίζει σχετικά ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση με την ετήσια απορροή των πηγών του άνω ρου, με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.739$ (Σχήμα 3.24), ενώ η συσχέτιση με τους άλλους δύο σταθμούς είναι πολύ κακή ($r^2 < 0.40$). Σημειώνεται ότι ο σταθμός Πυράς, ο οποίος υδρολογικά ανήκει στην γειτονική λεκάνη του Μόρνου, είναι ο μόνος που βρίσκεται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 1000 m, και συγκεκριμένα στα 1140 m. Το γεγονός αυτό ενισχύει την υποψία ότι η αδυναμία καθορισμού μιας αξιόπιστης σχέσης βροχής-πηγαίας απορροής οφείλεται στην ανεπάρκεια βροχομετρικών δεδομένων αλλά και μετρήσεων χιονόπτωσης στις περιοχές της λεκάνης του άνω ρου με μεγάλο υψόμετρο.

Πηγές μέσου ρου

Για τις πηγές του μέσου ρου, κυριότερες εκ των οποίων είναι οι πηγές Μαυρονερίου, δεν υφίστανται αξιολογικά δεδομένα προ της έναρξης του προγράμματος υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ. Οι μετρήσεις που έχουν γίνει κατά καιρούς είναι σποραδικές και συνεπώς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή αξιόπιστων δειγμάτων απορροής.

Από το 1981, το ΙΓΜΕ πραγματοποιεί συστηματικές μετρήσεις παροχής στις πηγές Μαυρονερίου, ανά 15 περίπου ημέρες. Στο Σχήμα 3.25 απεικονίζεται η μηνιαία διακύμανση των παροχών για την περίοδο 1981-1994, η οποία προέκυψε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των υδρομετρήσεων. Από το διάγραμμα είναι εμφανής η πτωτική τάση του πηγαίου δυναμικού των πηγών κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1980, εξαιτίας της υπερεκμετάλλευσης των ανάντη υδροφορέων. Για πρώτη φορά οι πηγές Μαυρονερίου στέρεψαν εντελώς από τον Μάιο του 1990 έως τον Δεκέμβριο του ίδιου έτους. Το 1994, οπότε πραγματοποιήθηκαν απολήψεις της τάξης των 44 hm^3 από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της Αθήνας, οι πηγές στέρεψαν εκ νέου. Ωστόσο, μετά τη διακοπή των αντλήσεων οι πηγές επανήλθαν γρήγορα στην κατάσταση προ άντλησης. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 οι πηγές εμφάνισαν σχετικά υψηλές παροχές, στέρεψαν όμως και πάλι

από τον καλοκαίρι του 2000 έως τα τέλη του 2001, οπότε ανέκαμψαν μετά την θεαματική αύξηση των κατακρημισμάτων κατά τα τελευταία δύο έτη.



Σχήμα 3.25: Μέσες μηνιαίες παροχές πηγών Μαυρονερίου της περιόδου 1981-1995, εκτιμημένες με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ (κατά την περίοδο Ιανουαρίου 1993-Φεβρουαρίου 1994 δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις).

Στον Πίνακα 3.16 δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος απορροής των πηγών Μαυρονερίου. Η μέση ετήσια τιμή της περιόδου 1981-1995 ανέρχεται σε 51.7 hm^3 ή $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Η τιμή αυτή είναι σύμφωνη με την άποψη τόσο των *Λαδόπουλου και Χωραρά (1974)* όσο και των *Γκόφα κ.ά. (1988)*, οι οποίοι, βασιζόμενοι σε σποραδικές μετρήσεις που έγιναν στις αρχές και τα τέλη της δεκαετίας του 1970 αντίστοιχα, υπολόγισαν το ετήσιο δυναμικό των πηγών σε περίπου 50 hm^3 .

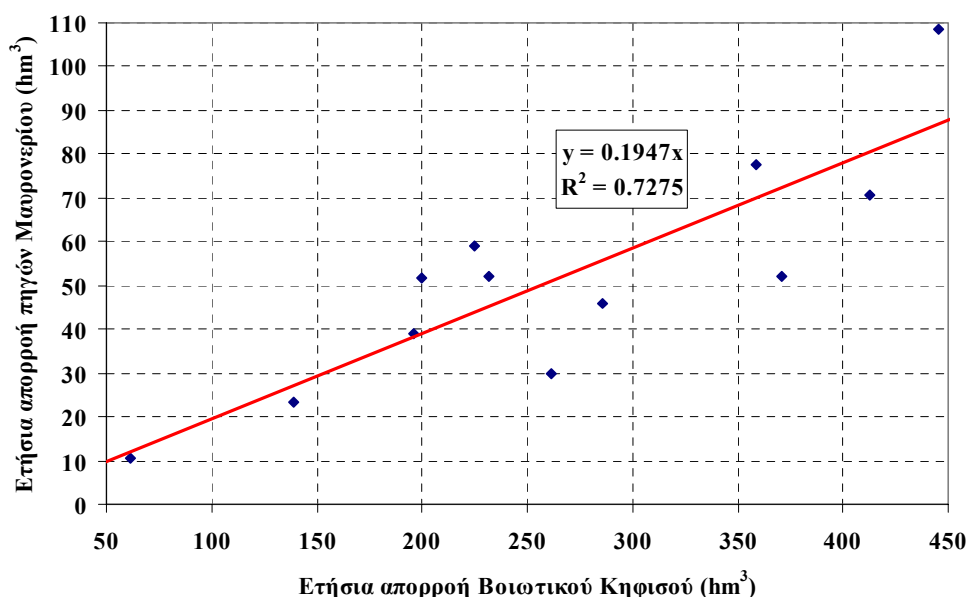
Πίνακας 3.16: Στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής πηγών Μαυρονερίου περιόδου 1981-1995 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	2.7	2.9	3.5	4.6	4.3	5.3	5.5	6.1	4.9	4.4	3.2	2.6	51.7
Τυπ. απόκλ.	2.1	2.0	2.4	2.5	2.2	2.8	3.1	3.3	3.1	3.4	3.0	2.4	26.1

Στο Σχήμα 3.26 απεικονίζεται η ετήσια απορροή των πηγών Μαυρονερίου συναρτήσει της ετήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης, για τα υδρολογικά έτη κατά τα οποία πραγματοποιήθηκαν υδρομετρήσεις όλους τους μήνες. Τα δύο δείγματα παρουσιάζουν σχετικά ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση, με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.723$. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι, κατά μέσο όρο, η απορροή των πηγών αντιστοιχεί στο 20% της συνολικής απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Ωστόσο, η καθαρή συνεισφορά των πηγών Μαυρονερίου είναι μικρότερη, δεδομένου ότι κατά την αρδευτική περίοδο πραγματοποιούνται απολήψεις, μέσω των μικρών υδροληπτικών έργων που έχουν κατασκευαστεί στην ομώνυμη τάφρο.

Για τις υπόλοιπες πηγές του μέσου ρου (πηγές Δαύλειας, Προφήτη Ηλία και Σφάκας), διατίθενται από το ΙΓΜΕ αναλυτικά στοιχεία μόνο για την τριετία 1981-82 ως 1983-84, τα οποία δίνονται στον Πίνακα 3.17. Η μέση ετήσια απορροή των παραπάνω πηγών ανέρχεται σε 29.5 hm^3 , εκ των οποίων τα 17.5 hm^3 προέρχονται από τις πηγές του Προφήτη Ηλία. Στις εν λόγω πηγές, οι οποίες τροφοδοτούν έναν από τους σημαντικότερους παραποτάμους του Βοιωτικού Κηφισού, το Μπογδανόρεμα, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον υδρομετρήσεις μέχρι το 1989, οι οποίες ωστόσο δεν επαρκούν για την εξαγωγή ολοκληρωμένου δείγματος απορροής. Πάντως οι μετρήσεις καταδεικνύουν ότι, τουλάχιστον

κατά την εαρινή και θερινή περίοδο, υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση της παροχής των πηγών του Προφήτη Ηλία με αυτή των πηγών Μαυρονερίου.



Σχήμα 3.26: Συσχέτιση ετήσιας απορροής Βοιωτικού Κηφισού και πηγών Μαυρονερίου για την περίοδο 1981-1995.

Πίνακας 3.17: Ετήσιες απορροές (σε hm³) των κύριων πηγών του μέσου ρου, με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ (Πηγή: Παγούνης κ.ά., 1986).

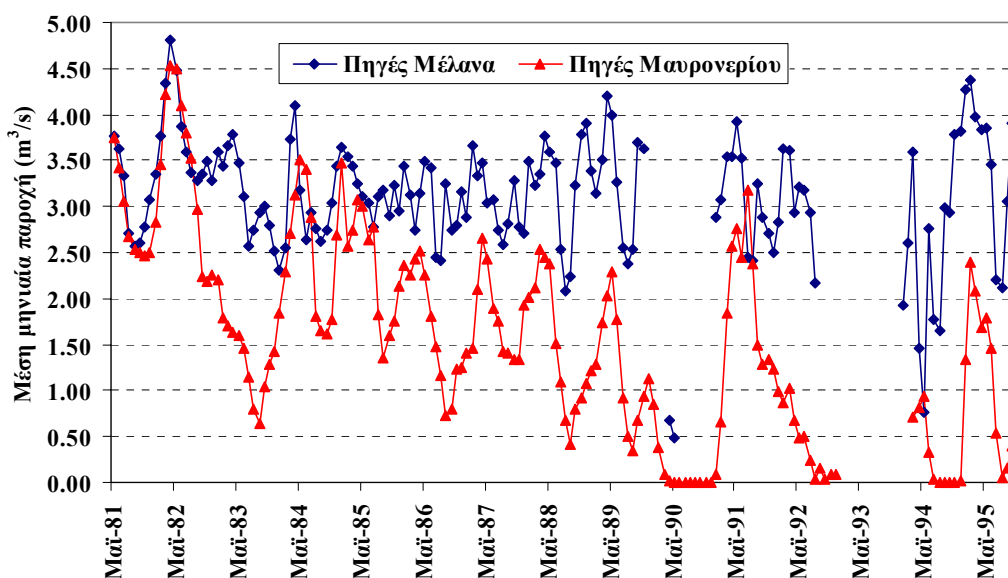
Θέση	1981-82	1982-83	1983-84	Μέση τιμή
Νερομάνα Δαύλειας	0.757	0.420	0.650	0.609
Νεκροταφείο Δαύλειας	1.098	0.775	0.990	0.954
Μύλος Δαύλειας	0.978	0.869	1.004	0.950
Καβάθα Δαύλειας	1.209	0.604	1.228	1.014
Κεφαλόβρυσο Δαύλειας	0.767	0.550	0.620	0.646
Αδύλειον (σταθμός Δαύλειας)	3.802	1.250	2.180	2.411
Προφ. Ηλίας Δαύλειας	3.341	0.777	1.592	1.903
Προφ. Ηλίας Αγ. Παρασκευής	24.760	10.450	17.421	17.544
Σφάκα-Σέλχι	5.223	1.505	3.550	3.426
Μαυρονέρι ⁽¹⁾	108.689	51.702	70.798	77.063
ΣΥΝΟΛΟ (χωρίς Μαυρονέρι)	41.935	17.200	29.235	29.457
ΣΥΝΟΛΟ (με Μαυρονέρι)	150.624	68.902	100.033	106.520

(1) Οι τιμές προέκυψαν με χρονική ολοκλήρωση των υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ.

Πηγές κάτω ρου

Παρόμοια με τις πηγές του μέσου ρου, έτσι και για τις πηγές του κάτω ρου δεν διατίθενται παρά σποραδικά και μόνο δεδομένα παροχής για την περίοδο πριν το 1981. Τα εν λόγω δεδομένα προέρχονται από 17 υδρομετρήσεις που πραγματοποίησε η ΕΕΥ μεταξύ των ετών 1933-1937 και άλλες 10 μετρήσεις που πραγματοποίησε ο Οργανισμός Κωπαΐδας μεταξύ των ετών 1953-1958 στις πηγές Μέλανα και Πολυγύρας (Αλτηγός κ.ά., 1964).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι κυριότερες πηγές όχι μόνο του μέσου ρου αλλά και όλης της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού είναι αυτές του Μέλανα (πηγές Χαρίτων). Από το 1981, το ΙΓΜΕ πραγματοποιεί συστηματικές υδρομετρήσεις στις εν λόγω πηγές (τουλάχιστον δύο ανά μήνα), οι οποίες διακόπηκαν κατά τις περιόδους Δεκέμβριος 1989 - Δεκέμβριος 1990 (με εξαίρεση δύο μετρήσεις) και Σεπτέμβριος 1992 - Δεκέμβριος 1993. Στο Σχήμα 3.27 απεικονίζεται η μηνιαία διακύμανση των παροχών για την περίοδο 1981-1994, η οποία προέκυψε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των υδρομετρήσεων. Για λόγους σύγκρισης, στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται και η χρονοσειρά απορροής των πηγών Μαυρονερίου. Παρατηρείται ότι από τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η υπερετήσια διακύμανση της παροχής των πηγών Μέλανα παρουσιάζει σημαντική αύξηση σε σχέση με τη δεκαετία του 1980. Μάλιστα, στις αρχές του καλοκαιριού των ετών 1990 και 1994 το δυναμικό των πηγών μειώθηκε δραστικά, όχι όμως μέχρι πλήρους μηδενισμού της παροχής, όπως συνέβη με τις πηγές Μαυρονερίου. Το αίτιο της μείωσης του δυναμικού των πηγών πρέπει να αναζητηθεί στην υπερεκμετάλλευση των γεωτρήσεων κατά μήκος του Ακοντίου όρους, εξαιτίας των έντονα δυσμενών συνθηκών υδροφορίας εκείνων των περιόδων.



Σχήμα 3.27: Μέσες μηνιαίες παροχές πηγών Μέλανα και Μαυρονερίου της περιόδου 1981-1995, εκτιμημένες με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ.

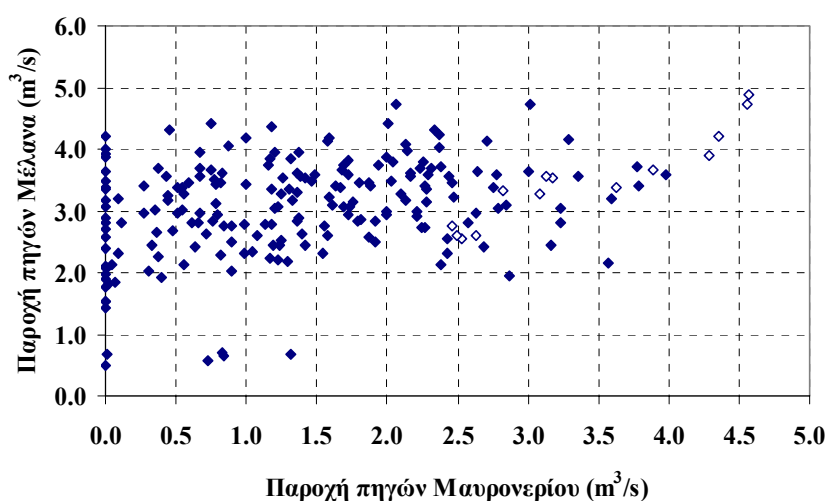
Στον Πίνακα 3.18 δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μηνιαίου δείγματος απορροής των πηγών Μέλανα, η μέση ετήσια τιμή του οποίου ανέρχεται σε 101.3 hm^3 . Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό της εν λόγω μέσης τιμής έχουν ληφθεί υπόψη μόνο τα υδρολογικά έτη κατά τα οποία πραγματοποιήθηκε τουλάχιστον μία υδρομέτρηση ανά μήνα, ήτοι οι περίοδοι 1981-82 ως 1988-89 και 1994-95 (αθροίζοντας τις επιμέρους μέσες μηνιαίες τιμές καταλήγουμε σε ελάχιστα χαμηλότερη μέση ετήσια τιμή). Για την ίδια περίοδο, η μέση απορροή του Βοιωτικού Κηφισού ανήλθε σε 300.2 hm^3 . Ωστόσο, αυτό δεν συνεπάγεται ότι το δυναμικό των πηγών του Μέλανα αντιστοιχεί στο 1/3 του ολικού υδατικού δυναμικού του Βοιωτικού Κηφισού, δεδομένου ότι το σύνολο σχεδόν της θερινής απορροής των πηγών δεσμεύεται για την άρδευση της Κοπαΐδας.

Σε αντίθεση με τις πηγές του άνω και μέσου ρου, το δείγμα απορροής των πηγών Μέλανα δεν συσχετίζεται με το δείγμα απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας ούτε σε μηνιαία ούτε σε ετήσια κλίμακα. Η ανυπαρξία οποιασδήποτε μορφής συσχέτισης καταδεικνύει ότι ο μηχανισμός τροφοδοσίας των πηγών Μέλανα διαφέρει από αυτόν των υπόλοιπων καρστικών πηγών της λεκάνης. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.28, στο οποίο απεικονίζονται οι ταυτόχρονες υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ στις πηγές Μέλανα και Μαυρονερίου. Από το διάγραμμα

προκύπτει ότι τα δύο δείγματα είναι πλήρως ασυσχέτιστα. Ωστόσο, προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι αν απομονωθούν οι υψηλές τιμές παροχής των πηγών Μαυρονερίου ($> 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), αρχίζει να διαφαίνεται μια αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο δειγμάτων. Σημειώνεται ότι, στη συντριπτική τους πλειονότητα, οι πολύ μεγάλες αυτές παροχές καταγράφηκαν την περίοδο 1981-1983, οπότε η μηνιαία διακύμανση της απορροής των δύο πηγών ήταν πρακτικά η ίδια, ενώ στη συνέχεια διαφοροποιήθηκε εντελώς (βλ. Σχήμα 3.27). Δυστυχώς, δεν υπάρχουν παλιότερα δεδομένα υδρομετρήσεων, ώστε να μπορεί να διαπιστωθεί αν αυτό οφείλεται σε κάποιο συστηματικό αίτιο ή πρόκειται για τυχαίο γεγονός.

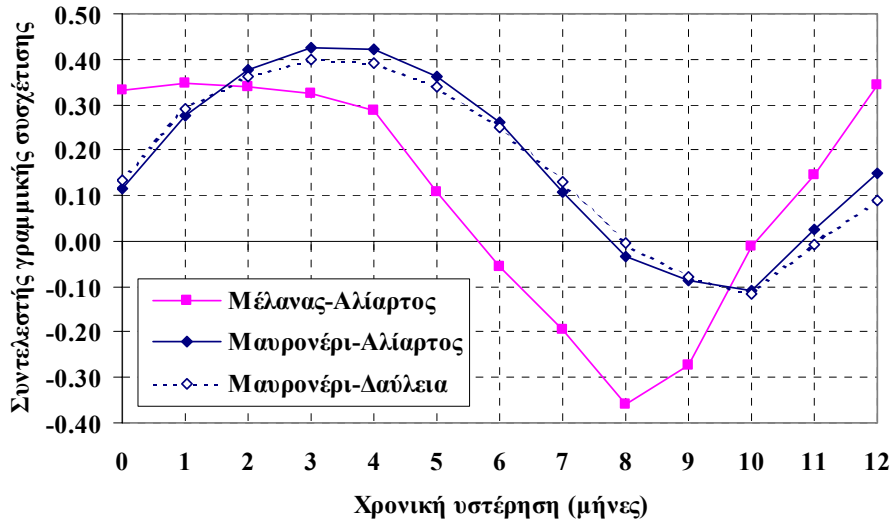
Πίνακας 3.18: Στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής πηγών Μέλανα περιόδου 1981-1995 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	8.3	8.6	8.4	8.5	9.0	9.6	8.8	8.5	8.7	7.2	6.7	7.7	101.3
Τυπ. απόκλ.	1.1	1.1	1.3	1.7	1.4	1.0	3.0	3.1	0.9	1.3	1.2	0.9	7.1



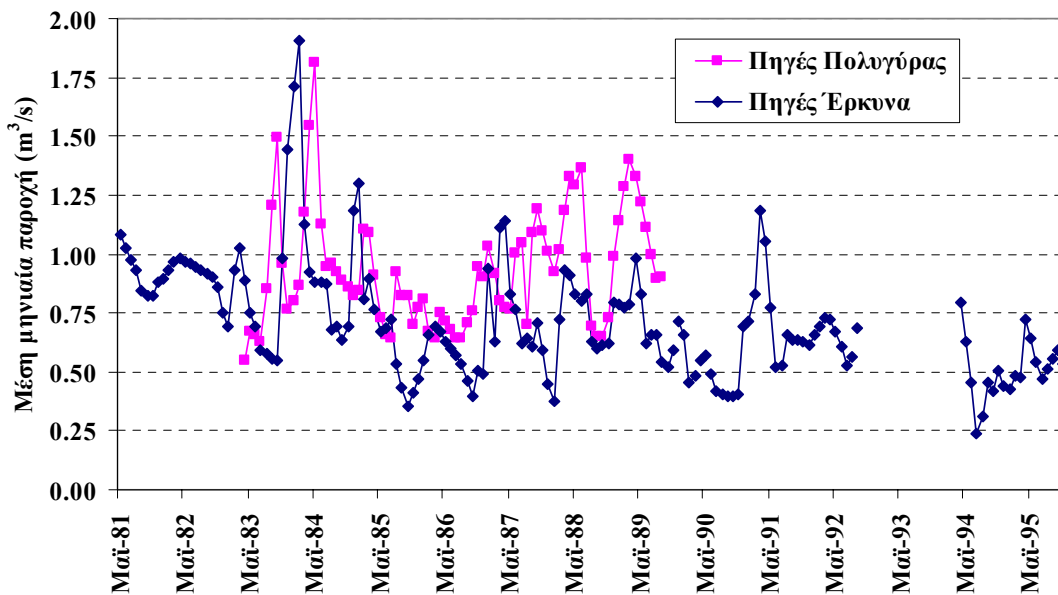
Σχήμα 3.28: Διάγραμμα διασποράς μετρημένων παροχών των πηγών Μέλανα και Μαυρονερίου. Με κενούς ρόμβους απεικονίζονται τα δεδομένα μέχρι το τέλος του υδρολογικού έτους 1981-82, ενώ με πλήρεις ρόμβους απεικονίζονται τα δεδομένα της υπόλοιπης περιόδου, μέχρι το 1995.

Επιχειρώντας μια περαιτέρω διερεύνηση, κατασκευάστηκαν τα ετεροσυσχετογράμματα της μηνιαίας απορροής των πηγών Μέλανα καθώς και Μαυρονερίου με τη μηνιαία βροχόπτωση του σταθμού Αλιάρτου (δηλαδή η μεταβολή των αντίστοιχων συντελεστών γραμμικής συσχέτισης των δειγμάτων βροχής-πηγαίας απορροής συναρτήσει του χρόνου υστέρησης), τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.29. Το δείγμα σημειακής βροχόπτωσης στην Αλιάρτο επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό της διάταξης των κατακρημνισμάτων στη λεκάνη. Για λόγους πληρότητας, ελέγχθηκε ακόμη η συσχέτιση του δείγματος απορροής των πηγών Μαυρονερίου με τη βροχόπτωση στη Δαύλεια, και το ετεροσυσχετόγραμμα που προέκυψε ταυτίζεται πρακτικά με αυτό των δειγμάτων απορροής Μαυρονερίου και βροχόπτωσης Αλιάρτου. Η μορφή των ετεροσυσχετογραμμάτων της απορροής του Μέλανα και του Μαυρονερίου με τη βροχόπτωση στην Αλιάρτο είναι πολύ διαφορετική, γεγονός που επεξηγεί την κακή συσχέτιση που παρουσιάζουν μεταξύ τους τα δείγματα παροχής των πηγών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις εντελώς διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες των αντίστοιχων υδροφορέων (αποθηκευτικότητα, μεταβιβαστικότητα). Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις, ο χρόνος απόκρισης των πηγών Μέλανα και Μαυρονερίου (που είναι οι σημαντικότερες της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού) είναι σχετικά μεγάλος, της τάξης των 4-5 μηνών. Αυτό σημαίνει ότι τα νερά που κατεισδύουν στους υπόγειους υδροφορείς της λεκάνης επανεμφανίζονται ως πηγαία απορροή με αντίστοιχο μέγεθος χρονική υστέρηση.



Σχήμα 3.29: Ετεροσυσχετόγραμμα μεταξύ μηνιαίας απορροής πηγών Μέλανα και Μαυρονερίου και μηνιαίας βροχόπτωσης στην Αλιάρτο και τη Δαύλεια (υδρολογικά έτη 1981-82 έως 1988-89).

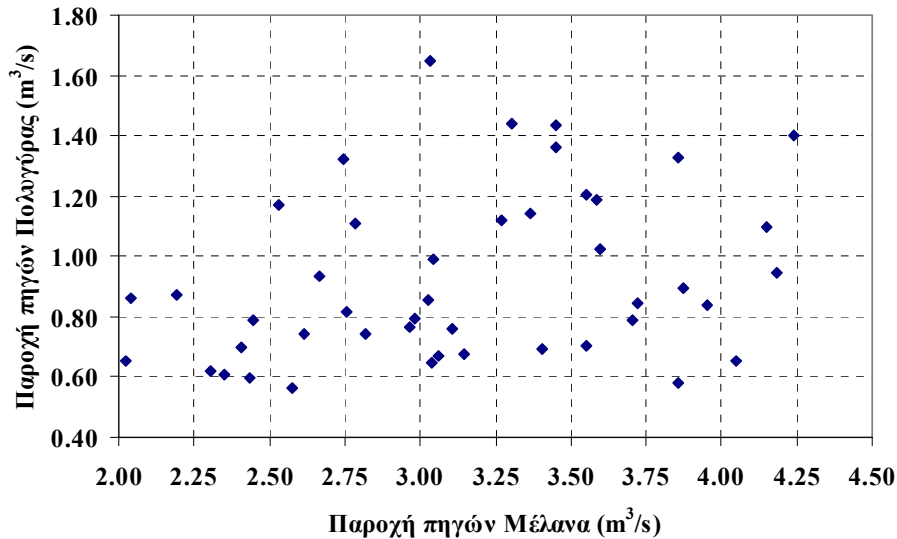
Η δεύτερη σημαντικότερη ομάδα πηγών του κάτω ρου είναι αυτές της Πολυγύρας, για τις οποίες διατίθενται δεδομένα υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ για την περίοδο 1983-1989. Στο Σχήμα 3.30 απεικονίζεται η χρονοσειρά διακύμανσης της παροχής των πηγών Πολυγύρας, ενώ στον Πίνακα 3.19 δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μηνιαίου δειγμάτων απορροής, η μέση ετήσια τιμή του οποίου ανέρχεται σε 29.9 hm^3 . Οι πηγές Πολυγύρας, παρόλο που γειτνιάζουν με αυτές του Μέλανα, ανήκουν σε άλλη υδρογεωλογική ενότητα. Για το λόγο αυτό, τα δείγματα των ταυτόχρονων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ είναι πλήρως ασυσχέτιστα, όπως εμφανώς καταδεικνύεται στο Σχήμα 3.31. Εξίσου όμως ασυσχέτιστα είναι και το δείγμα απορροής των πηγών Πολυγύρας με το αντίστοιχο δείγμα των πηγών Μέλανα (Σχήμα 3.32). Παλιότεροι μελετητές (*Gurlitt, 1957*) διατυπώνουν την άποψη ότι η παροχή των πηγών Πολυγύρας εμφανίζει μεγάλες μεταβολές εντός μικρών χρονικών διαστημάτων, οι οποίες δεν δικαιολογούνται από τις βροχοπτώσεις, ενώ επηρεάζεται έντονα από την αποστράγγιση ή άρδευση των παρακείμενων αγρών (βλ. *Παπαγιαννοπούλου και Λέτσιος, 1971*).



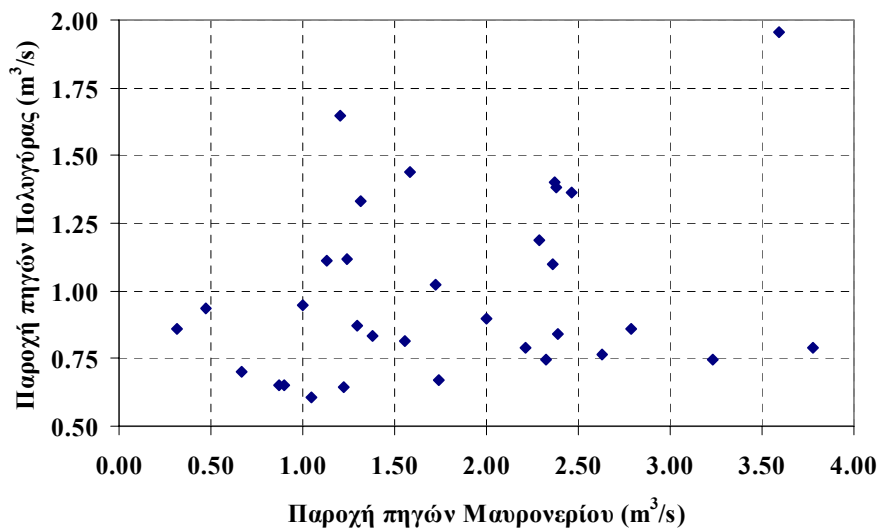
Σχήμα 3.30: Μέσες μηνιαίες παροχές πηγών Πολυγύρας και Έρκωνα της περιόδου 1981-1995, εκτιμημένες με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ.

Πίνακας 3.19: Στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής πηγών Πολυγύρας περιόδου 1983-1989 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	2.6	2.4	2.3	2.5	2.6	2.8	2.7	2.8	2.5	2.3	2.2	2.4	29.9
Τυπ. απόκλ.	0.8	0.4	0.3	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1	0.8	0.5	0.3	0.5	4.9



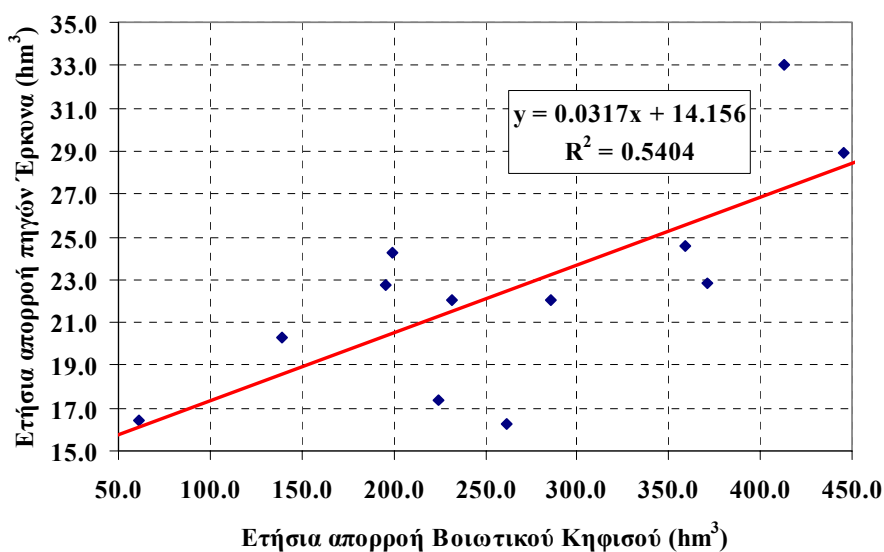
Σχήμα 3.31: Διάγραμμα διασποράς ταυτόχρονα μετρημένων παροχών στις πηγές Μέλανα και Πολυγύρας.



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα διασποράς ταυτόχρονα μετρημένων παροχών στις πηγές Μαυρονερίου και Πολυγύρας.

Η τρίτη σε σπουδαιότητα ομάδα πηγών είναι αυτές του ποταμού Έρκυνα (πηγές Κρύας ή πηγές Λειβαδιάς), για τις οποίες διατίθενται δεδομένα υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ για την περίοδο 1981-1995 (στην περίπτωση αυτή οι υδρομετρήσεις είναι σχετικά αραιές, με συχνότητα μία περίπου ανά μήνα). Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του μηνιαίου δείγματος απορροής, το οποίο προέκυψε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης (βλ. Σχήμα 3.30), δίνονται στον Πίνακα 3.20. Η μέση ετήσια τιμή του δείγματος απορροής των πηγών του Έρκυνα ανέρχεται σε 22.6 hm^3 , εφόσον χρησιμοποιηθεί το πλήρες δείγμα, ενώ αυξάνει σε 23.8 hm^3 , εφόσον χρησιμοποιηθεί το δείγμα της κοινής περιόδου με αυτό των πηγών

Πολυγύρας (1983-84 ως 1988-89). Ωστόσο, μέρος μόνο της παροχής των πηγών καταλήγει στον Βοιωτικό Κηφισό, καθώς τα νερά αυτά δεσμεύονται κατά κύριο λόγο για ύδρευση της Λειβαδιάς καθώς και για αρδευτικούς σκοπούς.



Σχήμα 3.33: Συσχέτιση ετήσιας απορροής Βοιωτικού Κηφισού και πηγών Έρκυνα για την περίοδο 1981-1995.

Πίνακας 3.20: Στατιστικά χαρακτηριστικά απορροής πηγών Έρκυνα περιόδου 1981-1995 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	1.6	1.7	2.0	2.2	2.2	2.3	2.3	2.1	1.8	1.7	1.6	1.6	22.6
Τυπ. απόκλ.	0.4	0.5	0.8	1.0	1.0	0.6	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	4.9

Στο Σχήμα 3.33 απεικονίζεται η ετήσια απορροή των πηγών συναρτήσει της ετήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης του, για τα υδρολογικά έτη κατά τα οποία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις παροχής στον Έρκυνα όλους τους μήνες (1981-82 ως 1991-92 και 1994-95). Σε αντίθεση με τις πηγές Μέλανα και Πολυγύρας, το δείγμα ετήσιας απορροής των πηγών Έρκυνα παρουσιάζει έστω και μέτρια γραμμική συσχέτιση με την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού, με συντελεστή προσδιορισμού $r^2 = 0.540$.

Για τις υπόλοιπες, μικρότερης σημασίας, πηγές του κάτω ρου, δεν υπάρχουν συστηματικά δεδομένα παροχής από υδρομετρήσεις, με εξαίρεση ορισμένες σποραδικές μετρήσεις στις πηγές του Αγίου Ιωάννη Λαφυστίου κατά την περίοδο 1981-1990. Η μέση τιμή των μετρημένων παροχών στις εν λόγω πηγές ανέρχεται σε $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$. Από το ΙΓΜΕ διατίθενται συγκεντρωτικά στοιχεία ετήσιων απορροών για το σύνολο των πηγών του κάτω ρου για την τριετία 1981-82 ως 1983-84, τα οποία δίνονται στον Πίνακα 3.21. Από τα δεδομένα του πίνακα προκύπτει ότι οι πηγές Μέλανα, Πολυγύρας και Έρκυνα συνεισφέρουν κατά 90% στη συνολική απορροή των πηγών του κάτω ρου.

Πίνακας 3.21: Ετήσιες απορροές (σε hm^3) των κύριων πηγών του κάτω ρου, με βάση τις υδρομετρήσεις του ΙΓΜΕ (Πηγή: Παγούνης κ.ά., 1986).

Θέση	1981-82	1982-83	1983-84	Μέση τιμή
Αλιάρτου (Κεφαλάρι)	6.572	1.374	2.817	3.588
Πόντζα Αγ. Τριάδας	7.871	1.483	8.114	5.823
Λαφυστίου	6.516	2.790	6.484	5.263
Λειβαδιάς ⁽¹⁾	28.941	24.222	33.050	28.738
Μέλανα ⁽¹⁾	113.700	103.519	92.413	103.211
Πολυγύρας ⁽¹⁾	40.000	25.000	47.258	35.202
Πέτρας	1.263	0.691	1.679	1.211
Ανάληψης	8.096	2.534	3.810	4.813
Αλιάρτου (Φλέβα)	1.510		0.840	1.175
Αμωτή (Αλιάρτου)	1.374		0.852	1.113
ΣΥΝΟΛΟ	215.843	161.613	197.318	190.137

(1) Οι ετήσιες απορροές των πηγών προέκυψαν με χρονική ολοκλήρωση των υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ. Το ίδιο το ΙΓΜΕ αναφέρει στην έκθεσή του ελαφρά υψηλότερες τιμές (κυρίως στις πηγές Μέλανα την περίοδο 1983-84), με αποτέλεσμα η ολική μέση πηγαία απορροή των ετών 1981-1983 να εκτιμάται σε 196.9 hm^3 .

3.3 Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας

3.3.1 Παρατηρήσεις στάθμης υπόγειου νερού

Το ΙΓΜΕ διενεργεί για λογαριασμό της ΕΥΔΑΠ συστηματικές (δύο έως τρεις ανά μήνα) μετρήσεις στάθμης σε 42 θέσεις παρατήρησης στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Πίνακας 3.22). Στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου, συλλέχθηκαν στοιχεία μετρήσεων στάθμης των ετών 1994 και 1995 (Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000). Με εξαίρεση τις γεωτρήσεις στην περιοχή του μέσου ρου του Βοιωτικού Κηφισού, οι παρατηρούμενες υπερετίσιες διακυμάνσεις της στάθμης στις υπόλοιπες γεωτρήσεις είναι σχετικά περιορισμένες.

Πίνακας 3.22: Σημεία παρακολούθησης στάθμης υπόγειου νερού και αντίστοιχα υψόμετρα διάτρησης.

Όνομασία	Υψόμετρο (m)	Όνομασία	Υψόμετρο (m)	Όνομασία	Υψόμετρο (m)
ΥΥΣ2	179.00	ΥΥ5	104.67	ΠΛ1	100.56
ΥΜ3	91.80	ΥΥ9	116.90	ΕΜΡ2	178.83
ΥΜ4	79.00	ΥΥ14	136.36	ΕΜΡ3	129.87
ΥΜ5	90.40	Γ43	101.83	ΕΜΡ6	129.27
ΥΜ7	62.20	ΕΚ1	99.23	ΕΜΡ8	142.12
ΥΜ10	178.30	ΕΚ7	116.55	ΕΜΡ13	138.44
ΕΠ6	41.96	ΕΚ9	103.33	ΕΜΡ22	127.08
ΕΠ9	58.95	ΜΡ1	124.22	Γ37	135.01
ΕΠ10	39.03	ΧΡ2	121.39	Γ82	166.30
ΕΠ14	48.72	ΧΡ3	118.13	Γ84	170.03
ΥΤ1	88.96	ΧΡ4	116.83	ΕΑΡ5	309.34
ΥΤ7	106.90	ΑΚ4	114.74	ΕΑΡ7	324.92
ΥΤ8	138.44	ΚΡ2	108.75	ΕΑΡ9	332.46
ΥΥ4	107.71	ΠΡ1	105.44	ΕΑΡ11	282.27

3.3.2 Γεωτρήσεις

Οι γεωτρήσεις της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες (Ζαρρής κ.ά., 1999):

Γεωτρήσεις Υπουργείου Γεωργίας (ΥΠΓΕ): Οι εν λόγω γεωτρήσεις διανοίχτηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και εκτείνονται σε μεγάλη έκταση, με τις περισσότερες να βρίσκονται κατάντη του Μαυρονερίου, με εξαίρεση αυτές της Σφάκας και του Προφήτη Ηλία. Ορισμένες καλύπτουν τοπικές αρδευτικές ανάγκες, ενώ οι υπόλοιπες διοχετεύουν τα νερά τους στο Υδραγωγείο Κωπαΐδας και συγκεκριμένα στις δεξαμενές των αντλιοστασίων Α3 (γεωτρήσεις Χαιρώνειας) και Α4 (γεωτρήσεις Ακοντίου). Κατά την περίοδο της λειψυδρίας, ορισμένες εξ αυτών (γεωτρήσεις Μαυρονερίου και Ακοντίου) χρησιμοποιήθηκαν και για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω γεωτρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.23.

Πίνακας 3.23: Γεωτρήσεις Υπουργείου Γεωργίας (Πηγή: Αντωνίου-Πέππας κ.ά., 1993).

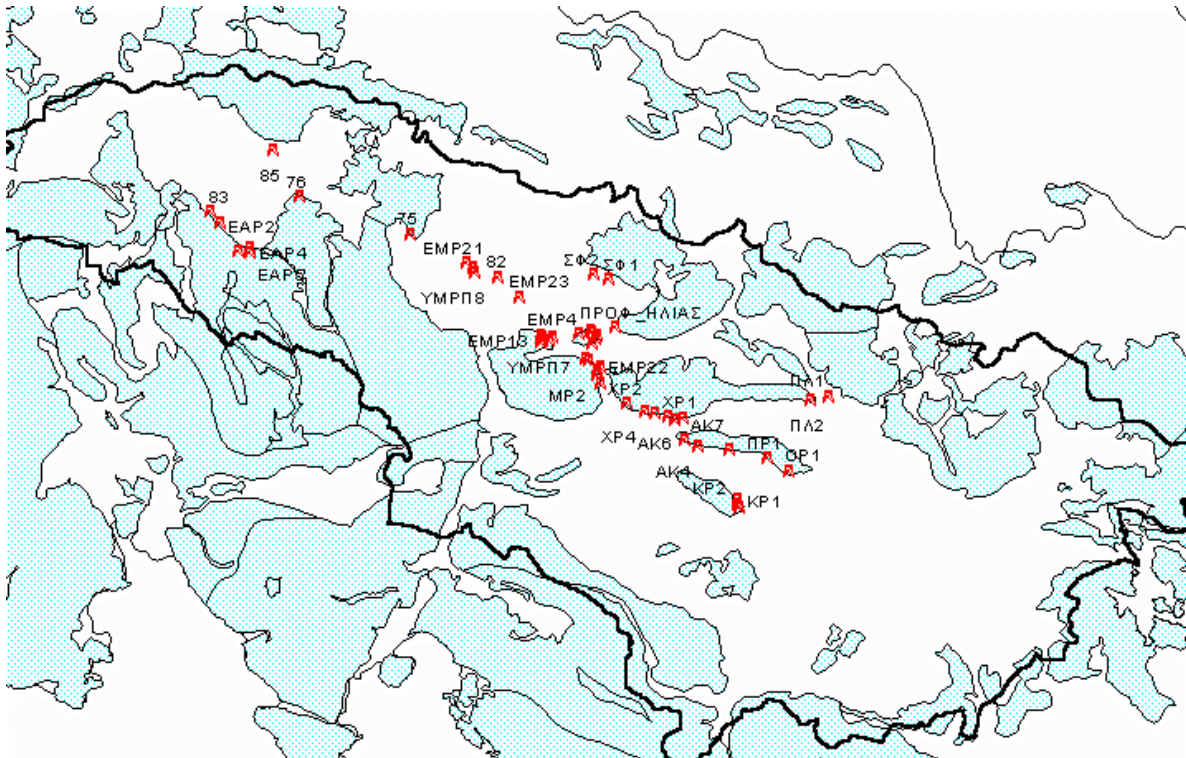
Όνομα	Περιοχή	Χρόνος εκτέλεσης	Απόλυτο υψόμετρο εδάφους (m)	Βάθος γεώτρησης (m)	Παροχή εκμετάλλευσης (m ³ /s)
ΣΦ1	Σφάκα	1978	131.7	75.0	0.14
ΣΦ2	Σφάκα	1977	135.5	80.0	0.22
ΠΡ.ΗΛ.	Πρ. Ηλίας	1978	126.3	77.0	0.11
ΜΡ1	Μαυρονέρι	1977	122.0	89.0	0.25
ΜΡ2	Μαυρονέρι	1978	124.0	71.0	0.23
ΜΡ3	Μαυρονέρι	1980	123.2	40.0	0.21
ΧΡ1	Χαιρώνεια	1977	115.7	89.0	0.32
ΧΡ2	Χαιρώνεια	1977	121.4	70.5	0.20
ΧΡ3	Χαιρώνεια	1977	116.8	70.0	0.32
ΧΡ4	Χαιρώνεια	1978	118.1	74.0	0.23
ΑΚ1	Ακόντιο	1977	112.3	62.0	0.31
ΑΚ4	Ακόντιο	1977	114.7	63.0	0.22
ΑΚ5	Ακόντιο	1977	112.6	89.0	0.14
ΑΚ6	Ακόντιο	1977	116.6	82.0	0.22
ΑΚ7	Ακόντιο	1977	113.7	94.0	0.09
ΠΡ1	Προσήλιο	1976	105.4	86.0	0.29
ΟΡ1	Ορχομενός	1977	104.6	93.0	0.10
ΚΡ1	Κερατοβούνι	1977	-	-	0.28
ΚΡ2	Κερατοβούνι	1979	-	64.5	0.22
ΚΡ3	Κερατοβούνι	1979	-	-	0.19
ΓΙΠ	Πέτρα	1979	-	63.0	0.28
ΠΛ1	Πολυγύρα	1979	95.3	42.5	0.06
ΠΛ2	Πολυγύρα	1979	95.4	60.0	0.11

Υδρευτικές γεωτρήσεις ΕΥΔΑΠ-ΥΠΕΧΩΔΕ-ΙΓΜΕ: Οι εν λόγω γεωτρήσεις, οι οποίες ανήκουν στην δικαιοδοσία της ΕΥΔΑΠ, διανοίχτηκαν κατά την περίοδο της έντονης λειψυδρίας (από το 1990 έως το 1992) και εκτείνονται από το Μαυρονέρι μέχρι την περιοχή Βασιλικών-Παρορίου. Αν και αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (μέσω του Υδραγωγείου Διστόμου), λειτουργούν πλέον μόνο τους θερινούς μήνες για να ενισχύσουν την άρδευση της Κωπαΐδας, μέσω του συγκεντρωτικού αγωγού Βασιλικών-Παρορίου. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω γεωτρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.24.

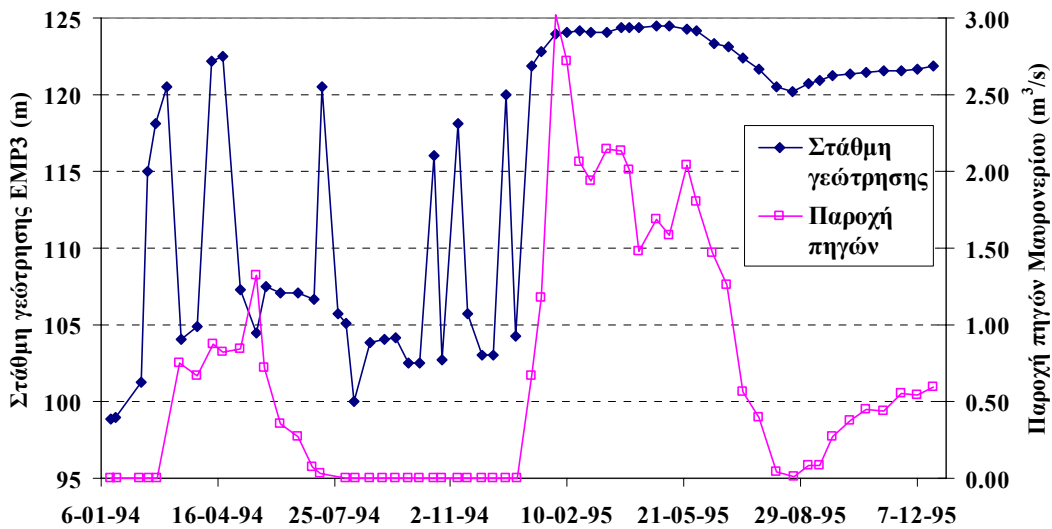
Πίνακας 3.24: Νέες γεωτρήσεις ΕΥΔΑΠ-ΥΠΕΧΩΔΕ-ΙΓΜΕ (Πηγή: *Αντωνίου-Πέππας κ.ά.*, 1993).

Όνομα	Περιοχή	Χρόνος εκτέλεσης	Απόλυτο υψόμετρο εδάφους (m)	Βάθος γεώτρησης (m)	Παροχή εκμετάλλευσης (m ³ /s)
EMP1	Κάτω Τιθορέα	1990	173.51	50.00	0.10
EMP2	Κάτω Καλύβια	1990	178.83	55.00	0.00
EMP3	Βασιλικά	1990	129.87	15.25	0.10
EMP4	Βασιλικά	1990	131.19	15.00	0.10
EMP5	Βασιλικά	1990	167.80	45.00	0.10
EMP6	Βασιλικά	1990	129.27	14.00	0.13
EMP7	Βασιλικά	1990	129.28	12.00	0.13
EMP8	Βέλκα	1990	142.12	45.00	0.03
EMP9	Μόδι	1990	166.37		0.00
EMP10	Βέλκα	1990	144.36	45.00	0.04
EMP11	Βασιλικά	1990	131.41	20.00	0.13
EMP12	Βασιλικά	1990	181.62	54.15	0.02
EMP13	Αγ. Παρασκευή	1990	138.44	20.00	0.10
EMP21	Μπουρνιά	1990	172.07	50.77	0.10
EMP22	Μπουρνιά	1990	127.27	12.65	0.10
EMP23	Βέλκα	1990	147.07	24.48	0.06
ΥΜΡΠ1	Κάτω Τιθορέα	1991		46.25	0.10
ΥΜΡΠ3	Παρόρι	1991	169.74	47.06	0.10
ΥΜΡΠ4	Παρόρι	1991	173.11	49.45	0.10
ΥΜΡΠ5	Αγ. Παρασκευή	1991	162.12	34.90	0.10
ΥΜΡΠ6	Κάτω Τιθορέα	1991		53.64	0.13
ΥΜΡΠ7	Παρόρι	1991	170.97	48.59	0.10
ΥΜΡΠ8	Κάτω Τιθορέα	1991		65.50	0.10
ΥΜΡΣ1	Αγ. Βλάσιος	1991		5.20	0.02
ΥΜΡΣ3	Κάτω Τιθορέα	1991		30.74	0.10
ΥΜΡΣ4	Κάτω Τιθορέα	1991		21.62	0.10
ΥΜΡΣ5	Κάτω Τιθορέα	1991		34.44	0.10
ΥΜΡΣ7	Δαύλεια	1991		22.33	0.08
ΥΜΡΣ8	Βασιλικά	1991		6.63	0.10
ΥΜΡΣ10	Βασιλικά	1991		43.65	0.13
ΥΜΡΣ11	Βασιλικά	1991	132.73	10.42	0.10
ΥΜΡΣ12	Βασιλικά	1991	130.33	7.80	0.10
ΥΜΡΣ13	Βασιλικά	1992			0.13
ΥΜΡΣ14	Βασιλικά	1992			0.13
EM3	Βασιλικά	1992			0.13

Οι γεωτρήσεις του ΥΠΓΕ και της ΕΥΔΑΠ έχουν διανοιχτεί στα κράσπεδα των αλλουβιακών αποθέσεων του Βοιωτικού Κηφισού και απ' ευθείας πάνω σε καρστικούς ασβεστόλιθους, ώστε εκμεταλλεύονται το πλούσιο υπόγειο υδατικό δυναμικό της λεκάνης. Στο Σχήμα 3.34 απεικονίζονται οι εμφανίσεις των καρστικών πετρωμάτων στην επιφάνεια της λεκάνης και οι θέσεις των γεωτρήσεων.



Σχήμα 3.34: Επιφανειακές εμφανίσεις καρστικών πετρωμάτων και θέσεις γεωτρήσεων λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (Πηγή: Μαρίνος, 1995).



Σχήμα 3.35: Σύγκριση χρονοσειρών παρατηρημένης στάθμης γεώτρησης EMP3 και μετρημένης παροχής πηγών Μαυρονερίου.

Ειδικότερα, οι γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου εξασφαλίζουν νερό καλής ποιότητας από τον υποκείμενο καρστικό υδροφόρα που τροφοδοτείται από κατεισδύσεις νερού μέσα στην μάζα του Παρνασσού. Όπως προαναφέρθηκε, ο εν λόγω υδροφόρας αποφορτίζεται μέσω των πηγών Μαυρονερίου (βλ. 3.1.3). Η δίαιτα των πηγών επηρεάζεται καθοριστικά από την λειτουργία των συγκεκριμένων γεωτρήσεων. Στο Σχήμα 3.35 συγκρίνονται οι χρονοσειρές της παρατηρημένης στάθμης στην γεώτρηση EMP3 κατά τα έτη 1994-1995 και της μετρημένης παροχής των πηγών Μαυρονερίου κατά την αντίστοιχη χρονική περίοδο. Είναι προφανές ότι η λειτουργία των πηγών σχετίζεται άμεσα με την διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση. Η εν λόγω στάθμη παρουσιάζει

πολύ έντονες διακυμάνσεις, κάτι που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του καρστ. Για παράδειγμα, με την διακοπή των αντλήσεων στα τέλη του 1994 και σε διάστημα δύο μόλις εβδομάδων παρατηρήθηκε άνοδος της στάθμης κατά 20 περίπου μέτρα, με ταυτόχρονη θεαματική ανάκαμψη της υδροφορίας των πηγών Μαυρονερίου, μετά από περίοδο μηδενισμού της παροχής του επί έξι μήνες.

Εκτός από τις γεωτρήσεις του ΥΠΓΕ και της ΕΥΔΑΠ, οι οποίες κατά κανόνα υδρομαστεύουν τους καρστικούς υδροφορείς της λεκάνης, υπάρχει ακόμη ένας αδιευκρίνιστος αριθμός γεωτρήσεων μικρότερης δυναμικότητας που εξυπηρετούν τοπικές χρήσεις νερού, πολλές από τις οποίες είναι παράνομες. Οι περισσότερες εξ αυτών ανήκουν σε ιδιώτες και αντλούν νερό από τον προσχωματικό υδροφορέα (τεταρτογενείς αποθέσεις). Υπάρχουν ωστόσο και ορισμένες κοινοτικές κυρίως γεωτρήσεις, οι οποίες υδρομαστεύουν καρστικούς υδροφορείς. Από το 2002, το ΙΓΜΕ έχει ξεκινήσει πρόγραμμα καταγραφής και ψηφιακής αποτύπωσης όλων των υφιστάμενων έργων υδροληψίας, που όταν ολοκληρωθεί αναμένεται να συμβάλει ουσιαστικά στην καλύτερη εποπτεία και διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης (Δάνδολος, 2002).

3.4 Δεδομένα υδατικών αναγκών

3.4.1 Αρδευτικές ανάγκες

Οι αρδευτικές ανάγκες στην λεκάνη εκτιμώνται έμμεσα, βάσει των θεωρητικών αναγκών των καλλιεργειών σε νερό και των αρδευόμενων εκτάσεων. Οι πρώτες εκτιμήθηκαν στα πλαίσια προηγούμενων μελετών (Ναλμπάντης και Μαυροδήμου, 1999), ενώ οι δεύτερες υπολογίστηκαν στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου (Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000).

Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση των θεωρητικών αναγκών των καλλιεργειών σε νερό υπολογίστηκαν οι ποσότητες δυνητικής εξατμοδιαπνοής ανά τύπο καλλιέργειας, και στη συνέχεια έγινε ολοκλήρωση των εν λόγω ποσοτήτων με βάση τα ποσοστά ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας. Οι μηνιαίες ανάγκες σε νερό που προέκυψαν, εκφρασμένες σε ισοδύναμα ύψη, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.25.

Πίνακας 3.25: Θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών της περιοχής μελέτης σε νερό (mm).

Μήνας	Αρδευτικές ανάγκες (mm)	Ποσοστό (%)
Απρίλιος	52.3	5.6
Μάιος	122.0	13.1
Ιούνιος	200.2	21.4
Ιούλιος	259.3	27.7
Αύγουστος	235.6	25.2
Σεπτέμβριος ¹	65.2	7.0
Σύνολο	934.8	100.0

Όσον αφορά τις αρδευόμενες εκτάσεις, στην περιοχή μελέτης υφίστανται τέσσερις τοπικοί οργανισμοί εγγείων βελτιώσεων (ΤΟΕΒ), τα ονόματα και η έκταση των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 3.26. Εκτός των παραπάνω οργανισμών που διαθέτουν οργανωμένα αρδευτικά δίκτυα, καλλιεργήσιμες εκτάσεις υπάρχουν και στις πεδινές περιοχές του κάτω, μέσου και άνω ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Οι αντίστοιχες καλλιεργούμενες εκτάσεις δίνονται στους Πίνακες 3.27, 3.28 και 3.29. Η χωρική κατανομή του συνόλου των αρδευόμενων εκτάσεων της λεκάνης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.36.

¹ Οι θεωρητικές ανάγκες του μηνός Σεπτεμβρίου είχαν υπολογιστεί αρχικά για το σύνολο του μήνα σε 130.5 mm. Ωστόσο, η τιμή αυτή δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, καθώς η άρδευση διακόπτεται μετά το πρώτο δεκαπενθήμερο. Η τελική λοιπόν εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών του Σεπτεμβρίου έγινε θεωρώντας, κατά προσέγγιση, το μισό της αρχικής τιμής.

Γενικά, η άρδευση στην περιοχή μελέτης πραγματοποιείται με αντλήσεις από υπόγεια νερά, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ., Οργανισμός Κωπαΐδας) και με απευθείας απολήψεις επιφανειακών νερών από τον Βοιωτικό Κηφισό και τις πηγές του. Μια τρίτη πηγή υδροδότησης είναι οι αντλήσεις από την Υλίκη, που στα μέσα της δεκαετίας του 1980 έφτασαν στα επίπεδα των 50 hm³/έτος, αλλά τα τελευταία χρόνια έχουν σταθεροποιηθεί στα επίπεδα των 15-20 hm³/έτος.

Πίνακας 3.26: Αρδευόμενες εκτάσεις Οργανισμού Κωπαΐδας και ΤΟΕΒ (Πηγή: Ζαρρής κ.ά., 1999).

Περιοχή	Αρδεύσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
Οργ. Κωπαΐδας	180 000	160 000
ΤΟΕΒ Ορχομενού	3 500	3 000
ΤΟΕΒ Λειβαδιάς	6 000	5 300
ΤΟΕΒ Χαιρώνειας	2 500	2 300
Σύνολο	192 000	170 600

Πίνακας 3.27: Αρδευόμενες περιοχές κάτω ρου Βοιωτικού Κηφισού εκτός δημόσιων δικτύων.

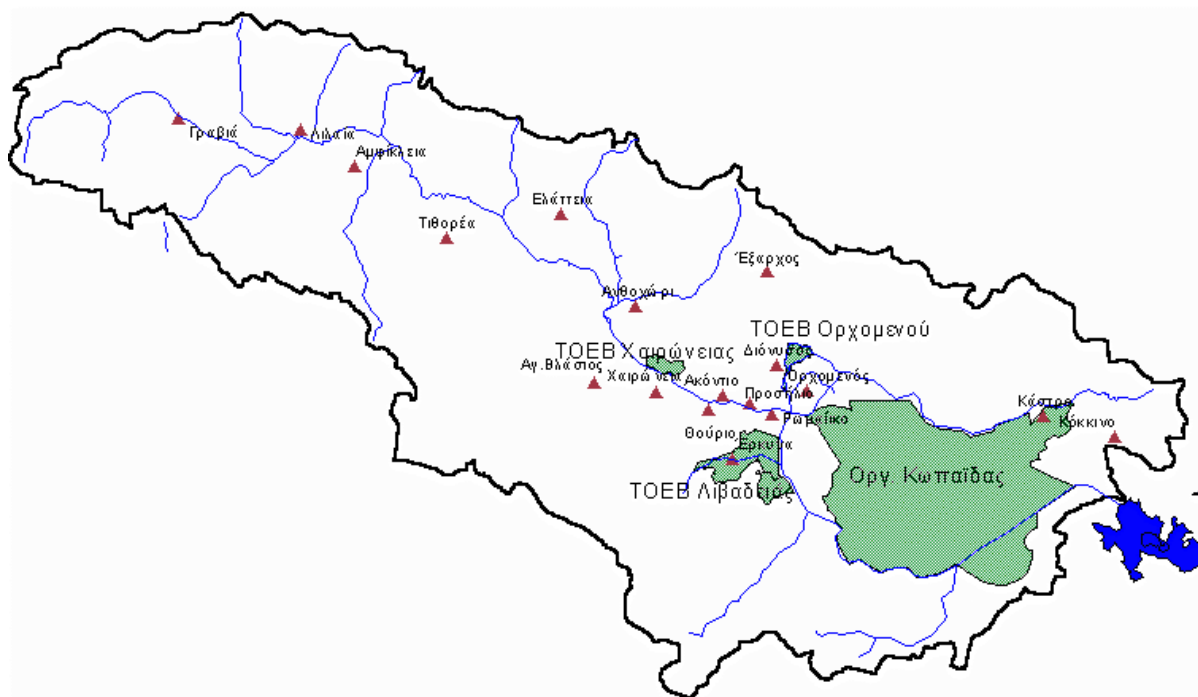
Περιοχή	Αρδεύσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
Διονύσου	7 000	6 300
Κάστρου	17 000	16 000
Κόκκινου	6 000	4 000
Έρκυνας	13 000	11 000
Αγ. Βλάση	6 100	5 950
Χαιρώνειας	11 100	8 000
Ακοντίου	3 300	2 650
Θουρίου	5 300	4 500
Προσηλίου	3 000	2 350
Ρωμαϊκού	5 900	4 700
Πεδιάδας Ορχομενού	39 800	39 000
Σύνολο	117 500	104 450

Πίνακας 3.28: Αρδευόμενες περιοχές μέσου ρου Βοιωτικού Κηφισού εκτός δημόσιων δικτύων.

Περιοχή	Αρδεύσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
Ελάτειας	123 000	20 000
Τιθορέας	17 000	5 500
Έξαρχου	6 100	5 000
Ανθοχωρίου	32 000	20 000
Σύνολο	170 100	50 500

Πίνακας 3.29: Αρδευόμενες περιοχές άνω ρου Βοιωτικού Κηφισού εκτός δημόσιων δικτύων.

Περιοχή	Αρδεύσιμη (στρέμματα)	Αρδευόμενη (στρέμματα)
Γραβιάς	3 800	3 500
Λιλαίας-Πολυδρόσου	10 000	5 800
Αμφίκλειας	20 000	10 000
Σύνολο	33 800	19 300



Σχήμα 3.36: Αρδευόμενες εκτάσεις Οργανισμού Κωπαΐδας, TOEB και πεδινών περιοχών κάτω, μέσου και άνω ρου Βοιωτικού Κηφισού (Πηγή: Κουκουβίνος και Χριστοφίδης, 1998).

Οι μηνιαίες αρδευτικές ανάγκες της περιοχής μελέτης, επιμερισμένες στις περιοχές του άνω, μέσου και κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και την περιοχή της Κωπαΐδας, όπως εκτιμώνται με βάση τις θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών και τις αρδευόμενες εκτάσεις του έτους 1996, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.30. Όπως προκύπτει, οι συνολικές αρδευτικές ανάγκες της λεκάνης φαίνεται να ξεπερνούν τα 300 hm³/έτος. Η εν λόγω εκτίμηση φαίνεται υπερβολική και πρέπει να οφείλεται σε λανθασμένα στοιχεία κυρίως όσον αφορά τον τύπο των καλλιεργειών. Λαμβάνοντας υπόψη παλαιότερες εκτιμήσεις του ΓΕΩΤΕΕ (1995), με τη θεώρηση ετήσιων αναγκών της τάξης των 660-680 mm, η αρδευτική ζήτηση της περιοχής μελέτης υπολογίζονται σε 238 hm³/έτος, ποσότητα που επιμερίζεται σε 40 hm³ στον άνω ρου, 56 hm³ στον μέσο και κάτω ρου και 141 hm³ στην Κωπαΐδα και τις παρακείμενες εκτάσεις. Νεότερες εκτιμήσεις κατεβάζουν την εν λόγω ποσότητα στα επίπεδα των 200-210 hm³/έτος (Δάνδολος, 2002, προσωπική επικοινωνία). Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι η εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών, οι οποίες αποτελούν είσοδο του μοντέλου προσομοίωσης, συνιστά ένα από τα πλέον προβληματικά σημεία της παρούσας μελέτης.

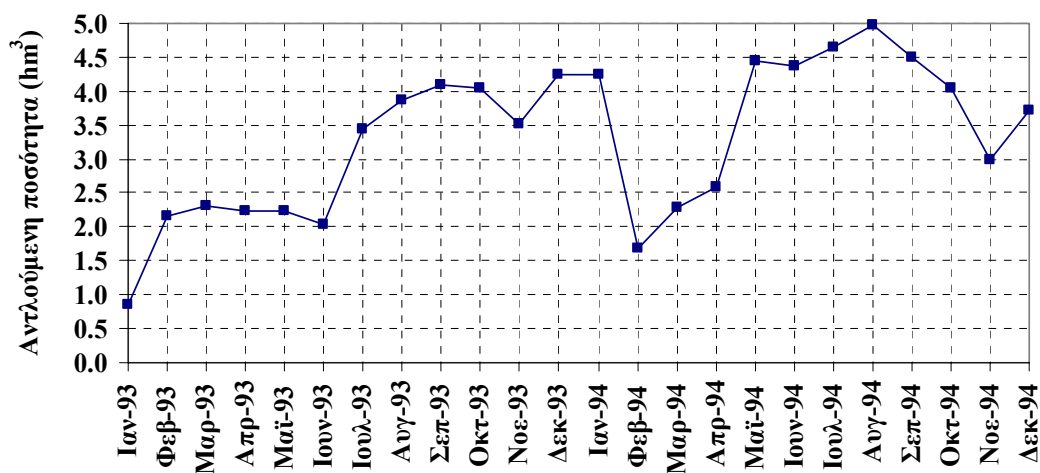
Πίνακας 3.30: Κατανομή μηνιαίων αρδευτικών αναγκών περιοχής μελέτης, όπως υπολογίζεται με βάση τις θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών και τις αρδευόμενες εκτάσεις (hm³).

Μήνας	Άνω ρους	Μέσος ρους	Κάτω ρους	Κωπαΐδα	Σύνολο
Απρίλιος	1.0	2.6	5.5	8.3	17.5
Μάιος	2.4	6.2	12.7	19.4	40.7
Ιούνιος	3.9	10.1	20.9	31.9	66.8
Ιούλιος	5.0	13.1	27.1	41.3	86.5
Αύγουστος	4.5	11.9	24.6	37.5	78.6
Σεπτέμβριος	2.5	6.6	0.4	10.4	19.9
Σύνολο	19.3	50.5	91.2	148.9	309.9

3.4.2 Απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας

Όπως προαναφέρθηκε, εκτεταμένες απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο της έμμονης ξηρασίας, οπότε κατασκευάστηκαν οι γεωτρήσεις της ΕΥΔΑΠ στις περιοχές Μαυρονερίου και Βασιλικών-Παρορίου. Έκτοτε οι εν λόγω γεωτρήσεις λειτούργησαν περιστασιακά μόνο ως υδρευτικές, καθώς χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της Κωπαΐδας. Εκτεταμένες απολήψεις πραγματοποιήθηκαν και μέσω των γεωτρήσεων Ακοντίου-Χαιρώνειας για τροφοδοσία της Υλίκης μέσω του υδραγωγείου Κωπαΐδας, οι οποίες επηρέασαν καθοριστικά την διαίτα των πηγών Μέλανα (Παγούνης, 1993).

Τα δεδομένα των απολήψεων για ύδρευση από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου προέρχονται από την ΕΥΔΑΠ. Η συνολική ποσότητα νερού που αντλήθηκε στο διάστημα των ετών 1993 και 1994 ανήλθε σε 79.5 hm³. Στο Σχήμα 3.37 απεικονίζεται η διακύμανση των αντλούμενων ποσοτήτων σε μηνιαίο χρονικό βήμα.



Σχήμα 3.37: Χρονοσειρά μηνιαίων απολήψεων για ύδρευση της Αθήνας από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου.

3.4.3 Λοιπές χρήσεις νερού

Εκτός από την άρδευση, που αποτελεί τον κύριο καταναλωτή, και την ύδρευση της Αθήνας, που αποτελεί περιστασιακό καταναλωτή, στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού υπάρχουν και άλλες χρήσεις νερού (υδρευτικές, κτηνοτροφικές, βιομηχανικές). Οι εν λόγω χρήσεις εξυπηρετούνται, ως επί το πλείστον, από τοπικές γεωτρήσεις, με εξαίρεση την ύδρευση της Λειβαδιάς και των παρακείμενων βιομηχανικών μονάδων που πραγματοποιείται με απευθείας απόληψη νερού από τις πηγές Έρκυνα (Ζαρρής κ.ά., 1999).

Γενικά, οι λοιπές χρήσεις νερού αποτελούν μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής ζήτησης νερού στην περιοχή μελέτης, και δεν έχει νόημα η λεπτομερέστερη διερεύνησή τους.

4 Ανάπτυξη λογισμικού προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών

4.1 Ανάλυση απαιτήσεων και συμμόρφωση προς αυτές

4.1.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο 5 του τεύχους των απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 2000), είχαν δοθεί οι απαιτήσεις για το σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης. Οι απαιτήσεις αυτές τέθηκαν αρχικά αυτούσιες και για το μοντέλο που καταρτίστηκε στην παρούσα φάση του έργου. Ορισμένες όμως από αυτές υπήρξε ανάγκη να τροποποιηθούν, καθόσον το μοντέλο από την αρχικά καταναμεμημένη του μορφή άλλαξε σε ημικαταναμεμημένο μοντέλο και εμπλουτίστηκε με δύο επί πλέον συνιστώσες που αφορούν στη φυσική δίαιτα των επιφανειακών νερών και τον τρόπο κάλυψης των ζητήσεων νερού στην περιοχή μελέτης. Οι απαιτήσεις μεταφέρθηκαν από το τεύχος των απαιτήσεων στο παρόν κείμενο με πλάγιους χαρακτήρες και με προσθήκη δύο ειδών επί πλέον πληροφορίας: (α) μερικών τροποποιήσεων των αρχικών απαιτήσεων που φαίνονται με υπογραμμισμένους χαρακτήρες, και (β) σχολίων σχετικών με τη συμμόρφωση (με τις νέες, τροποποιημένες, απαιτήσεις) του μοντέλου που καταρτίστηκε.

4.1.2 Γενικές απαιτήσεις του συστήματος

Στη συνέχεια δίνονται οι απαιτήσεις με την αρίθμηση του τεύχους των απαιτήσεων.

(5.1) *Το σύστημα θα λειτουργεί σε παραθυρικό περιβάλλον.*

Το σύστημα λειτουργεί σε ένα από τα πιο εξελιγμένα, με τη σημερινή τεχνολογία της πληροφορικής, παραθυρικά περιβάλλοντα. Αξιοποιεί όλες τις τυπικές δυνατότητες ενός τέτοιου περιβάλλοντος σχετικά με την επικοινωνία υπολογιστή – χρήστη. Οι δυνατότητες αυτές φαίνονται στο κείμενο των λεπτομερών οδηγιών χρήσης του μοντέλου που δίνονται σε παράρτημα στο τέλος του παρόντος τεύχους.

(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.*

Πράγματι, το σύστημα τρέχει σε κοινούς προσωπικούς υπολογιστές οι οποίοι, όμως, πρέπει να διαθέτουν τουλάχιστον τα τυπικά σημερινά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την υπολογιστική ισχύ (μνήμη 256 Kbytes, ταχύτητα επεξεργαστή τουλάχιστον 600 MHz) καθόσον η βελτιστοποίηση που γίνεται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου είναι δυνατό να είναι εξαιρετικά αργή σε παλιότερους υπολογιστές.

(5.3) *Το σύστημα θα είναι φιλικό στο χρήστη ως προς την εισαγωγή δεδομένων (δεν θα απαιτεί γράμμιμο σε αρχεία ASCII).*

Το σύστημα επικοινωνεί με δύο διαφορετικές βάσεις δεδομένων (ORACLE και MS-Access) και, επομένως, το πρόβλημα ανάγεται στην εισαγωγή δεδομένων στις βάσεις αυτές. Η εισαγωγή αυτή γίνεται με ξεχωριστό λογισμικό για την ORACLE, ενώ η βάση MS-Access

επιτρέπει άμεση εισαγωγή (ή τροποποίηση) δεδομένων σε αυτή ή μέσω του λογισμικού MS-Excel.

4.1.3 Γενικές απαιτήσεις μαθηματικού μοντέλου

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 5 του τεύχους των απαιτήσεων (Καραβοκυρός κ.ά., 2000), το μοντέλο θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

(5.4) *Να προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις.*

Το μοντέλο προσομοιώνει τη ροή του υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις, αλλά με τρόπο απλοποιητικό καθώς χρησιμοποιεί μικρό αριθμό κυψελίδων. Δεν απαιτείται να χειρίζεται μεταβλητή πυκνότητα του νερού. Επίσης, το μοντέλο προσομοιώνει τη ροή στην ακόρεστη ζώνη παρ' όλο που αυτό δεν αναφέρεται ρητά στις απαιτήσεις. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά είναι δομικά στοιχεία του μοντέλου. Ακόμη, θεωρήθηκε μόνο ένα γεωλογικό στρώμα κατά την κατακόρυφη έννοια.

(5.5) *Να χρησιμοποιεί μια από τις καταζωόμενες και ελεγμένες μεθόδους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για τη υπόγεια ροή (πεπερασμένες διαφορές, πεπερασμένα στοιχεία).*

Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και ένα άμεσο (explicit) σχήμα για την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων.

(5.6) *Να προσομοιώνει τόσο την μόνιμη όσο και τη μη μόνιμη ροή. Ωστόσο, στη διαχείριση του υπό μελέτη υδροσυστήματος της ΕΥΔΑΠ, δεν υφίσταται θέμα μη μόνιμης ροής.*

Το μοντέλο προσομοιώνει μόνον τη μη μόνιμη ροή αλλά, με κατάλληλο χειρισμό των αρχικών συνθηκών μπορούν να προσεγγιστούν συνθήκες μόνιμης ροής.

(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 περίπτωση του φρεάτιου υδροφορέα.

(5.8) *Να επιτρέπει την προσομοίωση της ροής σε υδροφόρα στρώματα μεταβλητής γεωμετρίας.*

Η γεωμετρία του πεδίου ροής προσεγγίζεται χονδροειδώς από μικρό αριθμό συνεχόμενων κυψελίδων που προσεγγίζουν την γεωμετρία με πολύ απλοποιητικό τρόπο.

(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. Στην κλίμακα που εξετάζει το μοντέλο, προσομοιώνονται μόνον όγκοι νερού που εισέρχονται (ή εξέρχονται) σε εκτεταμένα υδροφόρα στρώματα.*

Οι εξωτερικές διεγέρσεις προσομοιώνονται κατάλληλα με τον ορισμό οριακών συνθηκών.

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

Σε κάθε κυψελίδα του κανάβου είναι δυνατός ο ορισμός διαφορετικών υδραυλικών ιδιοτήτων. Λόγω, βέβαια, του ημικατανεμημένου χαρακτήρα του μοντέλου, η ανισοτροπία αναπαρίσταται με πολύ αδρομερή τρόπο.

(5.11) *Να χειρίζεται οριακές συνθήκες σταθερής ή μεταβλητής παροχής και σταθερού ή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου.*

Το μοντέλο αντιμετωπίζει όλα τα παραπάνω.

(5.12) *Να χρησιμοποιεί κανάβο 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 στο παρελθόν για παρόμοια αριθμητικά σχήματα, ενώ βασική έρευνα σε αυτά είναι σε εξέλιξη παράλληλα με την εκτέλεση του παρόντος έργου.

(5.14) *Να λειτουργεί σε μηνιαίο χρονικό βήμα.*

Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο για 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. Η πιλοτική εφαρμογή χρησιμοποιεί δεδομένα για μια δεκαετία (συνολικά για την βαθμονόμηση και την επαλήθευση).

(5.16) *Να διαθέτει επαρκές βήμα διακριτοποίησης στο χώρο (κάναβο) 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 Λειβαδιάς, (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.

4.1.4 Απαιτήσεις σε δεδομένα

Το υπό μελέτη σύστημα θα πρέπει να δέχεται τα ακόλουθα δεδομένα (Καραβοκυρός κ.ά., 2000):

(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 προέρχονται 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 κανάβου 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 επιφανειακή βροχόπτωση σε κάθε κυψελίδα καθώς και η δυναμική εξατμοδιαπνοή υπολογισμένη από μετεωρολογικές μεταβλητές με βάση την μέθοδο Penman.

(5.22) *Δεδομένα διαχείρισης του νερού στην (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 Κωπαΐδας).

Εισάγονται τα δεδομένα των γεωτρήσεων τόσο της ΕΥΔΑΠ όσο και του Υπουργείου Γεωργίας υπό μορφή ισοδύναμων γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις αυτές κατανέμονται κατάλληλα στις κυψελίδες του μοντέλου.

(5.23) Δεδομένα φυσικής εκφόρτισης των υδροφορέων υπό μορφή πηγών (χρονοσειρές).

Οι παροχές των σημαντικότερων πηγών εισάγονται ως οριακές συνθήκες (έξοδοι) για την βαθμονόμηση και την επαλήθευση του μοντέλου.

(5.24) Αρχικές συνθήκες υδραυλικού φορτίου ή παροχής σε κάθε κυψελίδα του κανάβου.

4.1.5 Απαιτήσεις σε εξαγόμενα

Στο τέλος κάθε κύκλου προσομοίωσης, το μοντέλο θα δίνει τα ακόλουθα εξαγόμενα (Καραβοκυρός κ.ά., 2000):

(5.25) Την διακύμανση της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στη θέση της Διώρυγας Καρδίτσας.

Στην παρούσα φάση του έργου όπου, εκτός της υπόγειας υδροφορίας ενδιαφέρει και η διαίτα των επιφανειακών νερών στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού, δίνεται η διακύμανση της παροχής του Βοιωτικού Κηφισού και των κύριων πηγών ως ομάδων.

(5.26) Την διακύμανση των μηνιαίων συνολικών ρυθμιστικών αποθεμάτων υπόγειου νερού στην λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.

Υπενθυμίζεται ότι η Υλίκη εξετάστηκε ξεχωριστά, εκτός του μοντέλου της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και οι σχετικές αναλύσεις δίνονται στο Κεφάλαιο 7.

(5.27) Τη διακύμανση της στάθμης της Υλίκης στην αρχή κάθε μήνα.

Δες το 5.26.

(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) Την χωροχρονική διακύμανση του υδραυλικού φορτίου.

(5.30) Την χωροχρονική διακύμανση της απόλυτης στάθμης του υπόγειου ορίζοντα.

(5.31) Την χωροχρονική διακύμανση της παροχής του υπόγειου νερού.

(5.32) Την χωροχρονική διακύμανση της κατεύθυνσης ροής του υπόγειου νερού.

(5.33) Την 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 μοντέλο, εκτός των περιπτώσεων που επισημαίνονται με κατάλληλο σχόλιο. Κύρια εξαίρεση, βέβαια, αποτελούν τα μεγέθη της Υλικής η οποία, στην παρούσα φάση του έργου, εξετάζεται ξεχωριστά.

4.1.6 Συμμόρφωση στις μη λειτουργικές απαιτήσεις

(5.40) Το υπό μελέτη υποσύστημα θα πρέπει να επιτρέπει μεγάλο αριθμό κυψελίδων της τάξης των 100000. Στο μοντέλο που καταρτίστηκε στην παρούσα δεύτερη φάση είναι ημικατανεμημένο και ο αριθμός κυψελίδων που απαιτούνται είναι μικρός, της τάξης των 10 ως 20.

(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 ικανοποιείται, και ένας κύκλος 10 ετών προσομοιώνεται σε χρόνο ενός δευτερολέπτου της ώρας.

(5.42) Η απαιτούμενη χωρητικότητα μνήμης H/Y και δίσκου θα παραμένουν κάτω από τα σημερινά (2003) 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 μεμονωμένου (stand-alone) υπολογιστικού πακέτου.

Στην παρούσα μορφή του το μοντέλο εκτελείται ως μεμονωμένο και επικοινωνεί είτε με της βάση δεδομένων MS-Access ή με την ORACLE και μέσω αυτών με τα άλλα πακέτα του έργου.

(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, που είναι μια συνήθης πρακτική σε τέτοιου είδους προβλήματα.

(5.46) Θα υφίσταται δυνατότητα εισαγωγής οριακών συνθηκών με γραφικό τρόπο.

Η απαίτηση δεν είναι κρίσιμο να ικανοποιείται, καθόσον οι οριακές συνθήκες είναι πολύ απλές και ορίζονται εύκολα απευθείας με αριθμητικές τιμές.

(5.47) Θα υφίσταται δυνατότητα αυτόματης (ή με δοκιμές) ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου μέσω κατάλληλων εργαλείων (π.χ. διαγράμματα διασποράς).

Το πακέτο υποστηρίζει αυτόματη βαθμονόμηση και παρέχει τα υπολογιστικά εργαλεία για την βαθμονόμηση αυτή.

(5.48) *Θα υπάρχει δυνατότητα εισαγωγής μεταβατικών οριακών συνθηκών (π.χ. κυμαινόμενη στάθμη ελεύθερου νερού στην Υλίκη).*

Στο μοντέλο όλες οι οριακές συνθήκες είναι ουσιαστικά μεταβατικές. Στην παρούσα φάση του έργου, το πρόβλημα της Υλίκης αντιμετωπίστηκε ξεχωριστά από το μοντέλο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

(5.49) *Θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα παρουσίασης αποτελεσμάτων σε γραφική μορφή (2 διαστάσεων).*

Το πρόγραμμα δίνει πολλές δυνατότητες γραφικών.

(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 από το πακέτο καθώς εξασφαλίζεται επικοινωνία μέσω βάσης δεδομένων.

4.2 Δομή και συνιστώσες υπολογιστικού συστήματος

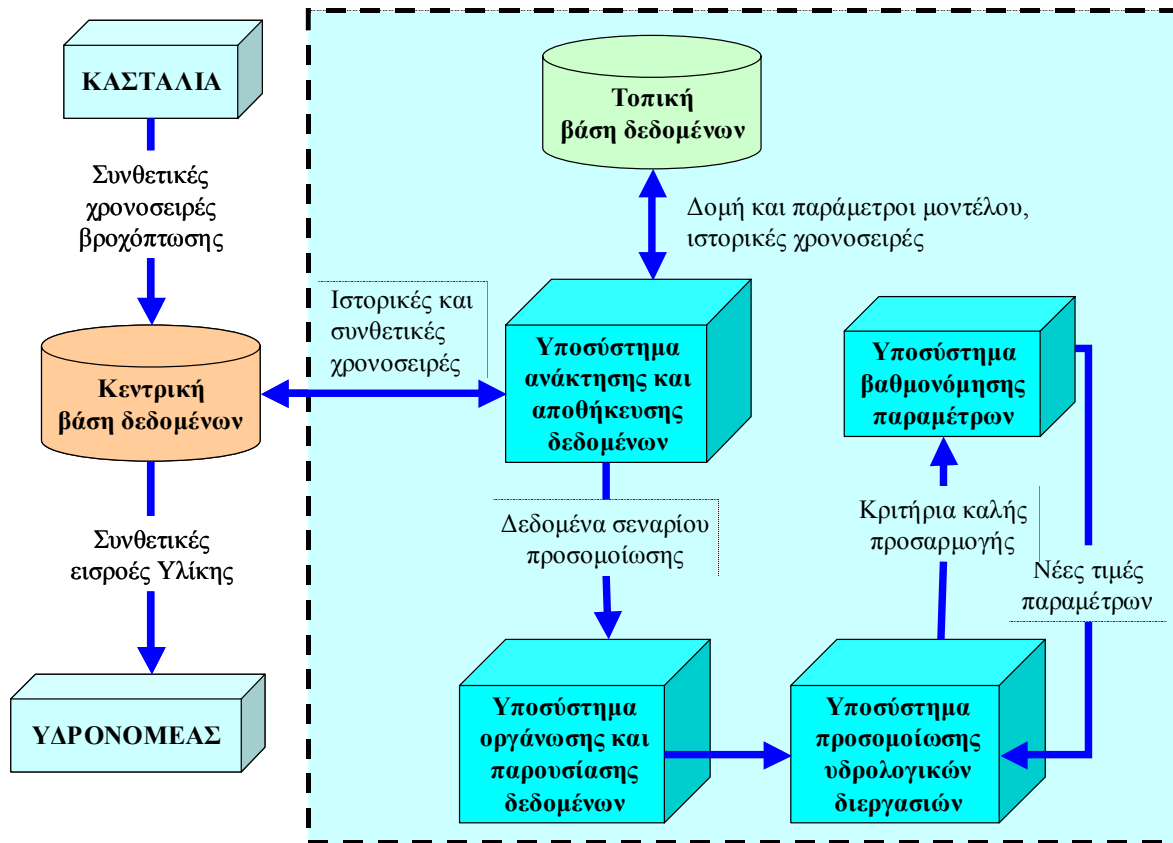
Το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 υλοποιήθηκε σε ενιαίο υπολογιστικό σύστημα, ο σχεδιασμός του οποίου έγινε με βάση τις προδιαγραφές της ανάλυσης απαιτήσεων (βλ. 4.1). Το πρόγραμμα λειτουργεί σε περιβάλλον Windows, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Object Pascal/Delphi.

Το υπολογιστικό σύστημα επιτελεί δύο κύριες λειτουργίες, ήτοι:

- την αναπαράσταση των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης, με σκοπό την εκτίμηση των παραμέτρων (βαθμονόμηση) του μοντέλου προσομοίωσης με προσαρμογή των προσομοιωμένων στις ιστορικές χρονοσειρές·
- την πρόγνωση της εξέλιξης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, για δεδομένο σενάριο βαθμονόμησης και δεδομένες αρχικές συνθήκες, με χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισόδου.

Το πρόγραμμα υποστηρίζεται από μια τοπική βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MS Access, στην οποία αποθηκεύονται οι πληροφορίες που αναφέρονται στην μαθηματική δομή, τις συνιστώσες, τις παραμέτρους και τις ιστορικές χρονοσειρές εισόδου των σεναρίων προσομοίωσης. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα επικοινωνίας και με την κεντρική βάση του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (ΣΥΑ) της ΕΥΔΑΠ, για την ανάκτηση και αποθήκευση των ιστορικών και, κυρίως, των συνθετικών χρονοσειρών εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αφενός η αυτονομία του συστήματος (καθώς όλες οι λειτουργίες μπορούν να επιτελούνται αποκλειστικά και μόνο μέσω της τοπικής βάσης) όσο και η επιχειρησιακή του ένταξη στο ΣΥΑ, αφού είναι εφικτή η ανταλλαγή πληροφοριών με τα υπόλοιπα συστήματα του έργου (συνθετικές χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης που παράγονται από το πρόγραμμα Κασταλία, συνθετικές χρονοσειρές εισροών στον ταμιευτήρα Υλίκη που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα Υδρονομέας). Περισσότερα ως προς την επιχειρησιακή λειτουργία του συστήματος αναφέρονται στο Κεφάλαιο 6.

Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική δομή του υπολογιστικού συστήματος καθώς και το πλαίσιο συνεργασίας του με τα λογισμικά Κασταλία και Υδρονομέας. Το πρόγραμμα αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα (συνιστώσες), οι λειτουργίες των οποίων περιγράφονται στην συνέχεια του υποκεφαλαίου.



Σχήμα 4.1: Αρχιτεκτονική δομή και συνιστώσες υπολογιστικού συστήματος.

Σε μια τυπική *σύνοδο* (session), ο χρήστης είτε επιλέγει ένα υφιστάμενο σενάριο προσομοίωσης είτε δημιουργεί ένα νέο σενάριο. Ως *σενάριο προσομοίωσης* νοείται το σύνολο των πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα μαθηματικής αναπαράστασης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Από τη βάση δεδομένων ανακτώνται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την εκτέλεση μιας ολοκληρωμένης εφαρμογής, δηλαδή η μαθηματική δομή, οι αρχικές συνθήκες και οι παράμετροι του σεναρίου καθώς και οι χρονοσειρές εισόδου, ήτοι οι χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμοδιαπνοής και υδατικών αναγκών. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τις παραμέτρους και τις αρχικές συνθήκες του σεναρίου, μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί να τροποποιήσει τις χρονοσειρές εισόδου, με εισαγωγή νέας χρονοσειράς είτε από την τοπική είτε από την κεντρική βάση δεδομένων. Μετά την ανάκτηση των δεδομένων ή τις τροποποιήσεις τους, είναι δυνατή η εκτέλεση των κύριων λειτουργιών του μοντέλου, ήτοι η προσομοίωση των ιστορικών αποκρίσεων ή η πρόγνωση των μελλοντικών αποκρίσεων της λεκάνης. Στην πρώτη περίπτωση, παρέχεται η δυνατότητα αυτόματης βαθμονόμησης επιλεγμένων παραμέτρων καθώς και αρχικών συνθηκών του μοντέλου, με εφαρμογή του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου. Ο χρήστης μπορεί να οπτικοποιήσει το σύνολο των δεδομένων εισόδου και εξόδου και να ελέγξει το προκύπτον υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης (επιφανειακό, υπόγειο και συγκεντρωτικό), μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων. Μετά το πέρας της συνόδου, το σύνολο των πληροφοριών που αναφέρονται στο εκάστοτε σενάριο προσομοίωσης μπορούν να αποθηκευτούν στην τοπική βάση δεδομένων, ώστε να είναι διαθέσιμες μεταγενέστερα. Ειδικά οι χρονοσειρές εξόδου αποθηκεύονται κατ' επιλογήν τόσο στην τοπική όσο και στην κεντρική βάση δεδομένων. Τονίζεται ότι ο χρήστης δεν χρειάζεται να επεμβαίνει στην ίδια τη βάση, καθώς όλες οι τροποποιήσεις πραγματοποιούνται μέσω του προγράμματος.

Για το πρόγραμμα διατίθενται αναλυτικές οδηγίες χρήσης σε ηλεκτρονική μορφή, οι οποίες παρατίθενται και στο Παράρτημα Β του παρόντος τεύχους.

4.2.1 Υποσύστημα ανάκτησης και αποθήκευσης δεδομένων

Μέσω του υποσυστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης εξασφαλίζεται η επικοινωνία του προγράμματος με την τοπική βάση δεδομένων καθώς και με την κεντρική βάση, όσον αφορά τις χρονοσειρές εισόδου και εξόδου του μοντέλου. Μετά την εκκίνηση κάθε συνόδου, ανακτώνται όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες ενός σεναρίου προσομοίωσης, οι οποίες ομαδοποιούνται στις ακόλουθες έξι συνιστώσες:

1. *Μαθηματική δομή και επιλογές μοντέλου προσομοίωσης*: Η μαθηματική δομή (σχηματοποίηση) του μοντέλου προσομοίωσης αναφέρεται στην τοπολογία και τις γεωμετρικές και υδραυλικές ιδιότητες των επιμέρους συνιστωσών του μοντέλου που αναπαριστούν τις διάφορες υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης (μονάδες υδρολογικής απόκρισης, υδροφορείς, δεξαμενές υπόγειου νερού, πηγές, γεωτρήσεις, θέσεις ζήτησης νερού). Οι επιλογές αναφέρονται στις γενικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος καθώς και στις υπολογιστικές παραμέτρους του αριθμητικού σχήματος επίλυσης της κίνησης του υπόγειου νερού (βλ. 2.2.2).
2. *Παράμετροι μοντέλου (μεταβλητές ελέγχου)*: Πρόκειται για τις παραμέτρους των μοντέλων προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών.
3. *Αρχικές συνθήκες υγρασίας και στάθμης υδροφορέων*: Πρόκειται για τις τιμές εκκίνησης του μοντέλου προσομοίωσης που αναφέρονται στις αρχικές στάθμες των εννοιολογικών δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και υπόγειου νερού.
4. *Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου*: Πρόκειται για το σύνολο των χρονοσειρών εισόδου που χρησιμοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (α) χρονοσειρές φόρτισης (επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή μονάδων υδρολογικής απόκρισης, υδατικές ανάγκες θέσεων ζήτησης νερού, άντληση γεωτρήσεων), ιστορικές ή συνθετικές, και (β) ιστορικές χρονοσειρές απόκρισης (απορροές λεκάνης και πηγών), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Υπενθυμίζεται ότι οι υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου ανακτώνται τόσο από την τοπική όσο και από την κεντρική βάση δεδομένων.
5. *Κριτήρια καλής προσαρμογής και επιλογές βαθμονόμησης*: Ως κριτήρια καλής προσαρμογής νοούνται τα ζεύγη ιστορικών και προσομοιωμένων χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου που χρησιμοποιούνται για την μαθηματική διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βαθμονόμησης. Οι επιλογές βαθμονόμησης αναφέρονται στις παραμέτρους εισόδου του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (βλ. 2.3.3).
6. *Υδρολογικές χρονοσειρές εξόδου*: Πρόκειται για το σύνολο των χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου προσομοίωσης που αποθηκεύονται επιλεκτικά στην κεντρική ή την τοπική βάση δεδομένων.

Καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της συνόδου, το σύνολο των υπολογιστικών διαδικασιών που αφορούν ανάγνωση και τροποποίηση των δεδομένων πραγματοποιούνται στην εσωτερική μνήμη του προγράμματος, το οποίο καθίσταται ανεξάρτητο από τη βάση. Μετά το πέρας της συνόδου, τα τροποποιημένα δεδομένα του σεναρίου προσομοίωσης μπορούν να αποθηκευτούν στην τοπική βάση δεδομένων μέσω μιας αντίστροφης διαδικασίας.

Σημειώνεται ότι το λογισμικό που αναπτύχθηκε υποστηρίζει συγκεκριμένη μαθηματική δομή και επιλογές του μοντέλου προσομοίωσης, οι οποίες είναι αυστηρά προσαρμοσμένες στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Αντίθετα, τα υπόλοιπα δεδομένα του προβλήματος (συνιστώσες 2-6) μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη, μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων (βλ. 4.2.2). Στην τοπική βάση δεδομένων αποθηκεύονται πολλές ομάδες συνιστωσών, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας νέων σεναρίων προσομοίωσης με συνδυασμό ήδη υφιστάμενων συνιστωσών.

4.2.2 Υποσύστημα οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων

Το υποσύστημα οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων, το οποίο αποτελεί το μέσο επικοινωνίας του προγράμματος με τον χρήστη, επιτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- επιλογή υφιστάμενου σεναρίου προσομοίωσης ή δημιουργία νέου σεναρίου·
- επισκόπηση ή τροποποίηση συνιστωσών σεναρίου προσομοίωσης·
- επισκόπηση αποτελεσμάτων προσομοίωσης, υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων·
- γραφική παράσταση ισοπίθανων καμπυλών εξέλιξης των κύριων αποκρίσεων της λεκάνης, εφόσον έχει επιλεγεί λειτουργία του μοντέλου υπό μορφή πρόγνωσης.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σεσάρια προσομοίωσης είναι αυστηρά προσαρμοσμένα στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, οπότε δεν είναι δυνατή η τροποποίηση των δεδομένων που αναφέρονται στην μαθηματική δομή και τις συνιστώσες του μαθηματικού μοντέλου. Αντίθετα, είναι δυνατή η τροποποίηση όλων των υπόλοιπων κατηγοριών δεδομένων. Τονίζεται ότι όλες οι επεμβάσεις του χρήστη ελέγχονται, ώστε να εμποδίζεται η εισαγωγή μη συμβατών δεδομένων και να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του προγράμματος.

Το σύνολο των χρονοσειρών εισόδου και εξόδου του μοντέλου, καθώς και το προσομοιωμένο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης, αναπαρίστανται υπό μορφή πινάκων και γραφημάτων. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία όλων των πινάκων μπορούν να αντιγραφούν στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel για περαιτέρω επεξεργασία.

4.2.3 Υποσύστημα προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών

Τα εν λόγω υποσύστημα αναπαριστά σε μηνιαίο χρονικό βήμα τις επιφανειακές και υπόγειες υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού καθώς και την διαχείριση των υδατικών αναγκών, με βάση το σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης που περιγράφεται αναλυτικά στο εδάφιο 2.2.3. Το υποσύστημα καλείται είτε αυτόνομα, ήτοι για την αναπαράσταση των ιστορικών ή μελλοντικών αποκρίσεων της λεκάνης, είτε στα πλαίσια του υποσυστήματος βαθμονόμησης παραμέτρων.

4.2.4 Υποσύστημα βαθμονόμησης παραμέτρων

Το πρόγραμμα υποστηρίζει την αυτόματη βαθμονόμηση των μεταβλητών ελέγχου του μοντέλου, μέσω του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου που περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 2.3. Ως μεταβλητές ελέγχου νοούνται αφενός οι παράμετροι και αφετέρου οι αρχικές συνθήκες που επιλέγει ο χρήστης, μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων. Η βαθμονόμηση προϋποθέτει το καθορισμό ενός μέτρου επίδοσης του μοντέλου, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο κριτηρίων καλής προσαρμογής, τα οποία σταθμίζονται μέσω κατάλληλα επιλεγμένων συντελεστών βάρους σε μια ενιαία έκφραση που συνιστά την αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος ολικής βελτιστοποίησης (βλ. 5.4.2). Εκτός από τους συντελεστές βάρους, ο χρήστης ορίζει και το επιτρεπόμενο εύρος διακύμανσης των μεταβλητών ελέγχου, μέσω του υποσυστήματος οργάνωσης και παρουσίασης δεδομένων.

5 Προσαρμογή μοντέλου προσομοίωσης στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού

5.1 Σκοπός και περιορισμοί του μοντέλου

Σκοπός του μοντέλου που αναπτύχθηκε είναι η πρόγνωση των εισροών της Υλίκης, μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας, καθώς και των επιπτώσεων στην υδρολογική δίαιτα του Βοιωτικού Κηφισού των απολήψεων που πραγματοποιούνται μέσω των υδρευτικών γεωτρήσεων του μέσου ρου της λεκάνης απορροής του. Για τον σκοπό αυτό, απαιτήθηκε η μαθηματική αναπαράσταση των κύριων υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, επιφανειακών και υπόγειων, καθώς και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων, με τελικό προϊόν ένα μοντέλο προσομοίωσης που να εκτιμά το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης σε μηνιαία κλίμακα, με έμφαση στις ακόλουθες συνιστώσες:

- την καθαρή απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης του, ήτοι την φυσική απορροή του ποταμού μείον τις επιφανειακές απολήψεις·
- την απορροή των κύριων καρστικών πηγών της περιοχής μελέτης, ήτοι των πηγών Μέλανα-Πολυγύρας, Μαυρονερίου, Έρκυνα και Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου.

Ως *περιοχή μελέτης* νοείται η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και του υποκείμενου υδροφορέα αυτής, συνολική έκτασης 2042.6 km².

Κατά την κατάστρωση του μοντέλου προσομοίωσης ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθοι περιοριστικοί παράγοντες:

- η έλλειψη αξιόπιστης και συστηματικής χωρικής πληροφορίας όσον αφορά την υδρολογία της περιοχής μελέτης, και κυρίως την υπόγεια υδρολογία·
- η αδυναμία εκτίμησης των πραγματικών υδατικών αναγκών, σε συνδυασμό με την πλήρη έλλειψη στοιχείων σχετικά με τον επιμερισμό των απολήψεων από επιφανειακά και υπόγεια νερά·
- η αοριστία που οφείλεται στην υδραυλική επικοινωνία του υδροφορέα της λεκάνης με την θάλασσα, και μάλιστα σ' ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο μέτωπο που καθιστά αδύνατη την έστω και προσεγγιστική εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών.

Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τους υπολογιστικούς περιορισμούς που τίθενται ώστε να είναι εφικτή η επιχειρησιακή εφαρμογή του συστήματος (βλ. Κεφάλαιο 6), οδήγησαν στην ανάγκη ανάπτυξης ενός ημικαταναμεμένου σχήματος που να χρησιμοποιεί τα ελάχιστα αναγκαία στοιχεία εισόδου και ένα φειδωλό πλήθος παραμέτρων. Χρησιμοποιώντας τα ελάχιστα στοιχεία εισόδου εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του μοντέλου, καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον δεδομένα σε σχέση με αυτά που συστηματικά διατίθενται στην περιοχή μελέτης. Από την άλλη πλευρά, το σχετικά μικρό πλήθος παραμέτρων εξασφαλίζει ευσταθή μαθηματική δομή, αξιόπιστη προγνωστική ικανότητα και χαμηλό υπολογιστικό φόρτο, που είναι αναγκαίες προϋποθέσεις για την επιχειρησιακή εφαρμογή του συστήματος.

5.2 Μαθηματική δομή μοντέλου προσομοίωσης

Η διαδικασία σχηματοποίησης του μοντέλου προσομοίωσης συνιστά ένα από τα πλέον δύσκολα σημεία της παρούσας έρευνας. Στα πλαίσια της μελέτης, διερευνήθηκαν αρκετές εναλλακτικές δομές

της τοπολογίας του μοντέλου που, αν και στο σύνολό τους έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την δυνατότητα πρόγνωσης της κύριας απόκρισης της λεκάνης (ήτοι της απορροής στην έξοδο αυτής), δεν θεωρήθηκαν επαρκείς ως προς την δυνατότητα πρόγνωσης των λοιπών σημαντικών υδρολογικών αποκρίσεων (π.χ., της απορροής των πηγών). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τελική σχηματοποίηση, βάσει της οποίας έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης.

5.2.1 Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής

Για την προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών η συνολική λεκάνη απορροής, έκτασης 2042.6 km², χωρίστηκε σε δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ), που αντιστοιχούν σε περιοχές με κοινά γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά. Η ΜΥΑ 1, έκτασης 651.9 km², προσομοιώνει τις υδρολογικές διεργασίες στις ορεινές περιοχές, όπου υπάρχει έντονη ανάπτυξη του καρστ, ενώ η ΜΥΑ 2, έκτασης 1390.9 km², προσομοιώνει τις αντίστοιχες διεργασίες στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου, όπου κυριαρχούν οι παραποτάμιες αποθέσεις (προσχώσεις). Ο διαχωρισμός της συνολικής λεκάνης σε μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ο οποίος έγινε με βάση τον χάρτη επιφανειακής εμφάνισης του καρστ (Σχήμα 3.34), απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Λεκάνη απορροής Βοιωτικού Κηφισού και κύριες καρστικές πηγές. Η σκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στην ΜΥΑ 1, ενώ η λευκή στην ΜΥΑ 2.

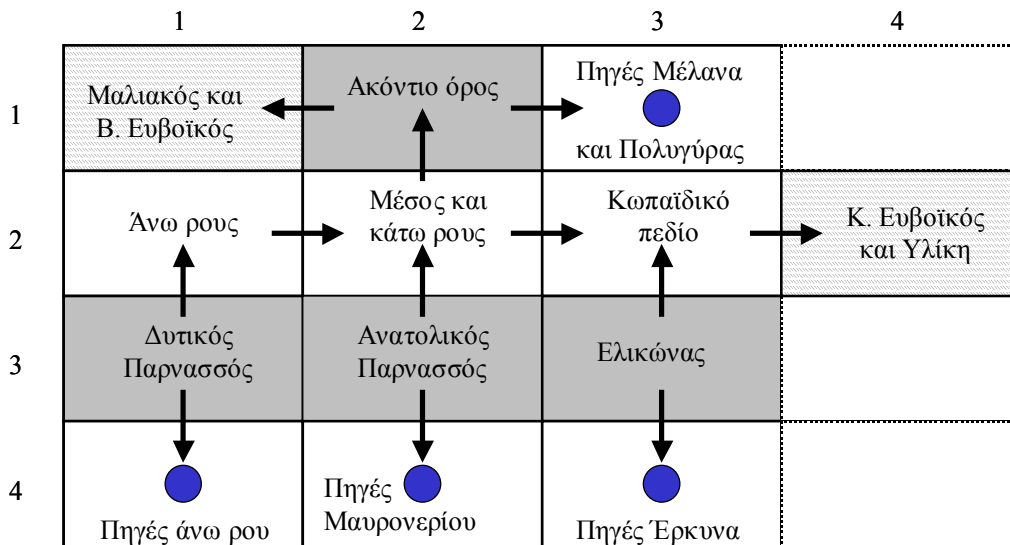
Το συνολικό πλήθος των μεταβλητών ελέγχου του επιφανειακού μοντέλου είναι 11, ήτοι οι τέσσερις παράμετροι κάθε δεξαμενής εδαφικής υγρασίας (K_1 , K_2 , λ , μ), οι αρχικές τιμές της εδαφικής υγρασίας στις δεξαμενές (S_0) και το όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής, ε , που θεωρείται ενιαίο για όλη την λεκάνη.

5.2.2 Σχηματοποίηση υδροφορέα

Για την προσομοίωση της κίνησης των υπογείων υδάτων υιοθετήθηκε μια σχηματική διάταξη 4×4 κελιών, η κάτοψη των οποίων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Σε κάθε κελί, η θέση του οποίου συμβολίζεται με (i, j) , αντιστοιχεί μια εννοιολογική δεξαμενή υπόγειου νερού. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών είναι οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους, η επιφάνεια του πυθμένα και η αρχική στάθμη του νερού.

Η επικοινωνία μεταξύ των δεξαμενών γίνεται μέσω αγωγών μεταφοράς που στο σχήμα συμβολίζονται με βέλη, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί ένας όρος υδραυλικής αγωγιμότητας που εκφράζει την ταχύτητα κίνησης του νερού. Υπενθυμίζεται ότι η φορά κίνησης καθορίζεται από τις στάθμες των διασυνδεδεμένων δεξαμενών και είναι θεωρητικά δυνατόν να μεταβάλλεται κατά την προσομοίωση.

Για τον λόγο αυτόν, στην μοντελοποίηση που έγινε ορίστηκαν κατάλληλες αρχικές συνθήκες που να εξασφαλίζουν σταθερή φορά κίνησης του νερού.



Σχήμα 5.2: Διακριτοποίηση του υδροφορέα σε κελιά και απεικόνιση των δυνατών κινήσεων του υπόγειου νερού. Με κύκλο απεικονίζονται τα κελιά στα οποία αντιστοιχούν πηγές. Τα κελιά με εστιγμένη είναι εικονικά. Οι διαστάσεις δεν αντιστοιχούν στην πραγματική κλίμακα του μοντέλου.

Από τις συνολικά 16 δεξαμενές του μοντέλου, μόνο οι επτά αναπαριστούν την λειτουργία του υδροφορέα. Οι υπόλοιπες δεξαμενές είτε προσομοιώνουν την λειτουργία πηγών είτε συγκεντρώνουν τις υπόγειες διαφυγές νερού εκτός της λεκάνης είτε είναι εικονικές. Συγκεκριμένα:

- Στα κύτταρα (1, 1) και (2, 4) τοποθετούνται εικονικές δεξαμενές που συγκεντρώνουν τις υπόγειες διαφυγές νερού προς την θάλασσα (Μαλιακός και Ευβοϊκός κόλπος) και την Υλίκη. Οι εν λόγω δεξαμενές έχουν πολύ μεγάλη επιφάνεια, η οποία εξασφαλίζει σταθερή στάθμη. Η αρχική στάθμη στις εν λόγω δεξαμενές είναι μηδέν, ενώ προφανώς δεν υπάρχει τροφοδοσία τους από την κατείσδυση κάποιας μονάδας υδρολογικής απόκρισης.
- Η δεξαμενή που αντιστοιχεί στο κύτταρο (4, 1) προσομοιώνει την λειτουργία των κύριων πηγών του άνω ρου (πηγές Λιλαίας και Κεφαλόβρυσου), στο (4, 2) των πηγών Μαυρονερίου, στο (1, 3) των πηγών Μέλανα και Πολυγύρας (θεωρούμενες ως ενιαία πηγή) και στο (4, 3) των πηγών Έρκυνα. Οι εν λόγω δεξαμενές έχουν αμελητέα επιφάνεια, ενώ οι συντεταγμένες και η αρχική τους στάθμη αντιστοιχούν στις συντεταγμένες και το απόλυτο υψόμετρο εκφόρτισης των αντίστοιχων πηγών.
- Οι δεξαμενές που αντιστοιχούν στα κύτταρα που απεικονίζονται με γκρι χρώμα τροφοδοτούνται από την κατείσδυση της ΜΥΑ 1, ήτοι των ορεινών καρστικών όγκων της λεκάνης, στις παρυφές των οποίων βρίσκονται οι μεγάλες καρστικές πηγές της λεκάνης καθώς και μεγάλο πλήθος γεωτρήσεων του ΥΠΓΕ και της ΕΥΔΑΠ. Η δεξαμενή του κυττάρου (3, 1) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα της ΒΔ περιοχής του Παρνασσού, που τροφοδοτεί το σύνολο των πηγών του άνω ρου της λεκάνης. Η δεξαμενή του κυττάρου (1, 2) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα της κεντρικής και βόρειας περιοχής της λεκάνης, όπου αναπτύσσονται οι καρστικοί όγκοι του Ακοντίου που τροφοδοτούν άμεσα τις πηγές του Μέλανα και της Πολυγύρας. Η δεξαμενή του κυττάρου (3, 2) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα της ΒΑ περιοχής του Παρνασσού, που τροφοδοτεί άμεσα τις πηγές Μαυρονερίου. Τέλος, η δεξαμενή του κυττάρου (3, 3) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα της περιοχής του Ελικώνα, που τροφοδοτεί άμεσα τις πηγές του Έρκυνα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών (συντεταγμένες

κέντρου βάρους και έκταση) υπολογίζονται με βάση τον υδρογεωλογικό χάρτη της περιοχής, ενώ οι αρχικές τους στάθμες εκτιμώνται μέσω βαθμονόμησης.

- Οι δεξαμενές που αντιστοιχούν στα κύτταρα που απεικονίζονται με λευκό χρώμα τροφοδοτούνται από την κατείσδυση της ΜΥΑ 2, ήτοι των πεδινών περιοχών της λεκάνης όπου κυριαρχούν οι προσχώσεις. Η δεξαμενή του κυττάρου (2, 1) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα του άνω ρου, η δεξαμενή του κυττάρου (2, 2) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα του μέσου και κάτω ρου, ενώ η δεξαμενή του κυττάρου (2, 3) προσομοιώνει την λειτουργία του υδροφορέα που εκτείνεται κάτω από την πεδιάδα της Κωπαΐδας. Όπως προηγουμένως, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών υπολογίζονται με βάση τον υδρογεωλογικό χάρτη της περιοχής, ενώ οι αρχικές τους στάθμες τίθενται ίσες με την παρατηρημένη μέση στάθμη του υδροφορέα στις αντίστοιχες περιοχές.
- Τα κύτταρα (1, 4), (3, 4) και (4, 4), τα οποία συμβολίζονται με εστιγμένη γραμμή, δεν συμμετέχουν στην κίνηση του νερού και τίθενται αποκλειστικά για υπολογιστικούς λόγους. Προφανώς, τα εν λόγω εικονικά κελιά έχουν αμελητέα έκταση και δεν τροφοδοτούνται από την κατείσδυση μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

Η ερμηνεία, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η ΜΥΑ από την οποία τροφοδοτούνται και η αρχική στάθμη νερού των δεξαμενών υπόγειου νερού συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1. Σημειώνεται ότι το ύψος οροφής όλων των δεξαμενών ελήφθη ίσο με το μέσο πάχος του υδροφορέα, το οποίο εκτιμάται σε 230 m.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά δεξαμενών υπόγειου νερού.

<i>i</i>	<i>j</i>	Συνοπτική περιγραφή	<i>X</i> (m)	<i>Y</i> (m)	<i>E</i> (km ²)	ΜΥΑ	<i>w</i> ₀ (m)
1	1	Μαλιακός και Βόρειος Ευβοϊκός	388 868	4 294 746	1.E+06	-	0.000
1	2	Πεδινή ζώνη άνω ρου	371 014	4 280 119	329.0	2	280.000
1	3	Ορεινοί όγκοι Δυτ. Παρνασσού	368 760	4 275 424	177.0	1	300.352*
1	4	Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	366 981	4 270 955	1.E-06	-	300.000
2	1	Περιοχή Ακοντίου όρους	404 025	4 270 336	225.0	1	105.028*
2	2	Πεδινή ζώνη μέσου και κάτω ρου	395 925	4 267 357	277.7	2	110.000
2	3	Ορεινοί όγκοι Ανατ. Παρνασσού	386 802	4 264 564	173.9	1	122.875*
2	4	Πηγές Μαυρονερίου	383 264	4 259 257	1.E-06	-	120.000
3	1	Πηγές Μέλανα-Πολυγύρας	412 497	4 266 174	1.E-06	-	100.000
3	2	Περιοχή Κωπαΐδας	417 059	4 257 302	784.2	2	95.000
3	3	Ορεινοί όγκοι Ελικώνα	401 046	4 250 320	75.8	1	203.698*
3	4	Πηγές Έρκυνα	396 763	4 247 247	1.E-06	-	200.000
4	1	Εικονική δεξαμενή	418 761	4 276 732	1.E-06	-	0.000
4	2	Κεντρικός Ευβοϊκός και Υλίκη	418 761	4 276 832	1.E+06	-	0.000
4	3	Εικονική δεξαμενή	418 761	4 276 932	1.E-06	-	0.000
4	4	Εικονική δεξαμενή	418 761	4 277 032	1.E-06	-	0.000

Με αστερίσκο (*) σημειώνονται οι τιμές αρχικής στάθμης που προκύπτουν μέσω βαθμονόμησης (βλ. 5.5.2).

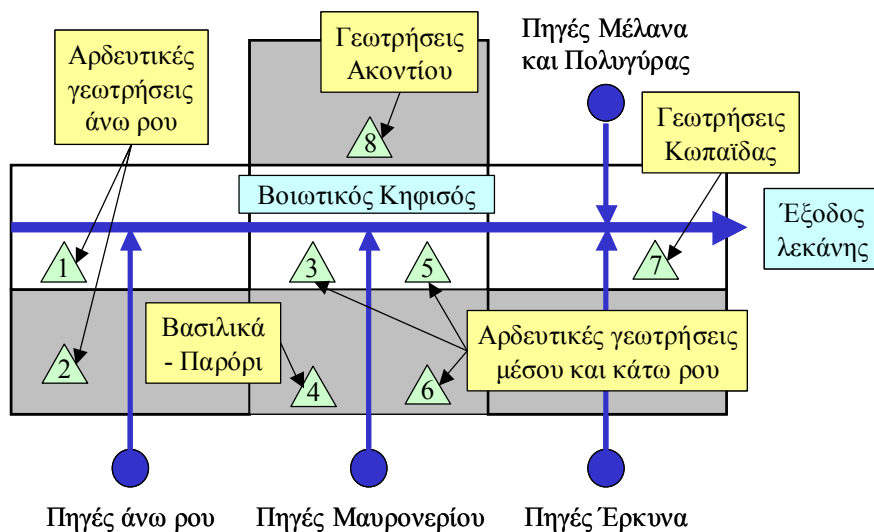
Το συνολικό πλήθος των παραμέτρων του υπόγειου μοντέλου είναι 13, ήτοι 12 όροι υδραυλικής αγωγιμότητας και το πορώδες, θεωρούμενο ενιαίο για όλη τη λεκάνη. Ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα σε συνθήκες πίεσης δεν επηρεάζει την παρούσα μοντελοποίηση, δεδομένου ότι στη λεκάνη επικρατούν κυρίως φρεατίες συνθήκες.

5.2.3 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

Ως υδροσύστημα νοούνται οι υδατικοί πόροι και τα έργα αξιοποίησης που σχετίζονται με την προσφορά και ζήτηση νερού. Για τις ανάγκες του μοντέλου προσομοίωσης, διαμορφώθηκε ένα στοιχειώδες υδροσύστημα που περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες (Σχήμα 5.3):

- τον κύριο κλάδο του Βοιωτικού Κηφισού·
- τις βασικούς παραποτάμους του, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τις αντίστοιχες καρστικές πηγές·
- τις αρδευτικές και υδρευτικές γεωτρήσεις.

Το εν λόγω υδροσύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι συνιστά ένα πρώτο επίπεδο του μοντέλου προσομοίωσης, πριν από την λεκάνη απορροής (δεύτερο επίπεδο) και τον υδροφορέα (τρίτο επίπεδο).



Σχήμα 5.3: Σχηματική απεικόνιση υδροσυστήματος, το οποίο αποτελείται από κλάδους ποταμών (βέλη), πηγές (κύκλοι) και ομάδες γεωτρήσεων (τρίγωνα). Στο παρασκήνιο απεικονίζεται η διακριτοποίηση της λεκάνης σε δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης (σκιασμένη και λευκή περιοχή, αντίστοιχα) και του υδροφορέα σε κελιά.

Οι γεωτρήσεις της λεκάνης συμπύσσονται σε ομάδες. Κάθε ομάδα γεωτρήσεων θεωρείται ότι αντλεί νερό από τον υδροφορέα που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη δεξαμενή υπόγειου νερού. Η ομαδοποίηση των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Στις εν λόγω ομάδες γεωτρήσεων περιλαμβάνονται:

- οι γεωτρήσεις που αναπτύσσονται στις πεδινές εκτάσεις της λεκάνης (άνω, μέσος και κάτω ρους Βοιωτικού Κηφισού, πεδιάδα Κωπαΐδας), και οι οποίες υδρομαστεύουν προσχωματικούς κυρίως υδροφορείς·
- οι αρδευτικές γεωτρήσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του άνω ρου και υδρομαστεύουν τον καρστικό υδροφορέα που τροφοδοτεί τις πηγές Λιλαίας και Κεφαλόβρυσου, ήτοι την δεξαμενή υπόγειου νερού που αντιστοιχεί στο κελί (3, 1)·
- οι αρδευτικές και υδρευτικές γεωτρήσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή του μέσου ρου και υδρομαστεύουν τον καρστικό υδροφορέα που τροφοδοτεί τις πηγές Μαυρονερίου, ήτοι την δεξαμενή υπόγειου νερού που αντιστοιχεί στο κελί (3, 2)·
- οι παλαιές γεωτρήσεις του ΥΠΓΕ, οι οποίες αναπτύσσονται στις παρυφές του Ακοντίου και υδρομαστεύουν τον καρστικό υδροφορέα που τροφοδοτεί τις πηγές Μέλανα και Πολυγύρας, ήτοι την δεξαμενή υπόγειου νερού που αντιστοιχεί στο κελί (1, 2).

Οι απολήψεις νερού στην λεκάνη πραγματοποιούνται από επιφανειακά και υπόγεια νερά. Η κατανομή των απολήψεων σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης γίνεται αυτόματα από το μοντέλο, εφόσον για κάθε περιοχή ζήτησης είναι γνωστές οι υδατικές ανάγκες και ο τρόπος πραγματοποίησης των απολήψεων (πηγές υδροδότησης). Οι υδατικές ανάγκες της λεκάνης επιμερίστηκαν σε επτά περιοχές ζήτησης που συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3. Συγκεκριμένα:

- Οι περιοχές ζήτησης 1 και 2 αντιστοιχούν στην αρδευόμενη πεδιάδα του άνω ρου του Βοιωτικού Κηφισού, ήτοι τις καλλιεργούμενες εκτάσεις των κοινοτήτων Γραβιάς, Λιλαίας και Αμφίκλειας. Η άρδευση γίνεται μέσω γεωτρήσεων που θεωρείται ότι υδρομαστεύουν κατά το ήμισυ τον προσχωματικό και κατά το ήμισυ τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής¹ (ομάδες γεωτρήσεων 1 και 2).
- Οι περιοχές ζήτησης 3 και 4 αντιστοιχούν στην αρδευόμενη πεδιάδα του μέσου ρου του Βοιωτικού Κηφισού, ήτοι τις καλλιεργούμενες εκτάσεις των κοινοτήτων Ελάτειας, Τιθορέας, Έξαρχου και Ανθοχωρίου. Η άρδευση γίνεται μέσω γεωτρήσεων που, όμοια με προηγουμένως, θεωρείται ότι υδρομαστεύουν κατά το ήμισυ τον προσχωματικό και κατά το ήμισυ τον καρστικό υδροφορέα της περιοχής (ομάδες γεωτρήσεων 3 και 6).
- Η περιοχή ζήτησης 5 αντιστοιχεί στην αρδευόμενη πεδιάδα του κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού, ήτοι τις καλλιεργούμενες εκτάσεις των κοινοτήτων Αγίου Βλασίου, Χαιρώνειας, Ακοντίου, Θουρίου, Προσηλίου και Ρωμαϊκού. Η άρδευση γίνεται από τις πηγές Μαυρονερίου² και μέσω γεωτρήσεων που θεωρείται ότι υδρομαστεύουν τον προσχωματικό υδροφορέα της περιοχής (ομάδα γεωτρήσεων 5).
- Η περιοχή ζήτησης 6 αντιστοιχεί στις καλλιεργούμενες εκτάσεις του Οργανισμού Κωπαΐδας, των ΤΟΕΒ Ορχομενού και Λειβαδιάς και των κοινοτήτων Διονύσου, Κάστρου και Κόκκινου. Οι αρδευτικές απολήψεις πραγματοποιούνται κατά πρώτη προτεραιότητα με εκτροπή των νερών του Βοιωτικού Κηφισού και των ποταμών Μέλανα και Έρκυνα στο αρδευτικό δίκτυο της περιοχής. Εφόσον οι διαθέσιμες ποσότητες δεν επαρκούν, το έλλειμμα θεωρείται ότι καλύπτεται μέσω γεωτρήσεων (ομάδα γεωτρήσεων 7). Ένας επιπλέον τρόπος ικανοποίησης της ζήτησης είναι η άντληση νερού από την Υλίκη και τις γεωτρήσεις Ακοντίου (ομάδα γεωτρήσεων 8), οι οποίες τροφοδοτούν την περιοχή μέσω του υδραγωγείου Κωπαΐδας.
- Η περιοχή ζήτησης 6 αναφέρεται στην ύδρευση της Αθήνας μέσω των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου (ομάδα γεωτρήσεων 4) και του υδραγωγείου Διστόμου.
- Η περιοχή ζήτησης 7 αναφέρεται στην τροφοδοσία του υδραγωγείου Κωπαΐδας μέσω των γεωτρήσεων Ακοντίου (ομάδα γεωτρήσεων 8). Τονίζεται ότι οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για άρδευση αφαιρούνται από την ζήτηση της θέσης 5, καθώς περιλαμβάνονται στην ζήτηση της θέσης 7. Οι εν λόγω ποσότητες εκτιμώνται σε 16 hm³/έτος, ομοιόμορφα κατανεμημένων τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο (Ζαργής κ.ά., 1999).

¹ Πρόκειται για αυθαίρετη πλην όμως αρκετά εύλογη υπόθεση, η οποία έγινε ελλείψει στοιχείων σχετικά με την κατανομή των αντλούμενων ποσοτήτων στην περιοχή του άνω ρου.

² Η άρδευση πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος μικρών τεχνικών έργων (διώρυγες και θυροφράγματα) κατά μήκος της τάφρου Μαυρονερίου, μέσω της οποίας τα νερά των πηγών εκτρέπονται προς τον Βοιωτικό Κηφισό. Συνεπώς, οι απολήψεις από τις πηγές αφαιρούνται από την συνολική απορροή του Βοιωτικού Κηφισού.

Πίνακας 5.2: Ομάδες γεωτρήσεων υδροσυστήματος περιοχής μελέτης.

α/α	Ονομασία	Περιοχή τροφοδοσίας	Υπόγειο κελί
1	Γεωτρήσεις άνω ρου	Γραβιά-Λιλαία-Αμφίκλεια	(2, 1)
2	Γεωτρήσεις μέσου ρου (προσχωμ.)	Ελάτεια-Τιθορέα- Έξαρχος-Ανθοχώρι	(2, 2)
3	Γεωτρήσεις μέσου ρου (καρστικές)	Ελάτεια-Τιθορέα- Έξαρχος-Ανθοχώρι	(3, 2)
4	Γεωτρήσεις κάτω ρου	Άγ. Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	(2, 2)
5	Γεωτρήσεις Κωπαΐδας	Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	(2, 3)
6	Γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου	Αθήνα (μέσω υδραγωγείου Διστόμου)	(3, 2)
7	Γεωτρήσεις Ακοντίου	Κωπαΐδα (μέσω υδραγωγείου Κωπαΐδας)	(1, 2)

Πίνακας 5.3: Περιοχές ζήτησης νερού υδροσυστήματος περιοχής μελέτης.

α/α	Ονομασία	Τρόποι υδροδότησης
1	Γραβιά-Λιλαία-Αμφίκλεια	Αντλήσεις από γεωτρήσεις άνω ρου
2	Ελάτεια-Τιθορέα-Έξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από προσχωματικές γεωτρήσεις μέσου ρου
3	Ελάτεια-Τιθορέα-Έξαρχος-Ανθοχώρι	Αντλήσεις από καρστικές γεωτρήσεις μέσου ρου
4	Άγιος Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	Απολήψεις από Μαυρονέρι Αντλήσεις από γεωτρήσεις κάτω ρου
5	Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	Μεταφορά νερού από Υλίκη Απολήψεις από επιφανειακά νερά Αντλήσεις από γεωτρήσεις Κωπαΐδας
6	Αθήνα (μέσω υδραγωγείου Διστόμου)	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου
7	Υδραγωγείο Κωπαΐδας	Αντλήσεις από γεωτρήσεις Ακοντίου

5.3 Ιστορικές χρονοσειρές

5.3.1 Περίοδος ελέγχου

Για την βαθμονόμηση των παραμέτρων θα ήταν επιθυμητή η ύπαρξη συστηματικών μετρήσεων όσον αφορά τις κύριες αποκρίσεις της λεκάνης για μεγάλο χρονικό διάστημα, που αφενός να καλύπτει ένα ευρύ και αντιπροσωπευτικό φάσμα υδροκλιματικών καταστάσεων και αφετέρου να εκτείνεται έως πρόσφατα, έτσι ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Ωστόσο, οι περιορισμοί που αφορούν την διαθεσιμότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των μέτρων καλής προσαρμογής, και ειδικά των υδρομετρικών πληροφοριών που αναφέρονται στις κύριες καρστικές πηγές του μοντέλου, κατέστησε αναπόφευκτη την επιλογή μιας περιόδου ελέγχου μικρής σχετικά διάρκειας.

Συγκεκριμένα, η περίοδος ελέγχου καλύπτει δέκα πλήρη υδρολογικά έτη, από τον Οκτώβριο του 1984 έως τον Σεπτέμβριο του 1994. Πρόκειται για ένα σχετικά αντιπροσωπευτικό των δίαιτας της λεκάνης διάστημα, καθώς περιλαμβάνει αλληλουχία υγρών και ξηρών υδρολογικών ετών. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εν λόγω περιόδου πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες απολήψεις για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, μέσω των γεωτρήσεων του μέσου ρου. Κατά συνέπεια, η εν λόγω περίοδος όχι μόνο καλύπτει ένα σχετικά ικανοποιητικό φάσμα υδροκλιματικών καταστάσεων αλλά και είναι η πλέον κατάλληλη για την προσαρμογή του μοντέλου σε καθεστώς έντονης εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης.

Η περίοδος ελέγχου χωρίστηκε σε δύο χρονικές ενότητες. Η πρώτη ενότητα, η οποία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1984-85 έως 1989-90, χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, ενώ η δεύτερη ενότητα, η οποία περιλαμβάνει τα υδρολογικά έτη 1990-91 έως 1993-94, χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου.

Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται στην περίοδο ελέγχου του μοντέλου διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- υδρολογικές χρονοσειρές, ήτοι χρονοσειρές βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής·
- χρονοσειρές υδατικών αναγκών·
- χρονοσειρές ελέγχου, ήτοι χρονοσειρές απόκρισης που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου.

Στα επόμενα εδάφια περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των εν λόγω ιστορικών χρονοσειρών σε μηνιαία βάση, ενώ οι αντίστοιχοι πίνακες δίνονται στο Παράρτημα Α.

5.3.2 Υδρολογικές χρονοσειρές

Οι ιστορικές υδρολογικές χρονοσειρές είναι τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής που αναφέρονται στις δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης.

Συγκεκριμένα, τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης υπολογίστηκαν με επιφανειακή ολοκλήρωση και στη συνέχεια υψομετρική αναγωγή των σημειακών δειγμάτων των ορεινών και πεδινών σταθμών της περιοχής μελέτης (βλ. 3.2.5). Υπενθυμίζεται ότι τα μηνιαία δείγματα των σταθμών προήλθαν από τα αντίστοιχα ημερήσια, τα οποία μετατοπίστηκαν κατά δύο ημέρες ώστε να μην υπάρχει ασυμβατότητα μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής σε περιπτώσεις ισχυρών καταιγίδων που λαμβάνουν χώρα κατά στο τέλος του μήνα¹ (βλ. 3.2.4). Με τον τρόπο υπολογίστηκαν οι επιφανειακές βροχοπτώσεις στην ορεινή και πεδινή ζώνη της λεκάνης, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των βροχοπτώσεων στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης 1 και 2, αντίστοιχα.

Τέλος, οι χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής υπολογίστηκαν στα πλαίσια προηγούμενης μελέτης που εκπόνησε το ΥΠΕΧΩΔΕ (2000).

5.3.3 Χρονοσειρές υδατικών αναγκών

Για κάθε θέση ζήτησης νερού (βλ. 5.2.3), εκτιμήθηκαν οι αντίστοιχες υδατικές ανάγκες. Ειδικότερα, οι αρδευτικές ανάγκες υπολογίστηκαν θεωρώντας ετήσιο ύψος θεωρητικών αναγκών σε νερό ίσο με 650 mm (τιμή που είναι συμβατή με τις εκτιμήσεις του ΓΕΩΤΕΕ και του ΠΓΜΕ), και οι οποίες επιμερίζονται σε κάθε μήνα της αρδευτικής περιόδου με βάση την κατανομή του Πίνακα 3.25. Επιπλέον, καθορίστηκαν οι αρδευόμενες εκτάσεις κάθε περιοχής ζήτησης, με βάση τα στοιχεία των Πινάκων 3.26 έως 3.29. Ο υπολογισμός της κατανομής των αρδευτικών αναγκών στις περιοχές ενδιαφέροντος γίνεται στους Πίνακες 5.4 και 5.5. Με βάση τα παραπάνω, οι συνολικές αρδευτικές ανάγκες της περιοχής μελέτης εκτιμώνται σε 219.1 hm³/έτος.

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν οι μηνιαίες χρονοσειρές για την δεκαετία ελέγχου (1984-1994), οι οποίες αναφέρονται στις θέσεις ζήτησης του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα:

- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση των περιοχών Γραβιάς, Λιλαίας και Αμφίκλειας με άντληση από τον προσχωματικό υδροφορέα υπολογίστηκε θεωρώντας το 50% των μηνιαίων αναγκών του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση των περιοχών Γραβιάς, Λιλαίας και Αμφίκλειας με άντληση από τον καρστικό υδροφορέα υπολογίστηκε θεωρώντας το 50% των μηνιαίων αναγκών του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου·

¹ Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε μόνο για τα έτη μέχρι το 1991, για τα οποία υπήρχαν ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης σε όλους τους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης. Για τα υπόλοιπα τρία έτη της περιόδου ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν οι πρωτογενείς μηνιαίες βροχοπτώσεις.

- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση των περιοχών Ελάτειας, Τιθορέας, Έξαρχου και Ανθοχωρίου με άντληση από τον προσχωματικό υδροφορέα υπολογίστηκε θεωρώντας το 50% των μηνιαίων αναγκών του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση των περιοχών Ελάτειας, Τιθορέας, Έξαρχου και Ανθοχωρίου με άντληση από τον καρστικό υδροφορέα υπολογίστηκε θεωρώντας το 50% των μηνιαίων αναγκών του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση των περιοχών Αγίου Βλασίου, Χαιρώνειας, Ακοντίου, Θουρίου, Προσηλίου και Ρωμαϊκού υπολογίστηκε θεωρώντας τις μηνιαίες ανάγκες του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για άρδευση της Κωπαΐδας και των παρακείμενων εκτάσεων υπολογίστηκε θεωρώντας τις μηνιαίες ανάγκες του Πίνακα 5.5 για όλη την δεκαετία ελέγχου, από τις οποίες αφαιρέθηκαν οι ποσότητες που καλύφθηκαν με άντληση από την Υλίκη και τις γεωτρήσεις Ακοντίου·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για ύδρευση της Αθήνας μέσω των γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου υπολογίστηκε με βάση τα όσα αναφέρονται στο εδάφιο 3.4.2·
- η χρονοσειρά ζήτησης νερού για τροφοδοσία του υδραγωγείου Κωπαΐδας μέσω των γεωτρήσεων Ακοντίου υπολογίστηκε με βάση τις μετρήσεις του ΙΓΜΕ κατά την περίοδο Μαΐου 1990 – Οκτωβρίου 1993 (Παγούνης, 1993), και θεωρώντας σταθερή άντληση 4.0 hm³ κατά τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο για όλα τα υπόλοιπα έτη της περιόδου ελέγχου.

Πίνακας 5.4: Αρδευόμενες εκτάσεις και ετήσιες αρδευτικές ανάγκες στις διάφορες περιοχές ζήτησης νερού, με θεώρηση ετήσιου ύψους θεωρητικών αναγκών ίσου με 650 mm.

Ονομασία	Αρδευόμενη έκταση (στρέμματα)	Ετήσιες ανάγκες (hm ³)
Γραβιά-Λιλαία-Αμφίκλεια	33 800	22.0
Ελάτεια-Τιθορέα-Έξαρχος-Ανθοχώρι	50 500	32.8
Άγιος Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	28 150	18.3
Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	235 550	146.0
Σύνολο	348 000	219.1

Πίνακας 5.5: Κατανομή μηνιαίων αρδευτικών αναγκών στις διάφορες περιοχές ζήτησης (hm³).

Μήνας	Γραβιά έως Αμφίκλεια	Ελάτεια έως Ανθοχώρι	Άγ. Βλάσιος έως Ρωμαϊκό	Κωπαΐδα και παρακείμενες εκτάσεις	Σύνολο
Απρίλιος	1.2	1.8	1.0	8.2	12.3
Μάιος	2.9	4.3	2.4	19.1	28.6
Ιούνιος	4.7	7.0	3.9	31.3	46.9
Ιούλιος	6.1	9.1	5.1	40.5	60.8
Αύγουστος	5.5	8.3	4.6	36.8	55.2
Σεπτέμβριος	1.5	2.3	1.3	10.2	15.3
Σύνολο	22.0	32.8	18.3	146.0	219.1

5.3.4 Χρονοσειρές ελέγχου

Για τον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου κατά την διαδικασία βαθμονόμησης συγκρίθηκαν οι ιστορικές με τις προσομοιωμένες αποκρίσεις τις λεκάνης. Οι εν λόγω χρονοσειρές απόκρισης αναφέρονται και στην απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης καθώς και στην απορροή των τεσσάρων καρστικών πηγών του συστήματος. Συγκεκριμένα:

- Η χρονοσειρά απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης, όπως εκτιμάται από την ΕΥΔΑΠ βάσει ημερήσιων παρατηρήσεων στάθμης και αναγωγή της τελευταίας σε παροχή (βλ. 3.2.8), ελήφθη από τα δεδομένα ισοζυγίου του ταμιευτήρα Υλίκης.
- Η χρονοσειρά απορροής των πηγών του άνω ρου κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στις κύριες πηγές της υπολεκάνης, ήτοι τις πηγές Λιλαίας, Ανατολικού Κεφαλόβρυσου και Δυτικού Κεφαλόβρυσου (βλ. 3.2.10).
- Η χρονοσειρά απορροής των πηγών Μαυρονερίου κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στην ομώνυμη τάφρο που τροφοδοτείται από τις εν λόγω πηγές (βλ. 3.2.10).
- Η χρονοσειρά απορροής των πηγών Μέλανα και Πολυγύρας κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στις αντίστοιχες θέσεις (βλ. 3.2.10).
- Η χρονοσειρά απορροής των πηγών Έρκυνα κατασκευάστηκε μέσω χρονικής ολοκλήρωσης των μετρήσεων παροχής που πραγματοποίησε το ΙΓΜΕ στον ποταμό που τροφοδοτείται από τις εν λόγω πηγές (βλ. 3.2.10).

Τα στατιστικά μεγέθη των τελικών δειγμάτων απορροής, τα οποία αναφέρονται στις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Μέση ετήσια απορροή Βοιωτικού Κηφισού και κύριων καρστικών πηγών (hm^3).

Χρονοσειρά απορροής	Περίοδος βαθμονόμησης (10/1984-9/1990)	Περίοδος επαλήθευσης (10/1990-9/1994)
Έξοδος λεκάνης (Διώρυγα Καρδίτσας)	233.9	171.6
Πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	34.8	-
Πηγές Μαυρονερίου	48.4	27.2
Πηγές Μέλανα-Πολυγύρας	123.7	-
Πηγές Έρκυνα	21.0	-

Η παύλα υποδηλώνει ότι τα διαθέσιμα στοιχεία κρίνονται ανεπαρκή για την αξιόπιστη εκτίμηση της μέσης ετήσιας απορροής.

5.4 Μεθοδολογία και κριτήρια βαθμονόμησης

5.4.1 Μεταβλητές ελέγχου

Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης αναφέρονται αφενός στις 22 συνολικά παραμέτρους του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλο και αφετέρου στις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης, ήτοι τις αρχικές στάθμες των δύο δεξαμενών συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας και των δεξαμενών υπόγειου νερού.

Κανονικά, οι αρχικές συνθήκες ενός μοντέλου δεν θεωρούνται παράμετροι προς βελτιστοποίηση. Εφόσον δεν υπάρχει τρόπος προσδιορισμού των τιμών των αρχικών συνθηκών μέσω μετρήσεων (κάτι που άλλωστε δεν έχει νόημα για εννοιολογικού τύπου μοντέλα), ορίζεται μια *περίοδος θέρμανσης* (warm-up period) κατά την οποία δεν ελέγχεται η προσαρμογή του μοντέλου (δηλαδή δεν υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) ώστε να μην επηρεάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης από σφάλματα εκτίμησης των αρχικών συνθηκών. Σε μοντέλα μηνιαίου βήματος προσομοίωσης, η εν λόγω περίοδος θέρμανσης μπορεί να διαρκεί ακόμη και ένα πλήρες υδρολογικό έτος. Ωστόσο, στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν ορίστηκε τέτοια περίοδος. Αυτό συνέβη όχι μόνο εξαιτίας του μικρού μήκους της περιόδου βαθμονόμησης (έξι υδρολογικά έτη, ήτοι 72 χρονικά βήματα) αλλά και επειδή οι αρχικές συνθήκες επηρεάζουν δραστικά την επίδοση του μοντέλου. Η ευαισθησία του μοντέλου στις αρχικές συνθήκες οφείλεται στο γεγονός ότι το καλοκαίρι που

προηγείται της έναρξης της περιόδου ελέγχου είναι εξαιρετικά υγρό, οπότε τόσο η συγκέντρωση εδαφικής υγρασίας όσο και η στάθμη του υπόγειου νερού είναι πολύ υψηλότερες από τις συνήθειες που παρατηρούνται στην αρχή ενός τυπικού υδρολογικού έτους. Επιπλέον, μόλις στο τέταρτο χρονικό βήμα, ήτοι τον Ιανουάριο του 1985, παρατηρείται η μέγιστη τιμή της απορροής στην έξοδο της λεκάνης και τις πηγές, κάτι που ασφαλώς σχετίζεται με το ασυνήθιστα υψηλό καθεστώς υδροφορίας με το οποίο ξεκινάει η προσομοίωση του φυσικού συστήματος.

Όσον αφορά τις δεξαμενές υπόγειου νερού, οι αρχικές στάθμες που θεωρήθηκαν μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι αυτές που αναφέρονται στα γειτονικά των πηγών κελιά, ήτοι στα κελιά (3, 1), (1, 2), (3, 2) και (3, 3) που τροφοδοτούνται από την ορεινή μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Από διερευνήσεις που έγιναν παρατηρήθηκε ότι η απόκριση των πηγών είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην αρχική στάθμη των λόγω κελιών, όπως εξάλλου και στις τιμές των όρων υδραυλικής αγωγιμότητας. Όσον αφορά τις αρχικές στάθμες των υπόλοιπων κελιών που προσομοιώνουν την λειτουργία του υδροφορέα, ορίστηκαν τιμές που είναι συμβατές με τις μέσες παρατηρημένες συνθήκες κατά την περίοδο ελέγχου (βλ. Πίνακα 5.2).

Η εφαρμογή του αλγορίθμου ολικής βελτιστοποίησης προϋποθέτει τον ορισμό ενός επιτρεπόμενου εύρους διακύμανσης των τιμών των μεταβλητών ελέγχου. Ο καθορισμός των ορίων διακύμανσης έγινε μετά από διερεύνηση, στα πλαίσια της ημιαυτόματης διαδικασίας βαθμονόμησης (βλ. 5.4.3).

5.4.2 Αντικειμενική συνάρτηση

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.3.1, για την αυτόματη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου με χρήση τεχνικών ολικής βελτιστοποίησης απαιτείται η διατύπωση ενός μέτρου επίδοσης που αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Το εν λόγω μέτρο σχετίζεται με την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου, την δυνατότητά του δηλαδή να αναπαράγει τις ιστορικές αποκρίσεις της λεκάνης.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή διαμορφώθηκε μια σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση, η οποία περιλαμβάνει πολλαπλά κριτήρια καλής προσαρμογής που αναφέρονται σε πολλαπλές αποκρίσεις της λεκάνης. Οι αποκρίσεις που ελέγχθηκαν είναι η μηνιαία απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην έξοδο της λεκάνης του και οι απορροές των τεσσάρων ομάδων πηγών του μοντέλου, ήτοι των πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, Μαυρονερίου, Μέλανα-Πολυγύρας και Έρκυνα. Τονίζεται ότι η παραπάνω προσέγγιση επιβάλλεται και λόγω του σχετικά μεγάλου πλήθους των μεταβλητών ελέγχου. Πράγματι, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι παράμετροι ενός υδρολογικού μοντέλου που μπορούν να ρυθμιστούν με χρήση ενός μοναδικού κριτηρίου καλής προσαρμογής δεν ξεπερνούν τις πέντε με έξι (*Wagner et al.*, 2001).

Τα κριτήρια καλής προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε απόκριση είναι ο συντελεστής προσδιορισμού μεταξύ της προσομοιωμένης και παρατηρημένης (ιστορικής) χρονοσειράς και δύο όροι σφάλματος, όπου ο πρώτος αναφέρεται στην μεροληψία του μοντέλου και ο δεύτερος στην αναπαραγωγή των μηδενικών απορροών.

Ο *συντελεστής προσδιορισμού*¹ (coefficient of determination) είναι ένα τυπικό στατιστικό μέτρο καλής προσαρμογής μαθηματικών μοντέλων που ορίζεται ως:

¹ Στην υδρολογία, ο συντελεστής προσδιορισμού είναι γνωστός και ως δείκτης Nash-Sutcliffe, από τα ονόματα των υδρολόγων που πρώτοι χρησιμοποίησαν τον εν λόγω συντελεστή ως μέτρο καλής προσαρμογής μοντέλων βροχής-απορροής (*Nash and Sutcliffe*, 1970).

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

όπου x_i είναι η παρατηρημένη χρονοσειρά, \bar{x} η μέση τιμή της, y_i η προσομοιωμένη χρονοσειρά και n ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου. Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Προφανώς, κάτι τέτοιο δεν είναι ποτέ εφικτό για ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπαριστά φυσικές διεργασίες και, ως εκ τούτου, υπόκειται τόσο σε δομικά σφάλματα όσο και σε σφάλματα μετρήσεων. Εφόσον $R < 0$ η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την μέση παρατηρημένη τιμή \bar{x} .

Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλύει συμβατικά προβλήματα ελαχιστοποίησης, το κριτήριο που αναφέρεται στον συντελεστή προσδιορισμού διατυπώθηκε τελικά ως:

$$NSERR = 1 - R \quad (5.2)$$

Η ποσότητα NSERR λαμβάνει τιμές από 0 έως $+\infty$. Προφανώς, η ελαχιστοποίηση του NSERR ισοδυναμεί με την μεγιστοποίηση του συντελεστή προσδιορισμού.

Η *μεροληψία* (bias) είναι ένα αδιάστατο μέτρο που εκφράζει την ποσοστιαία απόκλιση της μέσης τιμής, \bar{y} , της προσομοιωμένης χρονοσειράς σε σχέση με την μέση τιμή, \bar{x} , της παρατηρημένης. Το εν λόγω μέτρο υπολογίζεται από την σχέση:

$$BIAS = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (5.3)$$

Αν $BIAS > 0$, τότε το μοντέλο υπερεκτιμά την ιστορική απορροή και, αντίστροφα, αν $BIAS < 0$, τότε το μοντέλο υποεκτιμά την ιστορική απορροή. Αν $BIAS = 0$, το μοντέλο είναι αμερόληπτο. Από τον ορισμό του συντελεστή προσδιορισμού προκύπτει ότι στην περίπτωση που $R = 1$ το μοντέλο είναι εξ ορισμού αμερόληπτο, χωρίς όμως να ισχύει το αντίστροφο.

Η αναπαράσταση των καταστάσεων διακοπής της ροής του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών του θεωρήθηκε ως ένας πολύ σημαντικός παράγοντας αξιοπιστίας του μοντέλου. Για τον λόγο αυτόν, ορίστηκε ένας επιπλέον κριτήριο καλής προσαρμογής ώστε να εμποδίσει τόσο την αδικαιολόγητη στείρευση του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών του όσο και την παραγωγή απορροής στην περίπτωση στείρευσης. Ειδικά στις πηγές, η επιβολή επιπλέον ποινής σε σχέση με αυτήν που εισάγει ο συντελεστής προσδιορισμού δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο τελευταίος επηρεάζεται από σφάλματα των υδρομετρήσεων καθώς και από σφάλματα εκτίμησης της μέσης μηνιαίας παροχής τους με βάση αραιής χρονικής κλίμακας, στιγμιαίες μετρήσεις.

Για την μαθηματική διατύπωση του εν λόγω μέτρου καλής προσαρμογής ορίστηκε το σφάλμα μηδενικών τιμών:

$$z_i = \begin{cases} x_i & \text{αν } y_i = 0 \\ y_i & \text{αν } x_i = 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.4)$$

Το μέτρο ελέγχου ορίστηκε αδιάστατα, ως ο λόγος της μέσης τιμής των σφαλμάτων μηδενικών τιμών προς την μέση παρατηρημένη τιμή, δηλαδή:

$$\text{ZEROERR} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n_z \sum_{i=1}^n x_i} \quad (5.5)$$

όπου n_z το πλήθος των περιπτώσεων στις οποίες το μοντέλο είτε αναπαράγει απορροή ενώ υπάρχει στείρευση ($x_i = 0, y_i \neq 0$) ή δεν αναπαράγει καθόλου απορροή ενώ παρατηρείται τέτοια ($x_i \neq 0, y_i = 0$).

Για την δεκαετία ελέγχου, εκτός των υδρομετρήσεων, διατίθενται δείγματα παρατηρήσεων στάθμης σε μικρό αριθμό ερευνητικών γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης. Ωστόσο, δεν ήταν δυνατή η άμεση χρήση των εν λόγω δειγμάτων για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Ο λόγος είναι ότι η διακύμανση μιας παρατηρημένης στάθμης αναφέρεται στην τοπική κλίμακα μιας γεώτρησης, ενώ η διακύμανση της στάθμης μιας εννοιολογικής υπόγειας δεξαμενής του μοντέλου αναφέρεται στο ευρύ τμήμα του υδροφορέα που προσομοιώνει. Από την άλλη πλευρά, οι μετρήσεις καταδεικνύουν ότι, κατά την εξαετία της βαθμονόμησης, οι στάθμες των υδροφορέων του άνω και κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού και της Κωπαΐδας παρουσίασαν αμελητέα μόνο πτωτική τάση. Η εν λόγω πληροφορία, η οποία είναι ανεξάρτητη της χωρικής κλίμακας του μοντέλου, ελήφθη υπόψη στη βαθμονόμηση εισάγοντας στην αντικειμενική συνάρτηση έναν όρο ποινής, που ορίζεται ως η τετραγωνική διαφορά της τελικής μείον την αρχική στάθμη κάθε δεξαμενής, δηλαδή:

$$\Delta\text{WERR} = (W_n - W_0)^2 \quad (5.6)$$

Με τον τρόπο αυτό, αποφεύχθηκε η έντονη υπερετήσια τάση ανύψωσης ή ταπείνωσης της στάθμης των υπόγειων δεξαμενών, εξασφαλίζοντας έτσι τη διατήρηση ομαλής δίαιτας των υδροφορέων. Αντίστοιχος με τον παραπάνω όρος ποινής εισήχθη και για τις δεξαμενές του επιφανειακού μοντέλου, ώστε να εξασφαλιστεί ομαλή δίαιτα της εδαφικής υγρασίας. Ο εν λόγω όρος ποινής ορίστηκε ως:

$$\Delta\text{SERR} = (S_n - S_0)^2 \quad (5.7)$$

Αθροίζοντας τις τετραγωνικές αποκλίσεις ΔWERR και ΔSERR για το σύνολο των δεξαμενών υπόγειου νερού και εδαφικής υγρασίας, αντίστοιχα, προέκυψε το αθροιστικό σφάλμα $\text{SUM}\Delta\text{ERR}$, το οποίο εισήχθη ως όρος ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η τελευταία ορίστηκε ως το σταθμισμένο άθροισμα:

$$F = \sum_{j=1}^{n_R} [w_j (\text{NSERR}_j + \text{BIAS}_j + \text{ZEROERR}_j)] + 0.10 \sqrt{\text{SUM}\Delta\text{ERR}} \quad (5.8)$$

όπου n_R το πλήθος των χρονοσειρών απόκρισης των οποίων η προσαρμογή ελέγχεται ($n_R = 5$) και w_j συντελεστής βάρους που εκφράζει την σπουδαιότητα κάθε απόκρισης.

Δεδομένου ότι τα βάρη που υιοθετούνται επηρεάζουν δραστικά την διαδικασία βελτιστοποίησης, ο καθορισμός των τιμών των εν λόγω συντελεστών έγινε μετά από εκτεταμένη διερεύνηση. Τελικά, για την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας, η ακριβής εκτίμηση της οποίας συνιστά το κύριο ζητούμενο της μελέτης, υιοθετήθηκε τιμή βάρους ίση με 6. Επίσης, για την απορροή των πηγών Μαυρονερίου, για τις οποίες διατίθενται οι πλέον συστηματικές και αξιόπιστες μετρήσεις αλλά και είναι αυτές που επηρεάζονται άμεσα από τις υδρευτικές απολήψεις της ΕΥΔΑΠ, υιοθετήθηκε βάρος ίσο με 1.50, όσο και για τις πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου. Τέλος, για τις ομάδες πηγών Μέλανα-Πολυγύρας και Έρκυνα ορίστηκε μοναδιαίος συντελεστής βάρους.

5.4.3 Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου έγινε σταδιακά, ακολουθώντας μια σύνθετη στρατηγική εφαρμογής αυτόματων υπολογιστικών μεθόδων σε συνδυασμό με την ανθρώπινη κρίση. Σημειώνεται ότι παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στην περίπτωση πολύπλοκων υδρολογικών μοντέλων με πολλές παραμέτρους (π.χ., Boyle et al., 2000· Eckhardt and Arnold, 2001).

Αρχικά, έγινε ταυτόχρονη βαθμονόμηση του συνόλου των παραμέτρων, επιτρέποντας μεγάλο εύρος διακύμανσης τους (ευρύς χώρος εφικτών λύσεων). Πραγματοποιήθηκε μεγάλος αριθμός ανεξάρτητων βελτιστοποιήσεων με τον εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτησης-απλόκου (βλ. 2.3.3), μεταβάλλοντας τόσο τα όρια του εφικτού χώρου όσο και τα βάρη των κριτηρίων καλής προσαρμογής, ώστε να εντοπιστούν κατά το δυνατόν περισσότερες περιοχές έλξης ακροτάτων (regions of attraction). Ακολούθως αναζητήθηκε η ολικά βέλτιστη λύση κάθε περιοχής έλξης, μειώνοντας δραστικά το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης των παραμέτρων. Κατά τη δεύτερη αυτή φάση, η βαθμονόμηση έγινε ξεχωριστά για τις παραμέτρους του επιφανειακού και του υπόγειου μοντέλου, ώστε να εξασφαλιστεί πρωτίστως μια πολύ ικανοποιητική βαθμονόμηση για την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού και, δευτερευόντως, μια ικανοποιητική βαθμονόμηση για την απορροή των πηγών και, εν γένει, τη δίαιτα της κίνησης του υπόγειου νερού. Με τον παραπάνω τρόπο, ο ανθρώπινος έλεγχος υποβοήθησε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αποφύγει τα τοπικά ακρότατα και να επιτύχει καλή προσαρμογή για το σύνολο των κριτηρίων, παρά το σχετικά μεγάλο πλήθος μεταβλητών ελέγχου, την πολυπλοκότητα του μοντέλου, τις αβεβαιότητες που διέπει τις φυσικές διεργασίες της συγκεκριμένης λεκάνης και τις χονδροειδείς προσεγγίσεις που έγιναν κατά την εκτίμηση ορισμένων τουλάχιστον εκ των δεδομένων εισόδου του μοντέλου, κυρίως όσων αφορούν την κατανομή των αρδευτικών αναγκών.

5.4.4 Εμπειρικά κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών λύσεων

Όπως ήταν αναμενόμενο, κατά την διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου προέκυψε ένα εξαιρετικά μεγάλο πλήθος συνδυασμών παραμέτρων που δίνουν παρόμοια καλή προσαρμογή του μοντέλου στα παρατηρημένα υδρογραφήματα του Βοιωτικού Κηφισού και των πηγών του. Εφόσον χρησιμοποιούνται ποσοτικά και μόνο κριτήρια αξιολόγησης των εν λόγω συνδυασμών (ήτοι οι συντελεστές προσδιορισμού), οι λύσεις που προκύπτουν θεωρούνται ισοδύναμες. Το γεγονός αυτό είναι απόλυτα συμβατό με τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας, τα οποία εξηγήθηκαν στο εδάφιο 2.1.2. Συνεπώς, αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων έγινε χρησιμοποιώντας ποιοτικά και εμπειρικά κριτήρια. Συγκεκριμένα, απορρίφθηκαν όλοι οι συνδυασμοί παραμέτρων για τους οποίους ίσχυε ένα από τα ακόλουθα:

- στις τιμές των παραμέτρων δεν μπορούσε να αποδοθεί φυσικό νόημα·
- η επίδοση του μοντέλου μειονεκτούσε σημαντικά ως προς ορισμένα από τα κριτήρια καλής προσαρμογής υπερτερώντας ταυτόχρονα ως προς τα υπόλοιπα, με αποτέλεσμα να εξομαλύνεται το σταθμισμένο άθροισμα αυτών, όπως εκφράζεται από την αντικειμενική συνάρτηση (5.8)·
- παρατηρήθηκε μη αξιόπιστη αναπαραγωγή των μη ρυθμιζόμενων αποκρίσεων της λεκάνης.

Ως μη ρυθμιζόμενες νοούνται οι αποκρίσεις του μοντέλου για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις, οπότε δεν είναι δυνατός ο ορισμός ενός μέτρου καλής προσαρμογής των προσομοιωμένων χρονοσειρών στις αντίστοιχες ιστορικές. Τέτοιες είναι η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας, οι στάθμες των υδροφορέων, η πραγματική εξατμοδιαπνοή και οι απώλειες προς την θάλασσα. Εξετάζοντας ωστόσο τα στατιστικά χαρακτηριστικά και την υπερετήσια διακύμανση των εν λόγω χρονοσειρών ήταν δυνατή η ποιοτική αξιολόγηση του εκάστοτε συνδυασμού παραμέτρων, και η αποδοχή μόνο εκείνων που εξασφαλίζουν ένα ρεαλιστικό (κατά την κρίση μας) υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.

5.4.5 Επιλογή πλέον συμβιβαστικής λύσης

Λαμβάνοντας υπόψη τα τρία εμπειρικά κριτήρια του εδαφίου 5.4.4, προέκυψε ένα εκτενές δείγμα εναλλακτικών σεναρίων βαθμονόμησης, που με βάση τα επιμέρους κριτήρια καλής προσαρμογής θεωρούνται μαθηματικά ισοδύναμα. Στον Πίνακα 5.7 δίνονται τα κύρια αποτελέσματα για 20 από τα εν λόγω σενάρια, τα οποία αναφέρονται στους συντελεστές προσδιορισμού των πέντε χρονοσειρών ελέγχου. Όπως είναι φυσικό, δεν υπάρχει σενάριο στο οποίο να μεγιστοποιούνται ταυτόχρονα και οι πέντε συντελεστές προσδιορισμού. Κατά την εξαετή περίοδο βαθμονόμησης (1984-85 έως 1989-90), παρατηρείται πολύ καλή προσαρμογή της προσομοιωμένης χρονοσειράς απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, με τον αντίστοιχο συντελεστή προσδιορισμού να κυμαίνεται κοντά στα επίπεδα του 90%¹. Η προσαρμογή θεωρείται αρκετά ικανοποιητική στις πηγές Μαυρονερίου και Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, ενώ είναι κρίνεται – τηρουμένων των αναλογιών –ικανοποιητική και όσον αφορά τις πηγές Μέλανα-Πολυγύρας και Έρκυνα.

Πίνακας 5.7: Εναλλακτικά σενάρια βαθμονόμησης και αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού των υδρογραφημάτων στις πέντε θέσεις ενδιαφέροντος (BK = Βοιωτικός Κηφισός, M = πηγές Μαυρονερίου, ΛΚ = πηγές Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου, ΜΠ = πηγές Μέλανα-Πολυγύρας, E = πηγές Έρκυνα), για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου.

	Συντελεστές προσδιορισμού περιόδου βαθμονόμησης					Συντελεστές προσδιορισμού περιόδου επαλήθευσης				
	BK	M	ΛΚ	ΜΠ	E	BK	M	ΛΚ	ΜΠ	E
1	0.893	0.790	0.276	0.706	0.318	0.827	0.484	-0.273	0.101	-0.072
2	0.893	0.797	0.256	0.690	0.316	0.874	-0.017	-0.447	-0.179	-0.088
3	0.894	0.740	0.284	0.698	0.317	0.829	0.440	-0.540	0.291	-0.021
4	0.850	0.656	0.310	0.764	0.328	0.648	0.133	-0.013	-0.134	-0.124
5	0.914	0.757	0.276	0.706	0.314	0.743	0.225	-0.568	0.043	-0.035
6	0.905	0.753	0.262	0.714	0.355	0.855	0.114	-0.493	-0.016	-0.585
7	0.911	0.734	0.134	0.722	0.322	0.846	0.228	-0.684	0.141	-0.796
8	0.916	0.792	0.279	0.717	0.351	0.801	0.091	-0.616	-0.123	-0.508
9	0.911	0.711	0.208	0.735	0.331	0.730	-0.046	-1.110	-0.238	-1.149
10	0.899	0.645	0.215	0.727	0.298	0.856	-0.095	-1.028	-0.473	-1.058
11	0.908	0.626	0.192	0.351	0.287	0.800	-0.203	-1.294	0.424	-1.489
12	0.893	0.731	0.284	0.697	0.315	0.825	0.343	-0.080	0.194	-0.064
13	0.909	0.764	0.282	0.698	0.333	0.779	0.241	-0.351	-0.043	-0.272
14	0.888	0.791	0.292	0.689	0.319	0.824	0.454	-0.077	0.293	-0.226
15	0.889	0.791	0.292	0.683	0.313	0.824	0.454	-0.077	0.282	-0.083
16	0.887	0.797	0.289	0.738	0.310	0.827	0.463	-0.046	0.138	-0.073
17	0.878	0.809	0.305	0.717	0.314	0.702	0.322	-0.582	-0.181	-0.660
18	0.886	0.800	0.295	0.726	0.283	0.823	0.444	-0.165	0.301	0.161
19	0.886	0.804	0.287	0.726	0.284	0.823	0.466	-0.060	0.301	0.160
20	0.887	0.804	0.288	0.727	0.282	0.824	0.465	-0.083	0.282	0.163

Αντίθετα, για τα περισσότερα σενάρια, η προσαρμογή του μοντέλου κατά την περίοδο επαλήθευσης (1990-91 έως 1993-94) δεν είναι εξίσου καλή όσον αφορά τις πηγές. Η αιτία θα πρέπει να αναζητηθεί όχι μόνο στις υδροκλιματικές ιδιαιτερότητες της εν λόγω περιόδου αλλά κυρίως στο γεγονός ότι τα

¹ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την διαδικασία βαθμονόμησης προέκυψαν σενάρια τα οποία έδιναν εξαιρετικά υψηλή προσαρμογή στο υδρογράφημα του Βοιωτικού Κηφισού, της τάξης του 94%. Ωστόσο, τα εν λόγω σενάρια απορρίφθηκαν καθώς έδιναν πολύ χαμηλή προσαρμογή στις αποκρίσεις των πηγών.

στοιχεία που αφορούν τον τρόπο πραγματοποίησης των απολήψεων είναι περιορισμένα και όλες οι εκτιμήσεις βασίζονται σε χονδροειδείς προσεγγίσεις. Σημειώνεται ότι το μοντέλο αποδείχτηκε εξαιρετικά ευαίσθητο όσον αφορά τις αντλήσεις που αναφέρονται στα κελιά που τροφοδοτούν τις πηγές, κάτι που είναι συνεπές με την παρατηρημένη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος.

Η επιλογή της πλέον συμβιβαστικής λύσης έγινε ελέγχοντας την προσαρμογή του μοντέλου κατά την περίοδο επαλήθευσης. Όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του Πίνακα 5.7, ελάχιστες ήταν οι περιπτώσεις που παρατηρήθηκε ικανοποιητική προσαρμογή των προσομοιωμένων υδρογραφημάτων των πηγών, σε αντίθεση με το υδρογράφημα του Βοιωτικού Κηφισού. Μετά από εξαιρετικά επίπονη προσπάθεια, εντοπίστηκε και επελέγη το σενάριο 20, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

5.5 Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης

Παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της βέλτιστης ή, για την ακρίβεια, της πλέον συμβιβαστικής βαθμονόμησης του μοντέλου, όπως προέκυψε μετά την αξιολόγηση των μαθηματικά ισοδύναμων σεναρίων του Πίνακα 5.7. Τα αποτελέσματα αναφέρονται: (α) στις παραμέτρους του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου, (β) στα κριτήρια καλής προσαρμογής, και (γ) στο υπερετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.

5.5.1 Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης επιφανειακών διεργασιών

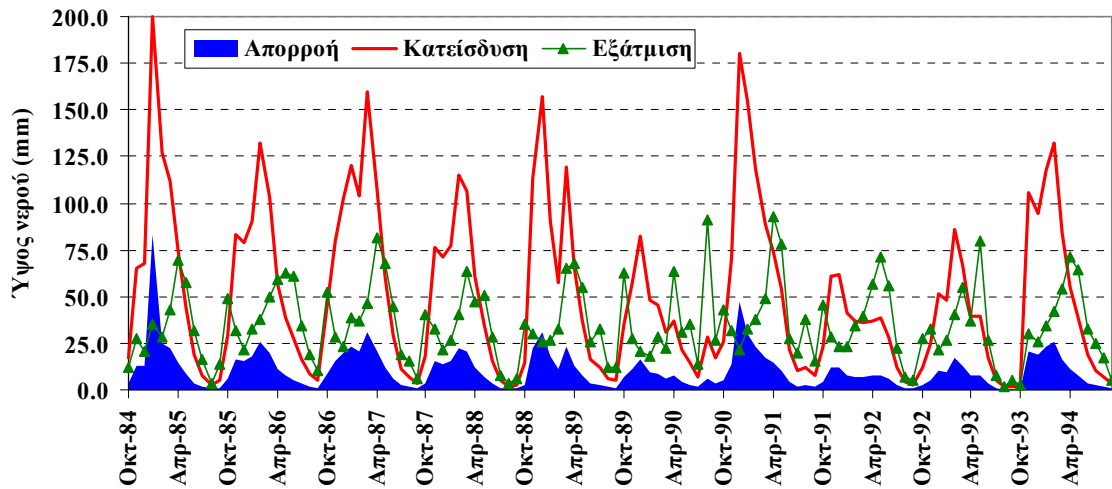
Στον Πίνακα 5.8 δίνονται οι βέλτιστες τιμές των 11 συνολικά μεταβλητών ελέγχου του μοντέλου προσομοίωσης των επιφανειακών διεργασιών της λεκάνης, ήτοι των παραμέτρων των δύο δεξαμενών συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης και των αρχικών υψών εδαφικής υγρασίας.

Πίνακας 5.8: Βέλτιστες τιμές παραμέτρων δεξαμενών συγκέντρωσης εδαφικής υγρασίας.

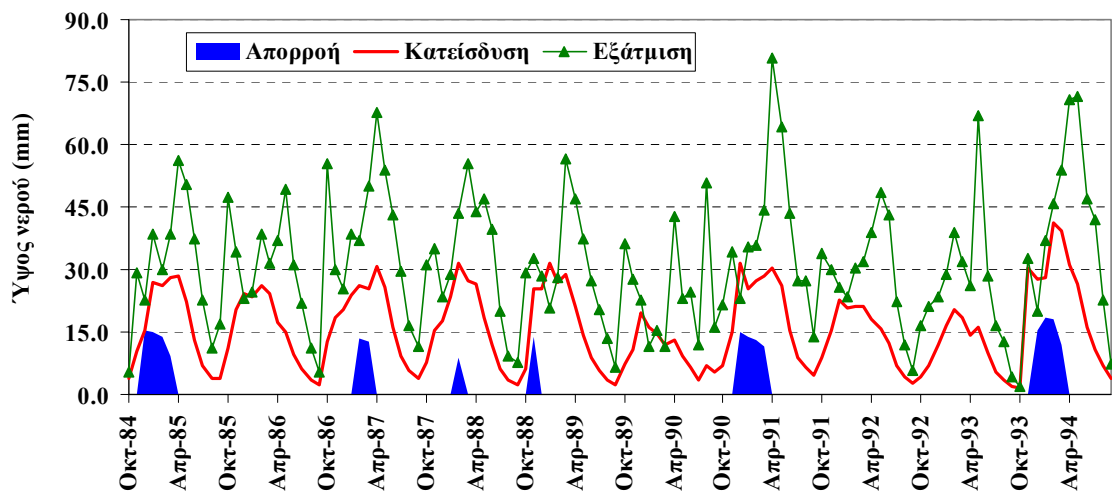
Παράμετρος	Δεξαμενή 1	Δεξαμενή 2
Ύψος κατακράτησης εδαφικής υγρασίας (m)	0.001	0.220
Χωρητικότητα δεξαμενής (m)	0.274	0.364
Συντελεστής στείρευσης υποδερμικής ροής	0.092	0.040
Συντελεστής στείρευσης κατείσδυσης	0.469	0.165
Αρχικό ύψος εδαφικής υγρασίας (m)	0.047	0.026
Άνω όριο πραγματοποίησης άμεσης εξατμοδιαπνοής	0.451	

Παρατηρείται ότι οι τιμές των παραμέτρων των δύο δεξαμενών εδαφικής υγρασίας διαφέρουν σημαντικά, κάτι που θεωρείται λογικό καθώς οι τελευταίες αναπαριστούν τις επιφανειακές υδρολογικές διεργασίες περιοχών με διαφορετικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, η δεξαμενή 1, η οποία αναφέρεται σε ορεινές περιοχές με διαπερατό υπόβαθρο (ανθρακικά πετρώματα), έχει σχετικά μικρή χωρητικότητα (274 mm) και υψηλό συντελεστή στείρευσης της κατείσδυσης (46.9%). Κατά συνέπεια, η δεξαμενή αυτή παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στην βροχόπτωση. Επιπλέον, αρκετά σημαντική είναι και η συνεισφορά της υποδερμικής ροής, η οποία τροφοδοτεί τον Βοιωτικό Κηφισό σε μόνιμη βάση (καθώς η οριζόντια οπή βρίσκεται στο ύψος πρακτικά του πυθμένα), με συντελεστή στείρευσης της τάξης του 9.2%. Η σχετικά υψηλή αυτή τιμή εξηγείται από το γεγονός ότι στην λεκάνη αναπτύσσονται και άλλες πηγές εκτός από τις κύριες που αναπαριστά το μοντέλο, και οι οποίες συνεισφέρουν στο επιφανειακό υδατικό δυναμικό της λεκάνης με αναρρύθμιση. Στο Σχήμα 5.4, όπου απεικονίζονται τα γραφήματα των χρονοσειρών απορροής, εξάτμισης και κατείσδυσης, είναι φανερό ότι η κυρίαρχη υδρολογική διεργασία στα ορεινά

τιμήματα της λεκάνης είναι η κατεΐσδυση. Σε υπερετήσια βάση (μέσος όρος δεκαετίας 1984-1994), από τα 1162.6 mm βροχής, τα 620.3 mm κατεΐσδουν (ποσοστό 53.4%), τα 418.7 mm εξατμίζονται (ποσοστό 36.0%) και τα 127.8 mm απορρέουν επιφανειακά (ποσοστό 11.0%).



Σχήμα 5.4: Χρονοσειρές απόκρισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας 1.



Σχήμα 5.5: Χρονοσειρές απόκρισης δεξαμενής εδαφικής υγρασίας 2.

Από την άλλη πλευρά, η δεξαμενή εδαφικής υγρασίας 2, η οποία αναφέρεται σε πεδινές περιοχές με ημιπερατό ή αδιαπέρατο υπόβαθρο (προσχώσεις), έχει μεγάλη χωρητικότητα (364 mm) και πολύ χαμηλότερο συντελεστή στείρευσης της κατεΐσδυσης (16.5%). Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την αποθήκευση σημαντικής ποσότητας εδαφικής υγρασίας, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας εξατμίζεται ενώ ένα μικρό ποσοστό απορρέει ή κατεΐσδύει αργά προς τον υπόγειο υδροφόρα. Πράγματι, στις πεδινές περιοχές της λεκάνης και ειδικά στην Κωπαΐδα, εξαιτίας των πολύ μικρών κλίσεων και της ανεπάρκειας του αντιπλημμυρικού δικτύου, παρατηρείται συχνά κατάκλυση μεγάλων εκτάσεων από όμβρια ύδατα, τα οποία λιμνάζουν επί μεγάλο χρονικό διάστημα και σιγά-σιγά εξατμίζονται. Σε ότι αφορά την απορροή μέσω υποδερμικής ροής, αυτή είναι αμελητέα, κάτι που επίσης θεωρείται απόλυτα λογικό, λόγω απουσίας μικρών πηγών στα πεδινά. Στο Σχήμα 5.5, όπου απεικονίζονται τα γραφήματα των χρονοσειρών απορροής, εξατμίσσης και κατεΐσδυσης, είναι φανερό ότι η κυρίαρχη υδρολογική διεργασία στα πεδινά τμήματα της λεκάνης είναι η εξατμίσση, ενώ η πραγματοποίηση απορροής είναι περιστασιακή, ήτοι μόνο σε περιπτώσεις έντονων επεισοδίων βροχής. Σε υπερετήσια

βάση, από τα 587.6 mm βροχής, τα 189.9 mm κατεισδύουν (ποσοστό 32.3%), τα 376.5 mm εξατμίζονται (ποσοστό 64.1%) και μόλις τα 22.0 mm απορρέουν επιφανειακά (ποσοστό 3.7%).

Τέλος, όσον αφορά το άνω όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής (που θεωρείται κοινό για τις δύο δεξαμενές), κυμαίνεται στα επίπεδα του 45.1%. Συνεπώς, λιγότερο από το ήμισυ της μηνιαίας βροχόπτωσης δύναται να εξατμιστεί άμεσα. Αυτό είναι απόλυτα συμβατό με τα ιστορικά δεδομένα, καθώς οι βροχοπτώσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στον μήνα, αλλά συγκεντρώνονται σε μεμονωμένα επεισόδια που, συνολικά, διαρκούν λίγες μόνο ημέρες.

5.5.2 Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων διεργασιών

Οι βέλτιστες τιμές των 17 συνολικά μεταβλητών ελέγχου του μοντέλου προσομοίωσης των υπόγειων διεργασιών της λεκάνης, ήτοι των όρων υδραυλικής αγωγιμότητας, των αρχικών σταθμών των δεξαμενών υπόγειου νερού και του πορώδους του υδροφορέα, δίνονται στους Πίνακες 5.9 και 5.10. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι εννοιολογικό, δεν έχει νόημα ο σχολιασμός των τιμών των παραμέτρων. Θα πρέπει πάντως να τονιστεί ότι η τιμή του πορώδους (14.0%) είναι σχετικά χαμηλή, ώστε να εξασφαλίζει γρήγορη απόκριση του υδροφορέα στην αλλαγή των συνθηκών υδροφορίας, κάτι που απεικονίζεται εύγλωττα στα ιστορικά υδρογραφήματα των πηγών (βλ. 5.5.3). Από την άλλη πλευρά όμως, μια τέτοια χαμηλή τιμή εξαναγκάζει το σύστημα να μεταβιβάσει πολύ γρήγορα το υπόγειο νερό διαμέσου των δεξαμενών, με συνέπεια την εμφάνιση πολύ υψηλών απωλειών προς την θάλασσα. Το χαρακτηριστικό αυτό εξετάζεται εκτενέστερα στο εδάφιο 5.5.4.

Πίνακας 5.9: Βέλτιστες τιμές όρων υδραυλικής αγωγιμότητας.

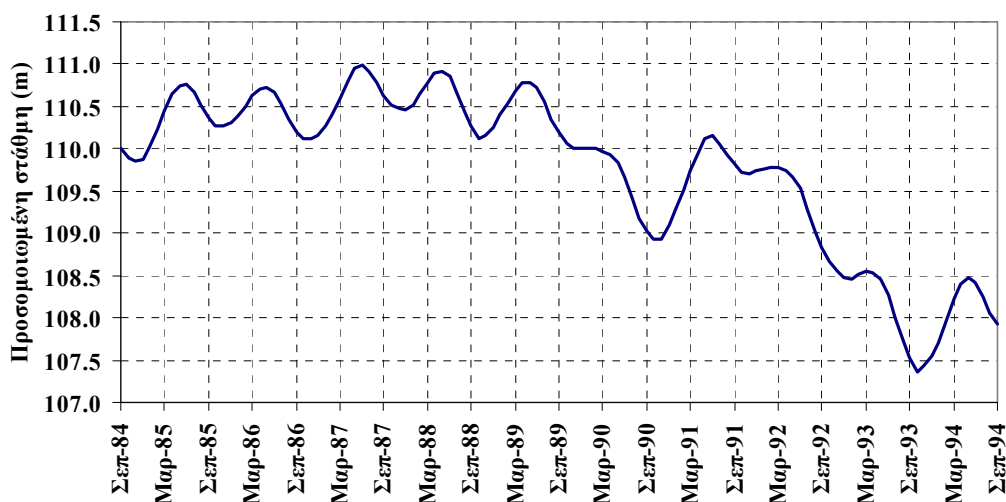
	Ανάτη δεξαμενή	Κατάτη δεξαμενή	Τιμή (m/s)
$c_x(0)$	(1, 2)	(1, 1)	0.000536
$c_x(1)$	(2, 1)	(2, 2)	0.000757
$c_x(4)$	(1, 2)	(1, 3)	0.004847
$c_x(5)$	(2, 2)	(2, 3)	0.000978
$c_x(9)$	(2, 3)	(2, 4)	0.000491
$c_y(1)$	(3, 1)	(2, 1)	0.000149
$c_y(2)$	(3, 1)	(4, 1)	0.001906
$c_y(4)$	(2, 2)	(1, 2)	0.008347
$c_y(5)$	(3, 2)	(2, 2)	0.000468
$c_y(6)$	(3, 2)	(4, 2)	0.001770
$c_y(9)$	(3, 3)	(2, 3)	0.000050
$c_y(10)$	(3, 3)	(4, 3)	0.000159

Πίνακας 5.10: Βέλτιστες τιμές λοιπών παραμέτρων μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων διεργασιών.

	Μονάδες	Τιμή
Αρχική στάθμη δεξαμενής (3, 1)	m	300.352
Αρχική στάθμη δεξαμενής (1, 2)	m	105.028
Αρχική στάθμη δεξαμενής (3, 2)	m	122.875
Αρχική στάθμη δεξαμενής (3, 3)	m	203.698
Πορώδες υδροφορέα	-	0.140

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται η προσομοιωμένη χρονοσειρά στάθμης της δεξαμενής (2, 2), η οποία είναι απόλυτα αντιπροσωπευτική της δίαιτας του υδροφορέα της πεδινής περιοχής του μέσου και κάτω ρου του Βοιωτικού Κηφισού. Πράγματι, μέχρι την εμφάνιση της έντονης ξηρασίας της περιόδου 1988-89, η διακύμανση της στάθμης είναι ομαλή. Στην συνέχεια, παρατηρείται μια σημαντική πτώση

και αμέσως μια ανάκαμψη, η οποία οφείλεται στην σχετικά υψηλή υδροφορία του έτους 1990-91. Με την εντατική όμως εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής εξαιτίας των υδρευτικών απολήψεων από τις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου, η στάθμη του υδροφορέα παρουσιάζει περαιτέρω ταπείνωση, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την στέρηση των πηγών Μαυρονερίου. Ωστόσο, κατά το τελευταίο έτος της περιόδου ελέγχου (1993-94), ο υδροφορέας δείχνει να ανακάμπτει και πάλι, χάρη στις υψηλές βροχοπτώσεις την περίοδο εκείνης.



Σχήμα 5.6: Χρονοσειρά στάθμης δεξαμενής υπόγειου νερού (2, 2).

5.5.3 Κριτήρια καλής προσαρμογής

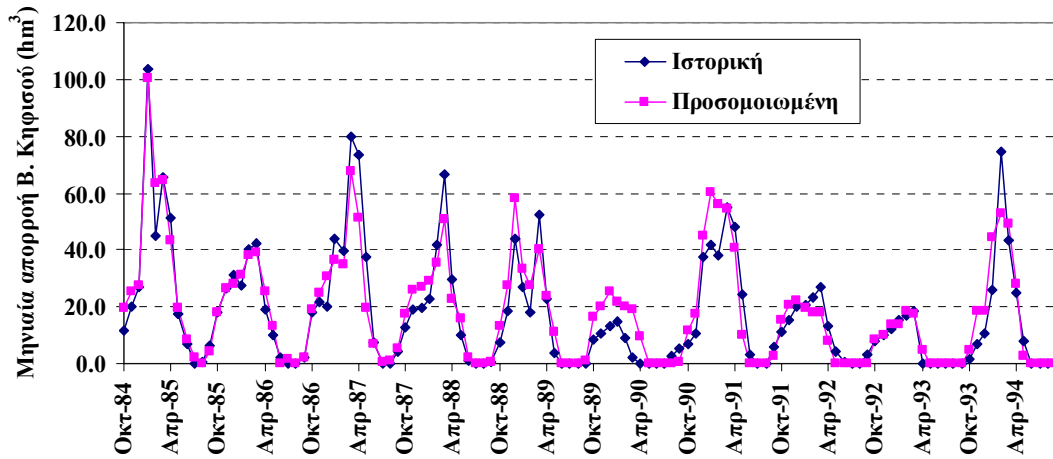
Οι τιμές των κριτηρίων καλής προσαρμογής για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου συνοψίζονται στους Πίνακες 5.11 και 5.12, αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι οι ιστορικά υδρογραφήματα των πηγών παρουσιάζουν κενά κατά την περίοδο επαλήθευσης, με συνέπεια οι τιμές των κριτηρίων να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτικές της επίδοσης του μοντέλου.

Πίνακας 5.11: Κριτήρια καλής προσαρμογής για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου (Οκτώβριος 1994 – Σεπτέμβριος 1990).

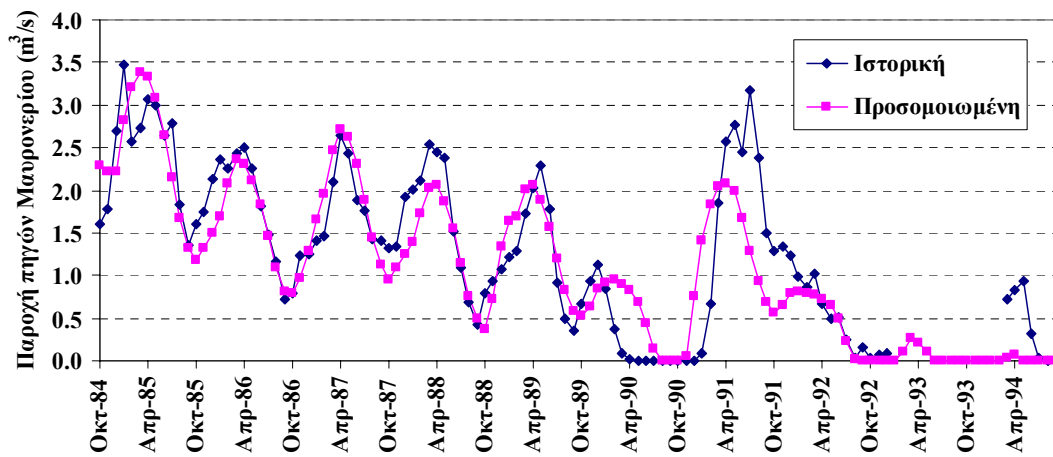
Χρονοσειρά ελέγχου	NASH	ZEROERR	BIAS
Απορροή Βοιωτικού Κηφισού	0.8873	0.0639	0.0641
Απορροή πηγών Μαυρονερίου	0.8039	0.1661	-0.0009
Απορροή πηγών Μέλανα-Πολυγύρας	0.2876	0.0000	-0.0055
Απορροή πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.7273	0.1835	-0.0019
Απορροή πηγών Έρκυνα	0.2822	0.0000	0.0350

Πίνακας 5.12: Κριτήρια καλής προσαρμογής για την περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου (Οκτώβριος 1990 – Σεπτέμβριος 1994).

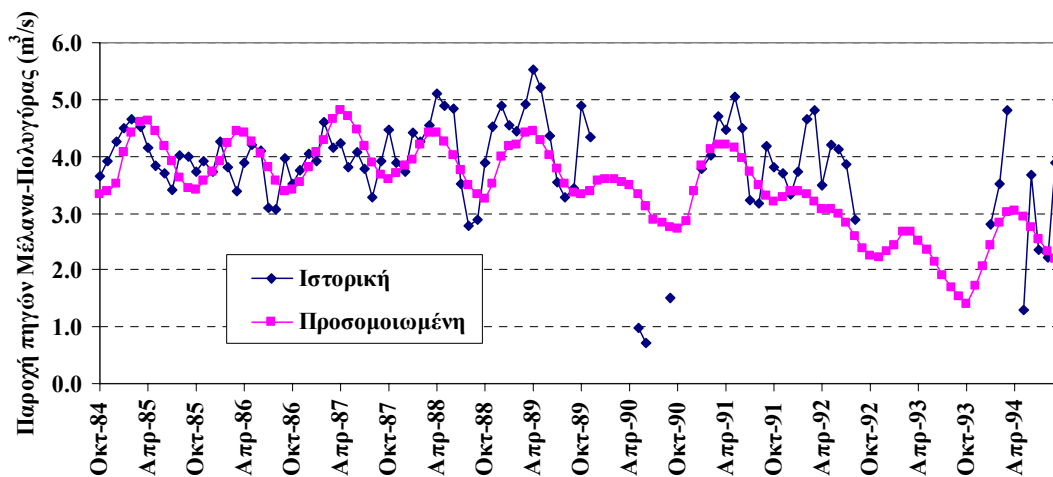
Χρονοσειρά ελέγχου	NASH	ZEROERR	BIAS
Απορροή Βοιωτικού Κηφισού	0.8237	0.0608	0.0545
Απορροή πηγών Μαυρονερίου	0.4651	0.1613	-0.2717
Απορροή πηγών Μέλανα-Πολυγύρας	-0.0830	0.0000	-0.1349
Απορροή πηγών Λιλαίας-Κεφαλόβρυσου	0.2819	0.2481	-0.3219
Απορροή πηγών Έρκυνα	0.1632	0.0000	-0.1552



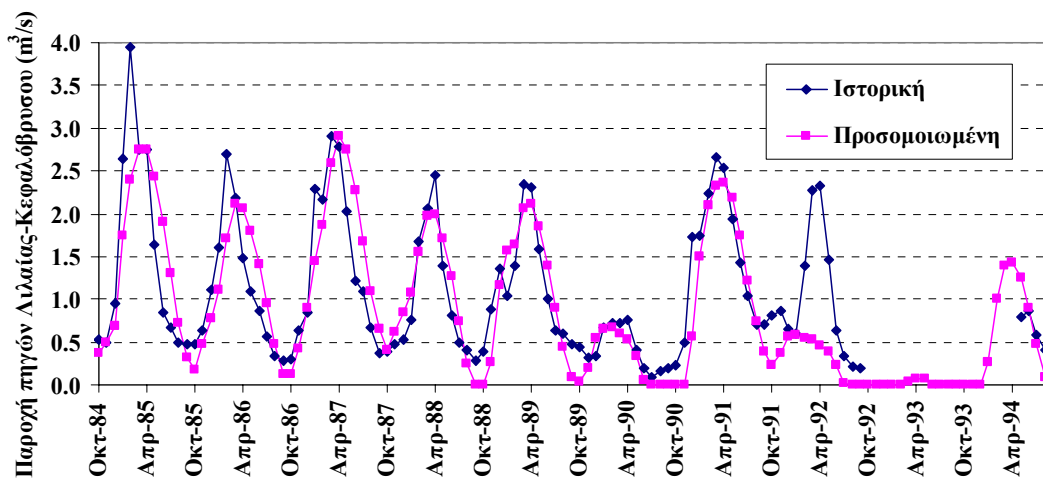
Σχήμα 5.7: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας (έξοδος λεκάνης).



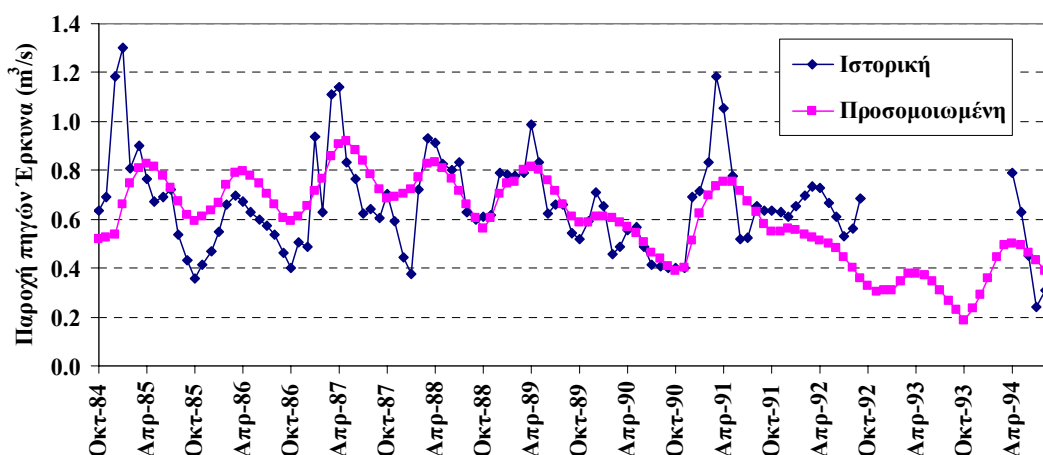
Σχήμα 5.8: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Μαυρονερίου.



Σχήμα 5.9: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Μέλανα και Πολυγύρας.



Σχήμα 5.10: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Λιλαίας και Κεφαλόβρυσου.



Σχήμα 5.11: Ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά μέσης μηνιαίας παροχής πηγών Έρκυνα.

Στα Σχήματα 5.7 έως 5.11 απεικονίζονται τα ιστορικά και προσομοιωμένα υδρογραφήματα στις πέντε θέσεις ενδιαφέροντος. Συγκρίνοντας τα υδρογραφήματα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η προσαρμογή του υδρογραφήματος του Βοιωτικού Κηφισού είναι εξαιρετική, τόσο κατά την περίοδο βαθμονόμησης (συντελεστής προσδιορισμού 89%) όσο και κατά την περίοδο επαλήθευσης (συντελεστής προσδιορισμού 82%). Το μοντέλο αναπαριστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια την επιφανειακή και πηγαία τροφοδοσία του ποταμού, που σε συνδυασμό με τις επιφανειακές αρδευτικές απολήψεις δίνει το υδρογράφημα στην έξοδο της λεκάνης. Όσον αφορά την αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς, παρατηρείται μικρή υπερεκτίμηση της μέσης τιμής κατά 6.1% (221.7 έναντι 209.0 hm³ σε ετήσια βάση), και μικρή υποεκτίμηση της τυπικής απόκλισης κατά 4.7% (19.3 έναντι 20.3 hm³ σε μηνιαία βάση).
- Η προσαρμογή του υδρογραφήματος των πηγών Μαυρονερίου είναι πολύ ικανοποιητική κατά την περίοδο βαθμονόμησης (συντελεστής προσδιορισμού 80%) και αρκετά ικανοποιητική κατά την περίοδο επαλήθευσης (συντελεστής προσδιορισμού 47%), λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη τις χονδροειδείς παραδοχές που αφορούν την κατανομή των αντλήσεων στην περιοχή του μέσου ρου. Ιδιαίτερα θετική ως προς την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου είναι η αναπαράσταση της θεαματικής ανάκαμψης των πηγών στις αρχές του 1991, μετά την προσωρινή τους στέρηση για διάστημα λίγων μηνών.

- Η προσαρμογή του υδρογραφήματος των πηγών Μέλανα και Πολυγύρας είναι φαινομενικά μέτρια κατά την περίοδο βαθμονόμησης (συντελεστής προσδιορισμού 30%) και κακή κατά την περίοδο επαλήθευσης (ελαφρά αρνητικός συντελεστής προσδιορισμού). Στην πραγματικότητα όμως, η επίδοση του μοντέλου κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική εάν ληφθεί υπόψη ότι οι ιστορικές χρονοσειρές παροχής των πηγών παρουσιάζουν πρακτικά μηδενική συσχέτιση με την βροχόπτωση¹.
- Η προσαρμογή του υδρογραφήματος των πηγών Λιλαίας και Κεφαλόβρυσου είναι πολύ ικανοποιητική κατά την περίοδο βαθμονόμησης (συντελεστής προσδιορισμού 73%) αλλά όχι τόσο καλή κατά την περίοδο επαλήθευσης (συντελεστής προσδιορισμού 28%). Ωστόσο, η χαμηλή αυτή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στους εαρινούς μήνες του έτους 1992, το οποίο χαρακτηρίστηκε από χαμηλές βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με έντονες χιονοπτώσεις (βλ. 3.2.6). Εάν ήταν γνωστή η συνεισφορά της χιονόπτωσης, η προσαρμογή του μοντέλου θα ήταν αναμφισβήτητα πολύ καλύτερη.
- Τέλος, η προσαρμογή του υδρογραφήματος των πηγών Έρκυνα είναι μέτρια τόσο κατά την περίοδο βαθμονόμησης (συντελεστής προσδιορισμού 28%) όσο και κατά την περίοδο επαλήθευσης (συντελεστής προσδιορισμού 16%). Βεβαίως, πρόκειται για πηγές μειωμένης σημασίας, καθώς η συνεισφορά τους στην απορροή του Βοιωτικού Κηφισού είναι μικρή.

5.5.4 Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης

Στον Πίνακα 5.13 δίνεται το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης (επιφανειακό και υπόγειο), το οποίο αναφέρεται στο σύνολο της δεκαετίας ελέγχου.

Από τα 1575.0 hm³ του συνολικού όγκου της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη, τα 796.5 hm³ εξατμίζονται (ποσοστό 50.6%), τα 668.4 hm³ κατεισδύουν στον υπόγειο υδροφόρα (ποσοστό 42.4%), και μόλις τα 113.9 hm³ απορρέουν επιφανειακά (ποσοστό 7.2%). Συνεπώς, ο συντελεστής επιφανειακής απορροής της λεκάνης είναι εξαιρετικά χαμηλός, κάτι που βεβαίως οφείλεται στις γεωμορφολογικές ιδιαιτερότητες της περιοχής (εκτεταμένο καρστικό υπόβαθρο, ήπιες κλίσεις σε μεγάλο τμήμα της λεκάνης).

Από τα 668.4 hm³ της κατεισδυσής, τα 189.8 hm³, «επιστρέφουν» στην λεκάνη με την μορφή πηγαίας απορροής (ποσοστό 28.5%). Συνεπώς, η μέση ετήσια φυσικοποιημένη απορροή του Βοιωτικού Κηφισού ανέρχεται σε 303.7 hm³ (ή ποσοστό 19.3% επί την μέσης βροχόπτωσης), εκ των οποίων το 62.5% προέρχεται από πηγές. Δεδομένου ότι οι αρδευτικές απολήψεις κατά την περίοδο ελέγχου εκτιμώνται σε 82.0 hm³, η απορροή που φτάνει στην έξοδο της λεκάνης και τροφοδοτεί τελικά την Υλίκη ανέρχεται σε 221.7 hm³.

Οι απολήψεις από υπόγεια νερά κατά την περίοδο ελέγχου εκτιμώνται 123.1 hm³, στις οποίες περιλαμβάνονται και οι εντατικές αντλήσεις για την ενίσχυση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας των ετών 1990-1994. Οι εν λόγω αντλήσεις φαίνεται ότι προκάλεσαν υπερεκμετάλλευση του υδροφόρα, όπως καταδεικνύει η σημαντική διαφορά στην αποθήκευση υπόγειου νερού (θα ανέμενε κανείς πρακτικά μηδενική διαφορά στο ισοζύγιο των υπόγειων νερών, εφόσον υπήρχε κανονική εκμετάλλευση του υδροφόρα και ομαλή δίαιτα των βροχοπτώσεων).

Ωστόσο, το σημαντικότερο μέρος κατεισδυσής, που ανέρχεται σε 411.4 hm³ ή ποσοστό 61.5%, μεταγγίζεται υπογείως εκτός λεκάνης, καταλήγοντας στην θάλασσα. Συνεπώς, από τα 1575.0 hm³ της βροχόπτωσης, τα 1207.9 hm³, ήτοι ποσοστό 76.7%, μετασχηματίζονται σε υδρολογικές απώλειες που

¹ Σημειώνεται ότι ο αντίστοιχος συντελεστής προσδιορισμού, όπως προέκυψε στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου με εφαρμογή του εμπορικού πακέτου MODFLOW, που χρησιμοποιεί πολύ πιο λεπτομερή χωρική κλίμακα και πολύ περισσότερες παραμέτρους, δεν ξεπερνά το 10% (Ναλμπάντης και Ρόζος, 2000)

κατανέμονται σε εξάτμιση και διαφυγές, με αναλογία 2:1 περίπου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για την πραγματική κατανομή των υδρολογικών απωλειών δεν μπορούμε να είμαστε κατηγορηματικοί. Τα περισσότερα σενάρια βαθμονόμησης έδωσαν αρκετά μικρότερες εκτιμήσεις όσον αφορά τις υπόγειες διαφυγές νερού, ανεβάζοντας το ποσοστό της εξάτμισης στα επίπεδα του 60-65%. Ωστόσο, η μείωση των διαφυγών προς την θάλασσα, η οποία επετεύχθη με κατάλληλη ρύθμιση των ορίων των παραμέτρων του υπόγειου μοντέλου (μικρότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, υψηλότερο πορώδες), είχε δυσμενείς συνέπειες όσον αφορά την προσαρμογή των υδρογραφημάτων των πηγών, τόσο κατά την περίοδο βαθμονόμησης όσο και (κυρίως) κατά την περίοδο επαλήθευσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το υπόγειο σύστημα αποκρίνεται με μεγάλη ταχύτητα στην βροχόπτωση, οπότε είναι λογικό να αναμένονται σχετικά υψηλές ταχύτητες ροής και, ως συνέπεια αυτού, μεγάλες διαφυγές προς την θάλασσα. Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει αοριστία του προβλήματος καθώς δεν είναι δυνατή η έστω και κατά προσέγγιση εκτίμηση των διαφυγών βάσει μετρήσεων.

Πίνακας 5.13: Μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1984-85 έως 1993-94 (hm³).

Συνιστώσα ισοζυγίου	Μέση ετήσια τιμή	Ποσοστό
<i>Ισοζύγιο επιφανειακών υδατικών πόρων</i>		
Βροχόπτωση	1575.0	1.000
Εξατμοδιαπνοή	796.5	0.506
Επιφανειακή απορροή	113.9	0.072
Κατείσδυση	668.4	0.424
<i>Ισοζύγιο υπόγειων υδατικών πόρων</i>		
Κατείσδυση	668.4	1.000
Διαφυγές εκτός λεκάνης	411.4	0.615
Απορροή πηγών	189.8	0.284
Αντλήσεις	123.1	0.184
Διαφορά αποθήκευσης	-55.9	-0.084
<i>Ισοζύγιο αρδευτικών και υδρευτικών απολήψεων</i>		
Απολήψεις από επιφανειακά νερά	82.0	0.400
Αντλήσεις υπόγειων νερών	123.1	0.600
Σύνολο απολήψεων	205.1	1.000
<i>Ισοζύγιο υδρολογικών απωλειών</i>		
Εξατμοδιαπνοή	796.5	0.659
Διαφυγές εκτός λεκάνης	411.4	0.341
Σύνολο απωλειών	1207.9	1.000
<i>Ισοζύγιο απορροής Βοιωτικού Κηφισού</i>		
Επιφανειακή απορροή	113.9	
Απορροή πηγών	189.8	
Αρδευτικές απολήψεις	82.0	
Καθαρή απορροή	221.7	

6 Προετοιμασία μοντέλου για επιχειρησιακή χρήση

6.1 Τοποθέτηση του προβλήματος της επιχειρησιακής χρήσης - Η έννοια της στοχαστικής προσομοίωσης και πρόγνωσης

Η επιχειρησιακή χρήση του συστήματος που αναπτύχθηκε 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 η λεκάνη απορροής με τα συναρτώμενα υδραυλικά έργα), 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 την εφαρμογή 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 *Κασταλία*, το οποίο περιγράφεται στο οικείο τεύχος (*Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2004*). Συνοπτικά, το πρόγραμμα εκτελεί τα ακόλουθα βήματα υπολογισμών που είναι απαραίτητα για το υπό μελέτη σύστημα:

Βήμα 1: Στατιστική ανάλυση ιστορικών δεδομένων ύψους επιφανειακής βροχόπτωσης στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και υπολογισμός στατιστικών χαρακτηριστικών ιστορικών δεδομένων βροχόπτωσης.

Βήμα 2: Εκτίμηση παραμέτρων στοχαστικών μοντέλων γέννησης συνθετικών χρονοσειρών.

Βήμα 3: Γέννηση 200 ετήσιων συνθετικών χρονοσειρών, μήκους 10 ετών.

Βήμα 4: Γέννηση μηνιαίων συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης με επιμερισμό των ετήσιων.

Βήμα 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 πολλών μεταβλητών και δύο επιπέδων. 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 (1988-94).

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 πληροφορικού συστήματος 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 των υδρολογικών διεργασιών στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, πραγματοποιείται ένας αριθμός προσομοιώσεων (ίσος με τον αριθμό των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης) και παράγονται συνθετικές χρονοσειρές παροχής των πηγών εκφόρτισης του υδροφορέα και στάθμης υπόγειου νερού στις δεξαμενές υπόγειου νερού του μοντέλου υπόγειας ροής. Για την αξιοποίηση του συστήματος που αναπτύχθηκε σε επιχειρησιακή βάση, είναι απαραίτητη ή, έστω και όχι αυτόματη, σύνδεση με το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων *Υδρονομέας* (Καραβοκυρός κ.ά., 2004) καθόσον:

- ο *Υδρονομέας* εκτιμά, με βάση την ζήτηση της Αθήνας από το συνολικό υδροδοτικό σύστημα, την απόληψη από τις γεωτρήσεις της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού, και
- οποιαδήποτε απόληψη από τις γεωτρήσεις επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο του υδροφορέα και κατά συνέπεια και την παροχή των πηγών της λεκάνης. Η τελευταία, ως σημαντικό τμήμα της εισροής στην Υλίκη, καθορίζει, προφανώς, το υδατικό δυναμικό της ενιαίας λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης.

Στην παρούσα φάση του ερευνητικού έργου έγινε σύνδεση, με έμμεσο τρόπο, του υπό μελέτη συστήματος με τον *Υδρονομέα* όπως θα αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 6.3.

6.2 Ρύθμιση αρχικών συνθηκών

Η αναφορά σε μελλοντική χρονική περίοδο με την οποία συναρτάται η επιχειρησιακή χρήση του συστήματος θέτει ορισμένα προβλήματα στην διαχείριση των οριακών συνθηκών. Αιτία γι' αυτό είναι το γεγονός ότι μεγέθη των οριακών συνθηκών θεωρήθηκαν ως μεταβλητές ελέγχου στη φάση της βαθμονόμησης των συνδυασμένων μοντέλων του συστήματος (βλ. 5.4.1). Τα εν λόγω μεγέθη είναι:

- Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης σε σταθμούς της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και παροχής του ποταμού και των πηγών, για τους τελευταίους μήνες πριν τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής.
- Μηνιαίες τιμές παροχής του ποταμού του Βοιωτικού Κηφισού και των κύριων καρστικών πηγών (Μέλανα, Μαυρονερίου, Πολυγύρας, Άνω Ρου, Έρκυνα), για τους τελευταίους μήνες πριν τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής.
- Τιμές αποθεμάτων εδαφικής υγρασίας στις δεξαμενές του μοντέλου των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, για το τέλος του τελευταίου μήνα πριν τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής.
- Τιμές σταθμών (ή αποθεμάτων) στις δεξαμενές του μοντέλου των υπόγειων υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, για το τέλος του τελευταίου μήνα πριν τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής.

Τα δεδομένα των πρώτων δύο κατηγοριών απαιτούνται για τη στοχαστική πρόγνωση μέσω του συστήματος *Κασταλία*, ενώ τα δεδομένα των υπολοίπων δύο κατηγοριών χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση των μοντέλων του συστήματος της υδρολογικής προσομοίωσης. Για τα δεδομένα των δύο τελευταίων κατηγοριών δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν μετρήσεις. Για το λόγο αυτό, γίνονται εκτιμήσεις ως εξής:

Βήμα 1: Γίνεται αρχικοποίηση των μοντέλων του συστήματος της υδρολογικής προσομοίωσης για μια χρονική στιγμή προγενέστερη του χρόνου έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής, η οποία αναφέρεται ως χρόνος έναρξης της αρχικοποίησης. Αυτό γίνεται με θεώρηση εύλογων αλλά αυθαίρετων αρχικών τιμών των αποθεμάτων (ή στάθμης) των δεξαμενών των μοντέλων.

Βήμα 2: Με βάση τα ιστορικά δεδομένα των υδρολογικών εισόδων των μοντέλων και τις ιστορικές απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά, πραγματοποιείται προσομοίωση της λειτουργίας του υδροσυστήματος της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για το χρονικό διάστημα από τον χρόνο έναρξης της αρχικοποίησης ως τον χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής εφαρμογής. Η προσομοίωση καταλήγει σε εκτίμηση των ζητούμενων αρχικών συνθηκών.

6.3 Ένταξη του συστήματος στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων – Σύνδεση με τα προγράμματα Κασταλία και Υδρονομέας

Στο παρόν έργο δεν πραγματοποιήθηκε ολοκληρωμένη ένταξη του συστήματος υδρολογικής προσομοίωσης στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων *Υδρονομέας*. Η σύνδεση, όμως, των δύο συστημάτων πραγματοποιήθηκε με έμμεσο τρόπο με την κατάρτιση κατάλληλης μεθοδολογίας συνδυασμένης χρήσης των δύο συστημάτων. Στη ουσία πρόκειται για συνδυασμένη χρήση των τριών συστημάτων της *Κασταλίας*, του *Υδρονομέα* και του συστήματος υδρολογικής προσομοίωσης.

Τα βήματα των υπολογισμών έχουν ως εξής:

Βήμα 1: Για επιλεγμένο χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής λειτουργίας – που, σε πραγματικό χρόνο, θα είναι η αρχή του παρόντος μήνα – γίνεται, μέσω της *Κασταλίας*, στοχαστική πρόγνωση των μελλοντικών βροχοπτώσεων των ΜΥΑ του μοντέλου επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών για 10 μελλοντικά έτη (200 σενάρια πρόγνωσης). Ταυτόχρονα, γίνεται στοχαστική πρόγνωση των μελλοντικών εισροών, ήτοι της απορροής και βροχόπτωσης, των ταμιευτήρων Μόρνου, Ευήνου, Υλίκης και Μαραθώνα.

Βήμα 2: Για τον ίδιο χρόνο έναρξης της επιχειρησιακής λειτουργίας γίνεται αρχικοποίηση των μοντέλων των υδρολογικών διεργασιών, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 6.2. Επιπλέον, ορίζονται οι επίκαιρες στάθμες των ταμιευτήρων, που αποτελούν στοιχείο εισόδου του *Υδρονομέα*.

Βήμα 3: Για τον χρονικό ορίζοντα των 10 ετών καθορίζονται οι ζητήσεις για κάθε χρήση νερού. Η ζήτηση για άρδευση θεωρείται γνωστή, ενώ η ζήτηση για ύδρευση της Αθήνας που επιβάλλεται στις γεωτρήσεις Βασιλικών-Παρορίου θεωρείται αρχικά μηδενική.

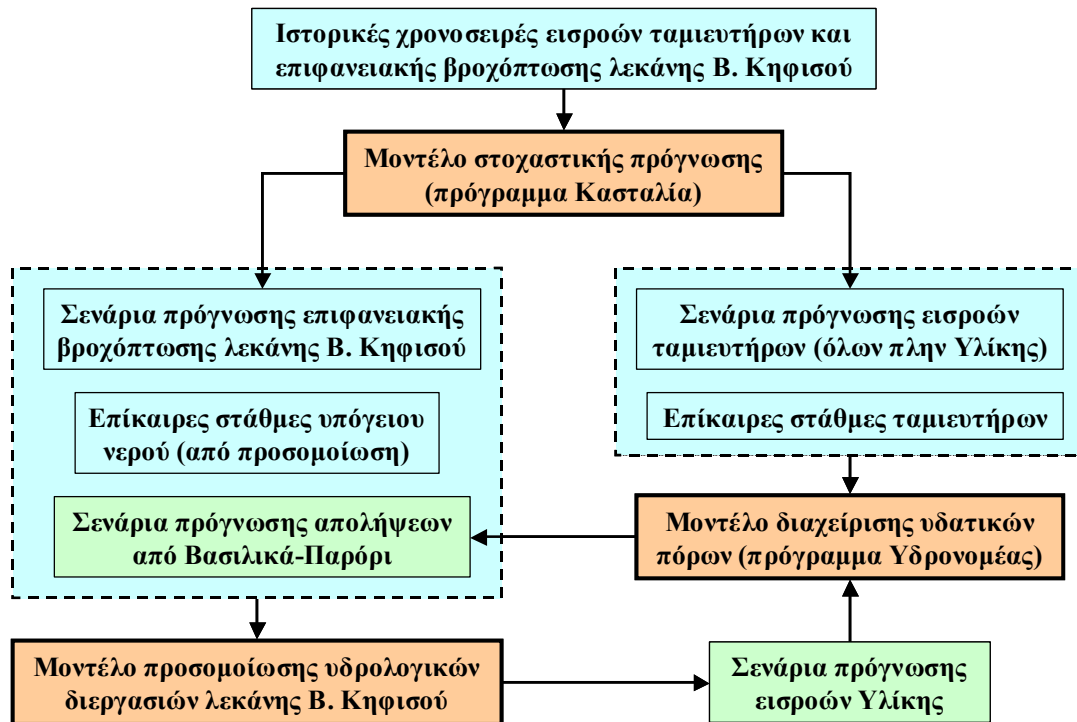
Βήμα 4: Τρέχει το σύστημα υδρολογικής προσομοίωσης για όλες τις χρονοσειρές μήκους 10 ετών και παράγει τα αντίστοιχα σενάρια εισροών στην Υλίκη (σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 7.4, οι εισροές στην Υλίκη προκύπτουν με προσαύξηση κατά 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας).

Βήμα 5: Τα εν λόγω σενάρια, μαζί με τα σενάρια εισροών των υπόλοιπων ταμιευτήρων που έχουν παραχθεί στο βήμα 1, εισάγονται στον *Υδρονομέα*, ο οποίος αναζητά τους βέλτιστους κανόνες διαχείρισης του υδροσυστήματος, βάσει των οποίων πραγματοποιεί την κατανομή των απολήψεων από όλους τους υδατικούς πόρους, μεταξύ των οποίων και τις υδρευτικές γεωτρήσεις της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

Βήμα 6: Οι απολήψεις αυτές εισάγονται στο σύστημα υδρολογικής προσομοίωσης το οποίο τρέχει εκ νέου με επανάληψη του βήματος 4 και στη συνέχεια του βήματος 5, στο οποίο ο *Υδρονομέας* δέχεται τροποποιημένες (προφανώς χαμηλότερες), εισροές στην Υλίκη.

Βήμα 7: Η διαδικασία (βήματα 4-6) επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση. Αυτή ελέγχεται με υπολογισμό ενός αριθμητικού κριτηρίου που είναι η μέγιστη, για όλους τους μήνες της στοχαστικής πρόγνωσης, ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Ως ικανοποιητική τιμή του κριτηρίου λαμβάνεται το 10%.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η πορεία της επιχειρησιακής εφαρμογής που περιγράφηκε πιο πάνω.



Σχήμα 6.1: Λογικό διάγραμμα διαδικασίας επιχειρησιακής εφαρμογής του συστήματος προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

7 Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών Υλίκης

7.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάστηκε διεξοδικά το ζήτημα της τροφοδοσίας της Υλίκης μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας, με τελικό προϊόν την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού και διαχείρισης των υδατικών της πόρων. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι εργασίες που αναφέρονται στην διερεύνηση των υπόλοιπων υδρολογικών διεργασιών της Υλίκης, με έμφαση στην μοντελοποίηση των υπόγειων διαφυγών της.

Ο προσδιορισμός των διαφυγών βασίστηκε στην κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης. Με δεδομένα τις εισροές, εκροές και απόθεμα της λίμνης είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ο όγκος των απωλειών. Η συσχέτιση των απωλειών με κάποιο άλλο χαρακτηριστικό της λίμνης, όπως η στάθμη, είναι αναγκαία για την πληρότητα της εκτίμησης αυτής και την δυνατότητα μελλοντικών προβλέψεων. Στην παρούσα μελέτη, αρχικά προσδιορίστηκαν οι μηνιαίες τιμές των απωλειών και της στάθμης. Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση του δείγματος, με στόχο την άμβλυνση των αβεβαιοτήτων που οφείλονται σε συστηματικά ή άλλα σφάλματα. Το τελικό δείγμα χρησιμοποιήθηκε ως στατιστική πληροφορία για την κατάρτιση αναλυτικών σχέσεων στάθμης-απωλειών. Οι σχέσεις που προέκυψαν θεωρούνται αρκετά πιο αξιόπιστες σε σχέση με παλιότερες προσεγγίσεις, όπως υποδηλώνει η αρκετά χαμηλότερη τιμή του τυπικού σφάλματος. Επιπλέον, διερευνήθηκε η δυνατότητα εισαγωγής περαιτέρω επεξηγηματικών μεταβλητών, οι οποίες σχετίζονται, έστω και έμμεσα, με την πιεζομετρία της περιοχής γύρω από την Υλίκη, χωρίς ωστόσο να προκύψει κάποιο σημαντικό συμπέρασμα.

Στα πλαίσια του έργου, επιχειρήθηκε ακόμη η μοντελοποίηση των εισροών της Υλίκης από την απορροή της τοπικής της λεκάνης. Βεβαίως, η πολυπλοκότητα του φυσικού συστήματος σε συνδυασμό με την έλλειψη αξιοποιήσιμης πληροφορίας, δεν επέτρεψε την εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων. Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η διατήρηση της υφιστάμενης προσέγγισης, με μια μικρή βελτίωση για τους θερινούς μήνες.

7.2 Περιοχή μελέτης και δεδομένα

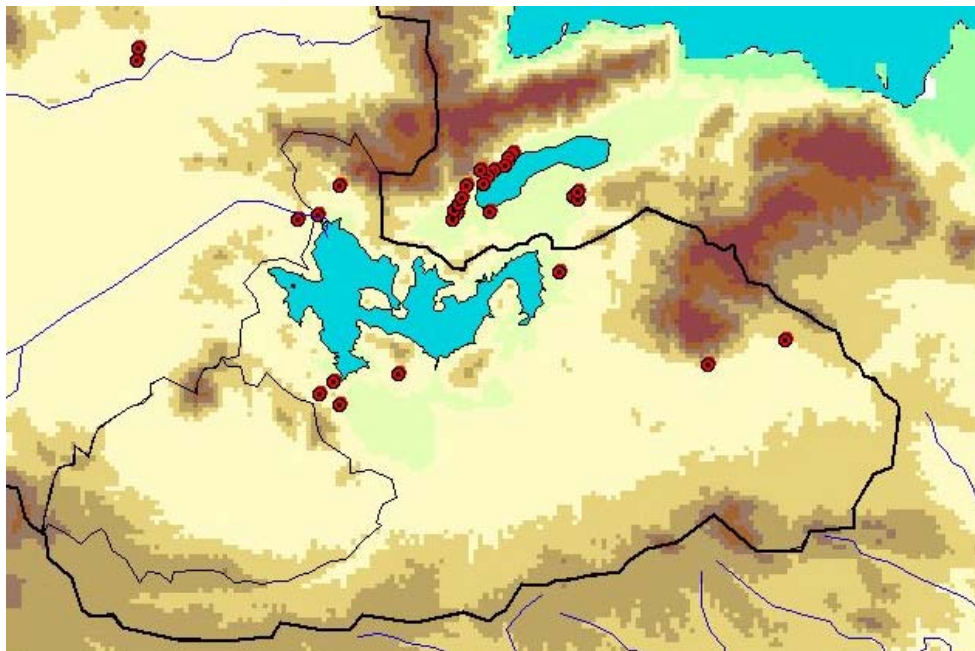
7.2.1 Φυσιογραφία περιοχής μελέτης

Ως περιοχή μελέτης νοείται η λίμνη Υλίκη και η λεκάνη απορροής της, στην οποία θεωρείται ότι ανήκει και η κλειστή λεκάνη των Βαγίων (Σχήμα 7.1).

Η λεκάνη απορροής της Υλίκης ορίζεται βόρεια από τους λόφους Φτελιά (+312 m), Ακραιφνιο (+558 m) και Κλεφτολήμερο, και ανατολικά από τους λόφους που χωρίζουν την Υλίκη από την Παραλίμνη. Ο υδροκρίτης της νότια και ανατολικά ακολουθεί τις παρειές του όρους Κτυπά (+836 m), ενώ νότια ακολουθεί τις κορυφογραμμές σχετικά χαμηλών υψωμάτων (+255 έως +612 m) μέχρι την Θήβα και τους λόφους που περικλείουν την λεκάνη απορροής του Ασωπού. Στην συνέχεια, από τα νοτιοανατολικά ακολουθεί τις κορυφές Κοτσιλιά (+414 m) και Φαγά (+565 m), ενώ από τα δυτικά η λεκάνη οριοθετείται από τους λόφους που χωρίζουν την Υλίκη από την Κωπαΐδα, όπου και η θέση της σήραγγας Καρδίτσας. Το συνολικό εμβαδόν της λεκάνης είναι 424.0 km² (συμπεριλαμβανομένης και

της λεκάνης των Βαγίων), ενώ το μέσο υψόμετρό της ανέρχεται σε 201.4 m. Τα κύρια υδατορεύματα της λεκάνης είναι το Καναβάρι και ο Καλαμίτης, τα οποία συλλέγουν την επιφανειακή απορροή της λεκάνης με τελικό αποδέκτη την Υλίκη.

Νοτιοδυτικά της λίμνης βρίσκεται η κλειστή λεκάνη των Βαγίων, συνολικής έκτασης 82.9 km². Η εν λόγω λεκάνη συνορεύει βόρεια και ανατολικά με την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, δυτικά με την λεκάνη της Υλίκης και νότια με την λεκάνη του Ασωπού. Το υψηλό τμήμα της, έκτασης 47.5 km², αποχετεύεται μέσω τεσσάρων τάφρων που έχουν διανοιχτεί στην περιφέρεια του έλους Φαγά. Οι εν λόγω τάφροι τροφοδοτούν την Υλίκη, μέσω της διώρυγας τέλματος και του ρέματος Καναβάρι. Το υπόλοιπο, χαμηλό, τμήμα της λεκάνης αποχετεύεται βραδέως μέσω των καταβοθρών του Τενερικού πεδίου, που εικάζεται ότι τροφοδοτούν υπογείως την Υλίκη (Λαδόπουλος και Χωραφάς, 1974).



Σχήμα 7.1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους περιοχής μελέτης, όπου φαίνονται τα όρια των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού, Υλίκης και Βαγίων (κλειστή λεκάνη, κάτω αριστερά) και οι λίμνες Υλίκη και Παραλίμνη. Με κύκλο απεικονίζονται οι κύριες γεωτρήσεις.

7.2.2 Βροχομετρικοί σταθμοί

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης λειτουργούν τέσσερις βροχομετρικοί σταθμοί (Αλιάρτος, Μουρίκι, Τανάγρα, Καλλιθέα), ενώ τον Ιούλιο του 2002 τέθηκε σε λειτουργία και ο αυτόματος τηλεμετρικός σταθμός της ΕΥΔΑΠ στην Υλίκη. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών δίνονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών περιοχής Υλίκης.

Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Διαθέσιμο δείγμα	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Αλιάρτος ⁽¹⁾	ΕΜΥ	110	1/1907 – 12/2000	576.2
Μουρίκι	ΥΠΕΧΩΔΕ	85	3/1958 – 9/2002	447.4
Τανάγρα	ΕΜΥ	139	10/1956 – 7/2001	453.5
Καλλιθέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	333	12/1954 – 12/2000	595.9
Υλίκη	ΕΥΔΑΠ	90	7/2002 – 12/2003	

(1) Από τα τέλη του έτους 2000, η λειτουργία του βροχομετρικού σταθμού Αλιάρτου, που είναι ο παλιότερος της περιοχής μελέτης και από τους παλιότερους στην Ελλάδα, έχει ουσιαστικά διακοπεί.

Με βάση με την διερεύνηση (έλεγχος ομογένειας) που πραγματοποιήθηκε κατά την πρώτη φάση του έργου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2000), ο σταθμός Καλλιθέας παρουσιάζει πολύ κακή συσχέτιση με τους γειτονικούς σταθμούς Τανάγρας και Μουρικίου, και ως εκ τούτου δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος. Χαμηλή συσχέτιση με την Τανάγρα παρουσιάζει και ο σταθμός Μουρικίου, που επιπλέον είναι τοποθετημένος σε ακατάλληλη θέση (κάτω από υψηλά δέντρα). Κατά συνέπεια, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα των σταθμών Αλιάρτου και Τανάγρας, παρόλο που κανένας από τους δύο δεν ανήκει υδρολογικά στην περιοχή μελέτης (ο σταθμός Αλιάρτου ανήκει στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, ενώ αυτός της Τανάγρας στην λεκάνη του Ασωπού).

7.2.3 Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης

Η επιφανειακή βροχόπτωση στην λεκάνη της Υλίκης εκτιμήθηκε ως ο μέσος όρος της σημειακής βροχόπτωσης των δύο σταθμών. Τα βασικά στατιστικά μεγέθη του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 7.2. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της κοινής περιόδου λειτουργίας τους, ήτοι τα υδρολογικά έτη 1955-57 έως 1999-00, η μέση ετήσια βροχόπτωση στην λεκάνη ανέρχεται σε 518.3 mm, είναι δηλαδή αρκετά χαμηλότερη από την μέση ετήσια βροχόπτωση της πεδινής ζώνης της γειτονικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού (Πίνακας 3.7).

Πίνακας 7.2: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης λεκάνης Υλίκης για την περίοδο 1955-57 έως 1999-00 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	59.1	68.0	84.0	73.3	58.1	64.2	31.5	26.6	14.0	7.0	10.9	21.7	518.3
Τυπ. απόκλ.	49.2	36.7	50.1	46.2	35.6	35.7	27.7	20.8	15.0	9.5	15.4	25.5	109.5
Μέγιστο	184.8	177.0	200.8	199.4	146.1	171.8	115.9	76.1	64.9	39.8	70.1	119.8	716.0
Ελάχιστο	0.0	12.0	20.5	3.6	1.6	5.5	2.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	283.0

7.2.4 Δεδομένα υπόγειας υδρολογίας

Στην λεκάνη της Υλίκης έχουν διανοιχτεί τέσσερις ομάδες γεωτρήσεων, στις περιοχές Μουρικίου-Υπάτου, Ούγγρων-Παραλίμνης, ΝΔ Υλίκης και Ταξιαρχών (Σχήμα 7.1). Τα βασικά χαρακτηριστικά των εν λόγω γεωτρήσεων δίνονται στον Πίνακα 7.3. Οι γεωτρήσεις διανοίχτηκαν την περίοδο 1990-1991 από την ΕΥΔΑΠ, με σκοπό να εξασφαλίσουν επιπλέον υδατικούς πόρους για την ύδρευση της Αθήνας. Αρχικά, οι γεωτρήσεις αξιοποιήθηκαν εντατικά, αποδίδοντας συνολικά 9.9 hm³ το 1991, 42.2 hm³ το 1992, 59.1 hm³ το 1993 και 54.3 hm³ το 1994. Έκτοτε, οι γεωτρήσεις λειτούργησαν σε ελάχιστες περιπτώσεις, με εξαίρεση αυτές των Ούγγρων που χρησιμοποιούνται συστηματικά για ύδρευση της Χαλκίδας.

Η σκοπιμότητα της χρήσης των γεωτρήσεων Ταξιαρχών, Μουρικίου-Υπάτου και ΝΔ Υλίκης είναι αμφισβητούμενη. Από την μία πλευρά θεωρείται πως οι ποσότητες που αντλούνται προέρχονται από τις διαφυγές της Υλίκης (οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση νερού που έτσι κι αλλιώς θα κατέληγε στην θάλασσα), από την άλλη πλευρά όμως φαίνεται πως η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνει την κλίση του υδραυλικού φορτίου, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των διαφυγών. Το ζήτημα αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στο εδάφιο 7.3.4. Από διερεύνηση που έχει πραγματοποιήσει ο Ρόζος (1997), προκύπτει ότι εξαίρεση αποτελεί η γεώτρηση ΥΜ3, η οποία παρουσιάζει περί τα 11 m υψηλότερη μέση στάθμη ηρεμίας από αυτή της Υλίκης. Ωστόσο, όταν αντλείται με παροχή 4560 m³/ημέρα, η μέση στάθμη είναι περί τα 10 m κάτω από την στάθμη της Υλίκης. Μια κατά προσέγγιση επιθυμητή παροχή είναι τα 2280 m³/ημέρα, που αντιστοιχεί σε 0.8 hm³/έτος.

Πίνακας 7.3: Γεωτρήσεις λεκάνης Υλίκης που ανήκουν στην ΕΥΔΑΠ.

Όνομα	Περιοχή	Απόλυτο υψόμετρο εδάφους (m)	Παροχή εκμετάλλευσης (m ³ /s)
ΥΥΣ2	Μουρίκι-Υπατο	179	0.03
ΥΜ3	Μουρίκι-Υπατο	92	0.05
ΥΜ4	Μουρίκι-Υπατο	79	0.08
ΥΜ5	Μουρίκι-Υπατο	90	0.08
ΥΜ7	Μουρίκι-Υπατο	62	0.05
ΥΜ10	Μουρίκι-Υπατο	178	0.02
ΥΜ11	Μουρίκι-Υπατο	178	0.04
ΥΜ14	Μουρίκι-Υπατο	178	0.04
ΥΜ16	Μουρίκι-Υπατο	178	0.04
ΥΜ9	Μουρίκι-Υπατο	178	0.00
ΕΠ4	Ούγγρα	80	0.06
ΕΠ5	Ούγγρα	48	0.09
ΕΠ6	Ούγγρα	42	0.02
ΕΠ7	Ούγγρα	50	0.10
ΕΠ8	Ούγγρα	48	0.08
ΕΠ9	Ούγγρα	59	0.06
ΕΠ10	Ούγγρα	39	0.10
ΕΠ13	Ούγγρα	47	0.06
ΕΠ14	Ούγγρα	48	0.06
ΕΠ15	Ούγγρα	43	0.10
ΕΠ16	Ούγγρα	40	0.10
ΥΥ1	ΝΔ Υλίκη	105	0.08
ΥΥ2	ΝΔ Υλίκη	105	0.07
ΥΥ3	ΝΔ Υλίκη	95	0.10
ΥΥ4	ΝΔ Υλίκη	105	0.09
ΥΥ5	ΝΔ Υλίκη	103	0.09
ΥΥ6	ΝΔ Υλίκη	107	0.05
ΥΥ7	ΝΔ Υλίκη	105	0.10
ΥΥ8	ΝΔ Υλίκη	125	0.10
ΥΥ9	ΝΔ Υλίκη	117	0.08
ΥΥ10	ΝΔ Υλίκη	130	0.08
ΥΥ11	ΝΔ Υλίκη	135	0.08
ΥΥ12	ΝΔ Υλίκη	140	0.06
ΥΥ14	ΝΔ Υλίκη	136	0.09
ΥΥ15	ΝΔ Υλίκη	145	0.08
ΥΤ1	Ταξιάρχες	89	0.08
ΥΤ2	Ταξιάρχες	96	0.07
ΥΤ3	Ταξιάρχες	90	0.03
ΥΤ4	Ταξιάρχες	105	0.07
ΥΤ6	Ταξιάρχες	110	0.05
ΥΤ7	Ταξιάρχες	107	0.05
ΥΤ8	Ταξιάρχες	138	0.08

Οι γεωτρήσεις Ούγγρων, στο δυτικό άκρο της Παραλίμνης, αντλούν νερό καλής ποιότητας και το αποδίδουν στο υδραγωγείο Υλίκης. Το νερό αυτό αν κατέληγε στην Παραλίμνη θα επιβαρυνόταν με

οργανικά φορτία και ιλύ, πράγμα που θα καθιστούσε δαπανηρή την εκμετάλλευσή του. Οι εν λόγω γεωτρήσεις θεωρείται ότι μπορούν να αποδώσουν μέχρι και 20 hm³/έτος (ΕΥΔΑΠ, 1996).

Για τις περισσότερες από τις γεωτρήσεις του Πίνακα 7.3 διατίθενται συστηματικές παρατηρήσεις στάθμης (δύο έως τρεις ανά μήνα), οι οποίες καλύπτουν την περίοδο 1994-1998. Ωστόσο, τα στοιχεία αυτά δεν θεωρούνται αξιοποιήσιμα, δεδομένου ότι υπάρχει σημαντική συσχέτισή τους με την στάθμη της Υλίκης, κάτι που δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι περισσότερες γεωτρήσεις έχουν διανοιχτεί στην γειτονιά της λίμνης.

7.2.5 Μετρήσεις παροχής

Στην λεκάνη της Υλίκης δεν υπάρχουν καθόλου δεδομένα υδρομετρήσεων σε υδατορεύματα, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των φυσικών εισροών στην λίμνη. Συνεπώς, η εκτίμηση της απορροής της λεκάνης γίνεται έμμεσα, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 7.4

7.3 Μοντέλο υπόγειων διαφυγών Υλίκης

7.3.1 Γενικά

Όπως και στην γειτονική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, στην περιοχή της Υλίκης παρατηρούνται κατά κύριο λόγο ασβεστολιθικές μάζες, με ποικίλες πτυχώσεις και ρηγματώσεις. Λόγω της έντονης καρστικοποίησης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί των τοιχωμάτων της Υλίκης, όπως και της γειτονικής της Παραλίμνης, δεν είναι στεγανοί, με αποτέλεσμα την διαφυγή σημαντικών ποσοτήτων νερού (μόνο ο πυθμένας της λίμνης έχει αργιλικές προσχώσεις). Ο ποσοτικός προσδιορισμός των υπόγειων απωλειών της Υλίκης έχει απασχολήσει όλους τους μελετητές του υδατικού δυναμικού της περιοχής. Συστηματική επισκόπηση των ερευνών που έχουν εκπονηθεί πάνω στο εν λόγω ζήτημα γίνεται από τους Τζεράνη και Τσολακίδη (1990).

Σύμφωνα με τους Παγούνη κ.ά. (1986), οι κυριότερες θέσεις των υπόγειων διαφυγών εντοπίζονται στην βορειοανατολική και νοτιοδυτική όχθη της λίμνης. Οι κατευθύνσεις της υπόγειας ροής είναι προς βορειοανατολικά, με αποδέκτες τις πηγές Ούγγρας και Καμηλόβρυσης και, στην συνέχεια, την Παραλίμνη, και προς νοτιοδυτικά έως νοτιοανατολικά, με αποδέκτες, όπως εικάζεται, τις πηγές Κοκκόση, δυτικά των μικρών πηγών του όρμου της Ανθηδόνας.

Οι πηγές Ούγγρας εμφανίζονται ως δύο συστήματα (άνω και κάτω), σε υψόμετρα +72 m και +65 m, αντίστοιχα. Οι πηγές Καμηλόβρυσης εμφανίζονται και αυτές ως δύο συστήματα (μικρές και μεγάλες), κοντά στις δυτικές-νοτιοδυτικές όχθες της Παραλίμνης και σε υψόμετρο +42 m.

7.3.2 Κατάρτιση χρονοσειράς υπόγειων διαφυγών

Για την εκτίμηση των ιστορικών απωλειών της Υλίκης λόγω υπόγειων διαφυγών απαιτήθηκε η κατάρτιση του μηνιαίου ισοζυγίου εισροών-εκροών της λίμνης. Η γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου ταμειυτήρα ή λίμνης διατυπώνεται ως εξίσωση διαφορών της μορφής:

$$S_{t+1} - S_t = I_t - O_t \quad (7.1)$$

όπου S_{t+1} το απόθεμα την πρώτη ημέρα του επόμενου από τον μήνα αναφοράς, t , S_t το απόθεμα την πρώτη ημέρα του εν λόγω μήνα, και I_t , O_t , οι αθροιστικές εισροές και εκροές, αντίστοιχα, που πραγματοποιήθηκαν κατά τον μήνα t . Εφόσον διατίθενται μετρήσεις ή εκτιμήσεις ως προς τους λοιπούς όρους της εξίσωσης ισοζυγίου, είναι δυνατή η εκτίμηση μίας άγνωστης συνιστώσας, που στην περίπτωση της Υλίκης είναι οι απώλειες λόγω διαφυγών.

Οι εισροές της Υλίκης περιλαμβάνουν τις ακόλουθες συνιστώσες:

- βροχόπτωση στην επιφάνεια της λίμνης·
- εισροές μέσω της σήραγγας Καρδίτσας, όπου διοχετεύεται η απορροή της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, η οποία και αποτελεί την κύρια πηγή τροφοδοσίας της λίμνης·
- απορροή της λεκάνης της λίμνης και του υψηλού τμήματος της λεκάνης των Βαγίων.

Οι εκροές από την Υλίκη περιλαμβάνουν τις ακόλουθες συνιστώσες:

- απώλειες λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια της λίμνης·
- υπόγειες διαφυγές, που είναι και η άγνωστη συνιστώσα του ισοζυγίου της λίμνης·
- απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας, μέσω του αντλιοστασίου της ΕΥΔΑΠ στο Μουρίκι και των πλωτών αντλιοστασίων·
- αρδευτικές απολήψεις, μέσω του αντλιοστασίου Κωπαΐδας·
- υπερχειλίση προς την Παραλίμνη, μέσω της διώρυγας Μουρικίου.

Αναλυτική παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού των επιμέρους συνιστωσών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση του μηνιαίου ισοζυγίου της Υλίκης, με τελικό προϊόν την μηνιαία χρονοσειρά των υπόγειων διαφυγών της λίμνης για την περίοδο 1977-78 έως 2002-03 (26 υδρολογικά έτη), γίνεται από τους *Ευστρατιάδη και Μαμάση* (2004).

7.3.3 Ιστορικό συσχέτισης υπόγειων διαφυγών - στάθμης

Οι δυσκολίες στις ποσοτικές εκτιμήσεις των διαφυγών οφείλονται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλά σημεία διαφυγής (καταβόθρες) που είναι διασκορπισμένα στον πυθμένα και τα τοιχώματα της λίμνης, καθώς και στον στοχαστικό χαρακτήρα των διαφυγών.

Οι πρώτες προσπάθειες κατάρτισης αναλυτικών εξισώσεων για την εκτίμηση των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης έγιναν στα τέλη του 19ου αιώνα. Ορισμένοι ερευνητές, υποθέτοντας ότι οι διαφυγές της Υλίκης τροφοδοτούν απευθείας την Παραλίμνη, επιχείρησαν να τις συσχετίσουν με την υψομετρική διαφορά των σταθμών των δύο λιμνών. Άλλοι, επιχείρησαν να δώσουν ποσοτικές εκτιμήσεις όσον αφορά την παροχή των κυρίαρχων διαδρομών (π.χ., πηγές Ούγγρας), τονίζοντας ωστόσο ότι ο προσδιορισμός της θέσης και της παροχής των πολλαπλών μικρότερων οδών διαφυγής είναι αδύνατος. Οι *Αλτηγός κ.ά.* (1964), αξιολογώντας τις προγενέστερες έρευνες και με βάση περαιτέρω στοιχεία που οι ίδιοι συνέλεξαν, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι υπόγειες διαφυγές εξαρτώνται μόνο από την απόλυτη στάθμη της λίμνης και όχι από την υψομετρική διαφορά των σταθμών Υλίκης-Παραλίμνης. Οι υπολογισμοί των μελετητών οδήγησαν στην κατάρτιση διαγράμματος που συσχετίζει τις απώλειες (εξαρτημένη μεταβλητή) με την στάθμη της Υλίκης (ανεξάρτητη μεταβλητή). Παρά την ιδιαίτερα αυξημένη διασπορά του σημειοσυνόλου των υπολογισμένων διαφυγών, η εν λόγω προσέγγιση θεωρείται κλασσική και ακολουθήθηκε σε όλες τις μεταγενέστερες έρευνες (π.χ., *Λαδόπουλος και Χωραφάς*, 1974· *Κουτσογιάννης και Ναλμπάντης*, 1989· *Ρώτη κ.ά.*, 1990).

Στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου καταρτίστηκαν σχέσεις στάθμης-διαφυγών με εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την εποχή του έτους (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Συγκεκριμένα, για την θερινή περίοδο (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) προέκυψε η σχέση:

$$L = 0.0060 Z^2 - 0.27 Z - 1.43 \quad (7.2)$$

όπου L οι διαφυγές σε $\text{hm}^3/\text{μήνα}$ και Z το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης Υλίκης σε m , υπολογιζόμενο ως ο μέσος όρος της στάθμης την πρώτη και τελευταία ημέρα του εκάστοτε μήνα. Ο

συντελεστής συσχέτισης της παραπάνω σχέσης είναι ίσος με 0.815, ενώ το τυπικό σφάλμα¹ ανέρχεται σε 3.73 hm³/μήνα.

Για την χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος) προέκυψε η σχεδόν γραμμική σχέση:

$$L = -0.0007 Z^2 + 0.50 Z - 17.08 \quad (7.3)$$

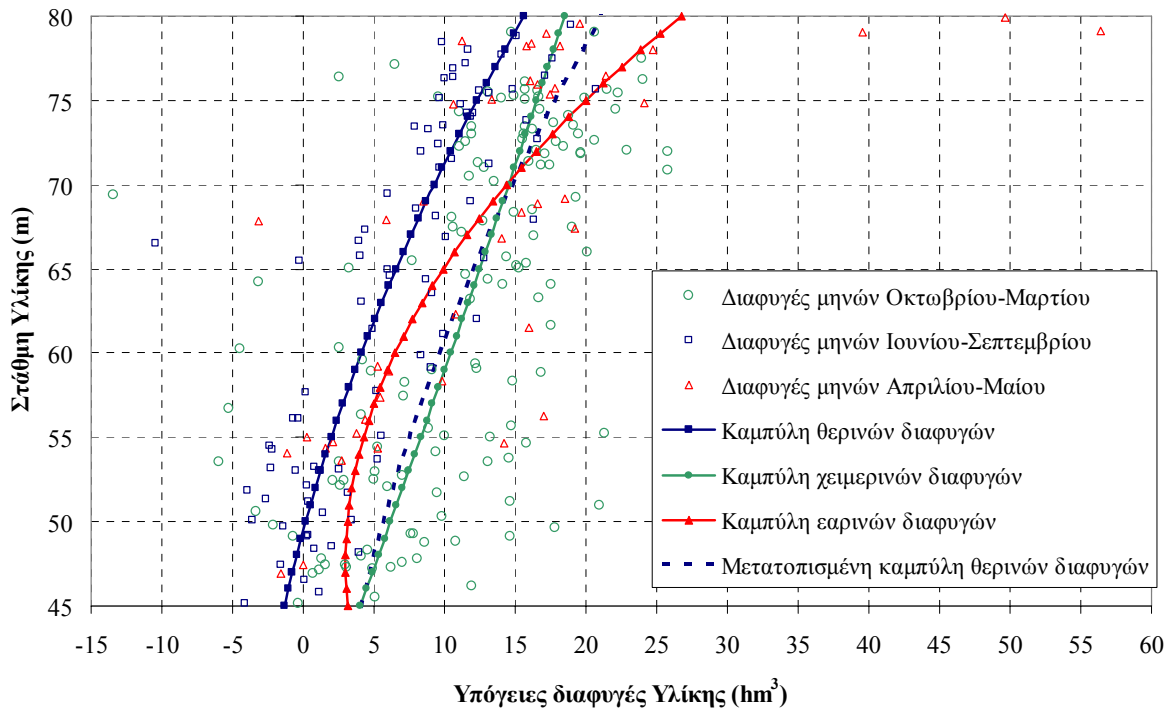
με συντελεστή συσχέτισης 0.586 και τυπικό σφάλμα 5.93 hm³/μήνα.

Τέλος, για την εαρινή περίοδο, η οποία περιλαμβάνει τους μήνες Απρίλιο και Μάιο, κατά την οποία η διασπορά του δείγματος ήταν εξαιρετικά μεγάλη, προέκυψε η σχέση:

$$L = 0.0224 Z^2 - 2.13 Z + 53.59 \quad (7.4)$$

με συντελεστή συσχέτισης 0.704 και τυπικό σφάλμα 8.64 hm³/μήνα. Η εν λόγω σχέση παρουσιάζει έντονη καμπυλότητα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη υπερβολικά υψηλών τιμών διαφυγών κοντά στην στάθμη υπερχειλίσης.

Η σχέση (7.2), η οποία αναφέρεται στις θερινές διαφυγές, θεωρήθηκε ως η πλέον αξιόπιστη, η σχέση (7.3), η οποία αναφέρεται στις χειμερινές διαφυγές θεωρήθηκε λιγότερο αξιόπιστη ενώ η σχέση (7.4), η οποία αναφέρεται στις εαρινές διαφυγές θεωρήθηκε αναξιόπιστη.



Σχήμα 7.2: Καμπύλες στάθμης-διαφυγών λίμνης Υλίκης, όπως εκτιμήθηκαν κατά την πρώτη φάση του έργου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2000).

Στο Σχήμα 7.2 απεικονίζονται τα δείγματα διαφυγών για τις τρεις περιόδους του έτους και οι αντίστοιχες σχέσεις. Επιπλέον, απεικονίζεται η καμπύλη των θερινών διαφυγών, μετατοπισμένη κατά 5.43 hm³/μήνα. Η εξίσωση της εν λόγω καμπύλης είναι:

$$L = 0.0060 Z^2 - 0.27 Z + 4.00 \quad (7.5)$$

¹ Αν y_i είναι η πραγματική τιμή και y_i^* η τιμή που εκτιμάται από ένα μαθηματικό μοντέλο, τότε η ποσότητα $e_i = y_i - y_i^*$ ονομάζεται υπόλοιπο (residual). Το τυπικό σφάλμα ενός μοντέλου ορίζεται ως η τυπική απόκλιση των υπολοίπων του.

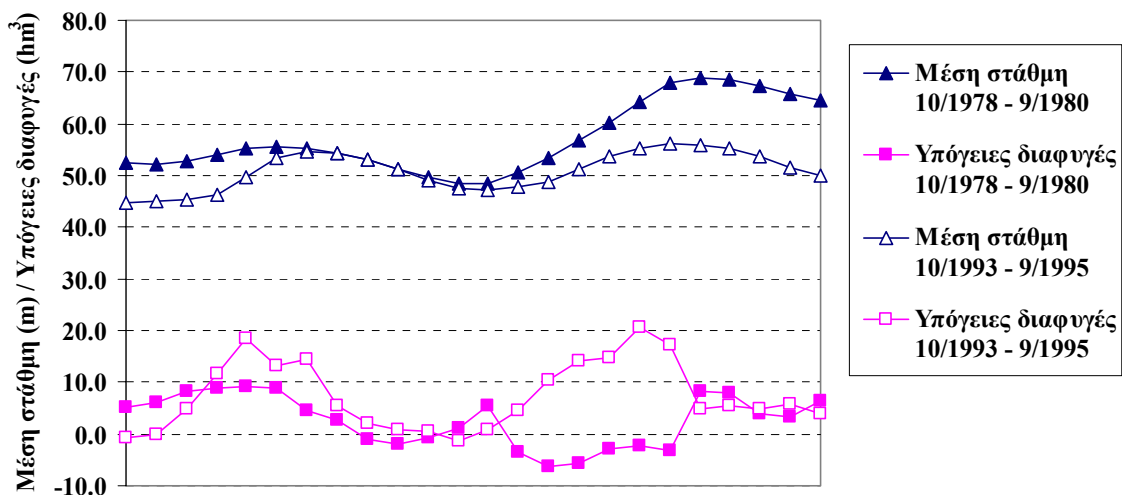
Δεδομένου ότι η καμπύλη (7.5) σχεδόν ταυτίζεται με αυτή των χειμερινών διαφυγών και, επιπλέον, μπορεί να προσεγγίσει, έστω και κατά μέσο όρο τις εαρινές διαφυγές, έγινε αποδεκτή ως εκτιμήτρια των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης για το σύνολο της περιόδου Οκτωβρίου-Μαΐου, για την οποία παρουσιάζει τυπικό σφάλμα $6.89 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η προτεινόμενη σχέση υπολογισμού των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης ήταν:

$$L = \begin{cases} 0.006 Z^2 - 0.27 Z - 1.43 & \text{για την περίοδο Ιουνίου-Σεπτεμβρίου} \\ 0.006 Z^2 - 0.27 Z + 4.00 & \text{για την περίοδο Οκτωβρίου-Μαΐου} \end{cases} \quad (7.6)$$

7.3.4 Εντοπισμός συστηματικών σφαλμάτων

Στα πλαίσια της παρούσας δεύτερης φάσης, επιχειρήθηκε μια λεπτομερής διερεύνηση των ιστορικών δεδομένων διαφυγών, με σκοπό την μείωση της αβεβαιότητας που οφείλεται στην μεγάλη διασπορά του δείγματος, ιδιαίτερα κατά την χειμερινή και εαρινή περίοδο.

Καταρχήν, απομακρύνθηκαν από το δείγμα ορισμένα σημεία που κρίθηκαν εντελώς αναξιόπιστα, τα περισσότερα από τα οποία αναφέρονται σε περιόδους που παρατηρήθηκε υπερχειλίση της Υλίκης προς την Παραλίμνη. Η εν λόγω υπερχειλίση είτε δεν καταγράφηκε καθόλου είτε εκτιμήθηκε προσεγγιστικά, με αποτέλεσμα ο υπολογισμός των διαφυγών με εφαρμογή της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου να καθίσταται προβληματικός.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση μηνιαίας διακύμανσης στάθμης-διαφυγών για δύο περιόδους.

Μια άλλη πηγή σφαλμάτων οφείλεται στην πραγματοποίηση αντλήσεων μέσω των παρακείμενων στην λίμνη υδρευτικών γεωτρήσεων της ΕΥΔΑΠ. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (βλ. 7.2.4), οι γεωτρήσεις περιφερειακά της Υλίκης αντλούν στην ουσία νερό από την ίδια την λίμνη, κάτι που βεβαίως δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη στην εξίσωση ισοζυγίου. Χαρακτηριστικό είναι το διάγραμμα του Σχήματος 7.3, όπου απεικονίζονται οι απώλειες της Υλίκης και οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες στάθμες για τις περιόδους Οκτωβρίου 1978 - Σεπτεμβρίου 1980 και Οκτωβρίου 1993 - Σεπτεμβρίου 1995. Κατά το πρώτο υδρολογικό έτος, η δίαιτα της στάθμης και η αντίστοιχη δίαιτα των υπόγειων διαφυγών είναι παρόμοιες για τις δύο περιόδους. Το δεύτερο ωστόσο υδρολογικό έτος, και παρά το γεγονός ότι η στάθμη της δεύτερης περιόδου διατηρείται σε σαφώς χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με την πρώτη, οι υπολογιζόμενες διαφυγές είναι μεγαλύτερες, ενώ θα έπρεπε να συμβαίνει το αντίθετο. Προφανώς, δεν πρόκειται για φυσικές διαφυγές αλλά για απώλειες που οφείλονται σε άντληση, ουσιαστικά, των ιδίων υδατικών πόρων της Υλίκης, καθώς πρόκειται για περίοδο εντατικής

χρήσης των γεωτρήσεων. Εξαιτίας λοιπόν των συστηματικών σφαλμάτων που οφείλονται στο εν λόγω φαινόμενο, απορρίφθηκε το δείγμα των υδρολογικών ετών 1994-95 έως 1997-98.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι η διαφοροποίηση της διαίτας των διαφυγών μεταξύ χειμερινών και θερινών μηνών. Μάλιστα, η ανάλυση των ιστορικών δεδομένων δείχνει ότι για συγκεκριμένη στάθμη, οι διαφυγές που παρατηρούνται κατά την χειμερινή περίοδο είναι αυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες της θερινής περιόδου κατά μια ποσότητα της τάξης των 5 hm³/μήνα. Προσπάθεια ερμηνείας του φαινομενικά παράδοξου αυτού φαινομένου επιχείρησαν να δώσουν παλιότερα οι *Κουτσογιάννης και Ναλμπάντης* (1989), οι οποίοι το απέδωσαν στον ταχύτερο ρυθμό ανύψωσης της στάθμης της Υλίκης σε σχέση με την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα τον χειμώνα, λόγω των εισροών από την Διώρυγα Καρδίτσας. Δεν απέκλεισαν πάντως το φαινόμενο να οφείλεται και σε συνδυασμένες ανακρίβειες στις εκτιμήσεις των συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε και η περίπτωση συστηματικών σφαλμάτων που αναφέρονται στην εκτίμηση της συνιστώσας του υδατικού ισοζυγίου που είναι κυρίαρχη σε κάθε περίοδο. Εάν υποτεθεί ότι γίνεται *υπερεκτίμηση* των διαφυγών κατά την χειμερινή περίοδο, αυτή θα πρέπει να οφείλεται σε αντίστοιχη *υπερεκτίμηση* της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Ωστόσο, αυτό δεν επιβεβαιώνεται από την σύγκριση των παροχών που εκτιμά η ΕΥΔΑΠ με τις υδρομετρήσεις που έχει πραγματοποιήσει το ΙΓΜΕ. Οι τελευταίες μάλιστα είναι κατά 10% αυξημένες (βλ. 3.2.9). Γενικά όμως, η μεγαλύτερη διασπορά των παρατηρημένων διαφυγών κατά την περίοδο υψηλής υδροφορίας (χειμώνας και, ακόμη περισσότερο, άνοιξη) δεν μπορεί παρά να αποδοθεί στην αβεβαιότητα που διέπει την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, βάσει ημερήσιων και μόνο παρατηρήσεων στάθμης. Η άρση της εν λόγω αβεβαιότητας θα μπορεί να είναι εφικτή μετά από εύλογο χρονικό διάστημα λειτουργίας του νέου υδρομετρικού σταθμού της Διώρυγας Καρδίτσας, οπότε και θα διαπιστωθεί αν η έως τώρα πρακτική υπολογισμού της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού παρουσιάζει τέτοιου είδους σφάλματα.

Από την άλλη πλευρά, αν το σφάλμα αναφέρεται στην θερινή περίοδο (κατά την οποία μάλιστα η συνιστώσα της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού πρακτικά μηδενίζεται λόγω των ανάντη αρδευτικών απολήψεων), γίνεται δηλαδή *υποεκτίμηση* των διαφυγών, αυτό θα πρέπει να οφείλεται σε αντίστοιχη *υπερεκτίμηση* των μετρούμενων ποσοτήτων που αντλούνται τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση. Ως γνωστόν, ο υπολογισμός των εν λόγω απολήψεων γίνεται χονδροειδώς, με βάση τις ώρες λειτουργίας των αντλιοστασίων Κωπαΐδας και Μουρικίου, αντίστοιχα. Πρόσφατα, η ΕΥΔΑΠ εγκατέστησε παροχόμετρα στην Βίλιζα, έτσι ώστε να εκτιμά με μεγαλύτερη ακρίβεια τις αντλούμενες ποσότητες για ύδρευση της Αθήνας. Η εκτίμηση γίνεται αφού συνυπολογιστούν οι τοπικές απολήψεις νερού, και με θεώρηση διαρροών της τάξης του 3% κατά μήκος του υδραγωγείου Κρεμμάδας-Βίλιζας (*Νασίκας* 2002, προσωπική επικοινωνία). Συγκρίνοντας τις δύο τιμές, προκύπτει ότι οι αντλήσεις από την Υλίκη όχι μόνο δεν είναι υπερεκτιμημένες, αλλά υποεκτιμώνται σε ποσοστό της τάξης του 20%.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι: (α) η φαινόμενη μετατόπιση της χειμερινής καμπύλης στάθμης-διαφυγών δεν είναι απόρροια κάποιου συστηματικού σφάλματος αλλά έχει κάποια φυσική ερμηνεία, και (β) υπάρχει σημαντική υπόνοια ότι οι υπόγειες διαφυγές της λίμνης είναι μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται με βάση τα ιστορικά δεδομένα ισοζυγίου της λίμνης.

7.3.5 Στατιστική διερεύνηση ιστορικού δείγματος διαφυγών

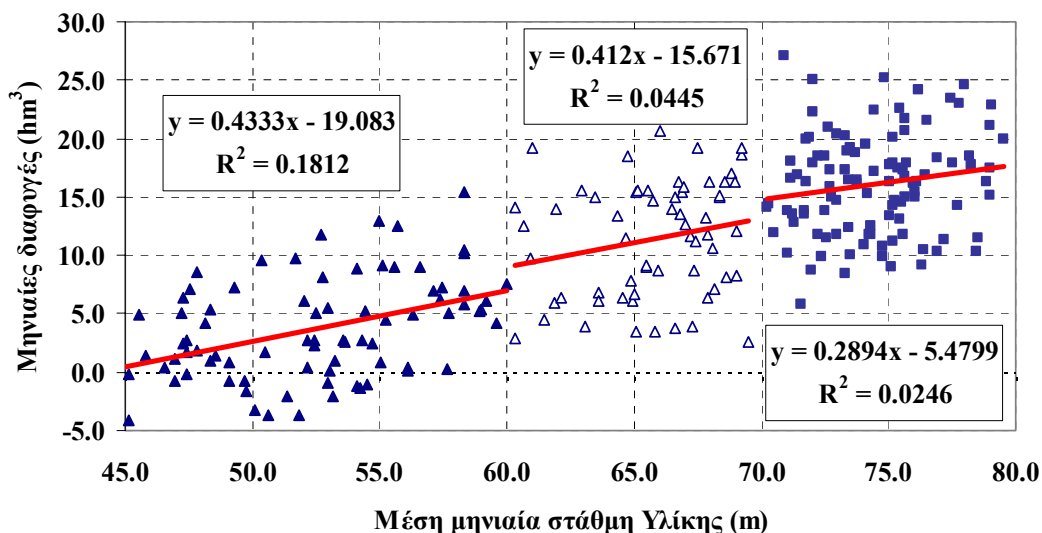
Πριν την επικαιροποίηση των καμπυλών στάθμης - υπόγειων διαφυγών σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν κατά την πρώτη φάση του έργου (σχέση 7.6), πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των ιστορικών δειγμάτων. Η επικαιροποίηση θεωρήθηκε επιβεβλημένη, καθώς μεσολάβησαν τρία υδρολογικά έτη μετά το πέρας της πρώτης φάσης, με αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του δείγματος από 23 σε 26 υδρολογικά έτη.

Αρχικά, εξετάστηκαν ένα προς ένα τα σημεία του δείγματος και απορρίφθηκαν αυτά για τα οποία υπήρχαν υποψίες ύπαρξης συστηματικών σφαλμάτων (βλ. 7.3.4) καθώς και ορισμένα που θεωρήθηκαν *εξωκείμενα* (outliers). Τα εξωκείμενα σημεία εντοπίστηκαν εμπειρικά, ελέγχοντας τους συντελεστές προσδιορισμού των δειγμάτων στάθμης-διαφυγών για κάθε μήνα, και απορρίπτοντας τα σημεία εκείνα που μείωναν σημαντικά της τιμή των εν λόγω συντελεστών. Συνολικά, από τα 312 σημεία του αρχικού ιστορικού δείγματος (26 υδρολογικά έτη επί 12 μήνες), απορρίφθηκαν για διάφορους λόγους τα 68, ήτοι ποσοστό 22%. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από τα στοιχεία του Πίνακα 7.4, μετά την κατάρτιση του τελικού δείγματος βελτιώθηκε σημαντικά η συσχέτιση μεταξύ στάθμης και υπόγειων διαφυγών, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες. Εντύπωση προκαλεί η θεαματική βελτίωση της προσαρμογής του δείγματος τον μήνα Ιανουάριο, από 17.2% σε 86.5%. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη το πλήρες δείγμα, δηλαδή όλους τους μήνες μαζί, ο συντελεστής προσδιορισμού αυξάνει από 41.7% σε 62.0%.

Πίνακας 7.4: Σύγκριση μεγέθους και συντελεστή προσδιορισμού, r^2 , αρχικού και τελικού δείγματος στάθμης - υπόγειων διαφυγών.

Μήνας	Αρχικό μέγεθος	Τελικό μέγεθος	Αρχικό r^2	Τελικό r^2
Οκτώβριος	26	22	0.729	0.756
Νοέμβριος	26	22	0.796	0.871
Δεκέμβριος	26	20	0.468	0.599
Ιανουάριος	26	19	0.172	0.865
Φεβρουάριος	26	20	0.179	0.639
Μάρτιος	26	19	0.105	0.554
Απρίλιος	26	19	0.428	0.842
Μάιος	26	18	0.543	0.690
Ιούνιος	26	20	0.698	0.786
Ιούλιος	26	21	0.673	0.696
Αύγουστος	26	22	0.694	0.733
Σεπτέμβριος	26	22	0.802	0.851
Πλήρες δείγμα	312	244	0.417	0.620

Στη συνέχεια ελέγχθηκε αν υπάρχει συστηματική διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του δείγματος των διαφυγών ανάλογα με την στάθμη της λίμνης, ήτοι ετεροσκεδαστικότητα. Για τον σκοπό αυτόν, το τελικό δείγμα κατατάχθηκε κατά αύξουσα σειρά ως προς την στάθμη και υπολογίστηκαν οι ευθείες γραμμικής παλινδρόμησης και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού για τρεις διακριτές ζώνες, χαμηλή, μέση και υψηλή. Η χαμηλή ζώνη περιλαμβάνει στάθμες από τον νεκρό όγκο της λίμνης (+45 m) έως τα +60 m. Η μεσαία ζώνη περιλαμβάνει στάθμες από +60 m έως +70 m, ενώ η υψηλή ζώνη περιλαμβάνει στάθμες μεγαλύτερες από +70 m. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4, μεταβαίνοντας σε υψηλότερη ζώνη παρατηρείται αύξηση της, έτσι κι αλλιώς, εξαιρετικά μεγάλης διασποράς του δείγματος, όπως καταδεικνύει η μείωση της τιμής του αντίστοιχου συντελεστή προσδιορισμού. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται θλάση (που είναι αρκετά έντονη μεταβαίνοντας από την μεσαία στην υψηλή ζώνη) και μικρή μετατόπιση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης προς τα πάνω, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διαίτα των διαφυγών διαφοροποιείται συστηματικά σε κάθε ζώνη. Σημειώνεται ότι αντίστοιχη θλάση στην περιοχή των +70 m αναφέρουν και οι *Αλληγός κ.ά.* (1964), βασιζόμενοι σε πολύ προγενέστερες από τις δικές μας εκτιμήσεις διαφυγών. Η εν λόγω θλάση αιτιολογείται από την ύπαρξη των πηγών Ούγγρας, οι οποίες αναπτύσσονται γύρω από αυτό το υψόμετρο. Ωστόσο, η διασπορά των σημείων είναι τόσο μεγάλη που είναι αδύνατη η αξιοποίηση της εν λόγω πληροφορίας.



Σχήμα 7.4: Γραφική απεικόνιση του τελικού δείγματος στάθμης-διαφυγών και των σχέσεων γραμμικής παλινδρόμησης για κάθε μία από τις τρεις ζώνες διακύμανσης της στάθμης.

Πίνακας 7.5: Ανάλυση δείγματος υπόγειων διαφυγών ανά υδρολογικό έτος.

Υδρ. έτος	Συντελ. προσδιορισμού	Μέση στάθμη (m)	Απορροή Β. Κηφισού (hm ³)
1977-78	0.312	54.46	275.9
1978-79	0.631	52.84	207.7
1979-80	0.456	61.40	424.7
1980-81	0.046	72.50	498.6
1981-82	-0.101	75.63	437.3
1982-83	0.744	74.55	193.3
1983-84	-0.036	74.88	401.8
1984-85	0.212	76.81	355.4
1985-86	0.518	74.41	218.9
1986-87	-0.238	74.65	345.7
1987-88	0.613	72.65	223.8
1988-89	0.755	66.69	192.7
1989-90	0.533	54.97	66.8
1990-91	0.149	53.08	271.3
1991-92	0.336	52.53	138.9
1992-93	0.694	46.78	80.9
1993-94	0.382	49.57	195.5
1994-95	0.487	52.25	258.2
1995-96	-0.066	56.47	321.4
1996-97	0.278	63.61	257.0
1997-98	0.127	66.23	232.8
1998-99	0.387	70.72	341.6
1999-00	0.621	71.45	160.7
2000-01	0.697	64.68	64.5
2001-02	0.438	61.66	265.4
2002-03	0.579	70.85	518.5

Μια τελευταία διερεύνηση έγινε χωρίζοντας το αρχικό, αυτή την φορά, δείγμα (από το οποίο εξαιρέθηκαν τα σημεία που αναφέρονται σε μήνες υπερχείλισης της Υλίκης προς την Παραλίμνη) σε υδρολογικά έτη. Για κάθε έτος, υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού με βάση τις μηνιαίες τιμές στάθμης και διαφυγών, ο οποίος συγκρίθηκε με την μέση ετήσια στάθμη της Υλίκης και την ετήσια απορροή του Βοιωτικού Κηφισού (Πίνακας 7.5). Παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση του συντελεστή προσδιορισμού από έτος σε έτος, η οποία συσχετίζεται αρνητικά κυρίως με την ετήσια απορροή του Βοιωτικού Κηφισού και δευτερευόντως με την στάθμη της λίμνης. Αυτό σημαίνει ότι η προσαρμογή του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης βελτιώνεται όσο χαμηλότερη είναι η τιμή της απορροής. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η εξαιρετικά υψηλή διασπορά του δείγματος οφείλεται, σε σημαντικό βαθμό, σε σφάλματα εκτίμησης της βασικής αυτής συνιστώσας του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης. Προφανώς, τα εν λόγω σφάλματα είναι μικρότερα στην περίπτωση χαμηλής υδροφορίας του Βοιωτικού Κηφισού, οπότε και υπάρχει μεγαλύτερη βεβαιότητα ως προς τον υπολογισμό των υπόγειων διαφυγών. Αυτό άλλωστε υποδηλώνει και η σχετικά καλύτερη προσαρμογή των δεδομένων κατά τους θερινούς μήνες, οπότε η παροχή του Βοιωτικού Κηφισού είναι συνήθως μηδενική.

7.3.6 Επικαιροποίηση καμπυλών στάθμης – υπόγειων διαφυγών

Για την εξαγωγή των καμπυλών στάθμης-διαφυγών χρησιμοποιήθηκε το τελικό δείγμα που διαμορφώθηκε με βάση τις παραδοχές των ενοτήτων 7.3.4 και 7.3.5. Το εν λόγω δείγμα χωρίστηκε σε δύο περιόδους, όπου η πρώτη περιλαμβάνει τους μήνες χαμηλής υδροφορίας (Μάιος-Νοέμβριος), ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει τους μήνες υψηλής υδροφορίας (Δεκέμβριος-Απρίλιος). Σημειώνεται ότι η περίοδος χαμηλής υδροφορίας περιλαμβάνει πλέον περισσότερους μήνες σε σχέση με την θεώρηση που έγινε κατά την πρώτη φάση του έργου, οπότε είχαν ληφθεί υπόψη μόνο οι θερινοί μήνες (Ιούνιος-Σεπτέμβριος).

Μετά από διερεύνηση προέκυψε ότι η βέλτιστη σχέση προσαρμογής και για τις δύο περιόδους είναι η γραμμική. Συγκεκριμένα, για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου προέκυψε η σχέση:

$$L = 0.545 Z - 26.6 \quad (7.7)$$

όπου L οι διαφυγές σε $\text{hm}^3/\text{μήνα}$ και Z το απόλυτο υπόμετρο της στάθμης Υλίκης σε m , υπολογιζόμενο ως ο μέσος όρος της στάθμης την πρώτη και τελευταία ημέρα του εκάστοτε μήνα. Ο συντελεστής προσδιορισμού της παραπάνω σχέσης είναι ίσος με 71.1%, ενώ το τυπικό σφάλμα ανέρχεται σε $3.6 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$.

Για την περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου προέκυψε η σχέση:

$$L = 0.530 Z - 20.8 \quad (7.8)$$

με συντελεστή προσδιορισμού 65.4% και τυπικό σφάλμα $3.7 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$.

Ουσιαστικά, οι καμπύλες (7.7) και (7.8) είναι παράλληλες, καθώς οι κλίσεις τους διαφέρουν ελάχιστα. Συνεπώς, αντί για την (7.8) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη Μαΐου-Νοεμβρίου μετατοπισμένη κατά $4.7 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$, η οποία αντιστοιχεί στην σχεδόν ισοδύναμη σχέση:

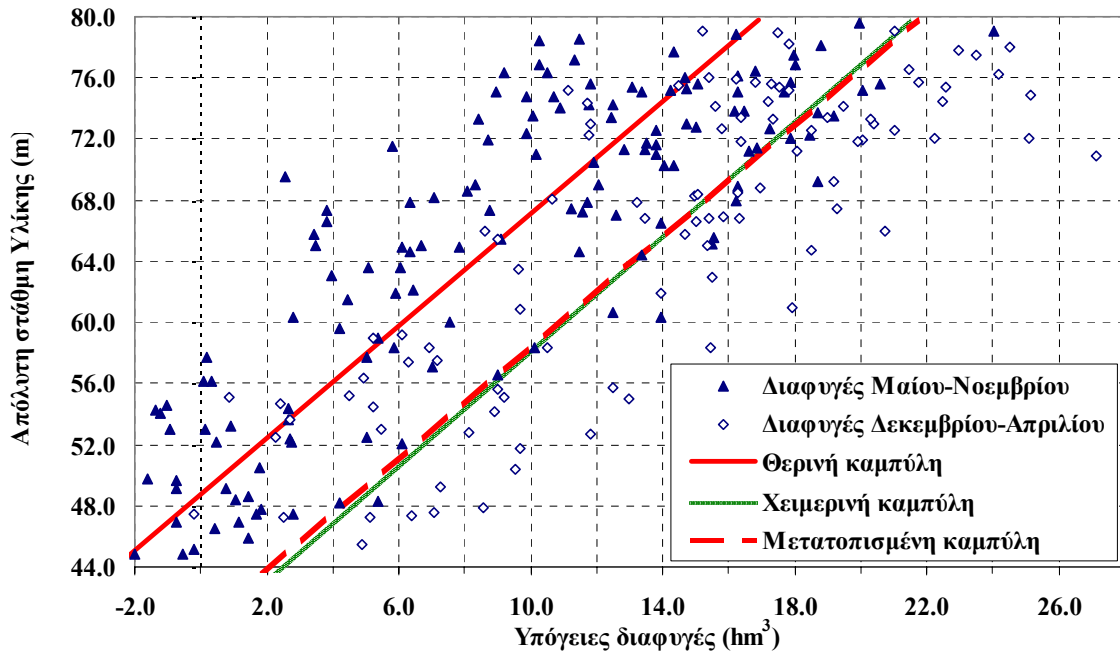
$$L = 0.545 Z - 21.8 \quad (7.9)$$

με πρακτικά ίδιο τυπικό σφάλμα.

Μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με την προσέγγιση της πρώτης φάσης του έργου προέρχεται από την μείωση της αβεβαιότητας, όπως αυτή εκφράζεται από το τυπικό σφάλμα. Ειδικότερα, το τυπικό σφάλμα της περιόδου υψηλής υδροφορίας μειώνεται σε επίπεδα που προσεγγίζουν το αντίστοιχο σφάλμα της περιόδου υψηλής υδροφορίας.

Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζονται τα δείγματα διαφυγών για τις δύο περιόδους και οι αντίστοιχες καμπύλες. Η τελική σχέση υπολογισμού των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης είναι:

$$L = \begin{cases} 0.545 Z - 26.6 & \text{για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου} \\ 0.545 Z - 21.8 & \text{για την περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου} \end{cases} \quad (7.10)$$



Σχήμα 7.5: Τελικές καμπύλες στάθμης-διαφυγών λίμνης Υλίκης.

Η σχέση (7.10) είναι η καλύτερη προσέγγιση από όσες έχουν γίνει έως τώρα, καθώς έχει βελτιωθεί η τιμή του τυπικού σφάλματος, όχι μόνο κατά την περίοδο χαμηλής υδροφορίας αλλά, κυρίως, κατά την περίοδο υψηλής υδροφορίας. Η μόνη πλέον εποχιακή διαφοροποίηση στις προτεινόμενες σχέσεις στάθμης-υπόγειων διαφυγών έγκειται στην παράλληλη μετατόπιση των ευθειών, που ερμηνεύεται από το μεγαλύτερο υδραυλικό φορτίο (ήτοι την διαφορά της στάθμης της Υλίκης με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα) που παρατηρείται κατά την χειμερινή περίοδο.

Οι ακραίες τιμές των υπόγειων διαφυγών που υπολογίζονται με εφαρμογή της (7.10) προκύπτουν με βάση την ελάχιστη και μέγιστη στάθμη της Υλίκης. Συγκεκριμένα, για ελάχιστη στάθμη της λίμνης ίση με +43.5 m, οι μηνιαίες διαφυγές εκτιμώνται σε -2.9 hm^3 για την περίοδο χαμηλής υδροφορίας και σε 2.2 hm^3 για την περίοδο υψηλής υδροφορίας¹. Ομοίως, για μέγιστη στάθμη ίση με +79.8 m, οι μηνιαίες διαφυγές εκτιμώνται σε 21.7 hm^3 για την περίοδο χαμηλής υδροφορίας και σε 16.9 hm^3 για την περίοδο υψηλής υδροφορίας.

Στη συνέχεια επιχειρείται μια πιο γενικευμένη προσέγγιση, με προσθήκη περισσότερων εξηγηματικών μεταβλητών, με στόχο την ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου για όλες τις εποχές του έτους, το οποίο να λαμβάνει υπόψη την ενδοετήσια διακύμανση του υδραυλικού φορτίου.

¹ Η αρνητική τιμή ερμηνεύεται από το γεγονός ότι την θερινή περίοδο που ο υδροφόρος ορίζοντας είναι χαμηλά, παρατηρείται τροφοδοσία της Υλίκης στις πολύ χαμηλές στάθμες.

7.3.7 Γενικευμένο μοντέλο υπόγειων διαφυγών Υλίκης

Όπως εξηγήθηκε, οι υπόγειες διαφυγές της Υλίκης είναι στην πραγματικότητα συνάρτηση όχι την στάθμης της λίμνης, Z_t , αλλά του υδραυλικού φορτίου, ήτοι της διαφοράς της Z_t από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, H_t , δηλαδή:

$$L_t = f(Z_t - H_t) \quad (7.11)$$

Ωστόσο, η άμεση εκτίμηση του υδραυλικού φορτίου μέσω μετρήσεων δεν είναι εφικτός, καθώς προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός εκτεταμένου δικτύου παρακολούθησης της πιεζομετρίας της περιοχής. Υπενθυμίζεται ότι οι περισσότερες παρατηρήσεις στάθμης που υπάρχουν στην λεκάνη αναφέρονται σε γεωτρήσεις που βρίσκονται περιφερειακά της Υλίκης, και ουσιαστικά ταυτίζονται με την στάθμη της λίμνης. Επιπλέον, το δείγμα των παρατηρήσεων όχι μόνο είναι μικρό αλλά αναφέρεται και σε περίοδο εντατικής εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών που, όπως προαναφέρθηκε, εισάγει συστηματικά σφάλματα στις διαφυγές που υπολογίζονται μέσω του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης (βλ. 7.3.4).

Για τον λόγο αυτόν, αντί της μεταβλητής H_t θεωρούνται εναλλακτικές μεταβλητές που σχετίζονται με την υδρολογική δίαιτα της περιοχής και ως εκ τούτου, εμμέσως, με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Οι εν λόγω μεταβλητές είναι η μετρημένη απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας, Q_t , και η επιφανειακή βροχόπτωσης στην λεκάνη, P_t .

Με βάση τα παραπάνω, το γενικευμένο μοντέλο εκτίμησης των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης διατυπώνεται μαθηματικά ως:

$$L_t = a + b Z_t + c Q_t + d P_t \quad (7.12)$$

όπου a , b , c , d άγνωστες παράμετροι που υπολογίζονται μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

Πίνακας 7.6: Σύγκριση συντελεστών προσδιορισμού απλού και γενικευμένου μοντέλου διαφυγών.

Μήνας	Μέγεθος δείγματος	Απλό μοντέλο	Γενικευμένο μοντέλο
Οκτώβριος	22	0.756	0.860
Νοέμβριος	22	0.871	0.882
Δεκέμβριος	20	0.599	0.662
Ιανουάριος	19	0.865	0.887
Φεβρουάριος	20	0.532	0.539
Μάρτιος	19	0.554	0.607
Απρίλιος	19	0.842	0.892
Μάιος	18	0.690	0.754
Ιούνιος	20	0.786	0.834
Ιούλιος	21	0.696	0.765
Αύγουστος	22	0.733	0.741
Σεπτέμβριος	22	0.851	0.884
Σύνολο	244	0.620	0.735

Με βάση το τελικό δείγμα διαφυγών, όπως αυτό προέκυψε μετά την απομάκρυνση των εξωκείμενων σημείων, και τα δείγματα απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη της Υλίκης (βλ. 7.2.3), υπολογίστηκαν για κάθε μήνα οι παράμετροι της παλινδρόμησης και οι συντελεστές προσδιορισμού. Στον Πίνακα 7.6 συγκρίνονται οι συντελεστές προσδιορισμού του γενικευμένου μοντέλου με τις αντίστοιχες τιμές που αναφέρονται στο απλό μοντέλο στάθμης-διαφυγών (Πίνακας 7.4). Προφανώς, με την προσθήκη δύο ακόμη επεξηγηματικών μεταβλητών, η προσαρμογή του δείγματος είναι καλύτερη, με την τιμή του συντελεστή προσδιορισμού να αυξάνει

στις περισσότερες περιπτώσεις από 5-10%, με εξαίρεση τους μήνες Φεβρουάριο και Αύγουστο τους οποίους δεν παρατηρείται πρακτικά καμία βελτίωση.

Θεωρώντας το πλήρες δείγμα, η σχέση παλινδρόμησης γράφεται:

$$L_t = 0.512 Z_t + 0.092 Q_t + 0.013 P_t - 24.9 \quad (7.13)$$

με συντελεστή προσδιορισμού 73.5% και τυπικό σφάλμα 3.6 hm³/μήνα, παρόμοιο δηλαδή με την καμπύλη χαμηλής υδροφορίας (7.7). Συνεπώς, με την προσθήκη δύο επιπλέον επεξηγηματικών μεταβλητών επιτυγχάνουμε αντίστοιχα καλή προσαρμογή των εκτιμημένων σε σχέση με τις παρατηρημένες υπόγειες διαφυγές της λίμνης, χωρίς να απαιτείται χρήση διαφορετικών παραμέτρων για κάθε εποχή.

Στην σχέση παλινδρόμησης (7.13) παρατηρούμε ότι οι συντελεστές των μεταβλητών Q_t (απορροή Βοιωτικού Κηφισού) και P_t (επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης) είναι θετικοί. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την υπόθεση ότι οι εν λόγω μεταβλητές είναι εκτιμήτριες της διακύμανσης της πιεζομετρίας γύρω από την Υλίκη, καθώς σε μια τέτοια περίπτωση θα αναμέναμε αρνητική συσχέτιση, ήτοι μείωση των διαφυγών με την άνοδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τις χαμηλές τιμές των συντελεστών, γεννά υποψίες σχετικά με το αν οι επιπρόσθετες επεξηγηματικές μεταβλητές, χρησιμοποιούμενες ανεξαρτήτως μήνα ή εποχής, προσθέτουν πληροφορία στο μοντέλο. Για τον λόγο αυτόν, πραγματοποιήθηκε έλεγχος υποθέσεων ως προς την σημαντικότητα των συντελεστών του μοντέλου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ο εν λόγω έλεγχος συνίσταται στην σύγκριση μιας συνάρτησης ελέγχου με μια τιμή αναφοράς (κρίσιμη τιμή) μιας στατιστικής κατανομής. Η κρίσιμη τιμή, που στην συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρεται στην κατανομή t , εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος και το επίπεδο εμπιστοσύνης που επιλέγεται. Λεπτομέρειες σχετικά με το θεωρητικό υπόβαθρο και τον τρόπο εφαρμογής του ελέγχου υποθέσεων δίνονται σε εξειδικευμένα εγχειρίδια στατιστικής (π.χ., *Hines and Montgomery*, 1990, pp. 455-558). Οι τιμές της συνάρτησης ελέγχου για κάθε συντελεστή συνοψίζονται στον Πίνακα 7.7. Για επίπεδο εμπιστοσύνης 1% και 240 βαθμούς ελευθερίας (που υπολογίζονται αφαιρώντας από το μέγεθος του δείγματος το πλήθος παραμέτρων του μοντέλου παλινδρόμησης, ήτοι τέσσερις), η κρίσιμη τιμή προκύπτει ίση με $t_{cr} = 2.336$. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβλητή που αναφέρεται στην επιφανειακή βροχόπτωση δεν είναι στατιστικά σημαντική, καθώς $2.103 < 2.336$. Συνεπώς, η εν λόγω μεταβλητή μπορεί να απαλειφεί από το μοντέλο (7.13). Αντίθετα, οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου είναι στατιστικά σημαντικές και συνεπώς διατηρούνται στο μοντέλο.

Πίνακας 7.7: Έλεγχος υποθέσεων για τους συντελεστές του γενικευμένου μοντέλου διαφυγών της Υλίκης.

Μεταβλητή	Συντελεστής	Τυπικό σφάλμα	Συνάρτηση ελέγχου ⁽¹⁾
Μέση στάθμη λίμνης	0.512	0.025	20.585
Βροχόπτωση λεκάνης	0.013	0.006	2.103
Απορροή Β. Κηφισού	0.092	0.013	7.039
Τομή	-24.91	1.639	15.199

(1) Η τιμή της συνάρτησης ελέγχου προκύπτει διαιρώντας την απόλυτη τιμή του εκάστοτε συντελεστή με το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα. Η τελευταία δίνεται απευθείας από το πρόγραμμα Excel.

Στην συνέχεια διερευνήθηκε αν η γνώση της τιμής της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού προσφέρει ουσιαστική πληροφορία στο μοντέλο. Για τον σκοπό αυτόν, η χρονοσειρά απορροής αντικαταστάθηκε από μια δυαδική μεταβλητή, με τιμές 0 την περίοδο χαμηλής υδροφορίας (Μάιος-Νοέμβριος) και 1 την περίοδο υψηλής υδροφορίας (Δεκέμβριος-Απρίλιος), διαμορφώθηκε δηλαδή ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης ισοδύναμο του (7.10). Ο προκύπτων συντελεστής προσδιορισμού του

τελευταίου ήταν ελαφρά υψηλότερος (73.2% έναντι 73.0%) σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή που προκύπτει θεωρώντας την κανονική χρονοσειρά απορροής. Αυτό σημαίνει ότι η μοναδική πληροφορία που εισάγει η απορροή του Βοιωτικού Κηφισού σχετίζεται με την εποχή του έτους. Κατά συνέπεια, η στάθμη της Υλίκης είναι η μόνη μεταβλητή που εξηγεί τις υπόγειες διαφυγές της λίμνης και η σχέση (7.10) κρίνεται απόλυτα επαρκής ως μοντέλο πρόγνωσης αυτών.

7.4 Απορροή λεκάνης Υλίκης

7.4.1 Ιστορικό

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 7.2.5, στη λεκάνη της Υλίκης δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις παροχής στα υδατορεύματα που τροφοδοτούν την λίμνη, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των απευθείας εισροών λόγω επιφανειακής απορροής. Αναγκαστικά λοιπόν, η εκτίμηση των εν λόγω εισροών είναι χονδροειδής, καθώς βασίζεται μόνο σε παραδοχές και καθόλου σε μετρήσεις.

Οι *Αλτηγός κ.ά.* (1964) ήταν οι πρώτοι που επιχείρησαν να δώσουν μια εκτίμηση των απευθείας εισροών στην Υλίκη. Οι μελετητές βασίστηκαν στην υπόθεση εξίσωσης του συντελεστή απορροής της λεκάνης της Υλίκης με τον αντίστοιχο συντελεστή της γειτονικής λεκάνης ανάντη του ταμιευτήρα Μαραθώνα. Στη συνέχεια, εφάρμοσαν μια σχέση αναγωγής σε μέση ετήσια βάση, η οποία βασίζεται στην ορθολογική μέθοδο και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$Q_2 = Q_1 \frac{F_2}{F_1} \frac{P_2}{P_1} \quad (7.14)$$

όπου Q_1 η τιμή της απορροής, F_1 η έκταση και P_1 η επιφανειακή βροχόπτωση στην λεκάνη όπου υπάρχουν μετρήσεις (εν προκειμένω, στην λεκάνη ανάντη του φράγματος Μαραθώνα), και Q_2 , F_2 , P_2 τα αντίστοιχα μεγέθη για την λεκάνη όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις. Εξαιρώντας την κλειστή λεκάνη των Βαγίων που θεωρήθηκε ότι δεν συνεισφέρει ουσιαστικά στην απορροή της Υλίκης¹, και θεωρώντας μέση ετήσια βροχόπτωση στην Υλίκη 520 mm και στον Μαραθώνα 695 mm, εκτιμήθηκε μέση ετήσια απορροή της τάξης των 29.0 hm³. Στην εν λόγω τιμή οι μελετητές προσέθεσαν 10.4 hm³ που προέρχονται από την επιφανειακή βροχόπτωση πάνω στην λίμνη, θεωρώντας μια μέση επιφάνεια της τάξης των 20 km². Συνεπώς, οι ετήσιες εισροές εκτιμήθηκαν στα επίπεδα των 39.4 hm³, που συγκρινόμενες με την μέση ετήσια τιμή της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (ήτοι 438.4 hm³) προέκυπτε ένα ποσοστό της τάξης του 9%. Οι μελετητές στρογγύλεψαν το εν λόγω ποσοστό στο 10%, ώστε να λάβουν υπόψη τους την αναμενόμενη συνεισφορά της λεκάνης των Βαγίων, όταν θα ολοκληρώνονταν τα αντιπλημμυρικά έργα της περιοχής. Αφαιρώντας την άμεση συνεισφορά της βροχόπτωσης στη λίμνη, το ποσοστό της μέσης απορροής της λεκάνης ως προς την μέση απορροή του Βοιωτικού Κηφισού δεν ξεπερνά το 8%, ο δε συντελεστής απορροής ανέρχεται στα επίπεδα του 18%.

Οι *Κουτσογιάννης και Ναλμπάντης* (1989) ακολούθησαν δύο προσεγγίσεις. Αρχικά, με βάση τα υδρολογικά δεδομένα των τελευταίων 20 ετών (μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης 748.5 mm, μέσο ετήσιο ύψος απορροής 171.9 mm), υπολόγισαν ότι ο συντελεστής απορροής της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού ανέρχεται στα επίπεδα του 23%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι: (α) η τιμή της μέσης ετήσια βροχόπτωσης στην λεκάνη της Υλίκης για την ίδια περίοδο είναι αρκετά μικρότερη, της τάξης των 509.6 mm, (β) ο ρυθμός μείωσης της απορροής σε μία λεκάνη είναι μεγαλύτερος του ρυθμού μείωσης των κατακρημνισμάτων, και (γ) η έκταση των διαπερατών (ανθρακικών) πετρωμάτων στην περιοχή της Υλίκης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, υπέθεσαν αρκετά χαμηλότερη τιμή του συντελεστή απορροής στην λεκάνη της Υλίκης, της τάξης των 10-15%.

¹ Την εποχή της συγγραφής της μελέτης δεν είχαν κατασκευαστεί οι τέσσερις περιφερειακές τάφροι, μέσω των οποίων το υψηλό τμήμα της λεκάνης Βαγίων, έκτασης 47 km², αποχετεύεται στην Υλίκη.

Μεταξύ των δύο ακραίων τιμών υιοθέτησαν την πιο συντηρητική (ήτοι 10%), την οποία επαλήθευσαν με εφαρμογή της σχέσης του Turk (*Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος*, 1997, σ. 243-246). Σύμφωνα με την εν λόγω εμπειρική σχέση, με θεώρηση μέσης θερμοκρασίας αέρα 16.5 °C, η μέση εξατμοδιαπνοή στην λεκάνη προκύπτει ίση με 466.0 mm, οπότε το ύψος απορροής για την περίοδο αναφοράς ανέρχεται σε $509.6 - 466.0 = 43.6$ mm ή ποσοστό 8.6% επί της μέσης βροχόπτωσης. Τελικά, ο υπερετήσιος όγκος απορροής, για συντελεστή απορροής 10% και έκταση λεκάνης ίση με 420 km², υπολογίστηκε σε 21.5 hm³. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί στο 6% της μέσης ετήσιας εισροής στην σήραγγα Καρδίτσας, είναι δηλαδή κάπως πιο συντηρητική σε σχέση με την εκτίμηση των *Αλτηγού κ.ά.* (1964). Ως εκ τούτου, για την εκτίμηση των συνολικών εισροών στην Υλίκη σε μηνιαία βάση, θεωρήθηκε προσαύξηση της μετρούμενης απορροής του Βοιωτικού Κηφισού κατά ποσοστό 6%. Η προσέγγιση αυτή ακολουθήθηκε σε όλες τις επόμενες μελέτες κατά τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι κατά την εκτίμηση του όγκου απορροής θεωρήθηκε από τους μελετητές ότι συνεισφέρει και η λεκάνη των Βαγίων, αφού ελήφθη όλη η έκταση των 420 km². Ωστόσο, δεδομένου ότι το υψηλό τμήμα της λεκάνης, έκτασης 47.5 km², αποχετεύεται στην Υλίκη μέσω αποστραγγιστικών τάφρων, ο τοπικός συντελεστής απορροής αναμένεται να είναι μεγαλύτερος από 10%. Από την άλλη πλευρά, το υπόλοιπο τμήμα της λεκάνης, έκτασης 35.4 km², είναι κλειστό, αν και εικάζεται ότι αποχετεύεται μέσω καταβοθρών. Στη περίπτωση αυτή, αναμένεται πρακτικά μηδενική τιμή του συντελεστή απορροής. Συνεπώς, κατά μέσο όρο, ο συντελεστής απορροής του συστήματος των Βαγίων κυμαίνεται στα επίπεδα που θεωρήθηκαν γενικά για την λεκάνη της Υλίκης, ήτοι 10%.

7.4.2 Περαιτέρω διερεύνηση

Οι *Κουτσογιάννης και Ναλμπάντης* (1989) εκτίμησαν την υπερετήσια απορροή της λεκάνης της Υλίκης θεωρώντας ότι μέρος της βροχόπτωσης εξατμίζεται και το υπόλοιπο απορρέει επιφανειακά. Μάλιστα, με εφαρμογή της σχέσης του Turk, προέκυψε ποσοστό απωλειών λόγω εξάτμισης της τάξης του 91.4%, τιμή που ωστόσο κρίνεται υπερβολική. Στην πραγματικότητα, λόγω του καρστικού υποβάθρου της λεκάνης, σημαντικό ποσοστό της βροχόπτωσης τροφοδοτεί τον υπόγειο υδροφόρο, μέσω μηχανισμών κατείδυσης αντίστοιχων με αυτών που αναπτύσσονται στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των δύο λεκανών είναι παρόμοια, καθώς παρατηρείται κυριαρχία των διαπερατών σχηματισμών. Σε υπερετήσια λοιπόν κλίμακα, η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης γράφεται:

$$P = E + G + Q \quad (7.15)$$

όπου P η βροχόπτωση, E η εξατμοδιαπνοή, G η κατείδυση, και Q η επιφανειακή απορροή. Από την άλλη πλευρά, η κατείδυση μαζί με τις υπόγειες διαφυγές την Υλίκης, L , τροφοδοτούν τον υπόγειο υδροφόρο της λεκάνης, τα ρυθμιστικά αποθέματα του οποίου είτε αντλούνται είτε εκφορτίζονται προς τις καρστικές πηγές της λεκάνης, την Παραλίμνη και την θάλασσα, ήτοι:

$$\Delta S = G + L - W - Q \quad (7.16)$$

όπου ΔS η μεταβολή στην αποθήκευση υπόγειου νερού (που σε υπερετήσια βάση μπορεί να αγνοηθεί, μόνο όμως εφόσον δεν παρατηρούνται συστηματικές τάσεις στην διαίτα των βροχοπτώσεων ούτε και υπερεκμετάλλευση του υδροφόρου), W οι αντλούμενες ποσότητες από τις γεωτρήσεις, και Q το σύνολο των εκφορτίσεων εντός κι εκτός λεκάνης. Στις τελευταίες περιλαμβάνεται, κανονικά, και η υπόγεια τροφοδοσία της Υλίκης (μέρος της οποίας ενδεχομένως να προέρχεται από την γειτονική λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού), που ωστόσο έχει ήδη ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό των υπόγειων διαφυγών. Με άλλα λόγια, ο άγνωστος στην εξίσωση ισοζυγίου της λίμνης είναι οι *καθαρές διαφυγές*, ήτοι οι υπόγειες εκροές μείον την υπόγεια τροφοδοσία. Το γεγονός αυτό ερμηνεύει την εμφάνιση

αρνητικών τιμών σε πολύ χαμηλές στάθμες, όπου η τροφοδοσία της λίμνης υπερτερεί έναντι των διαφυγών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το σύστημα της Υλίκης και της λεκάνης απορροής της είναι εξαιρετικά πολύπλοκο, με άγνωστες όλες σχεδόν τις συνιστώσες του υδατικού του ισοζυγίου, η αναλυτική μοντελοποίηση του οποίου είναι αδύνατη χωρίς την ύπαρξη εκτεταμένων και συστηματικών μετρήσεων, τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων νερών. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να περιοριστούμε σε απλές προσεγγίσεις, εκτιμώντας της απορροή της λεκάνης της Υλίκης σε συσχέτιση με κάποιο άλλο γνωστό μέγεθος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο υπολογισμός της εν λόγω απορροής γίνεται με προσαύξηση κατά 6% της μετρημένης απορροής στην διώρυγα Καρδίτσας. Η μέθοδος αυτή που είναι απλούστατη στην εφαρμογή της, αν και σε υπερετήσια βάση είναι ορθή, παρουσιάζει διάφορα μειονεκτήματα όταν χρησιμοποιείται σε μηνιαία βάση, δεδομένου ότι:

- η μετρούμενη απορροή του Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας δεν ταυτίζεται με την φυσική απορροή της λεκάνης, καθώς μεσολαβούν οι ανάντη αρδευτικές απολήψεις, με ολικό φράξιμο της κοίτης του ποταμού κατά την θερινή περίοδο·
- σημαντικό ποσοστό του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης, το οποίο εκτιμάται σε 50%, προέρχεται από πηγές, ήτοι από αναρρυθμιζόμενα νερά, κάτι που σε καμία περίπτωση δεν ισχύει για την λεκάνη της Υλίκης, η υδρολογική διαίτα της οποίας είναι χειμαρρική, με αποτέλεσμα η απόκρισή της στην βροχόπτωση να είναι άμεση.

Για την αποφυγή των παραπάνω σφαλμάτων, επιχειρήθηκε μια νέα προσέγγιση, θεωρώντας ως άγνωστο μέγεθος το άθροισμα της επιφανειακής και υπόγειας τροφοδοσίας της Υλίκης και των υπόγειων διαφυγών αυτής, με την κατάρτιση ενός στατιστικού μοντέλου με ανεξάρτητες μεταβλητές την στάθμη της λίμνης και την επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης. Η εν λόγω προσέγγιση περιγράφεται στο εδάφιο που ακολουθεί.

7.4.3 Ανάπτυξη μοντέλου καθαρών απωλειών Υλίκης

Οι υπόγειες διαφυγές μείον την επιφανειακή και υπόγεια τροφοδοσία της Υλίκης, που στο εξής θα καλούνται *καθαρές απώλειες*, εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τρεις παράγοντες:

- την στάθμη της λίμνης·
- την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα·
- την μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση στην λεκάνη.

Κατά συνέπεια, για την εκτίμηση των καθαρών απωλειών θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα γραμμικό στατιστικό μοντέλο παρόμοιο με το (7.12). Πράγματι, με την θεώρηση όχι των διαφυγών αλλά των καθαρών απωλειών, αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα με επεξηγηματικές μεταβλητές: (α) την μέση στάθμη της Υλίκης και την επιφανειακή βροχόπτωση του τρέχοντος και του προηγούμενου μήνα, (β) την μέση στάθμη της Υλίκης, την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού και την επιφανειακή βροχόπτωση του τρέχοντος μήνα, και (γ) την μέση στάθμη της Υλίκης, την απορροή του Βοιωτικού Κηφισού και την επιφανειακή βροχόπτωση του προηγούμενου μήνα. Στον Πίνακα 7.8 δίνονται οι συντελεστές προσδιορισμού των δύο μοντέλων υπόγειων διαφυγών (βλ. 7.3.6 και 7.3.7) και των τριών μοντέλων καθαρών απωλειών της Υλίκης, εφαρμοζόμενων σε μηνιαία βάση. Το συμπέρασμα που προκύπτει ότι η προσαρμογή των εκτιμημένων στις ιστορικές απώλειες βελτιώνεται με την θεώρηση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού ως επεξηγηματικής μεταβλητής του μοντέλου παλινδρόμησης. Ωστόσο, η προσαρμογή δεν είναι το ίδιο καλή σε σχέση με το γενικευμένο μοντέλο διαφυγών, με εξαίρεση τον μήνα Νοέμβριο, που πάντως η διαφορά στην τιμή του συντελεστή προσδιορισμού είναι μικρή. Ως εκ τούτου, είναι προτιμότερη η μοντελοποίηση μόνο των υπόγειων διαφυγών και όχι του συνδυασμού υπόγειων διαφυγών-απορροής λεκάνης Υλίκης.

Πίνακας 7.8: Σύγκριση συντελεστών προσδιορισμού μοντέλων διαφυγών ή καθαρών απωλειών Υλίκης.

Μήνας	Απλό μοντέλο διαφυγών	Γενικευμένο μοντέλο διαφυγών	Μοντέλο απωλειών 1	Μοντέλο απωλειών 2	Μοντέλο απωλειών 3
Οκτώβριος	0.756	0.860	0.810	0.849	0.846
Νοέμβριος	0.871	0.882	0.911	0.879	0.915
Δεκέμβριος	0.599	0.662	0.616	0.637	0.624
Ιανουάριος	0.865	0.887	0.797	0.778	0.798
Φεβρουάριος	0.532	0.539	0.485	0.549	0.549
Μάρτιος	0.554	0.607	0.441	0.498	0.447
Απρίλιος	0.842	0.892	0.866	0.862	0.849
Μάιος	0.690	0.754	0.711	0.725	0.726
Ιούνιος	0.786	0.834	0.805	0.825	0.821
Ιούλιος	0.696	0.765	0.726	0.762	0.779
Αύγουστος	0.733	0.741	0.733	0.738	0.739
Σεπτέμβριος	0.851	0.884	0.882	0.879	0.888

7.4.4 Τελική εκτίμηση απορροής Υλίκης

Από την διερεύνηση που έγινε, προκύπτει ότι η έως τώρα εκτίμηση της επιφανειακής απορροής της λεκάνης της Υλίκης, με θεώρηση της ως σταθερό ποσοστό της μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας, είναι αρκετά ικανοποιητική. Εξαιρέση αποτελούν οι θερινοί μήνες, κατά τους οποίους η μετρούμενη παροχή του Βοιωτικού Κηφισού δεν είναι η πραγματική λόγω των ανάντη αρδευτικών απολήψεων. Βεβαίως, την θερινή περίοδο κατά την οποία εντατικοποιούνται οι αρδεύσεις και φράσσεται η ροή του ποταμού, οι βροχοπτώσεις στην περιοχή της Υλίκης είναι ελάχιστες και η παραγόμενη απορροή πολύ μικρή, δεδομένου ότι το έδαφος είναι πολύ ξηρό και η ζήτηση για εξάτμιση αυξημένη.

Για την θερινή και μόνο περίοδο, κι εφόσον η κοίτη του Βοιωτικού Κηφισού είναι φραγμένη, προτείνεται η χρήση ενός στοιχειώδους μοντέλου βροχής-απορροής, βασισμένου στην ορθολογική μέθοδο. Το εν λόγω μοντέλο υπολογίζει την απορροή της λεκάνης της Υλίκης σε hm^3 , εφαρμόζοντας μια σχέση της μορφής:

$$Q = 0.001 c P F \quad (7.17)$$

όπου c ο συντελεστής απορροής, P η επιφανειακή βροχόπτωση στην λεκάνη της Υλίκης (σε mm) και F η έκταση της λεκάνης, που είναι ίση με $424.0 km^2$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι: (α) τους ξηρούς μήνες ο συντελεστής απορροής μιας λεκάνης χειμαρρικής διαίτας, όπως αυτή της Υλίκης, είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τους μήνες υψηλής υδροφορίας, κατά τους οποίους το έδαφος είναι κορεσμένο σε υγρασία και δεν μπορεί να απορροφήσει το νερό της βροχής, και (β) ο υπερετήσιος συντελεστής απορροής της λεκάνης, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 7.4.1, κυμαίνεται στα επίπεδα του 10%, προτείνεται συντελεστής επιφανειακής απορροής της τάξης του 3-5%.

8 Λοιποί υδροφορείς (εκτός Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης)

Κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης η ΕΥΔΑΠ έχει αναπτύξει ένα δίκτυο γεωτρήσεων στις περιοχές Βίλιζας, Αυλώνα και Μαυροσουβάλας, για την εκμετάλλευση του υδροφορέα της Βορειοανατολικής Πάρνηθας. Τα χαρακτηριστικά των εν λόγω γεωτρήσεων δίνονται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Γεωτρήσεις περιοχής ΒΑ Πάρνηθας (ΙΓΜΕ, 1988-1998).

Γεώτρηση	Περιοχή	Μέση στάθμη ηρεμίας (m)	Υψόμετρο επιφάνειας (m)	Παροχή ($\times 1000 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$)
ASI	Μαυροσουβάλα	16.00	147.26	
ASIX	Μαυροσουβάλα	17.00	135.37	
ASXXVI	Μαυροσουβάλα	17.00	145.00	4.32
ASXXVII	Μαυροσουβάλα	17.00	222.50	
ASXXXII	Μαυροσουβάλα	16.00	158.58	8.40
ASXXXIII	Μαυροσουβάλα	16.00	117.80	3.60
ASXIII	Αυλώνα	14.00	177.68	4.32
ASXV	Αυλώνα	16.00	177.82	4.32
ASXX	Αυλώνα	16.00	187.83	
ASXXXIV	Αυλώνα	16.00	132.81	1.44
ASXXXV	Αυλώνα	17.00	237.59	2.40
EM7	Βίλιζα	18.00	166.30	
EM12	Βίλιζα	18.00	188.28	3.60
EM13	Βίλιζα	19.00	197.70	3.60
EM17	Βίλιζα	16.00	236.98	1.20
EM20	Βίλιζα	18.00	167.23	3.36

Το ΙΓΜΕ (1996) δίνει ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη για τον υδροφορέα της ΒΑ Πάρνηθας. Συγκεκριμένα, η συνολική επιφάνεια τροφοδοσίας του εκτιμάται σε 300 km^2 , η απορροή των πηγών σε 95 hm^3 , ενώ τα ρυθμιστικά αποθέματα σε $60 \text{ hm}^3/\text{έτος}$. Σύμφωνα με την ΕΥΔΑΠ (1996), η ασφαλής απόδοση των γεωτρήσεων ΒΑ Πάρνηθας ανέρχεται σε $50 \text{ hm}^3/\text{έτος}$.

Ειδικότερα, η διαχείριση των γεωτρήσεων Μαυροσουβάλας που είναι οι σημαντικότερες της περιοχής αποτελεί αντικείμενο ερευνητικού προγράμματος του ΑΠΘ. Τα συμπεράσματα από την εκπόνηση της πρώτης φάσης του έργου συνοψίζονται στα ακόλουθα (Δημόπουλος, 1999):

- Την περιοχή δομούν καρστικοποιημένα ανθρακικά πετρώματα, τα οποία αποτελούν και τους υπόγειους ταμιευτήρες, τα νερά των οποίων εκμεταλλεύεται η ΕΥΔΑΠ.
- Η παρουσία υπερκείμενων, νεώτερων, αδιαπέρατων σχηματισμών (μάργες, άργιλοι, φλύσχης), δεν επηρεάζει την υδροφορία του καρστικού συστήματος.
- Ο υπόγειος καρστικός ορίζοντας είναι ελεύθερος, γεγονός που πιστοποιήθηκε από επί τόπου έρευνες (γεωλογικές παρατηρήσεις, γεωηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις, δοκιμαστικές αντλήσεις).
- Οι δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις της ΕΥΔΑΠ με κλιμακωτά αυξανόμενες παροχές κατέδειξαν την πλούσια υδροφορία του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα και τις σημαντικές δυνατότητες εκμετάλλευσής του σε περιόδους λειψυδρίας.

- Παρατηρήθηκαν ασήμαντες πτώσεις στάθμης στις αντλούμενες γεωτρήσεις και στο περιβάλλον, γεγονός που καταρχήν υποδηλώνει την δυνατότητα διάνοιξης νέων γεωτρήσεων εκμετάλλευσης.
- Ωστόσο, η στάθμη του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται περίπου 17 m πάνω από την θάλασσα, γεγονός που αναστέλλει την διάνοιξη νέων γεωτρήσεων εξαιτίας του κινδύνου υφαλμύρισης.

Αναφορές

- Αλτηγός, Ν., Κ. Κυριάκος, και Α. Μαχαίρας, Υδρολογική έρευνα λεκάνης Β. Κηφισού, *Υδρευσις Αθηνών – Προκαταρκτική Έκθεση*, Τεύχος 2, Αθήνα, Ιούλιος 1964.
- Αντωνίου-Πέππας & Συν/τες, ENVECO, και Β. Περλέρος, *Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων αρδευτικών και υδρευτικών έργων στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού*, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα, Απρίλιος 1993.
- Γκόφας Θ., και Συνεργάτες, Αθήνα, *Τεχνοοικονομική μελέτη σκοπιμότητας εγγειοβελτιωτικών έργων Κωπαϊδικού και Θηβαϊκού πεδίου - Οικονομική αναθεώρηση*, Ελληνική Εταιρεία Τοπικής Ανάπτυξης και Αυτοδιοίκησης, Ιανουάριος 1988.
- Δάνδολος, Η., Υδρογεωλογική έκθεση 3^{ου} τριμήνου 2002, *Υδρογεωλογική μελέτη παρακολούθησης των υδατικών πόρων σε περιοχές των γεωτρήσεων υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ Α.Ε.*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Αθήνα, Οκτώβριος 2002.
- Δημόπουλος, Γ., Έκθεση προόδου Α΄ φάσης εργασιών, *Πρότυπη μελέτη διαχείρισης υδάτινων πόρων λεκάνης Μαυροσουβάλας Αττικής με αξιοποίηση γεωτρήσεων ΕΥΔΑΠ*, Τομέας Γεωλογίας και Φυσικής Γεωγραφίας - Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 1999.
- ΕΥΔΑΠ, *Διαχειριστικό Σχέδιο Υδρευσης* (μετάφραση από το αγγλικό πρωτότυπο), Τεχνική υποστήριξη: Knight Riésold, Αθήνα, 1996.
- ΕΥΔΑΠ/ΕΜΠ, Σύμβαση έργου, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 16 σελίδες, Αθήνα, 26 Μαΐου 1999.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, MSc thesis, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, *Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 8, 129 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ζαρρής, Δ., Ε. Ρόζος, και Δ. Σακελλαριάδης, *Περιγραφή των υδατικών συστημάτων, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 36, 160 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- ΓΓΜΕ, *Εκτίμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Παράρτημα 3, 327 σελίδες, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, Νοέμβριος 1996.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ν. Δαμιανόγλου, Κ. Κωνσταντινίδου, Σ. Ναλπαντίδου, Α. Ξανθάκης, και Σ. Πολιτάκη, *Ανάλυση απαιτήσεων του*

- συστήματος, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 1, 74 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2000.
- Κουκουβίνος, Α., και Α. Χριστοφίδης, Ανάπτυξη συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας για την υδρολογία, τις χρήσεις και τα έργα αξιοποίησης νερού, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 38, 50 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ι. Ναλμπάντης, Εκτίμηση δυνατοτήτων του σημερινού υδροδοτικού συστήματος Μόρνου-Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 8, 87 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 1989.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Λαδόπουλος, Π. Δ., και Ν. Δ. Χωραφάς, Υδρολογική μελέτη: Έκθεσις - Πίνακες, *Μελέτη υδατικού ισοζυγίου μετά υδρογεωλογικής ερεύνης κοιλάδος Βοιωτικού Κηφισού και πεδιάδων Κωπαΐδος και Θηβών*, Υπουργείο Δημοσίων Έργων, υπηρεσία Υδραυλικών Έργων – Διεύθυνσις Δ2, Αθήνα, Φεβρουάριος 1974.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Μαμάσης, Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 17, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., και Δ. Κουτσογιάννης, Κασταλία (έκδοση 2.0) - Σύστημα στοχαστικής προσομοίωσης υδρολογικών μεταβλητών, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 23, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρονομέας (έκδοση 3.2) - Σύστημα υποστήριξης της διαχείρισης των υδατικών πόρων, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 24, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Μαρίνος, Π., Χάρτης ανάπτυξης καρστικών υδροφοριών, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*, Αρ. Σχεδίου 6, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1995.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ε. Ρόζος, Σύστημα προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Β. Κηφισού, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 10, 72 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ναλμπάντης, Ι., και Ρ. Μαυροδήμου, Εκτίμηση υδατικών αναγκών, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 3*, Τεύχος 37, 63 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 1999.
- Παγούνης, Μ., *Αποτελέσματα και συμπεράσματα από την λειτουργία των γεωτρήσεων ύδρευσης της πρωτεύουσας στην περιοχή Βοιωτίας-Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, Δεκέμβριος 1993.

- Παγούνης, Μ., Α. Γκατζογιάννης, και Θ. Γκέρτσος, *Μελέτη σύνταξης υδατικού ισοζυγίου Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1986.
- Παγούνης, Μ., Θ. Γκέρτσος, και Α. Γκατζογιάννης, *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1994.
- Παπαγιαννοπούλου, Α., και Α. Λέτσιος, *Υδρογεωλογική μελέτη Κωπαϊδικού πεδίου και Βοιωτικού Κηφισού*, Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα, 1971.
- Ρόζος, Ε., *Εποπτεία και διερεύνηση των γεωτρήσεων της περιοχής Υλίκης με τη βοήθεια συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας*, Διπλωματική εργασία, 77 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 1997.
- Ρώτη, Σ., Ν. Μαμάσης, και Κ. Τσολακίδης, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων λεκάνης Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 11, 167 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1990.
- Τζεράνης, Ι., και Κ. Τσολακίδης, Επισκόπηση υδρολογικών μελετών της ευρύτερης περιοχής Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 9, 184 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1990.
- ΥΠΕΧΩΔΕ, Ανάλυση υδρομετεωρολογικών δεδομένων, *Μελέτη διαχείρισης υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και των λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης*, Έκθεση Β' Φάσης, 2000.
- Andréassian, V., C. Perrin, C. Michel, I. Usart-Sanchez, and J. Lavabre, Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models, *Journal of Hydrology*, 250, 206-223, 2001.
- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- Beven, K. J., and A. M. Binley, The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, 279-298, 1992.
- Beven, K. J., Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172, 1989.
- Boyle, D., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods, *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674, 2000.
- Cohon, J. I., *Multiobjective Programming and Planning*, Academic Press, 1978.
- Dingman, S. L., *Physical Hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994.
- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. Gupta, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031, 1992.
- Eckhardt, K., and J. G. Arnold, Automatic calibration of a distributed catchment model, Technical note, *Journal of Hydrology*, 251, 103-109, 2001.
- Efstratiadis, A., and D. Koutsoyiannis, An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems, *Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics*, Vol. 2, 1423-1428, Cardiff, UK, July 2002, IAHR, IWA, IAHS, 2002.

- Gan, T., and G. Biftu, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization theories, catchment conditions and model structure, *Water Resources Research*, 32(12), 3513-3524, 1996.
- Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- Gupta, H. V., S. Sorooshian, and P. O. Yapo, Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and non-commensurable measures of information, *Water Resources Research*, 34(4), 751-763, 1998.
- Johnston, P. R., and D. Pilgrim, Parameter optimization for watershed problems, *Water Resources Research*, 12(3), 477-486, 1976.
- Hines, W. W., and D. C. Montgomery, *Probability and Statistics in Engineering and Management Science*, Third edition, John Wiley & Sons, 1990.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680, 1983.
- Kuczera, G., and M. Mroczkowski, Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data, *Water Resources Research*, 34(6), 1481-1489, 1998.
- Madsen, H., Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives, *Journal of Hydrology*, 235(4), 276-288, 2000.
- Madsen, H., G. Wilson, and H. C. Ammentorp, Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models, *Journal of Hydrology*, 261, 48-59, 2002.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, New York, 1996.
- Nalbantis, I., N. Mamassis, et D. Koutsoyiannis, Le phénomène récent de sécheresse persistante et l'alimentation en eau de la cité d' Athènes, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 6eme Colloque International de Climatologie*, édité par P. Maheras, Thessaloniki, Septembre 1993, 6, 123-132, Association Internationale de Climatologie, Aix-en-Provence Cedex, France, 1993.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290, 1970.
- Nelder, J. A., and R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.
- Pan, L., and L. Wu, A hybrid global optimization method for inverse estimation of hydraulic parameters: annealing-simplex method, *Water Resources Research*, 34(9), 2261-2269, 1998.
- Paturel, J. E., E. Servat, and A. Vassiliadis, Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data – case of the GR2M model, *Journal of Hydrology*, 168, 111-125, 1995.
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian, Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, *Journal of Hydrology*, 242(3-4), 275-301, 2001.
- Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, Second edition, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1992.

- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, Paper submitted to *Hydrological Sciences Journal*, 2003.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, An assessment of flow equations in modeling of karstic aquifers, Paper submitted to *Journal of Hydrology*, 2002.
- Sorooshian, S., and V. Gupta, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness, *Water Resources Research*, 19(1), 260-268, 1983.
- Thyer, M., G. Kuczera, and B. C. Bates, Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms, *Water Resources Research*, 35(3), 767-773, 1999.
- Vrugt, J. A., W. Bouten, H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data, *Water Resources Research*, 38(12), 1312, doi: 10.1029/2001WR001118, 2002.
- Wagner, T., D. P. Boyle, M. Lees, H. S. Wheater, H. V. Gupta, and S. Sorooshian, A framework for development and application of hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13-26, 2001.
- Wang, Q. J., The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, 27(9), 2467-2471, 1991.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data, *Journal of Hydrology*, 181, 23-48, 1996.
- Yapo, P. O., H. V. Gupta, and S. Sorooshian, Multi-objective global optimization for hydrologic models, *Journal of Hydrology*, 204, 83-97, 1998.

Παράρτημα Α: Επεξεργασμένες χρονοσειρές λεκανών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης

Χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης

Πίνακας Α.2: Μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση ορεινής ζώνης λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (mm).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1966-67	53.4	281.0	173.5	101.4	135.4	120.5	55.9	36.4	8.4	44.5	19.9	64.1	1094.4
1967-68	70.9	92.8	266.4	328.9	115.5	156.9	16.0	56.1	78.5	0.0	26.4	25.0	1233.4
1968-69	249.3	170.3	469.8	203.3	139.1	167.0	24.8	8.7	7.5	4.3	8.7	64.1	1516.9
1969-70	9.9	88.0	378.1	160.5	112.1	170.9	10.5	83.2	49.0	44.6	8.5	40.1	1155.5
1970-71	156.9	81.8	80.3	257.6	235.5	252.3	92.1	22.5	17.4	53.5	40.4	74.9	1365.3
1971-72	100.2	112.1	119.5	240.8	153.3	106.2	163.8	71.8	10.9	69.7	75.4	31.8	1255.4
1972-73	174.9	217.3	51.0	243.5	166.9	192.3	46.3	16.0	42.5	62.7	30.9	17.2	1261.6
1973-74	196.0	118.6	198.4	125.3	292.2	158.0	102.7	68.1	16.8	5.2	6.6	36.4	1324.4
1974-75	91.8	179.9	62.9	71.9	282.7	135.4	30.6	67.0	133.7	4.3	82.3	10.1	1152.7
1975-76	44.7	115.8	322.1	164.9	271.2	91.3	116.7	44.1	22.7	27.2	27.3	11.4	1259.3
1976-77	156.9	161.6	145.8	57.5	52.5	47.8	116.6	9.4	34.3	5.1	6.3	50.3	844.1
1977-78	56.9	192.0	348.4	347.3	232.3	98.0	124.1	14.8	14.5	2.1	11.0	129.8	1571.2
1978-79	132.4	115.2	321.6	203.9	172.4	55.2	88.2	87.9	39.6	76.9	34.7	12.7	1340.7
1979-80	279.9	284.1	196.6	336.2	145.2	268.8	113.8	59.2	41.4	3.9	10.4	18.1	1757.6
1980-81	343.3	77.3	310.0	566.8	121.3	50.3	117.3	28.4	17.4	3.6	17.4	63.9	1717.0
1981-82	127.3	156.3	278.3	74.9	244.8	310.5	163.8	198.3	31.2	10.1	15.3	40.7	1651.4
1982-83	57.1	219.3	184.3	58.9	169.1	165.7	33.2	20.3	151.1	70.0	38.3	3.6	1171.0
1983-84	85.6	147.2	330.5	143.5	276.0	189.0	216.1	31.0	11.8	15.9	47.0	15.9	1509.5
1984-85	10.1	185.2	105.2	484.9	109.5	152.0	88.4	60.0	19.4	12.9	0.0	23.4	1251.1
1985-86	123.6	218.5	107.4	158.3	261.9	126.1	39.3	87.5	75.4	38.7	20.2	14.1	1271.0
1986-87	172.5	177.6	180.2	211.1	135.0	326.9	110.4	62.9	36.2	8.5	19.8	6.7	1447.7
1987-88	86.5	218.1	97.2	128.4	239.1	176.8	36.4	50.3	22.0	1.6	1.8	9.5	1067.7
1988-89	71.5	324.5	284.1	18.9	54.4	310.2	41.6	61.7	15.1	42.8	12.2	17.2	1254.3
1989-90	153.6	131.6	158.8	17.0	81.8	34.0	116.9	29.4	41.8	12.0	154.3	34.0	965.3
1990-91	91.2	187.9	410.4	188.7	122.9	105.2	148.3	111.1	2.5	19.1	55.5	21.2	1464.1
1991-92	98.9	161.4	100.2	34.9	74.3	82.4	97.4	119.3	70.0	14.8	5.0	7.1	865.6
1992-93	55.1	85.5	124.2	80.4	203.5	99.4	36.5	127.2	12.8	0.0	0.1	7.5	832.2
1993-94	4.7	321.2	122.0	210.1	223.2	71.1	85.6	87.9	25.4	28.9	21.4	5.7	1207.2
M. T.	116.3	172.2	211.7	186.4	172.3	150.7	86.9	61.4	37.5	24.4	28.5	30.6	1278.8
T. A.	80.9	70.2	115.7	133.7	72.7	81.7	51.5	42.5	35.9	24.4	32.4	28.2	245.0

Προκύπτει με υψομετρική αναγωγή του μέσου όρου των μετατοπισμένων κατά δύο ημέρες σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών Δαύλειας, Αγίας Τριάδας, Γραβιάς, Δρυμαίας, Συκέας, Επταλόφου και Γραβιάς. Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής 1.244.

Πίνακας Α.3: Μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση πεδινής ζώνης λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (mm).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1966-67	16.4	119.0	91.5	51.4	62.4	126.1	30.9	34.2	9.2	15.9	33.0	43.0	633.0
1967-68	66.4	107.0	143.9	104.5	76.4	102.6	11.1	33.9	36.9	0.0	20.1	34.5	737.1
1968-69	181.8	126.9	266.9	101.3	29.0	74.4	23.7	1.9	1.8	3.9	0.2	43.5	855.4
1969-70	4.1	31.3	183.2	52.2	41.2	103.7	1.5	70.3	46.6	48.2	1.2	33.2	616.7
1970-71	108.4	27.2	69.6	73.7	96.0	93.1	61.9	7.7	16.5	26.0	59.0	36.4	675.5
1971-72	79.7	78.4	66.4	185.9	73.0	47.4	96.9	39.8	3.4	56.4	52.5	19.1	799.0
1972-73	71.5	65.3	34.0	113.2	62.2	62.6	13.7	10.5	22.7	42.0	9.8	29.6	537.2
1973-74	99.9	73.6	71.8	89.5	129.8	87.3	32.6	30.4	18.5	0.4	0.1	8.9	642.7
1974-75	37.6	96.5	25.0	62.2	134.8	64.1	21.5	35.5	64.0	2.2	25.6	16.1	584.9
1975-76	23.9	70.2	180.7	72.0	183.5	41.0	59.6	17.6	11.0	9.3	20.3	3.2	692.4
1976-77	76.7	59.3	52.2	17.9	5.4	24.9	45.4	0.8	30.6	0.9	5.0	35.5	354.7
1977-78	27.9	49.5	205.2	160.3	90.9	35.8	64.5	16.1	3.9	0.3	6.2	70.5	731.1
1978-79	62.9	43.0	173.0	63.5	67.6	22.6	33.0	38.9	12.8	28.3	30.6	11.5	587.7
1979-80	189.9	150.8	72.9	108.4	91.6	106.1	71.0	39.4	20.0	0.0	11.5	14.1	875.7
1980-81	159.0	46.9	123.3	239.0	37.3	14.1	56.3	7.4	4.9	0.5	11.8	40.6	741.0
1981-82	52.3	89.3	83.7	57.6	137.7	156.1	134.5	73.4	14.1	8.7	8.6	9.6	825.7
1982-83	30.2	98.6	49.0	42.5	95.3	40.3	5.3	8.3	93.9	26.8	16.6	0.0	506.9
1983-84	36.5	70.7	172.3	73.0	112.1	112.3	125.8	18.8	3.7	6.8	52.0	2.1	786.0
1984-85	2.3	79.2	64.3	223.8	65.6	69.6	44.1	15.7	2.5	2.9	0.4	23.3	593.8
1985-86	102.1	106.8	69.7	40.1	82.1	37.8	8.6	54.8	11.3	13.5	2.5	2.7	532.1
1986-87	127.9	80.7	55.4	80.6	76.2	158.7	89.1	10.1	10.0	4.8	8.6	9.2	711.3
1987-88	61.2	94.4	55.4	83.5	120.3	97.8	21.0	17.2	19.4	0.2	0.3	7.0	577.7
1988-89	56.5	166.3	142.0	5.1	30.1	97.7	13.0	18.3	7.7	12.0	8.3	4.4	561.4
1989-90	70.3	60.3	91.3	3.5	23.5	6.4	60.6	9.9	15.7	2.6	74.6	15.4	434.0
1990-91	38.7	96.3	147.4	120.1	70.2	79.0	92.0	40.2	0.5	8.7	22.6	12.5	728.1
1991-92	66.4	84.3	89.2	29.9	55.8	49.3	33.7	52.0	34.9	2.7	5.0	1.5	504.8
1992-93	30.5	43.1	66.0	69.8	80.1	34.0	15.1	91.5	2.7	0.2	8.4	1.4	442.9
1993-94	1.3	225.1	29.1	165.2	177.3	54.2	33.6	56.6	6.0	31.0	10.7	0.0	789.9
M. T.	67.2	87.1	102.7	88.9	82.4	71.4	46.4	30.4	18.7	12.7	18.1	18.9	645.0
T. A.	50.5	42.9	61.0	60.0	43.5	40.4	35.7	23.4	21.0	15.9	19.8	17.6	134.6

Προκύπτει με υψομετρική αναγωγή του μέσου όρου των μετατοπισμένων κατά δύο ημέρες σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών Αταλάντης, Αλιάρτου, Κάτω Τιθορέας, Λειβαδιάς και Παύλου. Συντελεστής υψομετρικής αναγωγής 1.045.

Πίνακας Α.4: Μηνιαία επιφανειακή βροχόπτωση λεκάνης Υλίκης (mm).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1956-57	9.1	45.0	26.9	71.8	12.1	27.2	14.7	49.7	15.8	1.5	2.5	41.1	317.2
1957-58	139.1	57.5	74.8	96.7	1.6	76.7	18.3	11.1	24.4	0.7	0.0	83.9	584.5
1958-59	52.4	123.6	20.5	60.9	19.8	57.1	58.0	14.8	20.0	20.8	3.8	48.3	499.6
1959-60	63.2	65.4	28.3	101.9	50.3	44.1	32.4	39.4	12.2	5.7	15.5	45.8	504.1
1960-61	10.3	59.7	152.3	81.6	61.1	120.1	17.0	7.5	6.2	2.8	2.1	1.1	521.5
1961-62	56.2	57.0	115.1	35.5	106.3	89.3	7.1	19.3	1.1	9.0	0.0	119.8	615.5
1962-63	131.0	120.9	200.8	31.2	42.1	68.1	21.6	63.4	22.3	11.5	0.9	2.4	716.0
1963-64	181.9	73.2	39.8	129.9	43.9	50.1	6.9	10.2	38.2	0.7	1.8	39.2	615.6
1964-65	14.3	12.0	63.6	87.6	104.6	64.3	34.0	33.9	22.0	2.6	4.8	0.0	443.4
1965-66	18.8	16.6	37.6	89.3	10.5	124.9	21.8	29.5	32.1	0.0	5.7	38.9	425.5
1966-67	17.4	95.2	105.7	44.7	47.4	58.8	33.0	17.6	31.6	4.3	32.9	45.0	533.3
1967-68	117.1	64.4	109.1	74.6	69.9	71.4	16.4	17.9	27.8	0.0	3.8	30.6	602.6

1968-69	154.5	105.2	193.6	94.4	18.2	92.8	20.1	0.5	0.4	0.1	0.0	15.2	694.8
1969-70	0.8	34.0	164.7	48.9	44.6	63.9	2.7	68.1	47.1	27.4	4.9	31.8	538.5
1970-71	76.7	13.4	89.3	68.0	83.4	100.5	31.5	14.8	6.3	17.1	44.8	16.5	561.9
1971-72	75.5	48.7	58.2	199.0	80.1	25.5	92.5	23.0	5.4	28.6	38.1	13.6	687.9
1972-73	119.1	20.5	31.5	106.5	54.4	35.1	8.0	1.7	21.5	16.9	6.2	49.5	470.7
1973-74	41.8	54.7	54.6	88.7	85.0	75.6	32.0	52.3	11.6	0.0	14.7	28.5	539.3
1974-75	17.1	88.4	24.6	69.7	128.6	23.4	7.1	41.5	41.1	2.3	17.9	5.1	466.6
1975-76	20.3	68.9	156.8	62.2	146.1	45.3	51.1	14.3	3.6	7.0	12.6	0.9	588.9
1976-77	70.8	67.3	55.2	13.4	5.1	40.9	36.7	9.0	33.2	0.2	0.7	15.3	347.5
1977-78	20.6	54.2	189.2	126.2	90.7	40.7	31.2	19.9	0.6	0.0	4.1	70.1	647.3
1978-79	55.5	38.7	143.7	37.1	62.1	20.9	21.3	35.1	5.0	19.9	24.8	16.6	480.5
1979-80	184.8	121.9	49.7	60.1	61.2	93.5	66.2	43.2	15.5	0.0	2.3	11.4	709.5
1980-81	106.9	33.5	114.6	199.4	38.4	5.5	38.8	12.1	0.2	5.8	10.3	14.4	579.5
1981-82	43.8	68.3	64.7	60.0	113.7	89.9	115.9	32.0	12.2	0.8	7.5	2.2	610.6
1982-83	34.3	107.6	37.9	13.7	71.3	54.4	6.7	12.1	64.9	19.5	7.0	0.4	429.4
1983-84	13.3	53.7	122.6	73.6	69.1	91.6	113.2	5.1	0.7	6.1	32.9	1.0	582.7
1984-85	2.5	79.3	83.6	126.3	31.5	69.4	27.2	8.8	0.8	0.9	0.0	6.7	436.7
1985-86	61.3	71.8	41.8	32.4	69.7	26.1	4.4	54.1	22.0	7.5	0.0	0.2	390.9
1986-87	83.9	22.3	47.9	41.1	37.3	75.6	83.6	4.6	7.4	3.0	20.3	0.0	426.7
1987-88	70.4	91.1	49.6	65.3	62.2	70.9	19.5	17.0	9.7	0.0	0.0	10.4	465.9
1988-89	33.9	148.5	116.1	3.6	22.3	60.4	6.5	18.7	2.5	6.7	1.8	2.9	423.7
1989-90	50.8	31.0	44.3	4.5	19.9	16.3	22.7	8.1	5.2	1.7	70.1	8.7	283.0
1990-91	25.4	86.9	94.5	110.8	66.0	81.4	72.8	42.1	0.1	6.2	43.2	6.5	635.6
1991-92	61.2	64.0	134.3	23.4	62.9	49.9	13.7	47.0	23.6	4.9	3.1	0.4	488.2
1992-93	32.0	37.7	33.8	33.5	63.6	19.9	20.2	76.1	0.2	0.3	0.2	0.5	317.9
1993-94	0.0	177.0	29.5	138.9	129.9	41.0	28.2	47.5	4.7	39.8	1.9	0.0	638.1
1994-95	147.5	62.5	92.4	117.6	7.7	81.2	26.2	6.8	1.3	0.0	1.3	30.8	575.1
1995-96	27.0	65.6	110.3	87.5	103.2	53.5	14.3	62.9	0.7	3.0	22.9	32.6	583.2
1996-97	40.9	20.4	60.5	129.8	32.6	70.8	47.7	7.8	4.0	0.0	10.3	0.3	424.9
1997-98	33.1	58.9	118.9	22.6	19.7	160.0	17.3	56.5	9.0	0.0	0.0	29.7	525.6
1998-99	27.1	90.8	68.6	30.7	43.2	171.8	17.3	10.6	0.0	22.3	3.8	34.7	520.8
1999-00	56.4	116.7	47.4	30.6	63.3	27.2	8.9	2.1	1.7	0.0	0.0	1.8	355.8
M. T.	59.1	68.0	84.0	73.3	58.1	64.2	31.5	26.6	14.0	7.0	10.9	21.7	518.3
T. A.	49.2	36.7	50.1	46.2	35.6	35.7	27.7	20.8	15.0	9.5	15.4	25.5	109.5

Προκύπτει ως μέσος όρος των σημειακών δειγμάτων των βροχομετρικών σταθμών Αλιάρτου και Τανάγρας.

Χρονοσειρές απορροής Βοιωτικού Κηφισού και πηγών

Πίνακας Α.5: Μηνιαία απορροή Βοιωτικού Κηφισού μετρημένη στη Διώρυγα Καρδίτσας (hm³).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1906-07				90.6	152.4	123.3	121.3	67.1	33.5	15.2	15.1	22.9	
1907-08	29.0	30.6	33.0	40.0	32.5	33.9	24.0	10.5	5.6	2.5	4.1	8.6	254.3
1908-09	27.7	25.4	86.4	114.2	72.6	60.5	65.7	27.4	23.5	5.0	2.7	12.0	523.1
1909-10	14.9	19.6	25.8	38.2	104.8	75.7	67.5	37.9	31.6	1.1	4.8	13.8	435.7
1910-11	20.8	25.4	31.7	38.0	27.3	40.7	38.9	22.5	17.7	5.7	7.8	20.0	296.5
1911-12	18.2	54.9	42.5	71.4	68.0	49.5	38.3	32.6	15.1	10.7	5.1	13.0	419.3
1912-13	18.1	65.8	97.7	42.7	89.1	157.6	75.3	33.4	27.2	6.6	7.6	13.5	634.6
1913-14	48.4	27.4	36.5	84.9	43.7	45.2	26.6	9.5	10.2	7.0	6.5	17.9	363.8
1914-15	19.2	61.2	54.9	92.6	78.9	77.0	63.0	35.6	13.9	7.0	4.5	19.7	527.5
1915-16	29.1	24.2	25.3	25.7	36.3	31.1	9.0	16.0	3.6	1.1	1.5	6.5	209.4
1916-17	13.1	15.3	17.4	20.6	29.6	24.0	2.7	1.1	0.9	0.8	0.7	2.4	128.6

1917-18	11.2	16.3	20.7	25.5	38.1	56.1	42.1	9.6	5.7	2.6	4.2	8.8	240.9
1918-19	18.3	52.5	73.5	103.8	121.5	98.7	64.6	51.5	32.5	6.3	2.7	22.9	648.8
1919-20	23.7	32.7	42.5	39.6	38.8	75.8	37.6	25.3	24.1	0.4	2.5	11.7	354.7
1920-21	46.8	108.1	127.5	109.9	98.3	76.0	53.4	38.5	26.3	7.4	5.5	20.7	718.4
1921-22	43.1	72.5	159.5	158.9	111.0	79.1	46.5	28.7	16.9	2.6	1.3	11.6	731.7
1922-23	19.6	46.3	43.4	97.8	68.1	74.1	60.0	64.0	44.3	14.3	5.6	16.7	554.2
1923-24	20.8	23.8	33.5	66.7	86.2	66.0	39.8	16.4	12.9	0.6	0.0	10.9	377.6
1924-25	16.8	77.3	60.8	44.8	61.7	90.5	66.8	44.8	27.6	9.5	0.0	7.8	508.4
1925-26	20.4	20.9	31.5	53.7	47.0	68.8	29.2	2.9	6.1	0.0	0.0	4.6	285.1
1926-27	13.9	13.1	20.8	48.8	49.9	56.7	38.8	11.1	0.0	0.0	0.0	4.6	257.7
1927-28	38.8	32.1	58.5	111.0	124.3	146.2	112.9	43.4	21.9	2.4	0.0	6.8	698.3
1928-29	35.0	52.2	79.8	72.1	98.3	97.2	62.5	26.8	20.4	2.5	0.0	27.3	574.1
1929-30	27.3	55.1	41.5	46.9	101.9	105.8	67.7	39.0	21.5	20.0	0.0	11.3	538.0
1930-31	22.6	23.8	39.1	77.8	116.3	82.4	120.4	47.5	34.2	0.1	0.0	16.7	580.9
1931-32	22.5	20.9	64.4	62.1	57.3	138.0	78.6	25.8	7.5	1.1	1.0	17.4	496.6
1932-33	22.0	34.8	27.9	48.2	71.1	42.2	37.6	22.2	22.8	3.7	7.1	17.5	357.1
1933-34	15.4	15.0	50.1	73.4	108.4	109.9	55.9	18.6	25.4	6.7	1.6	9.4	489.8
1934-35	16.5	21.8	44.3	86.2	75.9	64.1	37.8	18.0	12.3	1.2	0.0	4.0	382.1
1935-36	11.6	22.7	66.9	51.5	60.5	26.9	17.1	37.8	14.0	10.1	0.1	7.9	327.1
1936-37	18.6	30.7	60.3	38.7	67.4	37.0	32.3	19.1	8.7	1.8	0.0	11.7	326.3
1937-38	37.8	36.7	79.2	91.7	153.2	91.4	167.1	76.2	24.9	7.1	3.1	24.7	793.1
1938-39	30.5	27.0	79.5	82.8	51.3	168.9	90.1	33.6	43.1	16.1	0.0	19.0	641.9
1939-40	23.7	23.3	39.6	110.5	70.0	62.5	47.5	51.2	28.4	7.0	11.9	19.3	494.9
1940-41	20.1	18.5	65.9	81.8	76.3	53.6	29.2	66.5	57.6	48.5	29.6	18.6	566.2
1941-42	32.4	36.8	37.0	69.6	132.5	114.0	68.1	25.4	21.2	13.2	8.5	20.5	579.2
1942-43	28.4	41.0	29.9	31.0	27.7	36.8	25.8	31.0	8.8	7.4	7.4	22.2	297.4
1943-44	21.2	32.9	27.9	48.9	66.8	61.1	50.1	26.9	12.8	7.4	13.5	20.0	389.5
1944-45	20.9	22.1	40.6	76.1	53.9	62.0	49.1	21.1	6.6	2.6	2.6	22.3	379.9
1945-46	22.3	42.9	69.4	125.7	61.5	68.0	56.1	34.7	4.6	4.3	3.7	17.7	510.9
1946-47	25.0	28.8	95.6	138.8	130.3	66.9	33.2	25.4	22.7	7.0	9.0	24.1	606.8
1947-48	26.8	40.4	53.9	36.5	36.9	44.9	45.5	33.4	13.9	9.3	9.1	18.3	368.9
1948-49	21.1	23.0	36.7	48.2	59.9	64.2	47.5	25.0	22.4	0.0	14.0	22.7	384.7
1949-50	28.3	42.0	31.9	42.5	40.3	74.6	53.8	33.2	9.9	10.0	13.4	21.5	401.4
1950-51	23.0	23.7	32.3	52.4	45.8	48.8	31.8	13.0	13.1	13.7	6.7	13.3	317.6
1951-52	42.3	62.9	42.1	77.2	77.2	46.4	26.2	19.0	11.6	5.7	0.0	12.3	422.9
1952-53	14.7	15.1	34.1	56.2	35.8	36.3	28.4	17.5	15.2	0.0	0.0	13.1	266.4
1953-54	21.9	57.3	30.5	61.0	86.9	72.2	52.0	27.3	10.7	7.5	9.7	15.0	452.0
1954-55	19.2	25.6	64.5	56.6	26.7	39.2	54.1	27.4	8.1	0.0	11.9	18.7	352.0
1955-56	37.4	42.0	33.1	47.4	160.9	128.3	64.6	26.5	16.2	0.0	0.0	18.8	575.2
1956-57	19.2	19.0	23.3	31.7	25.0	32.1	12.9	12.2	12.2	38.0	0.0	14.8	240.4
1957-58	47.3	82.3	62.3	70.3	37.5	55.8	43.1	22.1	15.8	0.0	18.9	54.9	510.3
1958-59	24.8	42.1	47.7	50.6	38.8	59.8	43.8	32.8	15.6	0.0	15.5	20.3	391.8
1959-60	24.1	33.7	34.8	65.2	55.4	66.2	44.1	27.3	9.0	0.0	2.1	22.1	384.0
1960-61	22.4	22.1	36.3	37.7	39.1	95.2	35.5	19.4	2.0	0.0	0.0	7.0	316.7
1961-62	21.0	21.2	31.9	24.6	36.8	44.0	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	8.2	201.5
1962-63	26.0	48.4	178.4	96.0	130.9	88.7	54.6	41.7	13.5	0.0	0.0	13.5	691.8
1963-64	42.4	33.6	48.1	66.6	65.4	80.5	44.5	16.3	0.0	0.0	0.0	18.5	415.9
1964-65	20.7	17.1	25.9	55.8	72.0	78.5	50.3	29.8	16.2	5.5	3.9	11.2	386.8
1965-66	17.9	18.5	17.7	45.8	22.6	73.9	46.4	24.8	14.0	4.4	3.6	13.4	302.9
1966-67	17.6	32.3	45.8	41.7	39.9	58.7	42.0	19.2	9.1	2.8	4.6	14.8	328.6
1967-68	29.3	34.7	45.4	69.8	61.6	74.3	43.8	6.4	0.0	8.6	5.3	18.8	397.8
1968-69	38.3	46.0	205.4	147.5	73.7	90.8	59.4	25.7	0.0	0.0	10.0	27.3	724.2
1969-70	32.0	30.2	51.7	54.7	39.2	62.1	20.9	25.2	0.0	0.0	0.0	17.9	333.9
1970-71	24.9	25.5	25.9	46.9	47.3	91.4	60.2	22.7	0.0	0.0	0.0	22.6	367.3
1971-72	27.0	38.3	36.3	95.8	84.5	82.4	67.5	52.9	0.0	0.0	8.1	22.2	515.0

1972-73	32.0	49.7	28.3	64.3	61.3	69.3	50.2	0.0	13.3	0.0	0.0	0.0	368.4
1973-74	0.0	29.1	43.8	50.1	68.3	105.4	57.3	25.1	0.0	0.0	0.0	23.1	402.2
1974-75	39.0	35.6	37.0	40.4	50.6	54.1	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	12.7	279.9
1975-76	26.9	29.4	58.1	50.4	89.0	64.7	56.1	14.2	0.0	0.0	0.0	6.7	395.5
1976-77	18.8	23.6	24.1	20.2	3.5	16.4	15.9	5.4	4.9	1.0	2.2	11.3	147.2
1977-78	4.8	7.4	28.2	66.8	75.5	46.7	30.7	9.6	0.2	0.0	0.0	6.0	275.9
1978-79	15.1	18.2	43.4	38.4	36.1	27.2	13.3	7.5	0.7	0.0	0.0	7.7	207.7
1979-80	28.3	45.6	38.4	63.4	51.2	93.8	50.5	34.1	9.3	0.0	0.0	10.1	424.7
1980-81	42.1	31.3	55.2	115.0	100.6	62.3	50.2	15.8	3.6	1.4	3.9	17.4	498.6
1981-82	19.1	21.7	31.0	26.5	54.8	95.3	88.3	55.0	22.6	4.2	6.3	12.7	437.3
1982-83	14.7	22.4	33.3	27.9	27.9	42.5	11.4	4.8	8.1	0.4	0.0	0.0	193.3
1983-84	7.5	12.7	52.9	44.0	68.1	77.0	80.1	35.9	4.3	3.8	3.5	12.0	401.8
1984-85	11.8	19.8	27.2	103.4	44.8	65.6	51.3	17.7	7.1	0.0	0.5	6.3	355.4
1985-86	18.1	26.5	31.0	27.7	40.3	42.1	19.0	10.1	2.2	0.0	0.0	1.9	218.9
1986-87	18.1	21.8	20.0	43.6	39.9	79.8	73.5	37.7	7.2	0.0	0.0	4.0	345.7
1987-88	12.6	18.8	19.4	22.6	42.0	66.7	29.8	10.0	1.0	0.0	0.0	0.7	223.8
1988-89	7.2	18.4	43.8	26.9	17.8	52.3	22.6	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	192.7
1989-90	8.5	10.7	13.0	14.9	9.2	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	5.4	66.8
1990-91	7.1	10.8	37.6	41.7	37.9	54.9	48.0	24.3	3.1	0.0	0.0	5.9	271.3
1991-92	11.0	15.4	20.0	20.8	23.2	27.0	13.4	4.1	0.7	0.0	0.0	3.2	138.9
1992-93	7.9	10.2	12.2	15.4	16.8	18.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	80.9
1993-94	1.6	7.0	10.4	25.9	74.5	43.2	24.9	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	195.5
1994-95	19.9	20.9	26.5	59.5	37.5	49.1	37.1	5.5	0.0	0.0	0.0	2.1	258.2
1995-96	10.9	15.0	31.1	46.7	75.9	70.3	44.7	10.5	11.0	0.3	0.0	5.0	321.4
1996-97	11.7	14.8	18.3	80.2	26.6	46.0	36.7	20.2	0.7	0.0	0.0	1.7	257.0
1997-98	9.5	20.7	38.1	23.1	28.8	40.5	39.5	27.2	4.0	1.4	0.0	0.0	232.8
1998-99	0.0	21.3	39.6	48.6	50.1	94.4	65.5	16.6	2.7	0.0	0.0	2.7	341.6
1999-00	8.5	24.1	20.5	26.3	35.4	30.9	12.5	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	160.7
2000-01	2.7	6.5	9.0	16.7	16.3	6.6	5.1	1.5	0.2	0.0	0.0	0.0	64.5
2001-02	0.7	12.3	60.9	38.6	25.4	43.0	57.1	22.1	5.1	0.0	0.0	0.0	265.4
2002-03	12.2	16.8	38.5	67.9	125.0	111.0	78.7	44.1	18.5	2.6	2.9	9.2	527.5
M. T. ⁽¹⁾	21.4	30.7	46.1	59.5	62.4	66.8	46.5	24.2	11.9	4.1	3.5	12.8	386.5
T. A.	10.9	17.7	31.9	30.8	34.2	31.1	27.1	16.3	11.6	7.3	5.2	8.7	159.7
M. T. ⁽²⁾	14.4	21.3	31.9	45.5	48.1	56.7	39.4	16.6	4.0	0.5	0.9	6.4	285.9
T. A.	10.7	10.4	13.5	25.6	27.6	28.2	24.9	15.4	5.6	1.1	2.0	7.0	125.5

(1) Υπολογισμός με βάση το πλήρες δείγμα απορροής.

(2) Υπολογισμός με βάση το δείγμα απορροής των υδρολογικών ετών 1970-71 έως 2002-03.

Με πλάγια γράμματα απεικονίζονται οι τιμές που ήταν κενές (δεν υπήρξαν μετρήσεις λόγω έργων στη Διώρυγα Καρδίτσας), και συμπληρώθηκαν μέσω διπλής γραμμικής παλινδρόμησης, με βάση τη μηνιαία βροχόπτωση στον βροχομετρικό σταθμό Αλιάρτου και της απορροής του εκάστοτε προηγούμενου μήνα.

Πίνακας Α.6: Μέση μηνιαία παροχή πηγών Μαυρονερίου (m³/s).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1980-81								3.75	3.41	3.06	2.68	2.54	
1981-82	2.49	2.47	2.51	2.83	3.45	4.22	4.53	4.49	4.09	3.80	3.52	2.96	3.45
1982-83	2.24	2.19	2.26	2.20	1.80	1.70	1.63	1.60	1.45	1.15	0.80	0.64	1.64
1983-84	1.04	1.28	1.43	1.84	2.29	2.71	3.13	3.50	3.41	2.88	1.80	1.65	2.25
1984-85	1.61	1.77	2.70	3.47	2.58	2.73	3.07	3.00	2.64	2.78	1.83	1.36	2.46
1985-86	1.60	1.75	2.14	2.36	2.26	2.43	2.51	2.25	1.81	1.47	1.16	0.73	1.87
1986-87	0.80	1.24	1.25	1.41	1.46	2.10	2.65	2.43	1.89	1.76	1.42	1.41	1.65
1987-88	1.33	1.34	1.92	2.02	2.12	2.54	2.44	2.38	1.51	1.09	0.68	0.42	1.65
1988-89	0.80	0.93	1.08	1.22	1.29	1.73	2.03	2.29	1.77	0.91	0.50	0.35	1.24
1989-90	0.68	0.93	1.12	0.85	0.38	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34

1990-91	0.00	0.00	0.00	0.08	0.66	1.84	2.58	3.42	3.82	3.17	2.38	1.49	1.62
1991-92	1.29	1.33	1.23	0.99	0.87	1.02	0.67	0.49	0.51	0.26	0.00	0.00	0.72
1992-93	0.02	0.08	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
1993-94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.62	0.82	0.94	0.32	0.04	0.00	0.00	0.23
1994-95	0.00	0.00	0.01	1.34	2.39	2.08	1.68	1.79	1.45	0.53	0.05	0.16	0.95
1995-96	0.40	0.50	0.69	1.67	2.30	3.02	3.11	2.67	2.30	1.75	1.31	0.97	1.72
1996-97	0.96	0.89	0.53	0.82	1.38	1.65	1.52	1.20	0.84	0.53	0.32	0.30	0.91
1997-98	0.26	0.31	0.57	0.67	0.70	1.10	1.61	1.79	1.51	0.66	0.20	0.14	0.79
1998-99	0.09	0.10	0.33	1.32	1.91	2.21	2.29	2.07	1.91	1.57	1.11	0.98	1.32
1999-00	0.80	0.52	0.46	0.55	0.75	0.77	0.58	0.38	0.24	0.11	0.00	0.00	0.43
2000-01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M. T.	0.82	0.88	1.02	1.28	1.43	1.73	1.84	1.93	1.66	1.31	0.94	0.77	1.26
T. A.	0.76	0.78	0.90	0.97	0.99	1.11	1.23	1.31	1.27	1.20	1.02	0.86	0.88

Το δείγμα προκύπτει με χρονική ολοκλήρωση δεκαπενθήμερων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ.

Πίνακας Α.7: Μέση μηνιαία παροχή πηγών Μέλανα (m³/s).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1980-81								3.78	3.63	3.34	2.71	2.56	
1981-82	2.60	2.78	3.07	3.35	3.76	4.35	4.80	4.47	3.87	3.59	3.36	3.27	3.61
1982-83	3.35	3.49	3.28	3.59	3.44	3.66	3.79	3.47	3.10	2.57	2.74	2.93	3.28
1983-84	3.01	2.80	2.52	2.30	2.55	3.74	4.10	3.18	2.63	2.93	2.76	2.62	2.93
1984-85	2.75	3.05	3.44	3.65	3.55	3.43	3.24	3.11	3.03	2.77	3.10	3.17	3.19
1985-86	2.89	3.22	2.96	3.44	3.13	2.74	3.14	3.50	3.42	2.45	2.41	3.25	3.04
1986-87	2.75	2.80	3.16	2.88	3.67	3.34	3.47	3.03	3.07	2.74	2.58	2.82	3.02
1987-88	3.29	2.79	2.71	3.48	3.23	3.35	3.77	3.60	3.48	2.54	2.08	2.24	3.04
1988-89	3.23	3.78	3.91	3.39	3.14	3.51	4.20	3.99	3.26	2.55	2.38	2.53	3.32
1989-90	3.70	3.63					0.67	0.49					
1990-91				2.88	3.06	3.54	3.54	3.93	3.52	2.44	2.41	3.25	
1991-92	2.88	2.72	2.50	2.82	3.62	3.60	2.93	3.21	3.17	2.93	2.17		
1992-93													
1993-94				1.93	2.61	3.59	1.47	0.77	2.76	1.77	1.65	2.98	
1994-95	2.93	3.79	3.81	4.28	4.37	3.97	3.84	3.86	3.45	2.20	2.13	3.06	3.47
1995-96	3.91	3.47											
M. T.	8.32	8.55	8.40	8.48	8.96	9.56	8.85	8.49	8.74	7.17	6.69	7.74	8.60
T. A.	1.07	1.13	1.32	1.71	1.35	1.02	2.99	3.08	0.93	1.25	1.22	0.91	0.61

Το δείγμα προκύπτει με χρονική ολοκλήρωση δεκαπενθήμερων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ.

Πίνακας Α.8: Μέση μηνιαία παροχή πηγών Πολυγύρας (m³/s).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1982-83							0.55	0.67	0.66	0.63	0.85	1.20	
1983-84	1.49	0.96	0.76	0.80	0.87	1.18	1.55	1.81	1.12	0.94	0.96	0.93	1.12
1984-85	0.89	0.86	0.82	0.84	1.11	1.09	0.91	0.73	0.65	0.64	0.92	0.82	0.86
1985-86	0.82	0.70	0.77	0.81	0.67	0.64	0.75	0.71	0.68	0.64	0.65	0.71	0.71
1986-87	0.76	0.94	0.90	1.04	0.92	0.80	0.77	0.77	1.00	1.04	0.70	1.09	0.89
1987-88	1.19	1.10	1.01	0.93	1.02	1.18	1.33	1.29	1.36	0.98	0.69	0.65	1.06
1988-89	0.65	0.73	0.99	1.14	1.29	1.40	1.33	1.22	1.11	1.00	0.89	0.90	1.05
M. T.	0.97	0.88	0.87	0.93	0.98	1.05	1.03	1.03	0.94	0.84	0.81	0.90	0.95
T. A.	0.32	0.15	0.11	0.14	0.21	0.28	0.37	0.43	0.28	0.19	0.13	0.20	0.15

Το δείγμα προκύπτει με χρονική ολοκλήρωση δεκαπενθήμερων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ.

Πίνακας Α.9: Μέση μηνιαία παροχή πηγών Έρκυνα (m³/s).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1980-81								1.08	1.03	0.97	0.93	0.85	
1981-82	0.82	0.82	0.88	0.90	0.93	0.97	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.92	0.92
1982-83	0.90	0.86	0.75	0.69	0.93	1.03	0.89	0.75	0.70	0.59	0.58	0.55	0.77
1983-84	0.55	0.98	1.45	1.71	1.91	1.12	0.92	0.88	0.88	0.87	0.68	0.70	1.05
1984-85	0.64	0.69	1.18	1.30	0.81	0.90	0.76	0.67	0.69	0.72	0.54	0.43	0.78
1985-86	0.36	0.41	0.47	0.55	0.66	0.70	0.67	0.63	0.60	0.57	0.54	0.46	0.55
1986-87	0.40	0.51	0.49	0.94	0.63	1.11	1.14	0.83	0.76	0.62	0.64	0.61	0.72
1987-88	0.71	0.59	0.45	0.38	0.72	0.93	0.91	0.83	0.80	0.83	0.63	0.60	0.70
1988-89	0.61	0.62	0.79	0.78	0.78	0.79	0.98	0.83	0.62	0.66	0.66	0.54	0.72
1989-90	0.52	0.59	0.71	0.66	0.46	0.49	0.55	0.57	0.49	0.42	0.41	0.40	0.52
1990-91	0.40	0.40	0.69	0.71	0.83	1.18	1.05	0.78	0.52	0.52	0.65	0.64	0.70
1991-92	0.64	0.63	0.61	0.66	0.69	0.73	0.73	0.67	0.61	0.53	0.56	0.69	0.64
1992-93													
1993-94							0.79	0.63	0.45	0.24	0.31	0.45	
1994-95	0.42	0.51	0.44	0.43	0.48	0.48	0.72	0.64	0.54	0.47	0.51	0.55	0.52
1995-96	0.60	0.53											
M. T.	0.58	0.63	0.74	0.81	0.82	0.87	0.85	0.77	0.69	0.64	0.61	0.60	0.72
T. A.	0.17	0.17	0.31	0.38	0.38	0.24	0.17	0.15	0.18	0.21	0.17	0.15	0.16

Το δείγμα προκύπτει με χρονική ολοκλήρωση δεκαπενθήμερων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ.

Πίνακας Α.10: Μέση μηνιαία παροχή πηγών άνω ρου (m³/s).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1980-81								1.91	1.37	0.97	0.83	0.72	
1981-82	0.65	0.62	0.70	1.17	2.17	2.42	2.48	2.51	2.27	1.80	1.44	1.02	1.60
1982-83	0.74	0.90	2.23	1.07	0.98	1.67	1.61	0.92	0.65	0.48	0.29	0.25	0.98
1983-84	0.39	1.05	1.80	2.07	2.38	3.37	3.45	2.42	1.53	1.14	0.74	0.68	1.75
1984-85	0.53	0.50	0.94	2.65	3.94	2.75	2.74	1.65	0.84	0.66	0.49	0.48	1.50
1985-86	0.47	0.64	1.10	1.61	2.70	2.18	1.48	1.08	0.87	0.56	0.34	0.27	1.10
1986-87	0.30	0.63	0.85	2.29	2.17	2.90	2.79	2.02	1.21	1.09	0.67	0.37	1.44
1987-88	0.39	0.47	0.54	0.76	1.67	2.06	2.45	1.39	0.82	0.49	0.41	0.27	0.97
1988-89	0.38	0.88	1.36	1.04	1.39	2.35	2.31	1.59	1.00	0.63	0.60	0.47	1.17
1989-90	0.44	0.31	0.33	0.66	0.73	0.72	0.75	0.41	0.19	0.09	0.15	0.19	0.41
1990-91	0.22	0.50	1.73	1.74	2.24	2.66	2.53	1.94	1.42	1.04	0.70	0.71	1.45
1991-92	0.80	0.86	0.66	0.61	1.39	2.27	2.33	1.47	0.64	0.33	0.21	0.19	0.98
1992-93	0.22	0.25	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.38
1993-94	0.58	0.61	0.64	0.67	0.70	0.73	0.76	0.79	0.86	0.58	0.40	0.25	0.63
1994-95	1.19	2.17	2.34	3.01	2.29	2.86	3.51	2.55	1.74	1.13	0.57	0.37	1.97
1995-96	0.36	0.48											
M. T.	0.51	0.72	1.11	1.40	1.79	2.09	2.11	1.54	1.06	0.77	0.56	0.45	1.17
T. A.	0.25	0.46	0.68	0.84	0.96	0.91	0.98	0.71	0.54	0.43	0.31	0.24	0.48

Το δείγμα προκύπτει με χρονική ολοκλήρωση δεκαπενθήμερων υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ στις πηγές Αγίας Ελεούσας Πολύδροσου, Ανατολικού και Δυτικού Κεφαλόβρυσου. Οι μετρήσεις στο Ανατολικό Κεφαλόβρυσο διακόπηκαν τον Απρίλιο του 1991 και οι αντίστοιχες παροχές έχουν συμπληρωθεί θεωρώντας ότι η μέση συνεισφορά τους στην συνολική παροχή των πηγών άνω ρου ανέρχεται στο 38.5%. Οι συμπληρωμένες αυτές τιμές απεικονίζονται με πλάγια γράμματα.

Χρονοσειρές λίμνης Υλίκης

Πίνακας Α.11: Μέση μηνιαία στάθμη Υλίκης (m).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
1977-78	49.77	49.09	49.26	51.71	55.72	58.32	59.21	58.96	57.66	56.11	54.53	53.26
1978-79	52.50	52.05	52.74	54.13	55.11	55.57	55.24	54.33	53.00	51.35	49.69	48.36
1979-80	48.32	50.61	53.53	56.73	60.24	64.24	67.84	69.02	68.61	67.30	65.81	64.57
1980-81	64.36	64.65	65.47	69.36	74.31	77.10	78.37	78.21	76.90	75.12	73.53	72.68
1981-82	72.26	72.07	72.26	72.53	73.45	76.37	79.14	79.90	79.48	78.01	76.47	75.63
1982-83	75.16	75.08	75.44	75.66	75.68	76.06	75.96	75.03	74.28	73.29	71.97	71.02
1983-84	70.47	70.23	70.87	71.93	73.32	75.60	78.26	79.55	78.85	77.51	76.33	75.64
1984-85	75.27	75.17	75.52	77.49	79.03	79.02	79.00	78.55	77.71	76.36	74.81	73.80
1985-86	73.51	73.69	74.09	74.46	75.21	76.22	76.50	76.15	75.43	74.06	72.40	71.27
1986-87	71.03	71.19	71.18	71.79	72.97	75.19	78.00	79.05	78.46	77.19	75.59	74.22
1987-88	73.42	73.01	72.71	72.54	73.00	74.44	75.37	74.76	73.42	71.56	69.50	68.14
1988-89	67.45	67.20	67.83	68.33	68.09	68.54	68.84	67.91	66.64	64.97	63.07	61.45
1989-90	60.36	59.61	58.95	58.30	57.46	56.34	55.06	53.65	52.16	50.51	49.11	48.17
1990-91	47.41	46.91	47.83	50.34	52.70	54.99	57.35	58.34	57.73	56.11	54.25	53.05
1991-92	52.41	52.15	52.44	52.97	53.58	54.43	54.71	54.10	53.16	51.84	50.06	48.56
1992-93	47.79	47.44	47.26	47.20	47.31	47.58	47.41	46.95	46.56	45.84	45.14	44.88
1993-94	44.86	45.15	45.52	46.16	49.66	53.56	54.67	54.37	53.11	51.22	49.17	47.45
1994-95	47.11	47.95	48.85	51.21	53.79	55.24	56.24	56.03	55.13	53.70	51.68	50.10
1995-96	49.26	48.78	49.14	50.97	54.65	58.86	61.53	62.30	62.02	61.15	59.91	59.14
1996-97	58.99	59.10	59.38	61.65	64.08	65.34	66.85	67.44	66.89	65.67	64.39	63.55
1997-98	63.18	63.27	64.12	65.06	65.74	66.93	68.34	69.20	69.02	67.94	66.52	65.49
1998-99	65.06	65.17	66.01	67.49	69.25	72.01	74.85	75.73	75.07	73.78	72.54	71.69
1999-00	71.28	71.42	71.80	72.07	72.62	73.30	73.38	72.77	71.68	70.28	68.93	67.91
2000-01	67.35	67.05	66.82	66.77	66.86	66.60	65.93	64.99	63.61	61.86	59.96	58.33
2001-02	57.10	56.55	58.34	60.90	61.91	62.97	64.75	65.56	64.91	63.59	62.14	61.20
2002-03	60.66	60.35	61.00	63.47	68.54	74.19	77.81	79.20	79.09	78.16	76.90	76.06

Πίνακας Α.12: Μηνιαίες διαφυγές Υλίκης υπολογισμένες από το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης (hm³).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
1977-78	-1.6	-0.7	7.3	9.7	12.5	15.5	6.1	5.3	0.2	0.3	-1.0	0.9	54.4
1978-79	5.0	6.1	8.1	8.9	9.2	9.0	4.5	2.7	-0.9	-2.1	-0.7	1.0	50.8
1979-80	5.4	-3.6	-6.2	-5.8	-2.9	-2.2	-3.1	8.3	8.1	3.8	3.4	6.3	11.6
1980-81	13.4	11.5	9.0	-14.0	11.7	7.4	16.6	15.9	10.3	8.9	10.1	17.2	118.0
1981-82	18.4	17.9	11.8	18.5	16.4	4.2	55.7	49.9	20.0	12.2	16.8	15.0	256.8
1982-83	14.2	16.3	22.5	21.7	16.8	15.4	16.2	13.4	12.5	8.4	8.7	10.2	176.3
1983-84	11.9	14.0	27.1	20.0	17.3	17.3	17.8	20.0	16.2	18.0	9.2	20.6	209.5
1984-85	14.7	20.1	14.5	23.5	15.2	21.0	17.5	11.5	14.3	10.5	10.7	16.2	189.6
1985-86	19.2	18.7	19.5	22.5	17.8	24.2	21.5	16.3	13.1	10.9	9.9	13.5	206.9
1986-87	13.8	16.6	18.1	19.9	20.4	11.1	24.5	38.6	10.3	11.3	11.8	11.8	208.2
1987-88	12.4	14.7	15.8	11.4	11.8	17.2	17.5	9.9	3.1	5.8	2.6	7.1	129.4
1988-89	11.3	11.6	13.2	15.0	10.7	16.3	17.0	6.3	3.8	6.1	4.0	4.5	119.5
1989-90	2.8	4.2	5.2	6.9	7.2	4.9	0.8	2.6	0.5	1.8	0.8	4.2	41.9
1990-91	1.7	1.2	8.6	9.6	11.8	13.0	6.3	10.1	5.0	0.1	-1.4	0.2	66.0
1991-92	2.7	2.8	2.3	5.4	2.7	5.2	2.4	-1.2	-2.1	-3.7	-3.2	1.5	14.7
1992-93	1.8	2.8	2.5	5.1	6.4	7.1	-0.2	-0.7	0.4	1.4	-4.1	-2.0	20.5

1993-94	-0.6	-0.2	4.9	11.8	18.4	13.3	14.3	5.3	2.1	0.9	0.5	-1.4	69.3
1994-95	1.0	4.5	10.5	14.0	14.8	20.7	17.3	4.9	5.6	4.8	5.7	3.8	107.6
1995-96	7.8	9.2	14.2	20.2	15.7	17.9	16.3	11.0	12.2	9.5	8.1	9.4	151.5
1996-97	9.3	12.5	12.2	18.0	14.5	17.2	14.4	19.2	9.7	11.9	9.1	9.3	157.3
1997-98	12.1	16.2	18.1	15.4	14.7	15.9	15.1	18.7	12.0	16.2	13.9	9.1	177.4
1998-99	3.5	15.5	20.7	19.3	19.2	25.1	25.1	17.9	17.7	16.5	13.8	13.5	207.7
1999-00	12.8	16.8	16.4	22.2	21.0	20.3	19.0	15.0	13.8	14.4	16.3	11.7	199.7
2000-01	8.7	12.6	13.5	16.3	15.4	15.0	8.6	6.7	6.0	5.9	7.6	5.8	122.2
2001-02	7.0	9.0	10.5	9.7	13.9	15.5	18.5	15.5	7.9	5.1	6.4	-0.4	118.7
2002-03	12.5	13.9	17.9	9.6	9.3	15.6	23.0	36.1	24.0	18.8	18.0	14.7	213.4

Πίνακας Α.13: Τελικό δείγμα μηνιαίων διαφυγών Υλίκης, μετά την απομάκρυνση των συστηματικών σφαλμάτων και των εξωκείμενων σημείων (hm³).

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
1977-78	-1.6	-0.7	7.3	9.7	12.5	15.5	6.1	5.3	0.2	0.3	-1.0	0.9
1978-79	5.0	6.1	8.1	8.9	9.2	9.0	4.5	2.7	-0.9	-2.1	-0.7	1.0
1979-80	5.4	-3.6						8.3	8.1	3.8	3.4	6.3
1980-81	13.4	11.5	9.0		11.7				10.3	8.9	10.1	17.2
1981-82	18.4	17.9	11.8	18.5	16.4						16.8	15.0
1982-83	14.2	16.3	22.5	21.7	16.8	15.4	16.2	13.4	12.5	8.4	8.7	10.2
1983-84	11.9	14.0	27.1	20.0	17.3	17.3	17.8	20.0	16.2	18.0	9.2	20.6
1984-85	14.7	20.1	14.5	23.5	15.2	21.0	17.5	11.5	14.3	10.5	10.7	16.2
1985-86	19.2	18.7	19.5	22.5	17.8	24.2	21.5	16.3	13.1	10.9	9.9	13.5
1986-87	13.8	16.6	18.1	19.9	20.4	11.1	24.5		10.3	11.3	11.8	11.8
1987-88	12.4	14.7	15.8		11.8	17.2	17.5	9.3		5.8	2.6	7.1
1988-89	11.3	11.6	13.2	15.0	10.7	16.3	17.0	6.1	3.8	6.1	4.0	4.5
1989-90	2.8	4.2	5.2	6.9	7.2	4.9	0.8	2.6	0.5	1.8	0.8	4.2
1990-91	1.7	1.2	8.6	9.6	11.8	13.0	6.3	8.7	5.0	0.1	-1.4	0.2
1991-92	2.7	2.8	2.3	5.4	2.7	5.2	2.4	-1.5	-2.1	-3.7	-3.2	1.5
1992-93	1.8	2.8	2.5	5.1	6.4	7.1	-0.2	-0.7	0.4	1.4	-4.1	-2.0
1993-94	-0.6	-0.2	4.9									
1994-95												
1995-96												
1996-97												
1997-98				15.4	14.7	15.9	15.1	18.7	12.0	16.2	13.9	9.1
1998-99	3.5	15.5	20.7	19.3	19.2	25.1	25.1	17.9	17.7	16.5	13.8	13.5
1999-00	12.8	16.8	16.4	22.2	21.0	20.3	19.0	15.0	13.8	14.4	16.3	11.7
2000-01	8.7	12.6	13.5	17.0	15.4	14.2	8.5	6.4	6.0	5.9	7.6	5.8
2001-02	7.0	9.0	10.5	9.7	13.9	15.5	18.5	15.5	7.9	5.1	6.1	
2002-03	12.5	13.9	17.9	9.6		15.6	23.0		24.0	18.8	18.0	14.7

Παράρτημα Β: Χρονοσειρές μοντέλου προσομοίωσης

Χρονοσειρές δεξαμενών εδαφικής υγρασίας

Πίνακας Β.14: Χρονοσειρές δεξαμενής εδαφικής υγρασίας 1 (mm).

Μήνας	Βροχόπτωση	Δυν. εξατμ.	Εξάτμιση	Κατείδυση	Απορροή	Αποθήκευση
Οκτ-84	10.1	63.0	12.3	17.1	3.4	24.3
Νοε-84	185.2	27.1	27.1	65.4	12.8	104.1
Δεκ-84	105.2	21.0	21.0	67.5	13.3	107.6
Ιαν-85	484.9	35.3	35.3	200.0	83.2	273.9
Φεβ-85	109.5	28.4	28.4	127.4	25.0	202.7
Μαρ-85	152.0	43.3	43.3	111.7	21.9	177.8
Απρ-85	88.4	91.4	69.8	74.6	14.7	107.1
Μαϊ-85	60.0	117.7	57.6	43.4	8.6	57.4
Ιουν-85	19.4	160.5	31.4	19.2	3.8	22.4
Ιουλ-85	12.9	173.5	16.4	8.1	1.7	9.2
Αυγ-85	0.0	168.2	3.2	2.5	0.6	2.9
Σεπ-85	23.4	102.5	14.0	4.8	1.0	6.5
Οκτ-85	123.6	49.2	49.2	28.9	5.7	46.2
Νοε-85	218.5	31.7	31.7	83.6	16.4	133.0
Δεκ-85	107.4	21.4	21.4	78.6	15.4	125.1
Ιαν-86	158.3	32.6	32.6	90.0	17.6	143.2
Φεβ-86	261.9	37.4	37.4	132.0	25.8	209.9
Μαρ-86	126.1	49.9	49.9	102.7	20.1	163.4
Απρ-86	39.3	112.0	59.5	57.0	11.2	74.9
Μαϊ-86	87.5	116.9	62.9	38.9	7.7	52.9
Ιουν-86	75.4	159.6	61.1	27.7	5.5	34.1
Ιουλ-86	38.7	152.5	34.3	16.0	3.2	19.3
Αυγ-86	20.2	158.6	19.1	8.6	1.8	10.1
Σεπ-86	14.1	105.5	10.5	5.4	1.1	7.2
Οκτ-86	172.5	52.1	52.1	45.7	9.0	72.9
Νοε-86	177.6	27.9	27.9	79.8	15.7	127.1
Δεκ-86	180.2	23.5	23.5	101.8	20.0	162.0
Ιαν-87	211.1	38.5	38.5	120.1	23.5	191.0
Φεβ-87	135.0	37.3	37.3	103.6	20.3	164.9
Μαρ-87	326.9	46.0	46.0	160.0	31.3	254.4
Απρ-87	110.4	88.2	81.5	106.2	20.8	156.3
Μαϊ-87	62.9	112.5	67.5	59.8	11.8	80.2
Ιουν-87	36.2	141.2	44.9	29.4	5.8	36.2
Ιουλ-87	8.5	174.2	18.7	11.2	2.3	12.6
Αυγ-87	19.8	134.1	15.6	6.8	1.4	8.5
Σεπ-87	6.7	107.8	6.0	3.6	0.8	4.8
Οκτ-87	86.5	50.4	40.6	18.3	3.7	28.7
Νοε-87	218.1	32.7	32.7	76.8	15.1	122.3
Δεκ-87	97.2	21.8	21.8	70.9	13.9	112.9

Ιαν-88	128.4	26.7	26.7	76.9	15.1	122.5
Φεβ-88	239.1	40.3	40.3	115.3	22.6	183.4
Μαρ-88	176.8	63.9	63.9	106.3	20.8	169.2
Απρ-88	36.4	82.0	47.5	61.0	12.0	85.0
Μαϊ-88	50.3	129.2	50.9	34.1	6.7	43.6
Ιουν-88	22.0	157.2	28.0	15.8	3.2	18.6
Ιουλ-88	1.6	183.0	8.1	5.2	1.1	5.8
Αυγ-88	1.8	158.2	3.1	1.8	0.5	2.2
Σεπ-88	9.5	108.1	6.1	2.2	0.5	3.0
Οκτ-88	71.5	59.4	35.3	14.4	2.9	21.9
Νοε-88	324.5	30.3	30.3	113.4	22.2	180.4
Δεκ-88	284.1	26.0	26.0	157.4	30.8	250.3
Ιαν-89	18.9	34.0	26.3	89.7	17.6	135.6
Φεβ-89	54.4	42.3	32.5	57.6	11.3	88.6
Μαρ-89	310.2	65.1	65.1	119.7	23.5	190.5
Απρ-89	41.6	115.2	68.0	65.6	12.9	85.7
Μαϊ-89	61.7	122.9	55.0	36.8	7.3	48.3
Ιουν-89	15.1	159.9	25.8	15.9	3.2	18.5
Ιουλ-89	42.8	158.7	32.4	12.0	2.4	14.5
Αυγ-89	12.2	155.6	12.4	5.9	1.3	7.0
Σεπ-89	17.2	108.6	11.7	5.0	1.1	6.6
Οκτ-89	153.6	63.0	63.0	34.8	6.9	55.5
Νοε-89	131.6	27.1	27.1	57.3	11.3	91.4
Δεκ-89	158.8	21.0	21.0	82.2	16.1	130.9
Ιαν-90	17.0	35.3	18.0	48.0	9.5	72.4
Φεβ-90	81.8	28.4	28.4	45.1	8.9	71.9
Μαρ-90	34.0	43.3	22.1	31.0	6.1	46.7
Απρ-90	116.9	91.4	63.9	37.3	7.4	55.0
Μαϊ-90	29.4	117.7	30.8	21.6	4.3	27.8
Ιουν-90	41.8	160.5	34.8	14.5	2.9	17.3
Ιουλ-90	12.0	173.5	14.0	6.5	1.4	7.4
Αυγ-90	154.3	168.2	91.2	28.2	5.6	36.8
Σεπ-90	34.0	102.5	27.0	17.2	3.5	23.1
Οκτ-90	91.2	49.2	42.8	25.8	5.1	40.6
Νοε-90	187.9	31.7	31.7	70.5	13.9	112.4
Δεκ-90	410.4	21.4	21.4	180.0	47.5	273.9
Ιαν-91	188.7	32.6	32.6	154.3	30.2	245.5
Φεβ-91	122.9	37.4	37.4	118.8	23.3	189.0
Μαρ-91	105.2	49.9	49.1	88.1	17.3	139.6
Απρ-91	148.3	112.0	92.7	73.7	14.5	107.1
Μαϊ-91	111.1	116.9	78.2	54.1	10.6	75.2
Ιουν-91	2.5	159.6	27.5	21.4	4.3	24.6
Ιουλ-91	19.1	152.5	19.8	10.0	2.0	11.9
Αυγ-91	55.5	158.6	37.8	12.2	2.5	14.9
Σεπ-91	21.2	105.5	15.6	8.1	1.7	10.7
Οκτ-91	98.9	52.1	45.9	22.9	4.6	36.2
Νοε-91	161.4	27.9	27.9	60.8	12.0	96.9
Δεκ-91	100.2	23.5	23.5	62.2	12.2	99.1
Ιαν-92	34.9	38.5	23.0	40.8	8.1	62.2
Φεβ-92	74.3	37.3	34.6	36.6	7.2	58.0

Μαρ-92	82.4	46.0	39.7	36.4	7.2	57.1
Απρ-92	97.4	88.2	56.6	36.9	7.3	53.8
Μαϊ-92	119.3	112.5	71.6	38.8	7.7	55.0
Ιουν-92	70.0	141.2	55.5	28.1	5.6	35.8
Ιουλ-92	14.8	174.2	22.4	12.1	2.4	13.6
Αυγ-92	5.0	134.1	7.1	4.7	1.0	5.8
Σεπ-92	7.1	107.8	5.5	2.9	0.7	3.9
Οκτ-92	55.1	50.4	27.2	11.6	2.4	17.8
Νοε-92	85.5	32.7	32.7	25.2	5.0	40.4
Δεκ-92	124.2	21.8	21.8	51.2	10.1	81.6
Ιαν-93	80.4	26.7	26.7	48.4	9.5	77.2
Φεβ-93	203.5	40.3	40.3	86.2	16.9	137.3
Μαρ-93	99.4	63.9	54.7	66.7	13.1	102.2
Απρ-93	36.5	82.0	36.5	39.4	7.8	55.0
Μαϊ-93	127.2	129.2	79.6	39.8	7.9	54.9
Ιουν-93	12.8	157.2	26.3	17.5	3.5	20.4
Ιουλ-93	0.0	183.0	7.8	5.4	1.2	6.0
Αυγ-93	0.1	158.2	2.1	1.6	0.4	2.0
Σεπ-93	7.5	108.1	4.8	1.8	0.4	2.4
Οκτ-93	4.7	59.4	2.8	1.5	0.4	2.4
Νοε-93	321.2	30.3	30.3	105.2	20.6	167.4
Δεκ-93	122.0	26.0	26.0	94.5	18.5	150.4
Ιαν-94	210.1	34.0	34.0	117.2	23.0	186.4
Φεβ-94	223.2	42.3	42.3	131.8	25.8	209.7
Μαρ-94	71.1	65.1	53.8	84.5	16.6	125.9
Απρ-94	85.6	115.2	71.3	54.8	10.8	74.6
Μαϊ-94	87.9	122.9	64.6	38.5	7.6	51.8
Ιουν-94	25.4	159.9	33.0	18.6	3.7	21.9
Ιουλ-94	28.9	158.7	25.2	10.7	2.2	12.7
Αυγ-94	21.4	155.6	17.5	6.9	1.4	8.2
Σεπ-94	5.7	108.6	5.4	3.4	0.8	4.5

Πίνακας Β.15: Χρονοσειρές δεξαμενής εδαφικής υγρασίας 2 (mm).

Μήνας	Βροχόπτωση	Δυν. εξατμ.	Εξάτμιση	Κατείδυση	Απορροή	Αποθήκευση
Οκτ-84	2.3	66.9	5.2	3.8	0.0	19.4
Νοε-84	79.2	29.2	29.2	10.5	0.0	58.9
Δεκ-84	64.3	22.7	22.7	15.3	0.0	85.2
Ιαν-85	223.8	38.3	38.3	26.9	15.2	228.6
Φεβ-85	65.6	30.8	30.1	26.2	15.0	222.9
Μαρ-85	69.6	46.5	38.5	28.2	13.9	211.9
Απρ-85	44.1	96.9	56.3	28.3	9.4	162.0
Μαϊ-85	15.7	123.6	50.4	22.3	0.0	105.1
Ιουν-85	2.5	167.8	37.4	13.0	0.0	57.1
Ιουλ-85	2.9	181.4	22.6	7.1	0.0	30.4
Αυγ-85	0.4	176.0	11.1	3.7	0.0	16.0
Σεπ-85	23.3	108.2	16.8	3.8	0.0	18.7
Οκτ-85	102.1	52.6	47.3	11.2	0.0	62.2
Νοε-85	106.8	34.1	34.1	20.5	0.0	114.5
Δεκ-85	69.7	23.2	23.2	24.4	0.0	136.6

Ιαν-86	40.1	35.2	24.8	23.5	0.0	128.3
Φεβ-86	82.1	40.4	38.5	26.2	0.0	145.7
Μαρ-86	37.8	53.6	31.7	24.1	0.0	127.7
Απρ-86	8.6	118.8	37.1	17.3	0.0	81.9
Μαϊ-86	54.8	123.4	49.3	14.9	0.0	72.4
Ιουν-86	11.3	167.2	31.3	9.7	0.0	42.7
Ιουλ-86	13.5	159.6	22.1	6.2	0.0	27.9
Αυγ-86	2.5	166.1	11.0	3.6	0.0	15.8
Σεπ-86	2.7	111.1	5.4	2.3	0.0	10.8
Οκτ-86	127.9	55.4	55.4	12.6	0.0	70.6
Νοε-86	80.7	30.1	30.1	18.4	0.0	102.8
Δεκ-86	55.4	25.6	25.2	20.2	0.0	112.8
Ιαν-87	80.6	41.7	38.5	23.7	0.0	131.3
Φεβ-87	76.2	40.2	36.9	26.1	0.0	144.5
Μαρ-87	158.7	49.9	49.9	25.5	13.5	214.3
Απρ-87	89.1	94.0	67.8	30.8	12.6	192.2
Μαϊ-87	10.1	118.8	53.9	25.9	0.0	122.6
Ιουν-87	10.0	147.8	43.1	16.2	0.0	73.3
Ιουλ-87	4.8	182.1	29.6	9.2	0.0	39.3
Αυγ-87	8.6	140.5	16.6	5.6	0.0	25.6
Σεπ-87	9.2	113.4	11.5	4.0	0.0	19.3
Οκτ-87	61.2	53.8	31.0	7.8	0.0	41.7
Νοε-87	94.4	35.1	35.1	15.3	0.0	85.7
Δεκ-87	55.4	23.6	23.6	17.8	0.0	99.6
Ιαν-88	83.5	29.0	29.0	23.4	0.0	130.8
Φεβ-88	120.3	43.6	43.6	31.5	0.0	176.0
Μαρ-88	97.8	68.6	55.3	27.5	8.8	182.1
Απρ-88	21.0	87.3	43.9	26.5	0.0	132.6
Μαϊ-88	17.2	136.0	46.8	18.3	0.0	84.7
Ιουν-88	19.4	164.3	39.5	11.9	0.0	52.8
Ιουλ-88	0.2	190.8	20.1	6.3	0.0	26.6
Αυγ-88	0.3	165.6	9.2	3.3	0.0	14.4
Σεπ-88	7.0	113.9	7.6	2.4	0.0	11.4
Οκτ-88	56.5	63.3	29.3	6.1	0.0	32.4
Νοε-88	166.3	32.8	32.8	25.2	0.0	140.8
Δεκ-88	142.0	28.3	28.3	25.4	13.7	215.3
Ιαν-89	5.1	37.1	20.6	31.6	0.0	168.1
Φεβ-89	30.1	45.7	28.0	26.9	0.0	143.4
Μαρ-89	97.7	69.6	56.4	28.9	0.0	155.8
Απρ-89	13.0	121.9	47.1	21.3	0.0	100.4
Μαϊ-89	18.3	129.6	37.3	14.3	0.0	67.1
Ιουν-89	7.7	167.4	27.5	8.8	0.0	38.6
Ιουλ-89	12.0	166.1	20.4	5.6	0.0	24.6
Αυγ-89	8.3	162.9	13.3	3.6	0.0	16.0
Σεπ-89	4.4	114.4	6.5	2.4	0.0	11.5
Οκτ-89	70.3	66.9	36.0	7.3	0.0	38.5
Νοε-89	60.3	29.2	27.6	10.8	0.0	60.4
Δεκ-89	91.3	22.7	22.7	19.6	0.0	109.4
Ιαν-90	3.5	38.3	11.4	16.1	0.0	85.4
Φεβ-90	23.5	30.8	15.5	14.5	0.0	78.9

Μαρ-90	6.4	46.5	11.5	11.8	0.0	62.0
Απρ-90	60.6	96.9	42.7	13.2	0.0	66.7
Μαϊ-90	9.9	123.6	23.1	9.4	0.0	44.1
Ιουν-90	15.7	167.8	24.5	6.5	0.0	28.8
Ιουλ-90	2.6	181.4	12.1	3.6	0.0	15.6
Αυγ-90	74.6	176.0	50.6	7.1	0.0	32.4
Σεπ-90	15.4	108.2	16.1	5.4	0.0	26.3
Οκτ-90	38.7	52.6	21.5	6.9	0.0	36.6
Νοε-90	96.3	34.1	34.1	15.0	0.0	83.8
Δεκ-90	147.4	23.2	23.2	31.6	0.0	176.5
Ιαν-91	120.1	35.2	35.2	25.5	14.9	220.9
Φεβ-91	70.2	40.4	35.6	27.2	14.0	214.3
Μαρ-91	79.0	53.6	44.1	28.4	13.2	207.6
Απρ-91	92.0	118.8	80.8	30.5	11.5	176.8
Μαϊ-91	40.2	123.4	64.4	26.3	0.0	126.3
Ιουν-91	0.5	167.2	43.4	15.5	0.0	67.9
Ιουλ-91	8.7	159.6	27.4	9.0	0.0	40.2
Αυγ-91	22.6	166.1	27.2	6.5	0.0	29.1
Σεπ-91	12.5	111.1	14.0	4.8	0.0	22.8
Οκτ-91	66.4	55.4	33.7	8.7	0.0	46.9
Νοε-91	84.3	30.1	30.1	15.3	0.0	85.7
Δεκ-91	89.2	25.6	25.6	22.7	0.0	126.6
Ιαν-92	29.9	41.7	23.3	20.9	0.0	112.3
Φεβ-92	55.8	40.2	30.5	21.3	0.0	116.3
Μαρ-92	49.3	49.9	31.9	21.0	0.0	112.7
Απρ-92	33.7	94.0	38.8	18.0	0.0	89.6
Μαϊ-92	52.0	118.8	48.6	15.8	0.0	77.1
Ιουν-92	34.9	147.8	42.9	12.3	0.0	56.8
Ιουλ-92	2.7	182.1	22.4	7.0	0.0	30.1
Αυγ-92	5.0	140.5	11.9	4.2	0.0	19.0
Σεπ-92	1.5	113.4	5.6	2.6	0.0	12.4
Οκτ-92	30.5	53.8	16.6	4.2	0.0	22.1
Νοε-92	43.1	35.1	21.2	6.8	0.0	37.2
Δεκ-92	66.0	23.6	23.6	12.1	0.0	67.5
Ιαν-93	69.8	29.0	29.0	16.4	0.0	91.9
Φεβ-93	80.1	43.6	38.7	20.4	0.0	112.9
Μαρ-93	34.0	68.6	31.9	18.6	0.0	96.4
Απρ-93	15.1	87.3	26.0	14.3	0.0	71.2
Μαϊ-93	91.5	136.0	67.0	16.3	0.0	79.4
Ιουν-93	2.7	164.3	28.3	10.0	0.0	43.8
Ιουλ-93	0.2	190.8	16.7	5.2	0.0	22.1
Αυγ-93	8.4	165.6	12.7	3.3	0.0	14.5
Σεπ-93	1.4	113.9	4.4	2.0	0.0	9.5
Οκτ-93	1.3	63.3	2.1	1.4	0.0	7.3
Νοε-93	225.1	32.8	32.8	30.3	0.0	169.3
Δεκ-93	29.1	28.3	20.1	27.6	0.0	150.7
Ιαν-94	165.2	37.1	37.1	28.2	15.5	235.2
Φεβ-94	177.3	45.7	45.7	41.2	18.6	306.9
Μαρ-94	54.2	69.6	54.0	39.2	18.1	249.8
Απρ-94	33.6	121.9	70.9	31.3	11.9	169.4

Μαϊ-94	56.6	129.6	71.7	26.6	0.0	127.8
Ιουν-94	6.0	167.4	47.0	16.1	0.0	70.7
Ιουλ-94	31.0	166.1	41.8	10.9	0.0	49.0
Αυγ-94	10.7	162.9	22.8	6.8	0.0	30.1
Σεπ-94	0.0	114.4	7.5	3.9	0.0	18.7

Χρονοσειρές δεξαμενών υπόγειου νερού

Πίνακας Β.16: Χρονοσειρές απόλυτης στάθμης δεξαμενών υπόγειου νερού (m).

Μήνας	Κελί (2,1)	Κελί (3,1)	Κελί (1,2)	Κελί (2,2)	Κελί (3,2)	Κελί (2,3)	Κελί (3,3)
Σεπ-84	280.000	300.352	105.028	110.000	122.875	95.000	203.698
Οκτ-84	279.960	300.170	104.871	109.895	122.503	94.920	203.454
Νοε-84	279.971	300.328	105.040	109.857	122.499	94.891	203.564
Δεκ-84	280.014	300.468	105.186	109.866	122.495	94.892	203.673
Ιαν-85	280.145	301.429	106.138	110.033	123.356	94.977	204.694
Φεβ-85	280.279	301.848	106.553	110.228	123.712	95.066	205.215
Μαρ-85	280.423	302.064	106.778	110.446	123.877	95.160	205.568
Απρ-85	280.556	302.012	106.776	110.643	123.771	95.258	205.666
Μαϊ-85	280.623	301.723	106.470	110.753	123.412	95.309	205.530
Ιουν-85	280.604	301.303	106.081	110.754	122.898	95.298	205.246
Ιουλ-85	280.523	300.831	105.668	110.667	122.306	95.242	204.883
Αυγ-85	280.422	300.398	105.275	110.519	121.757	95.139	204.494
Σεπ-85	280.365	300.118	105.062	110.370	121.402	95.063	204.147
Οκτ-85	280.374	300.048	105.013	110.271	121.269	95.036	203.968
Νοε-85	280.452	300.343	105.316	110.271	121.517	95.078	204.186
Δεκ-85	280.557	300.558	105.533	110.317	121.696	95.145	204.348
Ιαν-86	280.657	300.817	105.790	110.379	121.931	95.205	204.584
Φεβ-86	280.784	301.347	106.316	110.506	122.459	95.294	205.141
Μαρ-86	280.892	301.580	106.548	110.633	122.701	95.358	205.434
Απρ-86	280.940	301.486	106.483	110.701	122.602	95.378	205.416
Μαϊ-86	280.949	301.246	106.197	110.720	122.337	95.377	205.258
Ιουν-86	280.901	300.947	105.897	110.673	121.986	95.341	205.043
Ιουλ-86	280.809	300.577	105.551	110.540	121.540	95.278	204.742
Αυγ-86	280.703	300.221	105.197	110.354	121.109	95.186	204.400
Σεπ-86	280.632	299.972	104.982	110.199	120.820	95.098	204.062
Οκτ-86	280.648	300.031	105.034	110.123	120.855	95.081	204.002
Νοε-86	280.709	300.308	105.294	110.120	121.118	95.108	204.192
Δεκ-86	280.782	300.678	105.640	110.160	121.488	95.144	204.515
Ιαν-87	280.883	301.113	106.052	110.262	121.939	95.205	204.952
Φεβ-87	281.008	301.427	106.351	110.405	122.278	95.293	205.300
Μαρ-87	281.126	302.015	106.923	110.583	122.911	95.367	205.984
Απρ-87	281.272	302.178	107.109	110.803	123.113	95.482	206.285
Μαϊ-87	281.361	301.979	106.870	110.952	122.933	95.559	206.240
Ιουν-87	281.361	301.599	106.504	110.987	122.538	95.570	206.001
Ιουλ-87	281.290	301.114	106.068	110.922	122.009	95.528	205.632
Αυγ-87	281.199	300.679	105.664	110.782	121.524	95.460	205.245
Σεπ-87	281.139	300.364	105.409	110.639	121.190	95.385	204.864
Οκτ-87	281.119	300.202	105.265	110.512	121.015	95.332	204.586
Νοε-87	281.155	300.442	105.507	110.470	121.248	95.337	204.735

Δεκ-87	281.209	300.602	105.662	110.464	121.408	95.356	204.824
Ιαν-88	281.302	300.780	105.833	110.512	121.591	95.415	204.952
Φεβ-88	281.459	301.204	106.250	110.652	122.032	95.539	205.368
Μαρ-88	281.585	301.488	106.532	110.780	122.345	95.626	205.679
Απρ-88	281.692	301.440	106.514	110.894	122.312	95.711	205.679
Μαϊ-88	281.718	301.185	106.214	110.914	122.050	95.732	205.480
Ιουν-88	281.679	300.828	105.858	110.857	121.654	95.712	205.175
Ιουλ-88	281.580	300.416	105.468	110.677	121.176	95.608	204.795
Αυγ-88	281.465	300.048	105.098	110.443	120.741	95.476	204.406
Σεπ-88	281.387	299.801	104.887	110.268	120.470	95.389	204.045
Οκτ-88	281.349	299.664	104.762	110.116	120.339	95.324	203.770
Νοε-88	281.451	300.209	105.277	110.151	120.874	95.398	204.202
Δεκ-88	281.557	300.953	105.977	110.251	121.633	95.471	204.909
Ιαν-89	281.708	301.168	106.160	110.411	121.873	95.587	205.122
Φεβ-89	281.832	301.191	106.169	110.533	121.918	95.681	205.147
Μαρ-89	281.965	301.566	106.535	110.682	122.329	95.778	205.559
Απρ-89	282.032	301.541	106.533	110.775	122.326	95.824	205.596
Μαϊ-89	282.028	301.293	106.233	110.785	122.077	95.817	205.419
Ιουν-89	281.966	300.926	105.860	110.723	121.677	95.716	205.117
Ιουλ-89	281.860	300.547	105.498	110.559	121.238	95.533	204.786
Αυγ-89	281.745	300.191	105.137	110.348	120.821	95.323	204.425
Σεπ-89	281.667	299.955	104.928	110.189	120.559	95.235	204.083
Οκτ-89	281.636	299.959	104.916	110.067	120.550	95.179	203.947
Νοε-89	281.634	300.114	105.045	109.997	120.696	95.152	203.984
Δεκ-89	281.693	300.397	105.297	110.012	120.980	95.183	204.180
Ιαν-90	281.728	300.426	105.296	110.008	121.011	95.190	204.132
Φεβ-90	281.759	300.460	105.307	110.005	121.048	95.196	204.102
Μαρ-90	281.763	300.373	105.195	109.966	120.960	95.172	203.939
Απρ-90	281.765	300.325	105.147	109.937	120.897	95.161	203.837
Μαϊ-90	281.719	300.144	104.869	109.844	120.684	95.111	203.619
Ιουν-90	281.634	299.916	104.556	109.665	120.399	94.972	203.372
Ιουλ-90	281.509	299.604	104.176	109.397	120.039	94.722	203.067
Αυγ-90	281.416	299.459	104.152	109.171	119.868	94.474	202.922
Σεπ-90	281.355	299.324	104.054	109.031	119.749	94.409	202.718
Οκτ-90	281.318	299.274	104.008	108.935	119.728	94.350	202.569
Νοε-90	281.343	299.548	104.249	108.926	120.022	94.353	202.746
Δεκ-90	281.488	300.523	105.132	109.104	120.997	94.471	203.662
Ιαν-91	281.595	301.205	105.730	109.295	121.705	94.546	204.366
Φεβ-91	281.723	301.613	106.082	109.514	122.150	94.643	204.838
Μαρ-91	281.853	301.729	106.163	109.737	122.313	94.738	205.041
Απρ-91	281.987	301.732	106.181	109.953	122.349	94.852	205.151
Μαϊ-91	282.069	301.567	106.078	110.111	122.198	94.932	205.107
Ιουν-91	282.055	301.199	105.783	110.154	121.810	94.857	204.853
Ιουλ-91	281.975	300.771	105.399	110.068	121.335	94.721	204.516
Αυγ-91	281.881	300.425	105.073	109.929	120.941	94.543	204.207
Σεπ-91	281.818	300.180	104.826	109.818	120.680	94.474	203.893
Οκτ-91	281.797	300.081	104.707	109.726	120.575	94.430	203.681
Νοε-91	281.826	300.244	104.858	109.702	120.735	94.437	203.750
Δεκ-91	281.906	300.385	104.987	109.739	120.880	94.492	203.815
Ιαν-92	281.972	300.373	104.966	109.761	120.870	94.534	203.729

Φεβ-92	282.046	300.354	104.915	109.787	120.852	94.586	203.642
Μαρ-92	282.111	300.320	104.663	109.780	120.818	94.629	203.532
Απρ-92	282.144	300.281	104.499	109.742	120.764	94.654	203.442
Μαϊ-92	282.140	300.220	104.511	109.670	120.673	94.637	203.357
Ιουν-92	282.094	300.076	104.394	109.532	120.476	94.484	203.212
Ιουλ-92	281.991	299.805	104.112	109.297	120.142	94.265	202.950
Αυγ-92	281.872	299.498	103.748	109.030	119.801	94.050	202.647
Σεπ-92	281.788	299.268	103.470	108.833	119.579	93.942	202.352
Οκτ-92	281.727	299.124	103.310	108.673	119.458	93.866	202.119
Νοε-92	281.687	299.084	103.291	108.548	119.438	93.811	201.998
Δεκ-92	281.683	299.221	103.477	108.481	119.592	93.791	202.050
Ιαν-93	281.711	299.336	103.612	108.465	119.724	93.802	202.082
Φεβ-93	281.777	299.740	103.986	108.520	120.128	93.852	202.404
Μαρ-93	281.823	299.974	103.911	108.551	120.254	93.878	202.549
Απρ-93	281.829	299.994	103.658	108.524	120.167	93.877	202.510
Μαϊ-93	281.828	299.975	103.441	108.447	120.038	93.864	202.465
Ιουν-93	281.764	299.778	103.104	108.266	119.713	93.664	202.278
Ιουλ-93	281.647	299.461	102.745	108.002	119.203	93.338	202.003
Αυγ-93	281.521	299.132	102.474	107.732	118.686	93.055	201.712
Σεπ-93	281.430	298.894	102.257	107.538	118.284	92.919	201.442
Οκτ-93	281.348	298.679	102.052	107.362	117.922	92.825	201.170
Νοε-93	281.477	299.206	102.664	107.444	118.301	92.939	201.635
Δεκ-93	281.585	299.645	103.115	107.544	118.592	93.030	201.998
Ιαν-94	281.701	300.211	103.646	107.691	119.040	93.126	202.505
Φεβ-94	281.921	300.829	104.240	107.970	119.712	93.324	203.128
Μαρ-94	282.119	301.033	104.439	108.235	119.992	93.498	203.368
Απρ-94	282.249	301.013	104.455	108.408	120.017	93.618	203.405
Μαϊ-94	282.324	300.852	104.257	108.478	119.805	93.702	203.317
Ιουν-94	282.305	300.565	103.974	108.410	119.410	93.619	203.107
Ιουλ-94	282.230	300.232	103.664	108.250	118.902	93.424	202.838
Αυγ-94	282.130	299.929	103.363	108.057	118.381	93.179	202.552
Σεπ-94	282.054	299.700	103.189	107.924	117.994	93.077	202.262

Χρονοσειρές Θέσεων ζήτησης νερού

Πίνακας Β.17: Χρονοσειρές ζήτησης νερού (hm³).

Μήνας	Θέση 1	Θέση 2	Θέση 3	Θέση 4	Θέση 5	Θέση 6	Θέση 7	Θέση 8
Οκτ-84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-85	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-85	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	12.4	0.0	4.0
Ιουν-85	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	15.1	0.0	4.0
Ιουλ-85	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	15.3	0.0	4.0
Αυγ-85	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	16.3	0.0	4.0
Σεπ-85	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0

Οκτ-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-86	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	6.0	0.0	0.0
Μαϊ-86	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	13.5	0.0	4.0
Ιουν-86	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	20.6	0.0	4.0
Ιουλ-86	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	15.2	0.0	4.0
Αυγ-86	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	14.9	0.0	4.0
Σεπ-86	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0
Οκτ-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-86	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-87	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-87	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	15.1	0.0	4.0
Ιουν-87	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	19.1	0.0	4.0
Ιουλ-87	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	18.8	0.0	4.0
Αυγ-87	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	15.2	0.0	4.0
Σεπ-87	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0
Οκτ-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-88	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-88	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	9.4	0.0	4.0
Ιουν-88	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	15.9	0.0	4.0
Ιουλ-88	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	19.2	0.0	4.0
Αυγ-88	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	17.3	0.0	4.0
Σεπ-88	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0
Οκτ-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-89	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-89	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	15.1	0.0	4.0
Ιουν-89	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	24.7	0.0	4.0
Ιουλ-89	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	28.7	0.0	4.0
Αυγ-89	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	27.4	0.0	4.0
Σεπ-89	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0
Οκτ-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Δεκ-89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-90	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-90	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	15.1	0.0	4.5
Ιουν-90	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	20.3	0.0	5.5
Ιουλ-90	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	28.4	0.0	6.8
Αυγ-90	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	33.5	0.0	0.0
Σεπ-90	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	0.0
Οκτ-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Νοε-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Μαρ-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Απρ-91	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	0.0
Μαϊ-91	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	19.1	0.0	0.0
Ιουν-91	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	29.0	0.0	1.0
Ιουλ-91	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	26.8	0.0	2.8
Αυγ-91	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	27.7	0.0	3.0
Σεπ-91	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	1.0
Οκτ-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
Νοε-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Δεκ-91	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Φεβ-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
Μαρ-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0
Απρ-92	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	0.0	6.5
Μαϊ-92	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	18.1	0.0	1.0
Ιουν-92	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	28.3	0.0	3.0
Ιουλ-92	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	28.3	0.0	5.0
Αυγ-92	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	23.9	0.0	7.0
Σεπ-92	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	0.0	5.0
Οκτ-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5
Νοε-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Δεκ-92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ιαν-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0
Φεβ-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0
Μαρ-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	9.0
Απρ-93	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	2.2	10.0
Μαϊ-93	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	15.1	2.2	9.8
Ιουν-93	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	27.3	2.0	10.0
Ιουλ-93	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	35.0	3.5	9.0
Αυγ-93	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	27.8	3.9	6.0
Σεπ-93	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	4.1	5.0
Οκτ-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	5.0
Νοε-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0
Δεκ-93	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0
Ιαν-94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0

Φεβ-94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
Μαρ-94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0
Απρ-94	0.6	0.6	0.9	0.9	1.0	8.2	2.6	0.0
Μαϊ-94	1.5	1.5	2.1	2.1	2.4	15.1	4.5	4.0
Ιουν-94	2.4	2.4	3.5	3.5	3.9	23.6	4.4	4.0
Ιουλ-94	3.1	3.1	4.6	4.6	5.1	29.1	4.6	4.0
Αυγ-94	2.8	2.8	4.1	4.1	4.6	29.3	5.0	4.0
Σεπ-94	0.8	0.8	1.1	1.1	1.3	10.2	4.5	0.0

Θέση 1: Άρδευση περιοχών Γραβιάς, Λιλαίας, Αμφίκλειας από προσχωματικές γεωτρήσεις, Θέση 2: Άρδευση περιοχών Γραβιάς, Λιλαίας, Αμφίκλειας από καρστικές γεωτρήσεις, Θέση 3: Άρδευση περιοχών Ελάτειας, Τιθορέας, Ανθοχωρίου από προσχωματικές γεωτρήσεις, Θέση 4: Άρδευση περιοχών Ελάτειας, Τιθορέας, Ανθοχωρίου από καρστικές γεωτρήσεις, Θέση 5: Άρδευση περιοχών Αγίου Βλασίου έως Ρωμαϊκού, Θέση 6: Άρδευση ευρύτερης περιοχής Κωπαΐδας, Θέση 7: Τροφοδοσία υδραγωγείου Διστόμου για ύδρευση της Αθήνας μέσω γεωτρήσεων Βασιλικών-Παρορίου, Θέση 8: Τροφοδοσία υδραγωγείου Υλίκης από γεωτρήσεις Ακοντίου.

Χρονοσειρές απορροής

Πίνακας Β.18: Ιστορικές χρονοσειρές απορροής Βοιωτικού Κηφισού και παροχής πηγών (απορροή Βοιωτικού Κηφισού σε hm³, παροχή πηγών σε m³/s).

Μήνας	Β. Κηφισός	Μαυρονέρι	Μέλανας-Πολυγύρα	Λιλαία-Κεφαλόβρυσο	Έρκυνας
Οκτ-84	11.8	1.61	3.64	0.53	0.64
Νοε-84	19.8	1.77	3.90	0.50	0.69
Δεκ-84	27.2	2.70	4.26	0.94	1.18
Ιαν-85	103.4	3.47	4.50	2.65	1.30
Φεβ-85	44.8	2.58	4.65	3.94	0.81
Μαρ-85	65.6	2.74	4.52	2.75	0.90
Απρ-85	51.3	3.07	4.15	2.74	0.76
Μαϊ-85	17.7	3.00	3.84	1.65	0.67
Ιουν-85	7.1	2.64	3.69	0.84	0.69
Ιουλ-85	0.0	2.78	3.41	0.66	0.72
Αυγ-85	0.5	1.83	4.02	0.49	0.54
Σεπ-85	6.3	1.36	3.99	0.48	0.43
Οκτ-85	18.1	1.60	3.71	0.47	0.36
Νοε-85	26.5	1.75	3.92	0.64	0.41
Δεκ-85	31.0	2.14	3.73	1.11	0.47
Ιαν-86	27.7	2.36	4.25	1.61	0.55
Φεβ-86	40.3	2.26	3.80	2.70	0.66
Μαρ-86	42.1	2.43	3.39	2.19	0.70
Απρ-86	19.0	2.51	3.89	1.48	0.67
Μαϊ-86	10.1	2.25	4.21	1.09	0.63
Ιουν-86	2.2	1.81	4.10	0.87	0.60
Ιουλ-86	0.0	1.47	3.09	0.56	0.57
Αυγ-86	0.0	1.16	3.06	0.34	0.54
Σεπ-86	1.9	0.73	3.96	0.27	0.46
Οκτ-86	18.1	0.80	3.51	0.30	0.40
Νοε-86	21.8	1.24	3.75	0.63	0.51
Δεκ-86	20.0	1.25	4.06	0.85	0.49
Ιαν-87	43.6	1.41	3.91	2.29	0.94
Φεβ-87	39.9	1.46	4.59	2.17	0.63
Μαρ-87	79.8	2.10	4.14	2.90	1.11

Απρ-87	73.5	2.65	4.24	2.79	1.14
Μαϊ-87	37.7	2.43	3.80	2.02	0.83
Ιουν-87	7.2	1.89	4.07	1.21	0.76
Ιουλ-87	0.0	1.76	3.78	1.09	0.62
Αυγ-87	0.0	1.42	3.28	0.67	0.64
Σεπ-87	4.0	1.41	3.90	0.37	0.61
Οκτ-87	12.6	1.33	4.48	0.39	0.71
Νοε-87	18.8	1.34	3.89	0.47	0.60
Δεκ-87	19.4	1.92	3.72	0.54	0.45
Ιαν-88	22.6	2.02	4.41	0.76	0.38
Φεβ-88	42.0	2.12	4.25	1.67	0.72
Μαρ-88	66.7	2.54	4.54	2.06	0.93
Απρ-88	29.8	2.44	5.10	2.45	0.91
Μαϊ-88	10.0	2.38	4.89	1.39	0.83
Ιουν-88	1.0	1.51	4.84	0.82	0.80
Ιουλ-88	0.0	1.09	3.52	0.49	0.83
Αυγ-88	0.0	0.68	2.77	0.41	0.63
Σεπ-88	0.7	0.42	2.89	0.28	0.60
Οκτ-88	7.2	0.80	3.88	0.38	0.61
Νοε-88	18.4	0.93	4.52	0.88	0.62
Δεκ-88	43.8	1.08	4.90	1.36	0.79
Ιαν-89	26.9	1.22	4.54	1.04	0.78
Φεβ-89	17.8	1.29	4.43	1.39	0.78
Μαρ-89	52.3	1.73	4.91	2.35	0.79
Απρ-89	22.6	2.04	5.53	2.31	0.98
Μαϊ-89	3.5	2.29	5.21	1.59	0.83
Ιουν-89	0.0	1.77	4.37	1.00	0.62
Ιουλ-89	0.0	0.91	3.55	0.63	0.66
Αυγ-89	0.0	0.50	3.27	0.60	0.66
Σεπ-89	0.0	0.35	3.44	0.47	0.54
Οκτ-89	8.5	0.68	4.89	0.44	0.52
Νοε-89	10.7	0.94	4.34	0.31	0.59
Δεκ-89	13.0	1.12		0.33	0.71
Ιαν-90	14.9	0.85		0.66	0.66
Φεβ-90	9.2	0.38		0.73	0.46
Μαρ-90	2.3	0.08		0.72	0.49
Απρ-90	0.0	0.01		0.75	0.55
Μαϊ-90	0.0	0.00	0.98	0.41	0.57
Ιουν-90	0.0	0.00	0.72	0.19	0.49
Ιουλ-90	0.0	0.00		0.09	0.42
Αυγ-90	2.8	0.00		0.15	0.41
Σεπ-90	5.4	0.00	1.50	0.19	0.40
Οκτ-90	7.1	0.00		0.22	0.40
Νοε-90	10.8	0.00		0.50	0.40
Δεκ-90	37.6	0.00		1.73	0.69
Ιαν-91	41.7	0.08	3.79	1.74	0.71
Φεβ-91	37.9	0.66	4.02	2.24	0.83
Μαρ-91	54.9	1.85	4.71	2.66	1.18
Απρ-91	48.0	2.58	4.48	2.53	1.05
Μαϊ-91	24.3	2.77	5.06	1.94	0.78

Ιουν-91	3.1	2.45	4.48	1.42	0.52
Ιουλ-91	0.0	3.17	3.22	1.04	0.52
Αυγ-91	0.0	2.38	3.17	0.70	0.65
Σεπ-91	5.9	1.49	4.19	0.71	0.64
Οκτ-91	11.0	1.29	3.82	0.80	0.64
Νοε-91	15.4	1.33	3.71	0.86	0.63
Δεκ-91	20.0	1.23	3.33	0.66	0.61
Ιαν-92	20.8	0.99	3.73	0.61	0.66
Φεβ-92	23.2	0.87	4.65	1.39	0.70
Μαρ-92	27.0	1.02	4.82	2.27	0.73
Απρ-92	13.4	0.67	3.50	2.33	0.73
Μαϊ-92	4.1	0.49	4.21	1.47	0.67
Ιουν-92	0.7	0.51	4.12	0.64	0.61
Ιουλ-92	0.0	0.25	3.85	0.33	0.53
Αυγ-92	0.0	0.04	2.87	0.21	0.56
Σεπ-92	3.2	0.17		0.19	0.69
Οκτ-92	7.9	0.03			
Νοε-92	10.2	0.08			
Δεκ-92	12.2	0.09			
Ιαν-93	15.4				
Φεβ-93	16.8				
Μαρ-93	18.4				
Απρ-93	0.0				
Μαϊ-93	0.0				
Ιουν-93	0.0				
Ιουλ-93	0.0				
Αυγ-93	0.0				
Σεπ-93	0.0				
Οκτ-93	1.6				
Νοε-93	7.0				
Δεκ-93	10.4				
Ιαν-94	25.9		2.81		
Φεβ-94	74.5		3.52		
Μαρ-94	43.2	0.72	4.80		
Απρ-94	24.9	0.82			0.79
Μαϊ-94	8.0	0.94	1.30	0.79	0.63
Ιουν-94	0.0	0.32	3.67	0.86	0.45
Ιουλ-94	0.0	0.04	2.36	0.58	0.24
Αυγ-94	0.0	0.00	2.23	0.40	0.31
Σεπ-94	0.0	0.00	3.90	0.25	0.45

Πίνακας Β.19: Προσομοιωμένες χρονοσειρές απορροής Βοιωτικού Κηφισού και παροχής πηγών (απορροή Βοιωτικού Κηφισού σε hm^3 , παροχή πηγών σε m^3/s).

Μήνας	Β. Κηφισός	Μαυρονέρι	Μέλανας-Πολυγύρα	Λιλαία-Κεφαλόβρυσο	Έρκυνας
Οκτ-84	19.7	2.29	3.32	0.37	0.52
Νοε-84	25.6	2.22	3.39	0.49	0.52
Δεκ-84	27.3	2.22	3.51	0.68	0.54
Ιαν-85	100.3	2.82	4.07	1.74	0.66
Φεβ-85	63.2	3.21	4.42	2.40	0.75

Μαρ-85	64.6	3.39	4.60	2.76	0.81
Απρ-85	43.4	3.33	4.61	2.74	0.83
Μαϊ-85	19.7	3.08	4.45	2.44	0.82
Ιουν-85	8.2	2.64	4.17	1.91	0.78
Ιουλ-85	2.4	2.15	3.90	1.31	0.73
Αυγ-85	0.0	1.67	3.63	0.73	0.67
Σεπ-85	4.0	1.32	3.44	0.32	0.62
Οκτ-85	18.1	1.17	3.40	0.18	0.59
Νοε-85	26.2	1.32	3.56	0.47	0.61
Δεκ-85	27.8	1.49	3.73	0.78	0.64
Ιαν-86	31.2	1.69	3.91	1.11	0.67
Φεβ-86	38.1	2.09	4.23	1.72	0.74
Μαρ-86	39.1	2.36	4.44	2.12	0.79
Απρ-86	25.2	2.32	4.41	2.06	0.79
Μαϊ-86	13.1	2.12	4.26	1.79	0.78
Ιουν-86	0.0	1.83	4.04	1.41	0.75
Ιουλ-86	1.6	1.46	3.81	0.95	0.71
Αυγ-86	0.0	1.09	3.57	0.48	0.66
Σεπ-86	2.1	0.81	3.39	0.12	0.61
Οκτ-86	19.0	0.79	3.41	0.13	0.59
Νοε-86	24.7	0.97	3.55	0.43	0.61
Δεκ-86	30.8	1.28	3.79	0.90	0.66
Ιαν-87	36.5	1.66	4.07	1.45	0.72
Φεβ-87	34.7	1.96	4.29	1.88	0.77
Μαρ-87	67.5	2.47	4.66	2.60	0.86
Απρ-87	51.4	2.71	4.82	2.90	0.91
Μαϊ-87	19.7	2.63	4.72	2.75	0.92
Ιουν-87	6.6	2.31	4.46	2.28	0.88
Ιουλ-87	0.7	1.88	4.18	1.68	0.84
Αυγ-87	1.3	1.45	3.89	1.10	0.78
Σεπ-87	5.1	1.13	3.69	0.65	0.72
Οκτ-87	17.5	0.96	3.58	0.40	0.68
Νοε-87	25.6	1.09	3.69	0.61	0.69
Δεκ-87	26.8	1.25	3.83	0.85	0.71
Ιαν-88	29.0	1.40	3.94	1.08	0.72
Φεβ-88	35.4	1.73	4.19	1.56	0.77
Μαρ-88	50.7	2.03	4.41	1.98	0.82
Απρ-88	22.8	2.05	4.43	1.99	0.83
Μαϊ-88	15.8	1.87	4.26	1.71	0.81
Ιουν-88	2.0	1.54	4.01	1.26	0.77
Ιουλ-88	0.0	1.15	3.76	0.74	0.72
Αυγ-88	0.0	0.77	3.50	0.25	0.66
Σεπ-88	0.4	0.50	3.32	0.01	0.61
Οκτ-88	13.1	0.37	3.24	0.00	0.56
Νοε-88	27.7	0.72	3.50	0.26	0.61
Δεκ-88	58.4	1.34	3.98	1.16	0.70
Ιαν-89	33.3	1.64	4.18	1.57	0.75
Φεβ-89	27.4	1.70	4.20	1.64	0.75
Μαρ-89	40.1	2.00	4.41	2.06	0.80
Απρ-89	23.7	2.06	4.44	2.11	0.82

Μαϊ-89	10.9	1.89	4.28	1.85	0.80
Ιουν-89	0.0	1.57	4.02	1.39	0.76
Ιουλ-89	0.0	1.20	3.78	0.91	0.71
Αυγ-89	0.0	0.83	3.53	0.43	0.66
Σεπ-89	1.2	0.58	3.35	0.10	0.61
Οκτ-89	16.5	0.53	3.33	0.04	0.59
Νοε-89	19.9	0.63	3.40	0.20	0.58
Δεκ-89	25.5	0.85	3.57	0.54	0.61
Ιαν-90	21.7	0.92	3.60	0.65	0.61
Φεβ-90	19.9	0.95	3.60	0.68	0.60
Μαρ-90	19.1	0.90	3.55	0.60	0.59
Απρ-90	9.7	0.84	3.49	0.53	0.57
Μαϊ-90	0.0	0.68	3.34	0.33	0.54
Ιουν-90	0.0	0.44	3.12	0.06	0.50
Ιουλ-90	0.0	0.15	2.88	0.00	0.46
Αυγ-90	0.0	0.01	2.82	0.00	0.44
Σεπ-90	0.3	0.00	2.75	0.00	0.41
Οκτ-90	11.7	0.00	2.73	0.00	0.39
Νοε-90	17.6	0.05	2.85	0.00	0.40
Δεκ-90	45.0	0.76	3.39	0.56	0.51
Ιαν-91	60.1	1.42	3.84	1.51	0.62
Φεβ-91	55.8	1.84	4.11	2.09	0.70
Μαρ-91	54.6	2.04	4.21	2.33	0.74
Απρ-91	40.7	2.08	4.21	2.36	0.75
Μαϊ-91	9.8	1.99	4.16	2.19	0.75
Ιουν-91	0.0	1.68	3.97	1.75	0.72
Ιουλ-91	0.0	1.29	3.72	1.21	0.67
Αυγ-91	0.0	0.94	3.49	0.74	0.63
Σεπ-91	2.5	0.68	3.30	0.39	0.58
Οκτ-91	15.2	0.57	3.21	0.22	0.55
Νοε-91	20.4	0.66	3.27	0.37	0.55
Δεκ-91	22.1	0.79	3.37	0.56	0.56
Ιαν-92	19.5	0.81	3.38	0.58	0.55
Φεβ-92	17.8	0.79	3.34	0.55	0.54
Μαρ-92	18.1	0.77	3.19	0.52	0.53
Απρ-92	7.9	0.72	3.06	0.47	0.51
Μαϊ-92	0.0	0.65	3.05	0.40	0.50
Ιουν-92	0.0	0.50	2.98	0.22	0.48
Ιουλ-92	0.0	0.23	2.82	0.01	0.45
Αυγ-92	0.0	0.01	2.58	0.00	0.40
Σεπ-92	0.0	0.00	2.37	0.00	0.36
Οκτ-92	8.4	0.00	2.26	0.00	0.32
Νοε-92	9.8	0.00	2.22	0.00	0.30
Δεκ-92	13.6	0.00	2.33	0.00	0.31
Ιαν-93	13.6	0.00	2.43	0.00	0.31
Φεβ-93	18.6	0.11	2.66	0.00	0.35
Μαρ-93	17.5	0.26	2.67	0.04	0.38
Απρ-93	4.6	0.21	2.51	0.08	0.37
Μαϊ-93	0.0	0.11	2.36	0.07	0.37
Ιουν-93	0.0	0.00	2.14	0.00	0.34

Ιουλ-93	0.0	0.00	1.90	0.00	0.31
Αυγ-93	0.0	0.00	1.70	0.00	0.27
Σεπ-93	0.0	0.00	1.54	0.00	0.23
Οκτ-93	4.5	0.00	1.41	0.00	0.19
Νοε-93	18.5	0.00	1.72	0.00	0.23
Δεκ-93	18.4	0.00	2.06	0.00	0.29
Ιαν-94	44.6	0.00	2.42	0.26	0.36
Φεβ-94	53.1	0.00	2.82	1.01	0.44
Μαρ-94	49.3	0.03	3.01	1.40	0.49
Απρ-94	28.2	0.07	3.04	1.42	0.50
Μαϊ-94	2.4	0.00	2.93	1.25	0.49
Ιουν-94	0.0	0.00	2.74	0.90	0.47
Ιουλ-94	0.0	0.00	2.54	0.48	0.43
Αυγ-94	0.0	0.00	2.33	0.09	0.39
Σεπ-94	0.0	0.00	2.18	0.00	0.35

Χρονοσειρές υδατικού ισοζυγίου λεκάνης

Πίνακας Β.20: Χρονοσειρές ισοζυγίου επιφανειακών υδατικών πόρων (hm³).

Μήνας	Βροχόπτωση	Εξάτμιση	Κατείδουση	Απορροή	Αποθήκευση	Διαφορά
Οκτ-84	9.8	15.3	16.4	2.2	42.9	-24.2
Νοε-84	230.9	58.3	57.3	8.4	149.8	106.9
Δεκ-84	158.0	45.3	65.2	8.6	188.6	38.8
Ιαν-85	627.3	76.3	167.8	75.4	496.5	307.8
Φεβ-85	162.6	60.3	119.4	37.1	442.1	-54.3
Μαρ-85	195.9	81.8	112.0	33.6	410.6	-31.6
Απρ-85	118.9	123.7	88.0	22.6	295.1	-115.4
Μαϊ-85	60.9	107.6	59.2	5.6	183.6	-111.5
Ιουν-85	16.1	72.5	30.7	2.5	94.0	-89.6
Ιουλ-85	12.4	42.1	15.1	1.1	48.2	-45.8
Αυγ-85	0.6	17.5	6.8	0.4	24.1	-24.1
Σεπ-85	47.7	32.5	8.5	0.7	30.2	6.1
Οκτ-85	222.6	97.8	34.5	3.7	116.7	86.5
Νοε-85	290.9	68.1	83.0	10.7	245.9	129.2
Δεκ-85	166.9	46.1	85.2	10.0	271.5	25.5
Ιαν-86	158.9	55.8	91.4	11.5	271.8	0.3
Φεβ-86	284.9	77.9	122.4	16.8	339.5	67.7
Μαρ-86	134.8	76.6	100.4	13.1	284.1	-55.4
Απρ-86	37.6	90.4	61.3	7.3	162.7	-121.4
Μαϊ-86	133.2	109.6	46.1	5.0	135.3	-27.5
Ιουν-86	64.9	83.3	31.5	3.6	81.7	-53.6
Ιουλ-86	44.0	53.0	19.1	2.1	51.4	-30.2
Αυγ-86	16.6	27.8	10.6	1.2	28.5	-22.9
Σεπ-86	12.9	14.3	6.7	0.7	19.7	-8.8
Οκτ-86	290.3	111.1	47.4	5.9	145.7	126.0
Νοε-86	228.0	60.0	77.6	10.2	225.8	80.1
Δεκ-86	194.5	50.4	94.4	13.0	262.5	36.6
Ιαν-87	249.7	78.6	111.2	15.3	307.1	44.6
Φεβ-87	194.0	75.6	103.8	13.2	308.4	1.3

Μαρ-87	433.8	99.4	139.7	39.1	463.9	155.5
Απρ-87	195.9	147.4	112.0	31.1	369.3	-94.7
Μαϊ-87	55.0	119.0	75.0	7.7	222.7	-146.5
Ιουν-87	37.5	89.3	41.6	3.8	125.5	-97.2
Ιουλ-87	12.2	53.4	20.0	1.5	62.8	-62.7
Αυγ-87	24.9	33.3	12.2	0.9	41.2	-21.6
Σεπ-87	17.2	19.9	8.0	0.5	29.9	-11.3
Οκτ-87	141.5	69.6	22.7	2.4	76.8	46.8
Νοε-87	273.4	70.1	71.4	9.8	198.9	122.1
Δεκ-87	140.4	47.0	71.0	9.1	212.2	13.3
Ιαν-88	199.8	57.7	82.7	9.8	261.7	49.6
Φεβ-88	323.1	86.9	118.9	14.7	364.3	102.6
Μαρ-88	251.3	118.6	107.5	25.9	363.5	-0.8
Απρ-88	52.9	92.1	76.7	7.8	239.9	-123.7
Μαϊ-88	56.7	98.3	47.6	4.4	146.3	-93.6
Ιουν-88	41.3	73.2	26.8	2.1	85.5	-60.8
Ιουλ-88	1.3	33.3	12.2	0.7	40.7	-44.8
Αυγ-88	1.6	14.8	5.8	0.3	21.5	-19.2
Σεπ-88	15.9	14.5	4.8	0.3	17.8	-3.7
Οκτ-88	125.2	63.8	17.9	1.9	59.4	41.6
Νοε-88	442.8	65.4	108.9	14.5	313.4	254.0
Δεκ-88	382.7	56.3	138.0	39.1	462.6	149.2
Ιαν-89	19.4	45.8	102.4	11.5	322.3	-140.3
Φεβ-89	77.3	60.1	74.9	7.4	257.2	-65.1
Μαρ-89	338.1	120.9	118.3	15.3	340.8	83.7
Απρ-89	45.2	109.7	72.3	8.4	195.5	-145.3
Μαϊ-89	65.7	87.7	43.9	4.7	124.8	-70.7
Ιουν-89	20.6	55.0	22.6	2.1	65.7	-59.1
Ιουλ-89	44.6	49.4	15.6	1.6	43.7	-22.0
Αυγ-89	19.5	26.7	8.9	0.8	26.8	-16.9
Σεπ-89	17.3	16.7	6.6	0.7	20.2	-6.6
Οκτ-89	197.9	91.1	32.8	4.5	89.8	69.6
Νοε-89	169.6	56.0	52.5	7.4	143.6	53.8
Δεκ-89	230.5	45.3	80.8	10.5	237.5	93.9
Ιαν-90	15.9	27.6	53.7	6.2	165.9	-71.6
Φεβ-90	86.0	40.0	49.6	5.8	156.5	-9.4
Μαρ-90	31.1	30.4	36.6	4.0	116.7	-39.9
Απρ-90	160.5	101.0	42.7	4.8	128.7	12.0
Μαϊ-90	32.9	52.2	27.1	2.8	79.5	-49.2
Ιουν-90	49.1	56.8	18.5	1.9	51.3	-28.2
Ιουλ-90	11.4	26.0	9.3	0.9	26.6	-24.7
Αυγ-90	204.3	129.9	28.3	3.6	69.1	42.5
Σεπ-90	43.6	40.1	18.8	2.2	51.6	-17.5
Οκτ-90	113.3	57.8	26.4	3.3	77.3	25.8
Νοε-90	256.4	68.1	66.8	9.0	189.8	112.5
Δεκ-90	472.5	46.1	161.2	31.0	423.9	234.1
Ιαν-91	290.0	70.2	136.1	40.3	467.3	43.3
Φεβ-91	177.7	73.9	115.2	34.7	421.2	-46.1
Μαρ-91	178.4	93.4	96.9	29.7	379.7	-41.5
Απρ-91	224.6	172.8	90.4	25.4	315.7	-64.0

Μαϊ-91	128.3	140.5	71.9	6.9	224.7	-91.0
Ιουν-91	2.3	78.3	35.5	2.8	110.4	-114.3
Ιουλ-91	24.5	51.0	19.1	1.3	63.6	-46.8
Αυγ-91	67.6	62.4	17.1	1.6	50.1	-13.5
Σεπ-91	31.2	29.7	11.9	1.1	38.7	-11.4
Οκτ-91	156.8	76.7	27.0	3.0	88.7	50.0
Νοε-91	222.4	60.0	61.0	7.8	182.4	93.6
Δεκ-91	189.4	51.0	72.1	8.0	240.7	58.3
Ιαν-92	64.3	47.4	55.7	5.2	196.7	-44.0
Φεβ-92	126.0	65.0	53.4	4.7	199.6	2.9
Μαρ-92	122.3	70.3	52.9	4.7	194.0	-5.6
Απρ-92	110.3	90.9	49.0	4.7	159.7	-34.3
Μαϊ-92	150.1	114.3	47.3	5.0	143.1	-16.6
Ιουν-92	94.2	95.8	35.4	3.6	102.3	-40.8
Ιουλ-92	13.4	45.8	17.6	1.6	50.7	-51.6
Αυγ-92	10.2	21.1	8.9	0.7	30.3	-20.4
Σεπ-92	6.7	11.4	5.5	0.4	19.7	-10.6
Οκτ-92	78.3	40.7	13.4	1.5	42.4	22.7
Νοε-92	115.7	50.8	25.9	3.3	78.0	35.7
Δεκ-92	172.7	47.0	50.1	6.6	147.0	69.0
Ιαν-93	149.5	57.7	54.4	6.2	178.2	31.1
Φεβ-93	244.0	80.1	84.6	11.0	246.5	68.3
Μαρ-93	112.1	80.0	69.3	8.5	200.7	-45.8
Απρ-93	44.8	60.0	45.6	5.1	134.8	-65.8
Μαϊ-93	210.2	145.1	48.6	5.1	146.2	11.3
Ιουν-93	12.1	56.5	25.2	2.3	74.2	-71.9
Ιουλ-93	0.3	28.3	10.8	0.8	34.6	-39.6
Αυγ-93	11.7	19.0	5.6	0.3	21.5	-13.1
Σεπ-93	6.8	9.3	3.9	0.3	14.8	-6.7
Οκτ-93	4.9	4.7	3.0	0.3	11.7	-3.1
Νοε-93	522.4	65.4	110.7	13.4	344.6	332.9
Δεκ-93	120.0	44.9	99.9	12.1	307.6	-36.9
Ιαν-94	366.7	73.7	115.5	36.5	448.6	141.0
Φεβ-94	392.1	91.2	143.3	42.7	563.5	114.9
Μαρ-94	121.7	110.1	109.6	36.0	429.6	-134.0
Απρ-94	102.5	145.0	79.2	23.5	284.3	-145.2
Μαϊ-94	136.0	141.8	62.1	5.0	211.5	-72.8
Ιουν-94	24.9	86.8	34.5	2.4	112.6	-98.9
Ιουλ-94	62.0	74.5	22.2	1.4	76.4	-36.2
Αυγ-94	28.8	43.1	14.0	0.9	47.3	-29.1
Σεπ-94	3.7	14.0	7.7	0.5	28.9	-18.4

Πίνακας Β.21: Χρονοσειρές ισοζυγίου υπόγειων υδατικών πόρων (hm³).

Μήνας	Κατείδυση	Απορροή πηγών	Διαφυγές	Αντληση	Αποθήκευση	Διαφορά
Οκτ-84	16.4	17.4	35.0	0.0	43603.3	-36.0
Νοε-84	57.3	17.1	33.7	0.0	43609.5	6.2
Δεκ-84	65.2	18.6	35.0	0.0	43621.1	11.6
Ιαν-85	167.8	24.9	35.2	0.0	43728.8	107.7
Φεβ-85	119.4	26.1	31.9	0.0	43790.3	61.5

Μαρ-85	112.0	31.0	35.4	0.0	43836.0	45.7
Απρ-85	88.0	29.8	34.1	3.0	43857.7	21.7
Μαϊ-85	59.2	28.9	35.3	11.1	43843.8	-14.0
Ιουν-85	30.7	24.6	34.0	15.7	43803.4	-40.4
Ιουλ-85	15.1	21.7	35.2	19.3	43746.9	-56.5
Αυγ-85	6.8	17.9	35.1	20.3	43684.5	-62.5
Σεπ-85	8.5	14.8	33.8	3.7	43641.6	-42.9
Οκτ-85	34.5	14.3	35.0	0.0	43626.7	-14.9
Νοε-85	83.0	15.4	33.8	0.0	43660.2	33.5
Δεκ-85	85.2	17.8	35.1	0.0	43692.5	32.3
Ιαν-86	91.4	19.7	35.2	0.0	43729.0	36.4
Φεβ-86	122.4	21.2	31.9	0.0	43798.3	69.3
Μαρ-86	100.4	26.0	35.3	0.0	43837.4	39.1
Απρ-86	61.3	24.8	34.1	3.0	43837.4	0.0
Μαϊ-86	46.1	24.0	35.3	11.1	43815.2	-22.2
Ιουν-86	31.5	20.8	34.0	15.8	43779.5	-35.7
Ιουλ-86	19.1	18.6	35.2	20.5	43729.0	-50.6
Αυγ-86	10.6	15.5	35.1	20.5	43672.5	-56.5
Σεπ-86	6.7	12.8	33.8	3.7	43629.8	-42.6
Οκτ-86	47.4	13.2	35.0	0.0	43629.0	-0.8
Νοε-86	77.6	14.4	33.8	0.0	43658.2	29.2
Δεκ-86	94.4	17.8	35.1	0.0	43699.8	41.6
Ιαν-87	111.2	21.2	35.2	0.0	43754.6	54.8
Φεβ-87	103.8	21.5	31.9	0.0	43805.0	50.4
Μαρ-87	139.7	28.4	35.4	0.0	43880.9	75.9
Απρ-87	112.0	29.4	34.2	3.0	43927.0	46.1
Μαϊ-87	75.0	29.5	35.5	11.1	43928.0	1.0
Ιουν-87	41.6	25.7	34.1	15.7	43897.3	-30.7
Ιουλ-87	20.0	23.0	35.3	19.4	43844.2	-53.1
Αυγ-87	12.2	19.4	35.2	18.5	43787.5	-56.7
Σεπ-87	8.0	16.0	33.9	3.7	43742.8	-44.7
Οκτ-87	22.7	15.1	35.1	0.0	43715.3	-27.5
Νοε-87	71.4	15.8	33.9	0.0	43736.8	21.5
Δεκ-87	71.0	17.8	35.2	0.0	43754.9	18.1
Ιαν-88	82.7	19.1	35.2	0.0	43783.2	28.3
Φεβ-88	118.9	20.0	31.9	0.0	43848.4	65.2
Μαρ-88	107.5	24.8	35.4	0.0	43895.8	47.4
Απρ-88	76.7	24.1	34.1	3.0	43911.9	16.1
Μαϊ-88	47.6	23.2	35.4	11.1	43891.9	-20.0
Ιουν-88	26.8	19.6	34.0	15.7	43852.6	-39.3
Ιουλ-88	12.2	17.1	35.2	25.8	43791.3	-61.3
Αυγ-88	5.8	13.9	35.1	25.4	43726.7	-64.6
Σεπ-88	4.8	11.5	33.8	3.7	43683.4	-43.3
Οκτ-88	17.9	11.2	35.0	0.0	43655.1	-28.3
Νοε-88	108.9	13.2	33.9	0.0	43716.9	61.7
Δεκ-88	138.0	19.2	35.2	0.0	43800.3	83.5
Ιαν-89	102.4	21.8	35.3	0.0	43845.7	45.3
Φεβ-89	74.9	20.0	31.9	0.0	43868.6	22.9
Μαρ-89	118.3	24.8	35.4	0.0	43926.6	58.0
Απρ-89	72.3	24.4	34.2	3.0	43938.0	11.4

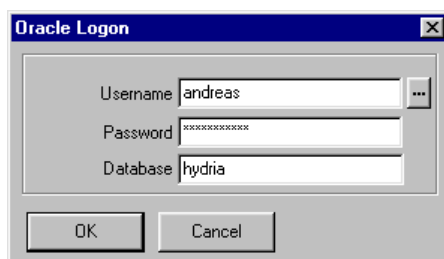
Μαϊ-89	43.9	23.7	35.4	11.1	43913.9	-24.1
Ιουν-89	22.6	20.0	34.0	22.1	43863.6	-50.3
Ιουλ-89	15.6	17.7	35.2	33.8	43797.1	-66.5
Αυγ-89	8.9	14.6	35.1	34.3	43726.1	-71.0
Σεπ-89	6.6	12.0	33.8	3.7	43684.1	-42.0
Οκτ-89	32.8	12.0	35.0	0.0	43669.8	-14.3
Νοε-89	52.5	12.5	33.8	0.0	43675.8	6.0
Δεκ-89	80.8	14.9	35.1	0.0	43706.6	30.8
Ιαν-90	53.7	15.5	35.1	0.0	43709.7	3.1
Φεβ-90	49.6	14.1	31.7	0.0	43713.5	3.8
Μαρ-90	36.6	15.1	35.1	0.0	43699.9	-13.6
Απρ-90	42.7	14.0	33.8	3.0	43692.4	-7.5
Μαϊ-90	27.1	13.1	35.0	13.2	43660.3	-32.1
Ιουν-90	18.5	10.7	33.7	28.8	43609.0	-51.3
Ιουλ-90	9.3	9.3	34.8	45.4	43533.4	-75.6
Αυγ-90	28.3	8.7	34.8	39.4	43482.8	-50.5
Σεπ-90	18.8	8.2	33.5	5.0	43455.9	-27.0
Οκτ-90	26.4	8.3	34.7	0.0	43439.2	-16.7
Νοε-90	66.8	8.5	33.5	0.0	43463.8	24.6
Δεκ-90	161.2	14.0	34.9	0.0	43576.1	112.3
Ιαν-91	136.1	19.8	35.0	0.0	43657.4	81.3
Φεβ-91	115.2	21.1	31.7	0.0	43719.7	62.3
Μαρ-91	96.9	25.0	35.2	0.0	43756.5	36.7
Απρ-91	90.4	24.3	33.9	3.0	43786.3	29.8
Μαϊ-91	71.9	24.4	35.2	7.1	43793.6	7.3
Ιουν-91	35.5	21.0	33.9	21.7	43755.8	-37.8
Ιουλ-91	19.1	18.5	35.1	30.2	43695.7	-60.1
Αυγ-91	17.1	15.5	35.0	31.9	43634.5	-61.2
Σεπ-91	11.9	12.8	33.6	4.7	43596.2	-38.3
Οκτ-91	27.0	12.2	34.9	0.5	43575.6	-20.5
Νοε-91	61.0	12.6	33.6	0.0	43590.3	14.6
Δεκ-91	72.1	14.2	34.9	0.0	43613.2	23.0
Ιαν-92	55.7	14.3	34.9	0.0	43619.7	6.5
Φεβ-92	53.4	12.6	31.5	1.0	43626.4	6.7
Μαρ-92	52.9	13.4	34.9	8.0	43623.0	-3.4
Απρ-92	49.0	12.3	33.6	9.5	43617.3	-5.7
Μαϊ-92	47.3	12.3	34.9	11.3	43608.3	-9.0
Ιουν-92	35.4	10.8	33.6	32.4	43570.3	-38.0
Ιουλ-92	17.6	9.4	34.7	42.7	43505.7	-64.6
Αυγ-92	8.9	8.0	34.6	40.5	43435.5	-70.2
Σεπ-92	5.5	7.1	33.3	12.7	43388.9	-46.6
Οκτ-92	13.4	6.9	34.5	3.5	43357.3	-31.5
Νοε-92	25.9	6.5	33.3	2.0	43341.3	-16.0
Δεκ-92	50.1	7.1	34.5	0.0	43349.9	8.6
Ιαν-93	54.4	7.4	34.5	0.0	43362.4	12.5
Φεβ-93	84.6	7.6	31.3	0.0	43408.2	45.8
Μαρ-93	69.3	9.0	34.6	11.4	43422.6	14.4
Απρ-93	45.6	8.2	33.3	15.7	43411.6	-11.0
Μαϊ-93	48.6	7.8	34.5	23.8	43396.2	-15.4
Ιουν-93	25.2	6.4	33.2	46.5	43338.6	-57.5

Ιουλ-93	10.8	5.9	34.3	61.3	43252.5	-86.2
Αυγ-93	5.6	5.3	34.2	50.3	43172.4	-80.0
Σεπ-93	3.9	4.6	32.9	19.5	43120.3	-52.1
Οκτ-93	3.0	4.3	34.1	9.2	43075.7	-44.6
Νοε-93	110.7	5.1	33.0	4.2	43144.0	68.3
Δεκ-93	99.9	6.3	34.3	4.2	43199.1	55.1
Ιαν-94	115.5	8.2	34.4	4.2	43267.9	68.7
Φεβ-94	143.3	10.4	31.2	1.6	43368.0	100.1
Μαρ-94	109.6	13.2	34.6	2.3	43427.3	59.4
Απρ-94	79.2	13.0	33.4	6.4	43454.4	27.1
Μαϊ-94	62.1	12.5	34.7	18.0	43453.4	-1.0
Ιουν-94	34.5	10.6	33.4	34.5	43412.8	-40.6
Ιουλ-94	22.2	9.2	34.5	47.6	43348.3	-64.5
Αυγ-94	14.0	7.5	34.4	48.1	43276.3	-72.0
Σεπ-94	7.7	6.5	33.1	12.5	43232.7	-43.6

Παράρτημα Γ: Οδηγίες χρήσης υπολογιστικού συστήματος

1. Εκκίνηση προγράμματος

Με την εκκίνηση του προγράμματος εμφανίζεται η φόρμα ταυτοποίησης του χρήστη (Σχήμα Γ.1), μέσω της οποίας γίνεται η σύνδεση με τη βάση δεδομένων. Ο χρήστης συμπληρώνει το όνομα (username) και τη λέξη-κλειδί (password), και πατώντας OK καλεί την κύρια οθόνη του προγράμματος.

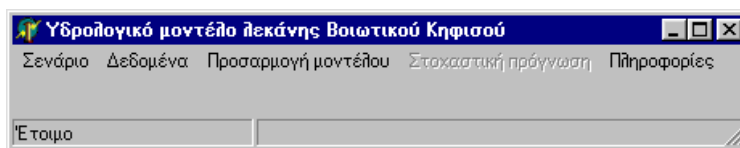


Σχήμα Γ.1: Φόρμα ταυτοποίησης του χρήστη.

2. Κύρια οθόνη

Η κύρια οθόνη, η οποία εμφανίζεται μετά την ταυτοποίηση του χρήστη, απεικονίζεται στο Σχήμα Γ.2. Από την κύρια οθόνη εκτελούνται όλες οι λειτουργίες του προγράμματος και καλούνται τα επιμέρους υποσυστήματα, χρησιμοποιώντας τα μενού που βρίσκονται στο πάνω μέρος της φόρμας.

Στο κάτω μέρος της φόρμας αναγράφονται πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας του προγράμματος. Αρχικά, οι μόνες διαθέσιμες επιλογές είναι η δημιουργία νέου σεναρίου προσομοίωσης (ενότητα 4) και η εισαγωγή ενός αποθηκευμένου στη βάση δεδομένων σεναρίου προσομοίωσης (ενότητα 5).



Σχήμα Γ.2: Κύρια φόρμα του προγράμματος.

3. Δημιουργία νέου σεναρίου προσομοίωσης

Ως *σενάριο προσομοίωσης* ορίζεται το σύνολο των πληροφοριών που συνιστούν ένα πλήρες πρόβλημα μαθηματικής αναπαράστασης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Το πρόγραμμα υποστηρίζει δύο μορφές λειτουργίας του μοντέλου: (α) *προσαρμογή μοντέλου*, ήτοι αναπαράσταση των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης (ενότητα 20), και (β) *στοχαστική πρόγνωση* των μελλοντικών αποκρίσεων της λεκάνης (ενότητα 25). Στην πρώτη περίπτωση ο κύριος στόχος είναι η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου με βάση τις ιστορικές αποκρίσεις της λεκάνης (ενότητα 21). Στην δεύτερη περίπτωση, ο στόχος είναι η στατιστική πρόβλεψη των υδρολογικών

αποκρίσεων της λεκάνης, για δεδομένες αρχικές συνθήκες και με χρήση συνθετικών χρονοσειρών εισόδου (χρονοσειρές πρόγνωσης επιφανειακής βροχόπτωσης).

Η δημιουργία ενός νέου σεναρίου προσομοίωσης γίνεται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού **Σενάριο** -> **Νέο**. Με το πάτημα του πλήκτρου καλείται η φόρμα του Σχήματος Γ.3, στην οποία ο χρήστης καθορίζει την *ονομασία*, τις *διαχειριστικές πληροφορίες* και τις *συνιστώσες* του νέου σεναρίου προσομοίωσης.

Νέο σενάριο προσομοίωσης

Όνομασία σεναρίου: Νέο σενάριο προσομοίωσης

Πληροφορίες

Διαχειριστικές πληροφορίες

Αρχή προσομοίωσης: 1/10/1994

Λήξη προσομοίωσης: 1/9/1994

Στοχαστική πρόγνωση

Πλήθος σεναρίων πρόγνωσης

Επιλογή διαθέσιμων συνιστωσών σεναρίου

Μαθηματική δομή και επιλογές μοντέλου προσομοίωσης: Λεκάνη με 2 ΜΥΑ, υδροφορέας με διάταξη 4X4 κελιών (id = 0)

Παράμετροι μοντέλου (μεταβλητές ελέγχου): Παράμετροι σεναρίου μέγιστων διαφυγών (id = 1)

Αρχικές συνθήκες υγρασίας και στάθμης υδροφορέων: Ρυθμισμένες αρχικές συνθήκες για σενάριο μέγιστων διαφυγών

Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου: Ιστορικές χρονοσειρές περιόδου 1984-1994 (id = 3)

Κριτήρια καλής προσαρμογής και επιλογές βαθμονόμησης: Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση (id = 4)

Υδρολογικές χρονοσειρές εξόδου: Χρονοσειρές εξόδου σεναρίου μέγιστων διαφυγών (id = 7)

Ανοιγμα Άκυρο

Σχήμα Γ.3: Φόρμα δημιουργίας νέου υδρολογικού σεναρίου.

Οι διαχειριστικές πληροφορίες του σεναρίου είναι η ημερομηνία έναρξης και λήξης της προσομοίωσης και το πλήθος των σεναρίων πρόγνωσης, εφόσον το μοντέλο λειτουργεί υπό μορφή στοχαστικής πρόγνωσης.

Κάθε σενάριο προσομοίωσης περιλαμβάνει τις ακόλουθες έξι συνιστώσες:

- Μαθηματική δομή και επιλογές μοντέλου προσομοίωσης:* Η μαθηματική δομή του μοντέλου προσομοίωσης αναφέρεται στην τοπολογία και τις γεωμετρικές και υδραυλικές ιδιότητες των επιμέρους εννοιολογικών αντικειμένων (συνιστώσες μοντέλου) που αναπαριστούν τις διάφορες υδρολογικές διεργασίες της λεκάνης, ήτοι μονάδες υδρολογικής απόκρισης (ενότητα 7), υδροφορείς (ενότητα 8), δεξαμενές υπόγειου νερού (ενότητα 9), πηγές (ενότητα 10), γεωτρήσεις (ενότητα 11) και θέσεις ζήτησης νερού (ενότητα 12). Οι επιλογές αναφέρονται στις γενικές ιδιότητες του φυσικού συστήματος καθώς και σε ορισμένες ρυθμίσεις που αφορούν την επίλυση του αριθμητικού σχήματος προσομοίωσης της κίνησης του υπόγειου νερού (ενότητα 13).
- Παράμετροι μοντέλου (μεταβλητές ελέγχου):* Ως παράμετροι νοούνται ορισμένες θεμελιώδεις ιδιότητες των συνιστωσών του μοντέλου που δεν μπορούν να προσδιοριστούν από τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης ή από επί τόπου μετρήσεις, οπότε βαθμονομούνται μέσω βελτιστοποίησης, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες έξοδοι του μοντέλου να αναπαριστούν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα τις ιστορικές (ενότητα 14).
- Αρχικές συνθήκες υγρασίας και στάθμης υδροφορέων:* Πρόκειται για τις τιμές εκκίνησης του μοντέλου προσομοίωσης, οι οποίες αναφέρονται στις αρχικές στάθμες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και υπόγειου νερού (ενότητα 15).

4. *Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου:* Πρόκειται για το σύνολο των χρονοσειρών εισόδου που χρησιμοποιεί το μοντέλο προσομοίωσης, οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (α) χρονοσειρές φόρτισης (βροχόπτωση, δυνητική εξατμοδιαπνοή, ζήτηση νερού, άντληση), ιστορικές ή συνθετικές, και (β) ιστορικές χρονοσειρές απόκρισης (απορροές λεκάνης και πηγών), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου (ενότητα 16).
5. *Κριτήρια καλής προσαρμογής και επιλογές βαθμονόμησης:* Ως κριτήρια καλής προσαρμογής νοούνται τα ζεύγη ιστορικών και προσομοιωμένων χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου, που χρησιμοποιούνται για τη μαθηματική διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βαθμονόμησης (ενότητα 18). Οι επιλογές βαθμονόμησης αναφέρονται σε ορισμένες ρυθμίσεις που αφορούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης (ενότητα 19).
6. *Υδρολογικές χρονοσειρές εξόδου:* Πρόκειται για το σύνολο των χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου προσομοίωσης που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων (ενότητα 17).

Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα υποστηρίζει συγκεκριμένη μαθηματική δομή και επιλογές του μοντέλου προσομοίωσης, προσαρμοσμένες στη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Αντίθετα, όλες οι υπόλοιπες συνιστώσες μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη. Στην βάση δεδομένων αποθηκεύονται πολλές ομάδες συνιστωσών, έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ενός νέου σεναρίου προσομοίωσης με συνδυασμό ήδη υπαρχουσών συνιστωσών. Η επιλογή κάθε συνιστώσας γίνεται μέσω της αντίστοιχης λίστας επιλογής της φόρμας. Σε κάθε λίστα επιλογής αναγράφεται η αποθηκευμένη ονομασία και ο κωδικός των συνιστωσών.

4. Εισαγωγή σεναρίου προσομοίωσης

Από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού **Σενάρια** -> **Εισαγωγή** καλείται η φόρμα του Σχήματος Γ.4, μέσω της οποίας ο χρήστης επιλέγει ένα από τα διαθέσιμα στη βάση δεδομένων σενάρια προσομοίωσης. Η επιλογή του σεναρίου γίνεται ανατρέχοντας στον κατάλογο της φόρμας.

Σενάρια προσομοίωσης

Διαθέσιμα στη βάση δεδομένων σενάρια προσομοίωσης

Κωδικός	Όνομασία	Αποθήκευση	Πρόγνωση απορροής	Χρονοσειρές	Έναρξη	Λήξη
0	Σενάριο μέγιστων διαφυγών	10/3/2003	False	1	1/10/1984	1/9/1994
1	Σενάριο ελάχιστων διαφυγών	10/3/2003	False	1	1/10/1984	1/9/1994
2	Σενάριο πρόγνωσης	3/10/2003	True	200	1/10/2002	1/9/2012

Συνιστώσες επιλεγμένου σεναρίου προσομοίωσης

Μαθηματική δομή και επιλογές μοντέλου προσομοίωσης: 0 | Λεκάνη με 2 ΜΥΑ, υδροφορέας με διάταξη 4x4 κελιών

Παράμετροι μοντέλου (μεταβλητές ελέγχου): 1 | Παράμετροι σεναρίου μέγιστων διαφυγών

Αρχικές συνθήκες υγρασίας και στάθμης υδροφορέων: 2 | Ρυθμισμένες αρχικές συνθήκες για σενάριο μέγιστων διαφυγών

Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου: 3 | Ιστορικές χρονοσειρές περιόδου 1984-1994

Κριτήρια καλής προσαρμογής και επιλογές βαθμονόμησης: 4 | Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση

Υδρολογικές χρονοσειρές εξόδου: 5 | Παράμετροι σεναρίου ελάχιστων διαφυγών

Ανοίγμα Διαγραφή Εξοδος

Σχήμα Γ.4: Φόρμα εισαγωγής υδρολογικού σεναρίου.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Άνοιγμα** εισάγονται από τη βάση δεδομένων όλες οι συνιστώσες του επιλεγμένου σεναρίου προσομοίωσης, οι οποίες φαίνονται στο κάτω τμήμα της φόρμας. Μετά την ανάκτηση των δεδομένων από τη βάση, επανέρχεται στο προσκήνιο η κύρια οθόνη.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Διαγραφή** διαγράφεται από την βάση δεδομένων το επιλεγμένο σενάριο προσομοίωσης, καθώς και όλες οι συνιστώσες του που δεν χρησιμοποιούνται από άλλα σενάρια. Για λόγους ασφαλείας, δεν επιτρέπεται η διαγραφή του τελευταίου σεναρίου που είναι αποθηκευμένο στη βάση δεδομένων.

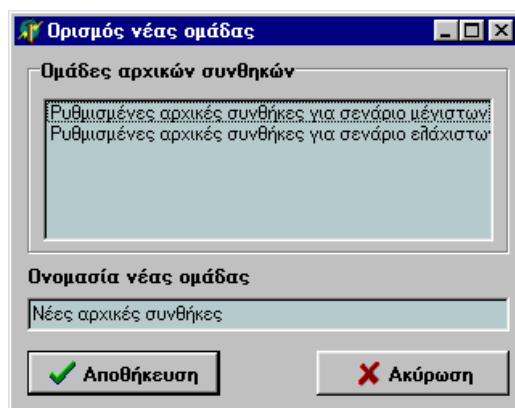
5. Αποθήκευση σεναρίου προσομοίωσης

Η εν λόγω δυνατότητα είναι ενεργή μόνο εφόσον έχει ολοκληρωθεί η εκτέλεση κάποιου σεναρίου προσομοίωσης ή εφόσον έχουν τροποποιηθεί κάποιες από τις συνιστώσες του. Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης καλεί από την κύρια οθόνη του προγράμματος το μενού **Σενάριο** → **Αποθήκευση**, οπότε αποθηκεύονται στην βάση δεδομένων όλες οι τροποποιήσεις που έχουν γίνει στο συγκεκριμένο σενάριο, καθώς και οι επιλεγμένες χρονοσειρές εξόδου, εφόσον έχουν παραχθεί τέτοιες. Εναλλακτικά, ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει το σενάριο με διαφορετική ονομασία, καλώντας από την κύρια οθόνη του προγράμματος το μενού **Σενάριο** → **Αποθήκευση ως**, οπότε εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.5.

Συνιστώσες σεναρίου προσομοίωσης (πατήστε το κουμπί δεξιά για τον ορισμό νέας συνιστώσας)	Τρέχουσα τιμή	Αποθήκευση
Μαθηματική δομή και επιλογές μοντέλου προσομοίωσης	Λεκάνη με 2 ΜΥΑ, υδροφορέας με διάταξη 4x4 κελιών (id = 0)	X
Παράμετροι μοντέλου (μεταβλητές ελέγχου)	Παράμετροι σεναρίου μέγιστων διαφυγών (id = 1)	X
Αρχικές συνθήκες υγρασίας και στάθμης υδροφορέων	Ρυθμισμένες αρχικές συνθήκες για σενάριο μέγιστων διαφυγών (id = 2)	X
Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου	Ιστορικές χρονοσειρές περιόδου 1984-1994 (id = 3)	X
Κριτήρια καλής προσαρμογής και επιλογές βαθμονόμησης	Πολυκριτηριακή βαθμονόμηση (id = 4)	X
Υδρολογικές χρονοσειρές εξόδου	Παράμετροι σεναρίου ελάχιστων διαφυγών (id = 5)	X

Σχήμα Γ.5: Φόρμα αποθήκευσης σεναρίου προσομοίωσης.

Στην εν λόγω φόρμα, ο χρήστης ορίζει την *ονομασία* του σεναρίου, η οποία πρέπει να είναι διαφορετική από την ονομασία των υπόλοιπων σεναρίων προσομοίωσης που είναι αποθηκευμένα στη βάση δεδομένων. Όσον αφορά τις *συνιστώσες* του σεναρίου, το πρόγραμμα ενημερώνει ποιες από αυτές έχουν τροποποιηθεί, ενεργοποιώντας το πλήκτρο με το σύμβολο «X» δίπλα στην ονομασία κάθε συνιστώσας. Πατώντας στο πλήκτρο, εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.6, μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει στη βάση δεδομένων το σύνολο των πληροφοριών που αναφέρονται στη συγκεκριμένη συνιστώσα ως νέα ομάδα.



Σχήμα Γ.6: Φόρμα αποθήκευσης νέας ομάδας, η οποία αναφέρεται στην αντίστοιχη τροποποιημένη συνιστώσα του σεναρίου προσομοίωσης.

6. Κλείσιμο σεναρίου προσομοίωσης

Από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Σενάριο → Κλείσιμο ολοκληρώνεται η εκτέλεση του τρέχοντος σεναρίου προσομοίωσης και είναι δυνατή είτε η δημιουργία νέου σεναρίου (ενότητα 3) είτε η εισαγωγή νέου σεναρίου (ενότητα 4). Σημειώνεται ότι το κλείσιμο ενός σεναρίου προσομοίωσης δεν συνεπάγεται αυτόματη αποθήκευση αυτού στη βάση δεδομένων. Η εν λόγω λειτουργία πραγματοποιείται με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 5.

7. Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Ως μονάδα υδρολογικής απόκρισης νοείται μια ένα σύνολο από τμήματα μιας λεκάνης απορροής με κοινά υδρολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Η προσομοίωση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, η οποία αποσκοπεί στον επιμερισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, απώλειες λόγω εξάτμισης και διαπνοής και κατείσδυση προς τους υποκείμενους υδροφορείς, πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας. Συγκεκριμένα, η λειτουργία κάθε μονάδας υδρολογικής απόκρισης εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, τα χαρακτηριστικά της οποίας φαίνονται στο αριστερό μέρος της φόρμας του Σχήματος Γ.7. Η εν λόγω φόρμα καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα → Δομή και συνιστώσες → Μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Σημειώνεται ότι όλες οι φόρμες του μενού Δεδομένα → Δομή και συνιστώσες είναι μόνο για ανάγνωση.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής εδαφικής υγρασίας είναι:

Έκταση λεκάνης απορροής: Η εν λόγω έκταση (σε km^2), η οποία αντιστοιχεί στην επιφάνεια της δεξαμενής, προκύπτει ως το άθροισμα των εκτάσεων των τμημάτων της συνολικής λεκάνης με κοινά υδρολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Χωρητικότητα κατακράτησης, K_1 : Όριο εδαφικής υγρασίας (σε mm), κάτω από το οποίο δεν πραγματοποιείται υποδερμική ροή.

Ολική χωρητικότητα, K_2 : Όριο εδαφικής υγρασίας (σε mm), πάνω από το οποίο πραγματοποιείται πλημμυρική απορροή, ήτοι το όριο κορεσμού του εδάφους.

Συντελεστής υποδερμικής ροής, λ : Συντελεστής στείρευσης υποδερμικής ροής, ήτοι ρυθμός πραγματοποίησης της υποδερμικής ροής συναρτήσει της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας, εφόσον η τελευταία ξεπερνά το όριο K_1 .

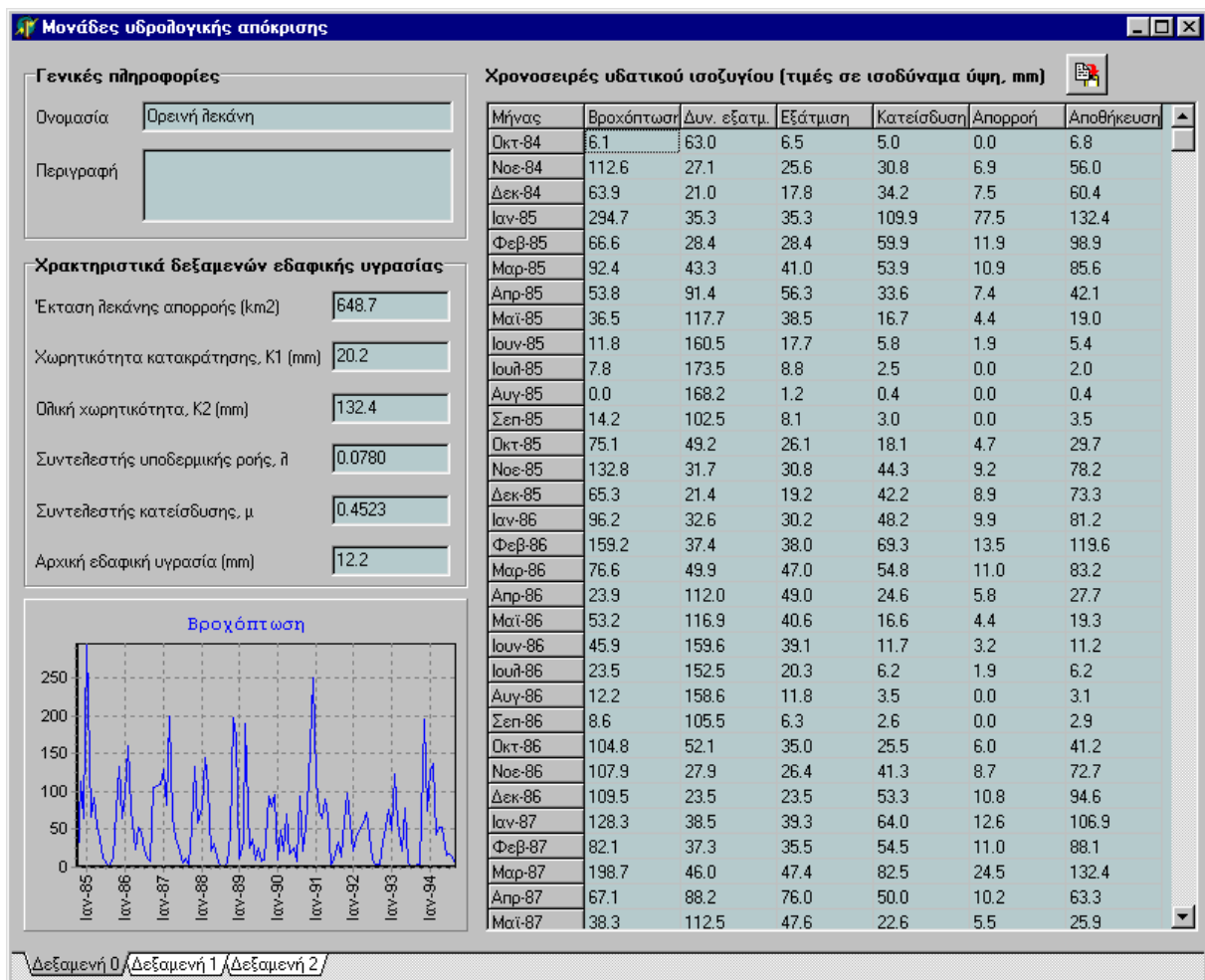
Συντελεστής κατείσδυσης, μ : Συντελεστής στείρευσης κατείσδυσης, ήτοι ρυθμός πραγματοποίησης της κατείσδυσης συναρτήσει της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας.

Αρχική εδαφική υγρασία, S_0 : Αρχική τιμή ύψους εδαφικής υγρασίας (σε mm) στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης.

Στον πίνακα που βρίσκεται στο δεξιό μέρος της φόρμας δίνονται οι χρονοσειρές υδατικού ισοζυγίου της μονάδας υδρολογικής απόκρισης, εκφρασμένες σε ισοδύναμα ύψη (mm). Οι εν λόγω χρονοσειρές είναι η βροχόπτωση (είσοδος του μοντέλου), η δυνητική εξατμοδιαπνοή (είσοδος του μοντέλου), η εξάτμιση (θεωρητικό άνω όριο της οποίας είναι η δυνητική εξατμοδιαπνοή), η κατείσδυση, η απορροή (που προκύπτει ως άθροισμα της πλημμυρικής απορροής και της υποδερμικής ροής) και η αποθήκευση (ήτοι η διαθέσιμη εδαφική υγρασία σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης).

Πατώντας το ποντίκι σε μία από τις στήλες του πίνακα, απεικονίζεται στο γράφημα που φαίνεται στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας η αντίστοιχη χρονοσειρά ισοζυγίου της δεξαμενής.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.



Σχήμα Γ.7: Φόρμα απεικόνισης μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

8. Τοπολογία υδροφορέα

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων, σύμφωνα με την οποία ο υδροφορέας διακριτοποιείται ως ένας ορθογώνιος κানাβος. Σε κάθε κυψέλη του κανάβου αντιστοιχεί μια δεξαμενή υπόγειου νερού που επικοινωνεί με τις γειτονικές της μέσω στοιχείων μεταφοράς (αγωγοί). Τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των

δεξαμενών και αγωγών δίνονται στη φόρμα του Σχήματος Γ.8, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Τοπολογία υδροφορέα. Η θέση κάθε κυψέλης φαίνεται στον σχηματικό κάναβο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε κυψέλης υπόγειου νερού είναι:

Τετμημένη κέντρου βάρους, X: Οριζόντια συντεταγμένη (σε m) κέντρου βάρους δεξαμενής υπόγειου νερού που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη κυψέλη.

Τεταγμένη κέντρου βάρους, Y: Εγκάρσια συντεταγμένη (σε m) κέντρου βάρους δεξαμενής υπόγειου νερού που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη κυψέλη.

Επιφάνεια κυψέλης, E: Αντιστοιχεί στην επιφάνεια των τμημάτων του υδροφορέα (σε km²) που προσομοιώνονται από την συγκεκριμένη κυψέλη.

Υπερκείμενη μονάδα υδρολογικής απόκρισης: Κωδικός μονάδας υδρολογικής απόκρισης που τροφοδοτεί, μέσω της κατεισδυσης, την συγκεκριμένη κυψέλη. Σημειώνεται ότι κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης μπορεί να τροφοδοτεί περισσότερες από μία κυψέλες. Ο όγκος νερού που κατεισδύει προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος κατεισδυσης επί την επιφάνεια της κυψέλης.

Οριζόντια αγωγιμότητα, Cx: Όρος υδραυλικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κίνησης του νερού κατά την οριζόντια διεύθυνση (σε m/s).

Εγκάρσια αγωγιμότητα, Cy: Όρος υδραυλικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κίνησης του νερού κατά την εγκάρσια διεύθυνση (σε m/s).

Κατακόρυφη αγωγιμότητα, Cz: Όρος υδραυλικής αγωγιμότητας που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κίνησης του νερού κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (σε m/s). Σημειώνεται ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο, όλοι οι όροι κατακόρυφης αγωγιμότητας είναι μηδενικοί, καθώς θεωρείται ενιαίο στρώμα κατακόρυφης διαμέρισης του υδροφορέα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

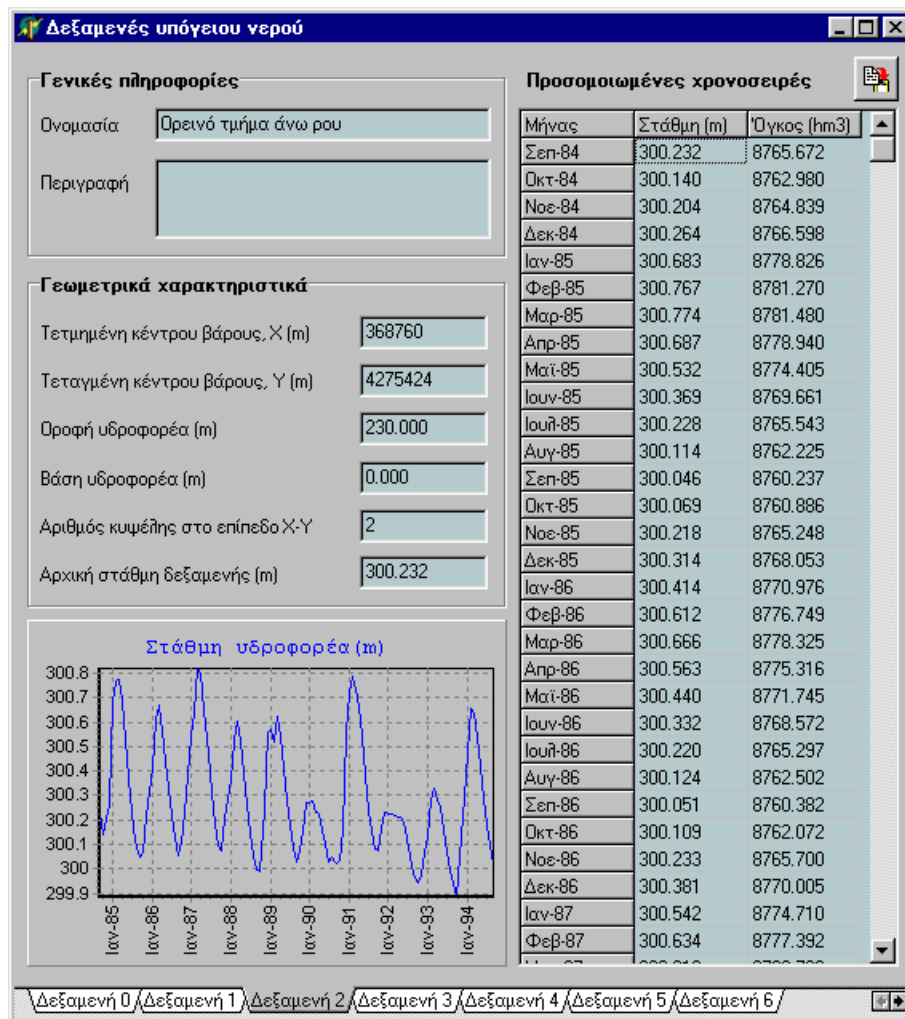
Τύπος κυψέλης: Ανάλογα με τις διεργασίες που προσομοιώνονται, η κυψέλη αντιστοιχεί σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες: (α) εικονική, (β) υδροφορέας, (γ) πηγή, και (δ) θάλασσα.

Σχήμα Γ.8: Φόρμα απεικόνισης τοπολογίας υδροφορέα.

9. Δεξαμενές υπόγειου νερού

Οι δεξαμενές υπόγειου νερού προσομοιώνουν τη λειτουργία του υδροφορέα, σύμφωνα και με τα όσα αναφέρονται στην ενότητα 8. Τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των δεξαμενών δίνονται

στη φόρμα του Σχήματος 2.2, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Δεξαμενές υπόγειου νερού.



Σχήμα Γ.9: Φόρμα απεικόνισης δεξαμενών υπόγειου νερού.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής υπόγειου νερού είναι:

Τετμημένη κέντρου βάρους, X: Οριζόντια συντεταγμένη (σε m) κέντρου βάρους δεξαμενής.

Τεταγμένη κέντρου βάρους, Y: Εγκάρσια συντεταγμένη (σε m) κέντρου βάρους δεξαμενής.

Οροφή υδροφορέα: Απόλυτο υψόμετρο οροφής δεξαμενής (σε m), η οποία αντιστοιχεί στην ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στην περίπτωση που η δεξαμενή προσομοιώνει τη λειτουργία πηγής, η εν λόγω τιμή τίθεται εξ ορισμού ίση με -999 .

Βάση υδροφορέα: Απόλυτο υψόμετρο βάσης δεξαμενής (σε m), η οποία αντιστοιχεί στην κατώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Αριθμός κυπέλης στο επίπεδο X-Y: Κυπέλη στην οποία αντιστοιχεί η δεξαμενή. Η αρίθμηση των κυψελών γίνεται ξεκινώντας από την άνω αριστερή κυπέλη (η οποία λαμβάνει κωδικό 0) και ανατρέχοντας τον κάναβο κατά στήλες.

Αρχική στάθμη δεξαμενής: Αρχική στάθμη υπόγειου νερού στην δεξαμενή (σε m) στην αρχή της περιόδου προσομοίωσης. Στην περίπτωση που η δεξαμενή προσομοιώνει τη λειτουργία πηγής, η αρχική στάθμη ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο εκφόρτισης της πηγής. Ομοίως, στην περίπτωση που η δεξαμενή προσομοιώνει τη λειτουργία της θάλασσας, η οποία συγκεντρώνει τις απώλειες νερού που καταλήγουν εκτός του υδροφορέα, η αρχική στάθμη τίθεται ίση με μηδέν.

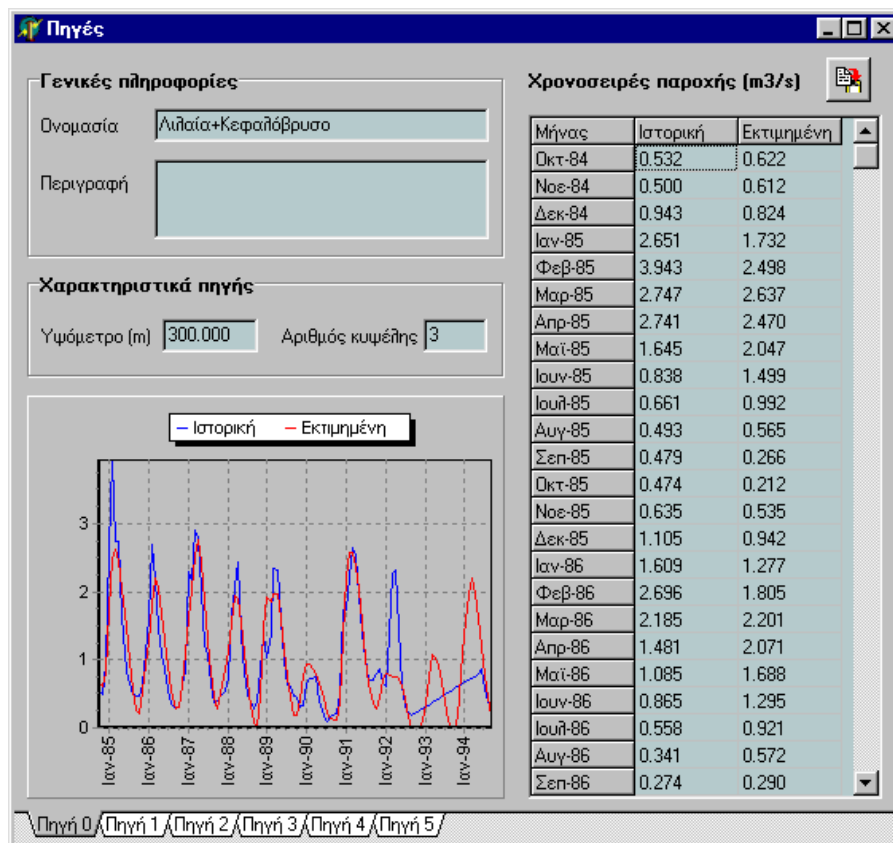
Στον πίνακα που βρίσκεται στο δεξιό μέρος της φόρμας δίνονται οι χρονοσειρές διακύμανσης της στάθμης (σε m) και του αντίστοιχου αποθέματος υπόγειου νερού (σε hm³) στην δεξαμενή.

Πατώντας το ποντίκι σε μία από τις στήλες του πίνακα, απεικονίζεται στο γράφημα που φαίνεται στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας η αντίστοιχη χρονοσειρά.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

10. Πηγές

Η εκφόρτιση ενός υδροφορέα μέσω μιας πηγής (ομοίως και η εκφόρτιση στη θάλασσα) μοντελοποιείται μέσω μιας δεξαμενής πολύ μεγάλης (θεωρητικά άπειρης) βάσης που εξασφαλίζει συνθήκες σταθερού υδραυλικού φορτίου, και η οποία επιτρέπεται μόνο να τροφοδοτείται και όχι να τροφοδοτεί γειτονικές δεξαμενές. Τα χαρακτηριστικά των πηγών δίνονται στη φόρμα του Σχήματος Γ.10, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Πηγές.



Σχήμα Γ.10: Φόρμα απεικόνισης πηγών.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε πηγής είναι το *υψόμετρο* αυτής (απόλυτη τιμή σε m) και ο *αριθμός κυψέλης* στην οποία αντιστοιχεί.

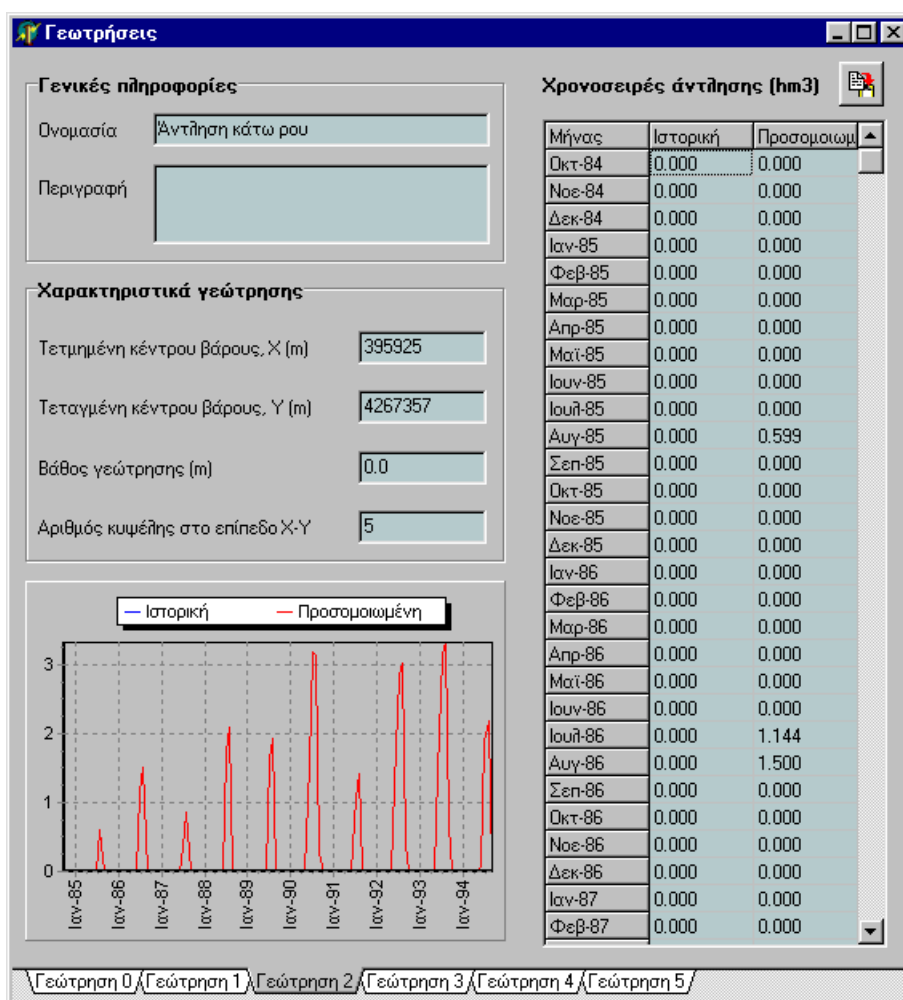
Στον πίνακα που βρίσκεται στο δεξιό μέρος της φόρμας δίνονται οι χρονοσειρές διακύμανσης της ιστορικής (εφόσον υπάρχει) και της εκτιμημένης (προσομοιωμένης) παροχής της πηγής, σε m³/s. Οι εν λόγω χρονοσειρές απεικονίζονται με μπλε και κόκκινο χρώμα, αντίστοιχα, στα γραφήματα που φαίνονται στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας. Σημειώνεται ότι όταν μια πηγή προσομοιώνει την

εκφόρτιση του υδροφορέα προς την θάλασσα, οι απόλυτες τιμές παροχής δεν έχουν φυσικό νόημα. Στην περίπτωση αυτή, η χρονοσειρά παροχής απεικονίζεται ως μια σχεδόν ευθεία γραμμή, η κλίση της οποίας εκφράζει τον ρυθμό αποφόρτισης του υδροφορέα προς τη θάλασσα.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

11. Γεωτρήσεις

Τα χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων δίνονται στη φόρμα του Σχήματος Γ.11, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Γεωτρήσεις. Τα εν λόγω χαρακτηριστικά είναι οι *συντεταγμένες της γεώτρησης* (σε m), το *βάθος της γεώτρησης*, εκφρασμένο ως απόλυτο υψόμετρο πυθμένα (σε m), και ο *αριθμός κυπέλης* στην οποία αντιστοιχεί.



Σχήμα Γ.11: Φόρμα απεικόνισης γεωτρήσεων.

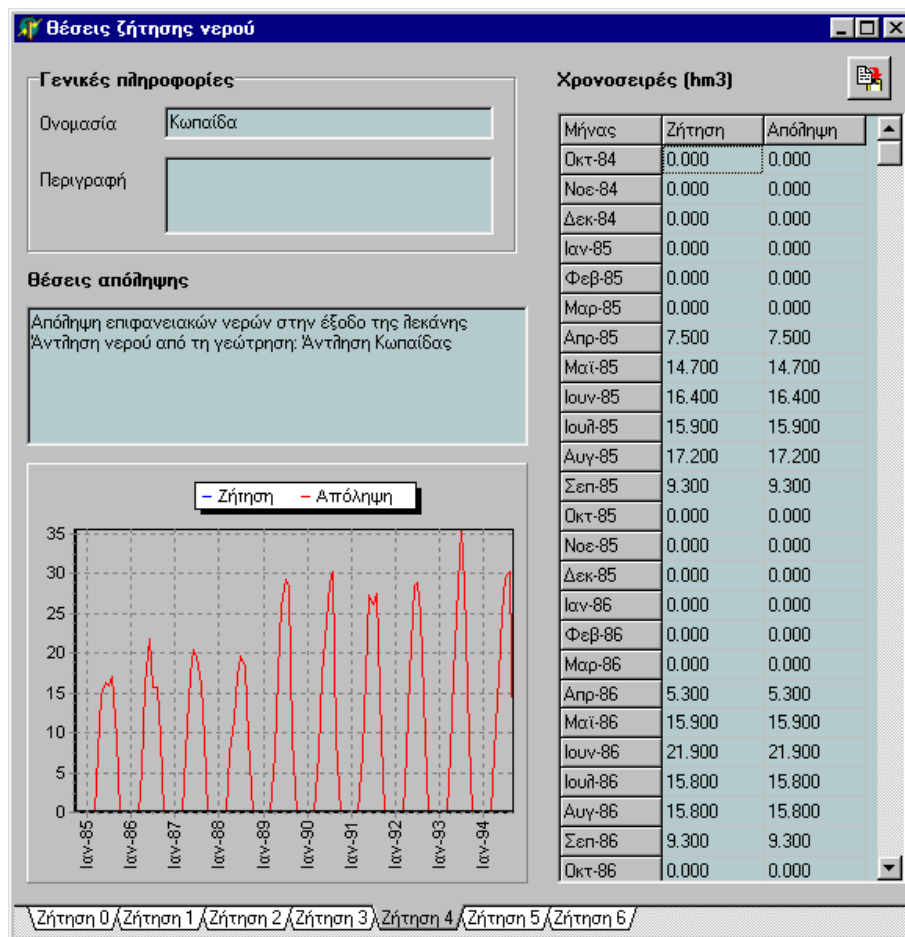
Στον πίνακα που βρίσκεται στο δεξιό μέρος της φόρμας δίνονται οι χρονοσειρές διακύμανσης της ιστορικής (εφόσον υπάρχει) και της προσομοιωμένης χρονοσειράς άντλησης, σε hm^3 . Οι εν λόγω χρονοσειρές απεικονίζονται με μπλε και κόκκινο χρώμα, αντίστοιχα, στα γραφήματα που φαίνονται στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας. Σημειώνεται ότι η προσομοιωμένη άντληση δύναται να είναι μεγαλύτερη από την ιστορική, καθώς το μοντέλο προσπαθεί πρώτα να αναπαράγει ακριβώς την

ιστορική άντληση και στη συνέχεια, εφόσον η ζήτηση νερού ξεπερνά την εν λόγω τιμή, να επιβάλει περαιτέρω αντλήσεις.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιό μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

12. Θέσεις ζήτησης νερού

Τα χαρακτηριστικά των θέσεων ζήτησης νερού δίνονται στη φόρμα του Σχήματος Γ.12, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Θέσεις ζήτησης νερού. Σε κάθε θέση μπορεί να πραγματοποιούνται απολήψεις από διαφορετικούς υδατικούς πόρους (επιφανειακά νερά, πηγαία νερά, γεωτρήσεις), οι οποίοι φαίνονται στη λίστα *Θέσεις απόληψης*. Το μοντέλο ικανοποιεί τη ζήτηση ιεραρχικά, χρησιμοποιώντας τους υδατικούς πόρους των αντίστοιχων θέσεων απόληψης με τη σειρά που αναφέρονται στην εν λόγω λίστα.



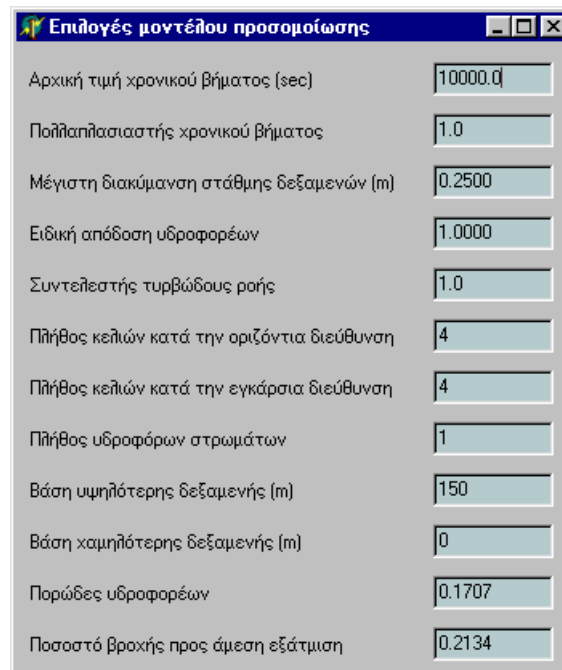
Σχήμα Γ.12: Φόρμα απεικόνισης θέσεων ζήτησης νερού.

Στον πίνακα που βρίσκεται στο δεξιό μέρος της φόρμας δίνονται οι χρονοσειρές διακύμανσης της ζήτησης και απόληψης νερού, σε hm^3 . Οι εν λόγω χρονοσειρές απεικονίζονται με μπλε και κόκκινο χρώμα, αντίστοιχα, στα γραφήματα που φαίνονται στο κάτω αριστερό μέρος της φόρμας. Προφανώς, σε κάθε χρονικό βήμα η πραγματοποιούμενη απόληψη είναι το πολύ ίση με τη ζήτηση. Εφόσον υπάρχει επάρκεια νερού, οι δύο χρονοσειρές ταυτίζονται.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

13. Επιλογές μοντέλου προσομοίωσης

Οι επιλογές του μοντέλου προσομοίωσης αναφέρονται σε ένα σύνολο υπολογιστικών παραμέτρων, οι οποίες απεικονίζονται στη φόρμα του Σχήματος Γ.13 και δεν μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη. Η εν λόγω φόρμα καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Δομή και συνιστώσες -> Επιλογές μοντέλου προσομοίωσης.



Παράμετρος	Τιμή
Αρχική τιμή χρονικού βήματος (sec)	10000.0
Πολλαπλασιαστές χρονικού βήματος	1.0
Μέγιστη διακύμανση στάθμης δεξαμενών (m)	0.2500
Ειδική απόδοση υδροφορέων	1.0000
Συντελεστής τυρβώδους ροής	1.0
Πλήθος κελιών κατά την οριζόντια διεύθυνση	4
Πλήθος κελιών κατά την εγκάρσια διεύθυνση	4
Πλήθος υδροφόρων στρωμάτων	1
Βάση υψηλότερης δεξαμενής (m)	150
Βάση χαμηλότερης δεξαμενής (m)	0
Παράδες υδροφορέων	0.1707
Ποσοστό βροχής προς άμεση εξάτμιση	0.2134

Σχήμα Γ.13: Φόρμα ρύθμισης επιλογών μοντέλου προσομοίωσης.

Οι υπολογιστικές παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης είναι:

Αρχική τιμή χρονικού βήματος: Χρονικό βήμα επίλυσης αριθμητικού σχήματος υπόγειας κίνησης νερού (σε sec). Τονίζεται ότι το εν λόγω χρονικό βήμα είναι κατά πολύ μικρότερο από το βήμα προσομοίωσης, το οποίο είναι εξ ορισμού μηνιαίο.

Πολλαπλασιαστές χρονικού βήματος: Συντελεστής με τον οποίον πολλαπλασιάζεται η αρχική τιμή του χρονικού βήματος επίλυσης, στην περίπτωση που η μέγιστη μεταβολή της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού δεν ξεπερνά το άνω όριο διακύμανσης.

Μέγιστη διακύμανση στάθμης δεξαμενών: Άνω όριο επιτρεπόμενη μεταβολή στάθμης δεξαμενών υπόγειου νερού ανά χρονικό βήμα (σε m).

Ειδική απόδοση υδροφορέων: Λόγος ειδικής απόδοσης προς αποθηκευτικότητα υδροφορέα υπό συνθήκες πίεσης.

Συντελεστής τυρβώδους ροής: Παράμετρος τύρβης που εισάγεται στην εξίσωση Darcy για την προσομοίωση καρστικών υδροφορέων.

Πλήθος κελιών κατά την οριζόντια διεύθυνση: Ταυτίζεται με το πλήθος των στηλών του κανάβου διακριτοποίησης του υδροφορέα.

Πλήθος κελιών κατά την εγκάρσια διεύθυνση: Ταυτίζεται με το πλήθος των γραμμών του κανάβου διακριτοποίησης του υδροφορέα.

Βάση υψηλότερης δεξαμενής: Ανώτερη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα (σε m).

Βάση χαμηλότερης δεξαμενής: Κατώτερη στάθμη υδροφόρου ορίζοντα (σε m).

Πορώδες υδροφορέων: Συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η επιφάνεια των δεξαμενών για τον υπολογισμό του ενεργού αποθέματος υπόγειου νερού (κοινή τιμή για το σύνολο του υδροφορέα).

Ποσοστό βροχής προς άμεση εξάτμιση: Σε κάθε χρονικό βήμα προσομοίωσης, η άμεση εξάτμιση προκύπτει ως το ελάχιστο της δυναμικής εξατμοδιαπνοής και του εν λόγω ποσοστού της βροχόπτωσης (κοινή τιμή για το σύνολο των μονάδων υδρολογικής απόκρισης).

14. Παράμετροι μοντέλου προσομοίωσης

Ως παράμετροι του μοντέλου προσομοίωσης νοούνται ορισμένα χαρακτηριστικά των συνιστωσών του μοντέλου, οι τιμές των οποίων δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά μεγέθη του φυσικού συστήματος και, πολύ περισσότερο, δεν μπορούν να προσδιοριστούν με επιτόπου μετρήσεις. Οι εν λόγω παράμετροι δίνονται υπό μορφή πίνακα στην φόρμα του Σχήματος Γ.14, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Παράμετροι.

Οι επίκαιρες τιμές των παραμέτρων είτε ορίζονται απευθείας από τον χρήστη είτε προκύπτουν μέσω βελτιστοποίησης. Η *βελτιστοποίηση* (ή αλλιώς βαθμονόμηση του μοντέλου) είναι μια συστηματική υπολογιστική διαδικασία, σύμφωνα με την οποία εκτελείται ένα μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων με διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών παραμέτρων και επιλέγεται ο συνδυασμός που αναπαράγει με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τις ιστορικές αποκρίσεις της λεκάνης (ενότητες 18, 19, 21). Η αναζήτηση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων γίνεται μεταξύ ενός κατώτερου και ενός ανώτερου ορίου, τα οποία ορίζει ο χρήστης μέσω της φόρμας. Δεν συστήνεται η αλλαγή των ορίων αυτών από μη έμπειρους χρήστες. Η επιλογή των παραμέτρων που ζητείται να υπολογιστούν μέσω βελτιστοποίησης γίνεται πατώντας στην τελευταία στήλη του πίνακα.

Συνιστώσα	Συμβολισμός	Μονάδες	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	Επίκαιρη τιμή	Βαθμονόμηση
Ύψος κατακράτησης υγρασίας (0)	K1(0)	mm	0.005000	0.150000	0.020150	0.020150	X
Ύψος κατακράτησης υγρασίας (1)	K1(1)	mm	0.100000	0.400000	0.331680	0.331680	X
Ύψος κατακράτησης υγρασίας (2)	K1(2)	mm	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Χωρητικότητα δεξαμενής υγρασίας (0)	K2(0)	mm	0.100000	0.300000	0.132435	0.132435	X
Χωρητικότητα δεξαμενής υγρασίας (1)	K2(1)	mm	0.300000	0.700000	0.589453	0.589453	X
Χωρητικότητα δεξαμενής υγρασίας (2)	K2(2)	mm	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Συντελεστής υποδερμικής ροής (0)	η(0)		0.000000	0.150000	0.078031	0.078031	X
Συντελεστής υποδερμικής ροής (1)	η(1)		0.000000	0.100000	0.042302	0.042302	X
Συντελεστής υποδερμικής ροής (2)	η(2)		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Συντελεστής κατείσδυσης (0)	μ(0)		0.300000	0.600000	0.452301	0.452301	X
Συντελεστής κατείσδυσης (1)	μ(1)		0.050000	0.200000	0.088575	0.088575	X
Συντελεστής κατείσδυσης (2)	μ(2)		0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Ποσοστό βροχής προς άμεση εξάτμιση	ε		0.200000	0.500000	0.213367	0.213367	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (0)	Cx(0)	m/s	0.000000	0.000100	0.000023	0.000023	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (1)	Cx(1)	m/s	0.000000	0.010000	0.000471	0.000471	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (2)	Cx(2)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (3)	Cx(3)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (4)	Cx(4)	m/s	0.000000	0.050000	0.008856	0.008856	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (5)	Cx(5)	m/s	0.000000	0.010000	0.002120	0.002120	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (6)	Cx(6)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (7)	Cx(7)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (8)	Cx(8)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (9)	Cx(9)	m/s	0.000000	0.005000	0.000430	0.000430	X
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (10)	Cx(10)	m/s	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	

Σχήμα Γ.14: Φόρμα ρύθμισης παραμέτρων μοντέλου προσομοίωσης.

Με το πάτημα του πλήκτρου Αποθήκευση τιμών αποθηκεύονται στη μνήμη του προγράμματος το σύνολο των αλλαγών που έχει κάνει ο χρήστης στην φόρμα. Επισημαίνεται ότι ο χρήστης μπορεί να επέμβει μόνο στις στήλες 4 (ελάχιστη τιμή), 5 (μέγιστη τιμή), 7 (επίκαιρη τιμή) και 8 (βαθμονόμηση).

Με το πάτημα του πλήκτρου Βέλτιστες τιμές τίθενται στη θέση των επίκαιρων τιμών αυτές που έχουν προκύψει μετά την τελευταία βαθμονόμηση του μοντέλου.

Με το πάτημα του πλήκτρου Επαναφορά τιμών ακυρώνονται όλες οι μη αποθηκευμένες τροποποιήσεις του χρήστη στην φόρμα.

Με το πάτημα του πλήκτρου Έξοδος η φόρμα κλείνει, προειδοποιώντας τον χρήστη αν θέλει να αποθηκευτούν οι τροποποιήσεις που έχει πραγματοποιήσει.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

15. Αρχικές συνθήκες προσομοίωσης

Ως αρχικές συνθήκες προσομοίωσης νοούνται οι αρχικές τιμές ύψους εδαφικής υγρασίας των μονάδων υδρολογικής απόκρισης και οι αρχικές στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού. Οι εν λόγω παράμετροι δίνονται υπό μορφή πίνακα στην φόρμα του Σχήματος Γ.15, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Αρχικές συνθήκες.

Ομοίως με τις παραμέτρους του μοντέλου (ενότητα 14), οι επίκαιρες τιμές των αρχικών συνθηκών είτε ορίζονται απευθείας από τον χρήστη είτε προκύπτουν μέσω βελτιστοποίησης. Η επιλογή των παραμέτρων που ζητείται να υπολογιστούν μέσω βελτιστοποίησης γίνεται πατώντας στην τελευταία στήλη του πίνακα.

Συνιστώσα	Συμβολισμός	Μονάδες	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	Επίκαιρη τιμή	Βαθμονόμηση
Ύψος εδαφικής υγρασίας (0)	So(0)	mm	0.000000	0.020000	0.012246	0.012246	X
Ύψος εδαφικής υγρασίας (1)	So(1)	mm	0.090000	0.150000	0.102262	0.102262	X
Ύψος εδαφικής υγρασίας (2)	So(2)	mm	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (0)	Wa(0, 0)	m	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (1)	Wa(0, 1)	m	0.000000	0.000000	280.000000	280.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (2)	Wa(0, 2)	m	300.000000	300.500000	300.232419	300.232419	X
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (3)	Wa(0, 3)	m	0.000000	0.000000	300.000000	300.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (4)	Wa(1, 0)	m	100.000000	104.000000	102.948003	102.948003	X
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (5)	Wa(1, 1)	m	0.000000	0.000000	110.000000	110.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (6)	Wa(1, 2)	m	120.000000	122.000000	121.423231	121.423231	X
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (7)	Wa(1, 3)	m	0.000000	0.000000	120.000000	120.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (8)	Wa(2, 0)	m	0.000000	0.000000	100.000000	100.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (9)	Wa(2, 1)	m	0.000000	0.000000	95.000000	95.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (10)	Wa(2, 2)	m	200.000000	202.000000	201.238064	201.238064	X
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (11)	Wa(2, 3)	m	0.000000	0.000000	200.000000	200.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (12)	Wa(3, 0)	m	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (13)	Wa(3, 1)	m	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (14)	Wa(3, 2)	m	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (15)	Wa(3, 3)	m	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	

Σχήμα Γ.15: Φόρμα ρύθμισης αρχικών συνθηκών μοντέλου προσομοίωσης.

Με το πάτημα του πλήκτρου Αποθήκευση τιμών αποθηκεύονται στη μνήμη του προγράμματος το σύνολο των αλλαγών που έχει κάνει ο χρήστης στην φόρμα. Επισημαίνεται ότι ο χρήστης μπορεί να επέμβει μόνο στις στήλες 4 (ελάχιστη τιμή), 5 (μέγιστη τιμή), 7 (επίκαιρη τιμή) και 8 (βαθμονόμηση).

Με το πάτημα του πλήκτρου Βέλτιστες τιμές τίθενται στη θέση των επίκαιρων τιμών αυτές που έχουν προκύψει μετά την τελευταία βαθμονόμηση του μοντέλου.

Με το πάτημα του πλήκτρου Επαναφορά τιμών ακυρώνονται όλες οι μη αποθηκευμένες τροποποιήσεις του χρήστη στην φόρμα.

Με το πάτημα του πλήκτρου Έξοδος η φόρμα κλείνει, προειδοποιώντας τον χρήστη αν θέλει να αποθηκευτούν οι τροποποιήσεις που έχει πραγματοποιήσει.

Πατώντας το πρώτο πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας καλείται η φόρμα του Σχήματος Γ.16, στην οποία απεικονίζονται σε κάτοψη οι επίκαιρες αρχικές στάθμες των δεξαμενών υπόγειου νερού. Τονίζεται ότι, όσον αφορά τις δεξαμενές σταθερού υδραυλικού φορτίου (αυτές δηλαδή που προσομοιώνουν την λειτουργία πηγής), η τιμή της στάθμης ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο εκφόρτισης της πηγής. Για τις δεξαμενές που προσομοιώνουν την εκφόρτιση του υδροφορέα προς τη θάλασσα, η τιμή της αρχικής στάθμης τίθεται ίση με μηδέν. Ομοίως, θεωρείται μηδενική η αρχική στάθμη των εικονικών δεξαμενών.

Πατώντας το δεύτερο πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

	i = 0	i = 1	i = 2	i = 3
i = 0	0.000000	102.948003	100.000000	0.000000
i = 1	280.000000	110.000000	95.000000	0.000000
i = 2	300.232419	121.423231	201.238064	0.000000
i = 3	300.000000	120.000000	200.000000	0.000000

Σχήμα Γ.16: Φόρμα απεικόνισης αρχικών τιμών στάθμης στις δεξαμενές υπόγειου νερού.

16. Χρονοσειρές εισόδου

Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται από το μοντέλο προσομοίωσης δίνονται υπό μορφή πίνακα στην φόρμα του Σχήματος Γ.17, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Χρονοσειρές -> Χρονοσειρές εισόδου.

Οι διεργασίες που συνιστούν τις χρονοσειρές εισόδου του μοντέλου και οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησης που υποστηρίζει το πρόγραμμα είναι:

- η επιφανειακή βροχόπτωση των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (σε mm)·
- η δυναμική εξατμοδιαπνοή των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (σε mm)·
- η μετρημένη απορροή των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (σε hm^3)·
- η μετρημένη απορροή στην έξοδο της λεκάνης (σε hm^3)·
- η μετρημένη παροχή των πηγών (σε m^3/s)·
- η ζήτηση νερού στις αντίστοιχες θέσεις ζήτησης (σε hm^3)·
- η άντληση νερού από τις γεωτρήσεις (σε hm^3).

Το μοντέλο δύναται να χρησιμοποιήσει είτε την χρονοσειρά αυτούσια είτε τις πρώτες δώδεκα μηνιαίες τιμές αυτής, τις οποίες θεωρεί ως *ετήσιο πρότυπο* και επαναλαμβάνει για όλη την περίοδο προσομοίωσης. Δεν έχει νόημα η χρήση ετήσιου προτύπου για τις μετρημένες χρονοσειρές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, ούτε και για τις επιφανειακές βροχοπτώσεις, οι οποίες συνιστούν τη βασική φόρτιση του μοντέλου. Η επιλογή της χρήσης ετήσιου προτύπου σε μια χρονοσειρά γίνεται κάνοντας κλικ με το ποντίκι στην τέταρτη στήλη του πίνακα.

Στην τελευταία στήλη του πίνακα φαίνεται η βάση δεδομένων όπου είναι αποθηκευμένη η κάθε χρονοσειρά. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα αποθηκεύει το σύνολο των δεδομένων του μοντέλου προσομοίωσης σε μια τοπική βάση τύπου Access, ειδικά όμως οι χρονοσειρές εισόδου και εξόδου μπορούν να αποθηκευτούν και στην κεντρική βάση τύπου Oracle. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η χρήση και συνθετικών χρονοσειρών εισόδου (π.χ. συνθετικές βροχοπτώσεις), οι οποίες παράγονται μέσω άλλων εφαρμογών, όπως το πρόγραμμα Κασταλία, και αποθηκεύονται στην κεντρική βάση δεδομένων του συστήματος.

Διεργασία	Συνιστώσα	Κωδικός	Ετήσιο πρότυπο	Βάση δεδομένων
Επιφανειακή βροχόπτωση	Όρεινή πεκάνη	991		Access
Επιφανειακή βροχόπτωση	Πεδινή πεκάνη	992		Access
Δυνητική εξατμοδιαπνοή	Όρεινή πεκάνη	103		Access
Δυνητική εξατμοδιαπνοή	Πεδινή πεκάνη	104		Access
Παραχή πηγής	Λιθαία+Κεφαλόβρυσο	30		Access
Παραχή πηγής	Μαυρονέρι	9		Access
Παραχή πηγής	Μέλανας+Πολλυγύρα	10		Access
Παραχή πηγής	Έρκυνας	19		Access
Ζήτηση νερού	Άνω ρους	330		Access
Ζήτηση νερού	Μέσος ρους	331		Access
Ζήτηση νερού	Κάτω ρους	332		Access
Ζήτηση νερού	Έρκυνας	334		Access
Ζήτηση νερού	Κωπαίδα	333		Access
Ζήτηση νερού	Βασιλικά-Παράρι	20	X	Access
Ζήτηση νερού	Υδρευση από Ακόντιο	21		Access
Συνολική απορροφή πεκάνης		2071		Oracle

Σχήμα Γ.17: Φόρμα απεικόνισης υδρολογικών χρονοσειρών εισόδου.

Ο χρήστης μπορεί να αντικαταστήσει μια υπάρχουσα χρονοσειρά εισόδου, πατώντας το πλήκτρο Αντικατάσταση, οπότε εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.18. Η εν λόγω φόρμα αποτελείται από τρεις καρτέλες:

Στην *πρώτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.18) δίνονται, υπό μορφή πίνακα, όλες οι χρονοσειρές που είναι διαθέσιμες στις δύο βάσεις δεδομένων (τοπική και κεντρική) και οι οποίες αναφέρονται στην ίδια διεργασία και χρησιμοποιούν τις ίδιες μονάδες μέτρησης που υποστηρίζει το πρόγραμμα. Η ονομασία και ο κωδικός της χρονοσειράς που επιλέγεται απεικονίζονται στο πλαίσιο που βρίσκεται στο κάτω μέρος της φόρμας. Η επιλογή μιας χρονοσειράς γίνεται με απλό κλικ του ποντικιού σε έναν από τους δύο καταλόγους.

Στην *δεύτερη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.19) δίνονται, υπό μορφή πίνακα, οι μηνιαίες τιμές της επιλεγμένης χρονοσειράς καθώς και το ετήσιο άθροισμά τους ανά υδρολογικό έτος. Οι εν λόγω τιμές

αναφέρονται μόνο στην περίοδο προσομοίωσης και όχι στο σύνολο της περιόδου κατά την οποία είναι διαθέσιμη η χρονοσειρά.

Στην *τρίτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.20) απεικονίζονται, υπό μορφή γραφημάτων, η ετήσια και μηνιαία ακολουθία της επιλεγμένης χρονοσειράς.

Με το κλείσιμο της φόρμας, κι εφόσον η επιλεγμένη χρονοσειρά δεν ταυτίζεται με την προς αντικατάσταση, εμφανίζεται ένα προειδοποιητικό μήνυμα που ζητά από τον χρήστη να επικυρώσει την αντικατάσταση της αρχικής χρονοσειράς. Εφόσον η απάντηση είναι καταφατική, ανακτώνται τα δεδομένα της νέας χρονοσειράς και επανέρχεται στο προσκήνιο η φόρμα των χρονοσειρών εισόδου (Σχήμα Γ.17).

Διαθέσιμες χρονοσειρές απορροής λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (hm3)

Κατάλογος χρονοσειρών | Πίνακας τιμών | Γραφήματα

Αποθηκευμένες χρονοσειρές στην τοπική βάση δεδομένων (Access)

Κωδικός	Όνομασία	Γεωγρ. θέση	Πρώτη εγγραφή	Τελευταία εγγραφή	Συνθετική	Πληροφορίες
7	Απορροή - Σήραγγα Καρδίτη	Υΐτικη	1/10/1984	1/9/1994	Όχι	
8	Συνολική απορροή λεκάνης Υΐτικη		1/10/1984	1/9/1994	Ναι	
201	Απορροή - Υπολεκάνη 1	Άγνωστη	1/10/1984	1/9/1994	Όχι	Ορχομενός-Μαυρονέρι

Αποθηκευμένες χρονοσειρές στην κεντρική βάση δεδομένων (Oracle)

Κωδικός	Όνομασία	Γεωγρ. θέση	Πρώτη εγγραφή	Τελευταία εγγραφή	Συνθετική	Πληροφορίες
2071	Απορ-Μην	Διώρυγα Καρδίτσας	1/1/1907	1/9/2002	Όχι	(α) Οι τιμές από Οκτ. 1942-Δεκ. 1942, Οκτ. 1964-Νοέ.

Επιλεγμένη χρονοσειρά: Απορ-Μην (κωδικός = 2071) | Κεντρική βάση δεδομένων (Oracle)

Σχήμα Γ.18: Πρώτη καρτέλα φόρμας αντικατάστασης επιλεγμένης χρονοσειράς εισόδου.

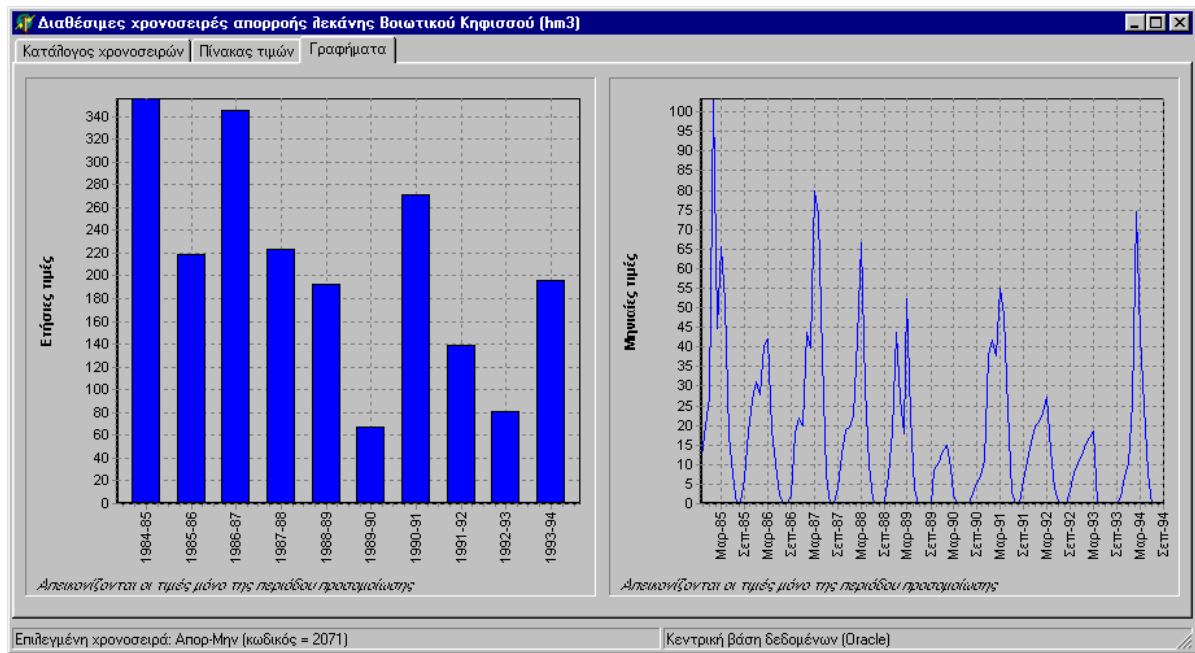
Διαθέσιμες χρονοσειρές απορροής λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού (hm3)

Κατάλογος χρονοσειρών | Πίνακας τιμών | Γραφήματα

Υδρ. έτος	Οκτ.	Νοε.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μαι.	Ιουν.	Ιουλ.	Αυγ.	Σεπ.	ΕΤΗΣΙΑ
1984-85	11.785	19.829	27.213	103.359	44.804	65.567	51.270	17.677	7.129	0.000	0.518	6.273	355.423
1985-86	18.079	26.542	31.043	27.668	40.304	42.051	18.999	10.124	2.174	0.000	0.000	1.888	218.872
1986-87	18.079	21.825	20.008	43.631	39.868	79.843	73.457	37.739	7.233	0.000	0.000	3.981	345.665
1987-88	12.642	18.818	19.445	22.632	41.994	66.719	29.756	10.044	0.968	0.000	0.000	0.745	223.763
1988-89	7.218	18.447	43.773	26.920	17.838	52.318	22.631	3.534	0.000	0.000	0.000	0.000	192.679
1989-90	8.512	10.666	13.043	14.915	9.209	2.286	0.000	0.000	0.000	0.000	2.773	5.369	66.773
1990-91	7.070	10.785	37.642	41.739	37.912	54.918	47.975	24.264	3.054	0.000	0.000	5.922	271.281
1991-92	10.960	15.420	20.000	20.830	23.180	27.000	13.422	4.109	0.741	0.000	0.000	3.233	138.895
1992-93	7.920	10.171	12.210	15.351	16.810	18.399	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	80.861
1993-94	1.602	6.993	10.402	25.853	74.536	43.179	24.942	7.978	0.038	0.000	0.000	0.000	195.523

Επιλεγμένη χρονοσειρά: Απορ-Μην (κωδικός = 2071) | Κεντρική βάση δεδομένων (Oracle)

Σχήμα Γ.19: Δεύτερη καρτέλα φόρμας αντικατάστασης επιλεγμένης χρονοσειράς εισόδου.



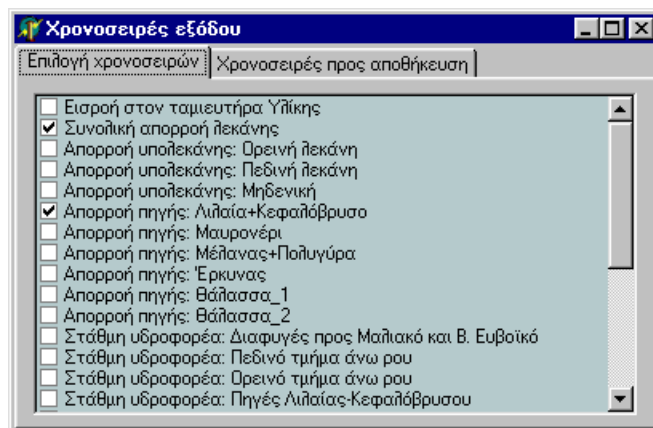
Σχήμα Γ.20: Τρίτη καρτέλα φόρμας αντικατάστασης επιλεγμένης χρονοσειράς εισόδου.

17. Χρονοσειρές εξόδου

Οι χρονοσειρές εξόδου (απόκρισης) που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων δίνονται υπό μορφή πίνακα στην φόρμα του Σχήματος Γ.21, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Χρονοσειρές -> Χρονοσειρές εξόδου. Η εν λόγω φόρμα, οποία ενεργοποιείται μετά την εκτέλεση προσομοίωσης, αποτελείται από δύο καρτέλες:

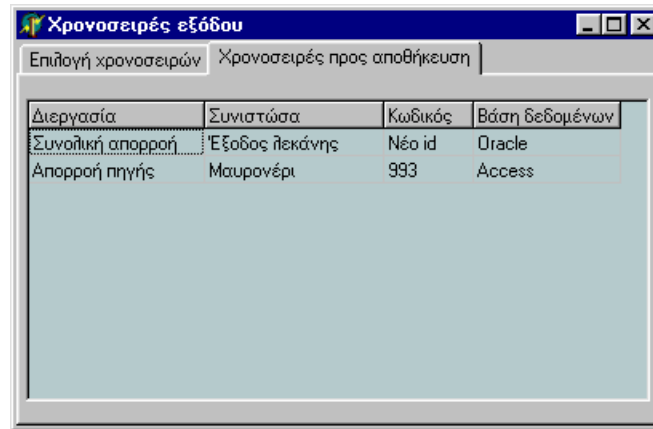
Στην *πρώτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.21) απεικονίζεται το σύνολο των χρονοσειρών απόκρισης του μοντέλου προσομοίωσης, με σημειωμένες τις χρονοσειρές εκείνες που ζητείται να αποθηκευτούν. Ως χρονοσειρές απόκρισης, με τις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης που υποστηρίζει το πρόγραμμα, εννοούνται:

- η εισροή στον ταμιευτήρα Υλίκης (σε hm^3).
- η συνολική απορροή στην έξοδο της λεκάνης (σε hm^3).
- η απορροή των μονάδων υδρολογικής απόκρισης (σε hm^3).
- η απορροή των πηγών (σε m^3/s).
- η διακύμανση της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού (σε m).



Σχήμα Γ.21: Πρώτη καρτέλα φόρμας επιλογής χρονοσειρών εξόδου.

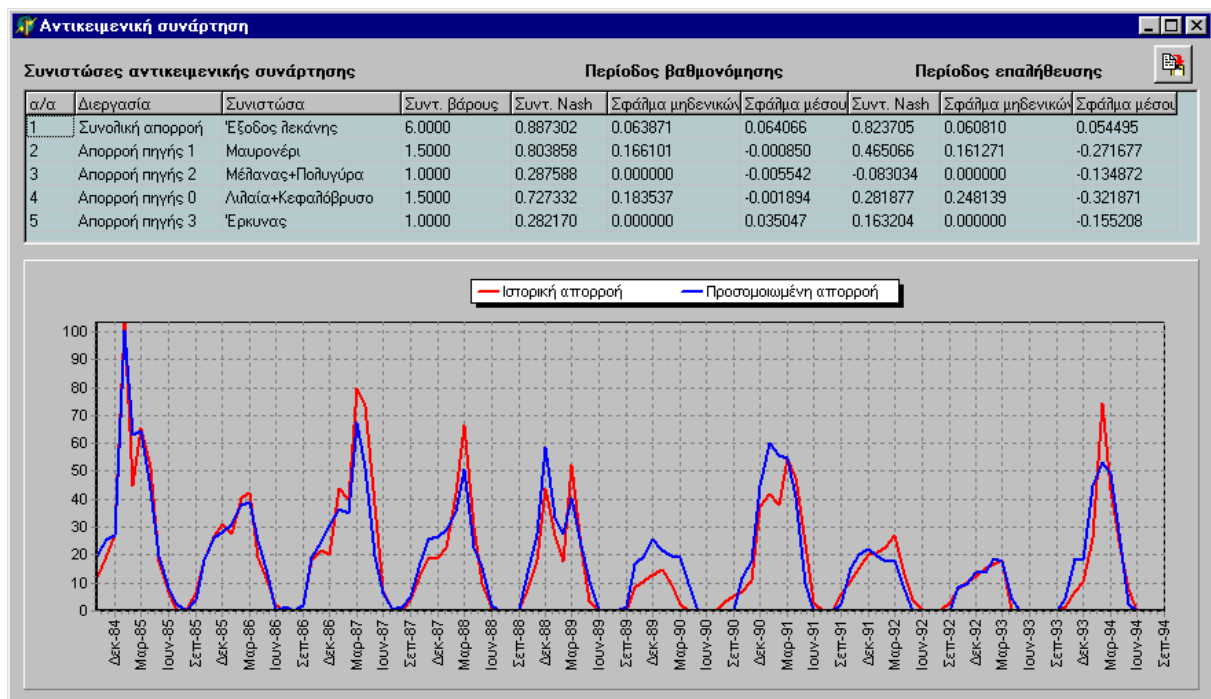
Στην *δεύτερη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.22) απεικονίζονται μόνο χρονοσειρές εκείνες που ζητείται να αποθηκευτούν. Κάνοντας κλικ στην τελευταία στήλη του πίνακα, ο χρήστης επιλέγει την βάση δεδομένων στην οποία επιθυμεί να αποθηκευτεί η κάθε χρονοσειρά. Εφόσον η αποθήκευση γίνει στην κεντρική βάση δεδομένων (Oracle), είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία της μέσω άλλων εφαρμογών (Υδρογνώμων) και η χρήση της από άλλα προγράμματα (Υδρονομέας). Ειδικά για τον Υδρονομέα, επιθυμητή είναι η αποθήκευση της χρονοσειράς εισροής στον ταμιευτήρα Υλίκης.



Σχήμα Γ.22: Δεύτερη καρτέλα φόρμας επιλογής χρονοσειρών εξόδου

18. Αντικειμενική συνάρτηση

Οι συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βαθμονόμησης δίνονται υπό μορφή πίνακα στην φόρμα του Σχήματος Γ.23, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Βαθμονόμηση -> Αντικειμενική συνάρτηση καθώς και από το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα Γ.23: Φόρμα απεικόνισης συνιστωσών αντικειμενικής συνάρτησης.

Ως *αντικειμενική συνάρτηση* νοείται ένα μέτρο καλής προσαρμογής του μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται για την αποτίμηση διαφορετικών εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης (ενότητα 14). Το πρόγραμμα υποστηρίζει τη διατύπωση μιας σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης, συνιστώσες της οποίας είναι: (α) οι συντελεστές προσδιορισμού (συντελεστές Nash) των προσομοιωμένων με τα ιστορικά υδρογραφήματα, (β) το σχετικό σφάλμα μηδενισμού της απορροής (σφάλμα μηδενικών), και (γ) η μεροληψία, ήτοι το σχετικό σφάλμα αναπαραγωγής της μέσης παρατηρημένης τιμής (σφάλμα μέσου). Στην εν λόγω συνάρτηση προστίθενται και δύο όροι ποινής, ο πρώτος για την αποφυγή υπερβολικής ανύψωσης ή ταπείνωσης του υδροφορέα και ο δεύτερος για την αποφυγή της παραγωγής πηγιάς απορροής σε περίπτωση στείρευσης των πηγών.

Τα υδρογραφήματα αναφέρονται τόσο στην έξοδο της λεκάνης όσο και στις θέσεις των πηγών, ενώ οι συνιστώσες της συνάρτησης υπολογίζονται τόσο για την περίοδο βαθμονόμησης όσο και για την περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου. Γενικά, η προσαρμογή ενός υδρολογικού μοντέλου είναι καλύτερη κατά την περίοδο βαθμονόμησης. Ο καθορισμός των περιόδων βαθμονόμησης και επαλήθευσης γίνεται μέσω της φόρμας των επιλογών βελτιστοποίησης (ενότητα 19).

Στον πίνακα που βρίσκεται στο πάνω μέρος της φόρμας του Σχήματος Γ.23 φαίνονται τα διάφορα κριτήρια καλής προσαρμογής του μοντέλου, ήτοι οι συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει την τιμή των συντελεστών βάρους, δίνοντας μεγαλύτερη σημασία σε συγκεκριμένες αποκρίσεις της λεκάνης, έτσι ώστε να επιδιώξει καλύτερη προσαρμογή αυτών μέσω της διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων του μοντέλου. Εφόσον έχει πραγματοποιηθεί προσομοίωση, τότε στις δύο τελευταίες στήλες του πίνακα αναγράφονται οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού για τις περιόδους βαθμονόμησης και επαλήθευσης, αντίστοιχα.

Πατώντας το ποντίκι σε μία από τις γραμμές του πίνακα, απεικονίζονται στο γράφημα που φαίνεται στο κάτω μέρος της φόρμας η αντίστοιχη ιστορική (μπλε χρώμα) και προσομοιωμένη (κόκκινο χρώμα) χρονοσειρά απόκρισης.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

19. Επιλογές βελτιστοποίησης

Οι ρυθμίσεις που αναφέρονται στην βαθμονόμηση του μοντέλου προσομοίωσης πραγματοποιούνται μέσω της φόρμας του Σχήματος Γ.24, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Δεδομένα -> Βαθμονόμηση -> Επιλογές βελτιστοποίησης.

Οι εν λόγω επιλογές είναι δύο κατηγοριών. Η πρώτη αναφέρεται στον καθορισμό των περιόδων βαθμονόμησης και επαλήθευσης του μοντέλου που γίνεται μέσω της *πρώτης καρτέλας* της φόρμας. Στο κάτω μέρος της φόρμας φαίνονται ακόμη οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για τις δύο αυτές περιόδους. Οι εν λόγω τιμές προκύπτουν με στάθμιση των επιμέρους κριτηρίων καλής προσαρμογής (ενότητα 18).

Η δεύτερη κατηγορία επιλογών αναφέρεται στις ρυθμίσεις των παραμέτρων εισόδου του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, οι οποίες απεικονίζονται στην *δεύτερη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.25). Ο εν λόγω αλγόριθμος είναι *εξελικτικός*. Η γενική στρατηγική αναζήτησης των εξελικτικών αλγορίθμων συνίσταται στην παραγωγή ενός αρχικού συνόλου συνδυασμών παραμέτρων (αρχικός πληθυσμός λύσεων), το οποίο σταδιακά εξελίσσεται με την παραγωγή βελτιωμένων λύσεων, ώσπου το σύνολο του πληθυσμού να συγκλίνει προς μία τελική επιλογή που θεωρείται ως βέλτιστη λύση του

προβλήματος. Σημειώνεται ότι στα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης (τυπική εφαρμογή των οποία είναι τα προβλήματα βαθμονόμησης μαθηματικών μοντέλων) η εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης δεν είναι εγγυημένη. Αντίθετα, αυτό που κατά κανόνα επιδιώκεται είναι ο εντοπισμός μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό υπολογιστικό φόρτο.

Οι παράμετροι εισόδου του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι:

Πλήθος μεταβλητών ελέγχου: Ισούται με το πλήθος των παραμέτρων του μοντέλου (συμπεριλαμβανομένων και των αρχικών συνθηκών) των οποίων ζητείται η βαθμονόμηση.

Πλήθος απλόκων: Απλοκο καλείται ένα γεωμετρικό σχήμα, οι κορυφές του οποίου ορίζονται ως ένα σύνολο $n + 1$ σημείων στον n -διάστατο χώρο (όπου n το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου). Η παραγωγή νέων συνδυασμών παραμέτρων βασίζεται στη διαμόρφωση απλόκων, τα οποία προσαρμόζονται στη γεωμετρία του χώρου, καθοδηγώντας την πορεία αναζήτησης προς την κατεύθυνση του πλησιέστερου ακρότατου. Μεγάλο πλήθος ακροτάτων εγγυάται την εύρεση καλύτερης τελικής λύσης αλλά προϋποθέτει μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών, άρα και περισσότερο χρόνο υπολογισμών. Τυπικές τιμές του πλήθους απλόκων είναι από 2 (γρήγορη σύγκλιση) έως 6 (αργή σύγκλιση).

Μέγεθος πληθυσμού: Ισούται με το γινόμενο του πλήθους των μεταβλητών ελέγχου επί το πλήθος των απλόκων. Κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης, τα αρχικές λύσεις αντικαθίστανται σταδιακά από καλύτερες, διατηρώντας ωστόσο σταθερό μέγεθος πληθυσμού.

Μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος δοκιμών: Εφόσον δεν έχει επέλθει προηγουμένως σύγκλιση, η αναζήτηση διακόπτεται εφόσον το πλήθος των δοκιμών ξεπεράσει το εν λόγω όριο, τυπικές τιμές του οποίου είναι από 500 έως 10000.

Ελάχιστη σχετική απόκλιση μεγίστου-ελαχίστου: Κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου, με τυπικές τιμές από 0.001 (αργή σύγκλιση) έως 0.01 (γρήγορη σύγκλιση).

Ρυθμός μείωσης θερμοκρασίας: Η θερμοκρασία είναι μια εννοιολογική παράμετρος, δανεισμένη από την στατιστική μηχανική, βάσει της οποίας καθορίζεται ο βαθμός τυχαιότητας κατά την αξιολόγηση νέων λύσεων. Η θερμοκρασία λαμβάνει αρχικά μια υψηλή τιμή, η οποία συνεπάγεται μεγάλη πιθανότητα αποδοχής λύσεων που δεν βελτιώνουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, με σκοπό την εξερεύνηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερου τμήματος του χώρου αναζήτησης και την αποφυγή εγκλωβισμού του αλγορίθμου σε τοπικά ακρότατα. Σταδιακά, η θερμοκρασία μειώνεται, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία αναζήτησης όσο ο αλγόριθμος συγκλίνει προς την ολικά βέλτιστη λύση. Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας λαμβάνει τυπικές τιμές από 0.90 (γρήγορη σύγκλιση) έως 0.99 (αργή σύγκλιση).

Παράμετρος προσαρμογής μέγιστης θερμοκρασίας: Για την αποφυγή εμφάνισης θερμοκρασιών που οδηγούν σε υπερβολικά μεγάλες πιθανότητες αποδοχής μη βέλτιστων λύσεων, εισάγεται η εν λόγω παράμετρος ρύθμισης, με τυπικές τιμές από 1 (γρήγορη σύγκλιση) έως 5 (αργή σύγκλιση).

Μέγιστο πλήθος βημάτων αναρρίχησης: Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο αλγόριθμος επιδιώκει την υπερπήδηση των τοπικών ακροτάτων, επιβάλλοντας την εκτέλεση ενός ορισμένου πλήθους δοκιμών σε αντίθετη διεύθυνση από την κλίση του αναγλύφου. Το πλήθος αυτό λαμβάνει τυπικές τιμές από 2 (γρήγορη σύγκλιση) έως 10 (αργή σύγκλιση).

Πιθανότητα αποδοχής βημάτων μετάλλαξης: Εφόσον κατά τη διάρκεια ενός κύκλου δοκιμών δεν βρεθεί λύση που να είναι καλύτερη από μία τουλάχιστον κορυφή του απλόκου, γεννάται ένα τυχαίο σημείο στην περιοχή γύρω από το κέντρο βάρους του πληθυσμού, το οποίο γίνεται αποδεκτό με την εν λόγω πιθανότητα (ο όρος μετάλλαξη προέρχεται από την γενετική). Τυπικές τιμές της πιθανότητας μετάλλαξης είναι από 0.05 (γρήγορη σύγκλιση) έως 0.20 (αργή σύγκλιση).

Εξάντληση μεγίστου επιτρεπόμενου πλήθους δοκιμών: Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επαναλάβει την διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινώντας από νέο αρχικό πληθυσμό λύσεων, εφόσον δεν έχει προηγουμένως εξαντληθεί το όριο δοκιμών που έχει θέσει.

Τονίζεται ότι είναι προτιμητέο οι παραπάνω παράμετροι να μην τροποποιούνται από μη έμπειρους χρήστες, καθώς ενδέχεται είτε να αυξηθεί αδικαιολόγητα ο υπολογιστικός φόρτος του προβλήματος βελτιστοποίησης είτε να προκύψει λύση που διαφέρει σημαντικά από την θεωρητικά βέλτιστη. Εξαίρεση αποτελεί το μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος δοκιμών, η ερμηνεία του οποίου είναι προφανής.

Με το πάτημα του πλήκτρου Αποθήκευση τιμών αποθηκεύονται στη μνήμη του προγράμματος το σύνολο των αλλαγών που έχει κάνει ο χρήστης στην φόρμα.

Με το πάτημα του πλήκτρου Επαναφορά τιμών ακυρώνονται όλες οι μη αποθηκευμένες τροποποιήσεις του χρήστη στην φόρμα.

Επιλογές βελτιστοποίησης

Ρύθμιση μοντέλου | Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Αρχή περιόδου βαθμονόμησης: Οκτώβριος 1984

Λήξη περιόδου βαθμονόμησης: Σεπτέμβριος 1990

Αρχή περιόδου επαλήθευσης: Οκτώβριος 1990

Λήξη περιόδου επαλήθευσης: Σεπτέμβριος 1994

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (βαθμονόμηση) (*): 3.5699

Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (επαλήθευση) (*): 6.9109

Με () σημειώνονται τα πεδία που δεν μπορούν να τροποποιηθούν*

Σχήμα Γ.24: Πρώτη καρτέλα φόρμας ρύθμισης επιλογών βελτιστοποίησης.

Επιλογές βελτιστοποίησης

Ρύθμιση μοντέλου | Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Πλήθος μεταβλητών ελέγχου (*): 28

Πλήθος απλόκων: 2

Μέγεθος πληθυσμού (*): 58

Μέγιστο επιτρεπόμενο πλήθος δοκιμών: 300

Ελάχιστη σχετική απόκλιση μέγιστου-ελαχίστου: 0.0010

Ρυθμός μείωσης θερμοκρασίας: 0.9500

Παράμετρος προσαρμογής μέγιστης θερμοκρασίας: 2.0000

Μέγιστο πλήθος βημάτων αναρρίχησης: 5

Πιθανότητα αποδοχής βημάτων μετάπτωσης: 0.1000

Εξάντληση μέγιστου επιτρεπόμενου πλήθους δοκιμών

Με () σημειώνονται τα πεδία που δεν μπορούν να τροποποιηθούν*

Σχήμα Γ.25: Δεύτερη καρτέλα φόρμας ρύθμισης επιλογών βελτιστοποίησης.

20. Προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών λεκάνης

Η αναπαράσταση των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης γίνεται επιλέγοντας από την κύρια φόρμα του προγράμματος το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Προσομοίωση με ιστορικά δεδομένα, οπότε εκτελείται η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης για το σύνολο της περιόδου ελέγχου. Μετά το πέρας της προσομοίωσης, αναγράφεται στο κάτω μέρος της φόρμας η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την περίοδο βαθμονόμησης, η οποία προκύπτει με στάθμιση των επιμέρους κριτηρίων καλής προσαρμογής (ενότητα 18).

21. Βαθμονόμηση παραμέτρων

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου πραγματοποιείται μέσω της φόρμας του Σχήματος Γ.26, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Βαθμονόμηση παραμέτρων.

Βαθμονόμηση παραμέτρων

Αντικειμενική συνάρτηση

α/α	Διεργασία	Συνιστώσα	Όνομασία	Συντ. βάρους	Βέλτιστη τιμή	Επίκαιρη τιμή
1	Συνολική απορροή	Έξοδος λεκάνης		6.0000	0.840972	0.826748
2	Απορροή πηγής	Πηγή 1	Μαυρονέρι	2.0000	0.458989	0.461715
3	Απορροή πηγής	Πηγή 2	Μέλιανας+Ποιλυύρα	1.0000	-0.400218	-0.110066
4	Απορροή πηγής	Πηγή 0	Λιθαία+Κεφαλόβρυσο	1.0000	0.137566	-1.137784
5	Απορροή πηγής	Πηγή 3	Έρκυνας	1.0000	0.116920	-0.127688

Μεταβλητές ελέγχου

Συνιστώσα	Συμβολισμός	Μονάδες	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βέλτιστη τιμή	Επίκαιρη τιμή
Ύψος κατακράτησης υγρασίας (0)	K1(0)	mm	0.005000	0.150000	0.053003	0.071381
Ύψος κατακράτησης υγρασίας (1)	K1(1)	mm	0.100000	0.400000	0.285119	0.283478
Χωρητικότητα δεξαμενής υγρασίας (0)	K2(0)	mm	0.100000	0.300000	0.199632	0.203776
Χωρητικότητα δεξαμενής υγρασίας (1)	K2(1)	mm	0.300000	0.700000	0.508329	0.488087
Συντελεστής υποδερμικής ροής (0)	η(0)		0.000000	0.150000	0.129395	0.130100
Συντελεστής υποδερμικής ροής (1)	η(1)		0.000000	0.100000	0.024936	0.026396
Συντελεστής κατείσδυσης (0)	μ(0)		0.300000	0.600000	0.420492	0.437993
Συντελεστής κατείσδυσης (1)	μ(1)		0.050000	0.200000	0.072397	0.068485
Ποσοστό βροχής προς άμεση εξάτμιση	ε		0.200000	0.500000	0.426997	0.421986
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (0)	Cx(0)	m/s	0.000000	0.000100	0.000001	0.000007
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (1)	Cx(1)	m/s	0.000000	0.010000	0.001694	0.002907
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (4)	Cx(4)	m/s	0.000000	0.050000	0.008029	0.010866
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (5)	Cx(5)	m/s	0.000000	0.010000	0.004805	0.005588
Οριζόντια υδρ. αγωγιμότητα (9)	Cx(9)	m/s	0.000000	0.005000	0.002455	0.002279
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (1)	Cy(1)	m/s	0.000000	0.000500	0.000059	0.000122
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (2)	Cy(2)	m/s	0.000000	0.100000	0.017950	0.024053
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (4)	Cy(4)	m/s	0.000000	0.010000	0.001482	0.001667
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (5)	Cy(5)	m/s	0.000000	0.000500	0.000066	0.000034
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (6)	Cy(6)	m/s	0.000000	0.050000	0.007944	0.008352
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (9)	Cy(9)	m/s	0.000000	0.000100	0.000003	0.000005
Εγκάρσια υδρ. αγωγιμότητα (10)	Cy(10)	m/s	0.000000	0.010000	0.001238	0.001796
Πορώδες υδροφορέων	p		0.100000	0.250000	0.231579	0.218024
Ύψος εδαφικής υγρασίας (0)	So(0)	mm	0.000000	0.020000	0.015891	0.016711
Ύψος εδαφικής υγρασίας (1)	So(1)	mm	0.090000	0.150000	0.106106	0.114340
Στάθμη δεξαμενής υπόγειου νερού (2)	Wo(0, 2)	m	300.000000	300.500000	300.079251	300.163613

Επιλογές Αντικ. συνάρτηση Παράμετροι Αρχικές συνθήκες Διακοπή

Τρέχουσα δοκιμή | 870 Τρέχουσα τιμή | 7.475564 Βέλτιστη τιμή | 6.030258 Χρόνος υπολογισμών (sec) | 536

Σχήμα Γ.26: Φόρμα παρακολούθησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Στον πίνακα που βρίσκεται στο πάνω μέρος της φόρμας φαίνονται οι συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της βελτιστοποίησης, απεικονίζονται οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού που αναφέρονται στην επίκαιρη και την έως τότε βέλτιστη λύση.

Στον πίνακα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της φόρμας φαίνονται οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης, ήτοι οι παράμετροι και οι αρχικές συνθήκες των οποίων ζητείται η βαθμονόμηση. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της βελτιστοποίησης, απεικονίζονται οι τιμές των μεταβλητών που αναφέρονται στην επίκαιρη και την έως τότε βέλτιστη λύση.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Επιλογές** εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.24, μέσω της οποίας ο χρήστης ρυθμίζει τις επιλογές βαθμονόμησης και τις παραμέτρους του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (ενότητα 19). Η εν λόγω επιλογή είναι διαθέσιμη εφόσον δεν εκτελείται βελτιστοποίηση.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Αντικ.** συνάρτηση εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.23, μέσω της οποίας ο χρήστης καθορίζει τους συντελεστές βάρους των επιμέρους κριτηρίων καλής προσαρμογής (ενότητα 18). Η εν λόγω επιλογή είναι διαθέσιμη εφόσον δεν εκτελείται βελτιστοποίηση.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Παράμετροι** εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.14, μέσω της οποίας ο χρήστης καθορίζει το επιτρεπόμενο όριο διακύμανσης των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων του μοντέλου προσομοίωσης (ενότητα 14). Η εν λόγω επιλογή είναι διαθέσιμη εφόσον δεν εκτελείται βελτιστοποίηση.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Αρχικές συνθήκες** εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.15, μέσω της οποίας ο χρήστης καθορίζει το επιτρεπόμενο όριο διακύμανσης των προς βελτιστοποίηση αρχικών συνθηκών της προσομοίωσης (ενότητα 15). Η εν λόγω επιλογή είναι διαθέσιμη εφόσον δεν εκτελείται βελτιστοποίηση.

Με το πάτημα του πλήκτρου **Βελτιστοποίηση** καλείται ο εξελικτικός αλγόριθμος αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Κάθε φορά που δοκιμάζεται ένας νέος συνδυασμός παραμέτρων, ενημερώνονται τα αντίστοιχα πεδία των δύο πινάκων που αναφέρονται στην τρέχουσα λύση, καθώς και οι πληροφορίες που αναγράφονται στο κάτω μέρος της φόρμας και αφορούν στην παρακολούθηση της βελτιστοποίησης. Οποτεδήποτε εντοπίζεται μια λύση που υπερέχει σε σχέση με όλες τις υφιστάμενες, ενημερώνονται τα αντίστοιχα πεδία των δύο πινάκων που αναφέρονται στην βέλτιστη λύση.

Κατά την διάρκεια εκτέλεσης της βελτιστοποίησης δεν επιτρέπεται το κλείσιμο της φόρμας. Ωστόσο, είναι δυνατός ο τερματισμός της διαδικασίας αναζήτησης, με απλό πάτημα του παραπάνω πλήκτρου. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος διακόπτεται πριν τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης, οπότε αποθηκεύεται στη μνήμη του προγράμματος ο έως τότε βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων.

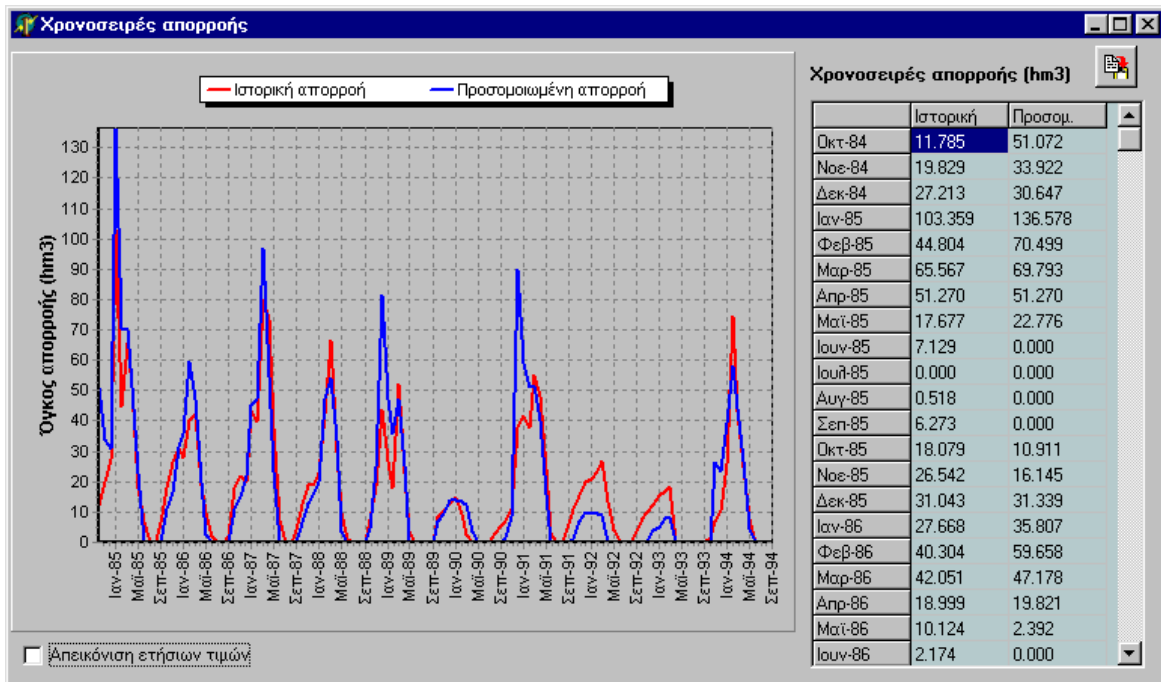
Μετά το πέρας της βελτιστοποίησης, πραγματοποιείται προσομοίωση των ιστορικών αποκρίσεων της λεκάνης, χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Κατά συνέπεια, το σύνολο των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται στις υπόλοιπες φόρμες του προγράμματος αναφέρονται στην βέλτιστη λύση του προβλήματος.

22. Χρονοσειρές απορροής

Η ιστορική και προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής στην έξοδο της λεκάνης απεικονίζονται μέσω της φόρμας του Σχήματος Γ.27, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Χρονοσειρές απορροής.

Εξ ορισμού, οι χρονοσειρές απεικονίζονται υπό μορφή μηνιαίου πίνακα τιμών (αριστερά) και μηνιαίου διαγράμματος (δεξιά). Με ενεργοποίηση της επιλογής *Απεικόνιση ετήσιων τιμών*, τα αντίστοιχα μεγέθη απεικονίζονται σε ετήσια κλίμακα.

Πατώντας το πλήκτρο που βρίσκεται στο πάνω δεξιά μέρος της φόρμας αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.



Σχήμα Γ.27: Φόρμα απεικόνισης ιστορικής και προσομοιωμένης απορροής στην έξοδο της λεκάνης.

23. Σύνολο Pareto λύσεων

Οι μη κατώτερες λύσεις που εντοπίζονται κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων του μοντέλου απεικονίζονται μέσω της φόρμας του Σχήματος Γ.28, η οποία καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Σύνολο Pareto λύσεων.

Η έννοια της μη κατώτερης λύσης προέρχεται από τη θεωρία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Μια λύση ονομάζεται *μη κατώτερη* ή *Pareto βέλτιστη* εφόσον δεν υπάρχει εφικτό διάλυσμα το οποίο να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο. Ο παραπάνω ορισμός οδηγεί σε ένα σύνολο αποδεκτών λύσεων (*σύνολο Pareto*), δεδομένου ότι στα πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης τα επιμέρους κριτήρια είναι, κατά κανόνα, ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να βρεθεί ένας συνδυασμός παραμέτρων που να βελτιστοποιεί την προσαρμογή του συνόλου των προσομοιωμένων αποκρίσεων της λεκάνης. Αντίθετα, υπάρχουν περισσότερες από μία λύσεις που υπερέχουν τουλάχιστον ως προς ένα κριτήριο καλής προσαρμογής σε σχέση με μία τουλάχιστον από τις υπόλοιπες. Συνεπώς, για την επιλογή μίας τελικής λύσης που λαμβάνεται ως βέλτιστη, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές βάρους, μέσω των οποίων σταθμίζονται τα επιμέρους κριτήρια σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση (ενότητα 18). Η εν λόγω «βέλτιστη» λύση ανήκει εξ ορισμού στο σύνολο Pareto και θεωρείται ως η *πλέον συμβιβαστική*.

Η φόρμα των Pareto βέλτιστων λύσεων περιλαμβάνει δύο καρτέλες. Στην *πρώτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.28) απεικονίζεται το σύνολο των σημείων που ανήκουν στο σύνολο Pareto, και οι οποίες εντοπίζονται κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται

δεν έχει σχεδιαστεί για να εντοπίζει το σύνολο των μελών του συνόλου Pareto. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία αναζήτησης, οι συνδυασμοί παραμέτρων που παράγονται αξιολογούνται, και εφόσον είναι Pareto βέλτιστοι απεικονίζονται στον πίνακα της φόρμας. Οι Pareto βέλτιστες λύσεις κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά ως προς το μέτρο επίδοσης (αντικειμενική συνάρτηση) του προβλήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης επιδιώκεται σταδιακή βελτίωση του μέτρου επίδοσης, οπότε κάθε νέος συνδυασμός παραμέτρων που εντοπίζεται κατά κανόνα υπερτερεί σε σχέση με τους προηγούμενους.

Πατώντας το πλήκτρο Προσομοίωση που βρίσκεται στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας του Σχήματος Γ.28 εκτελείται μια πλήρης προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, χρησιμοποιώντας τις τιμές παραμέτρων της επιλεγμένης λύσης από το σύνολο Pareto. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η επισκόπηση των αποτελεσμάτων καθώς και η αποθήκευση μιας λύσης που διαφέρει από αυτή που προκύπτει μέσω βαθμονόμησης (ήτοι με την υιοθέτηση των συγκεκριμένων συντελεστών βάρους), εφόσον ο χρήστης κρίνει ότι αυτή είναι πιο ικανοποιητική.

Πατώντας το πλήκτρο Αντιγραφή που βρίσκεται στο κάτω δεξιά μέρος της φόρμας του Σχήματος Γ.28 αντιγράφεται το σύνολο των περιεχομένων του πίνακα στο Πρόχειρο (Clipboard) των Windows, ώστε να είναι δυνατή η επικόλλησή τους σε αρχείο Excel.

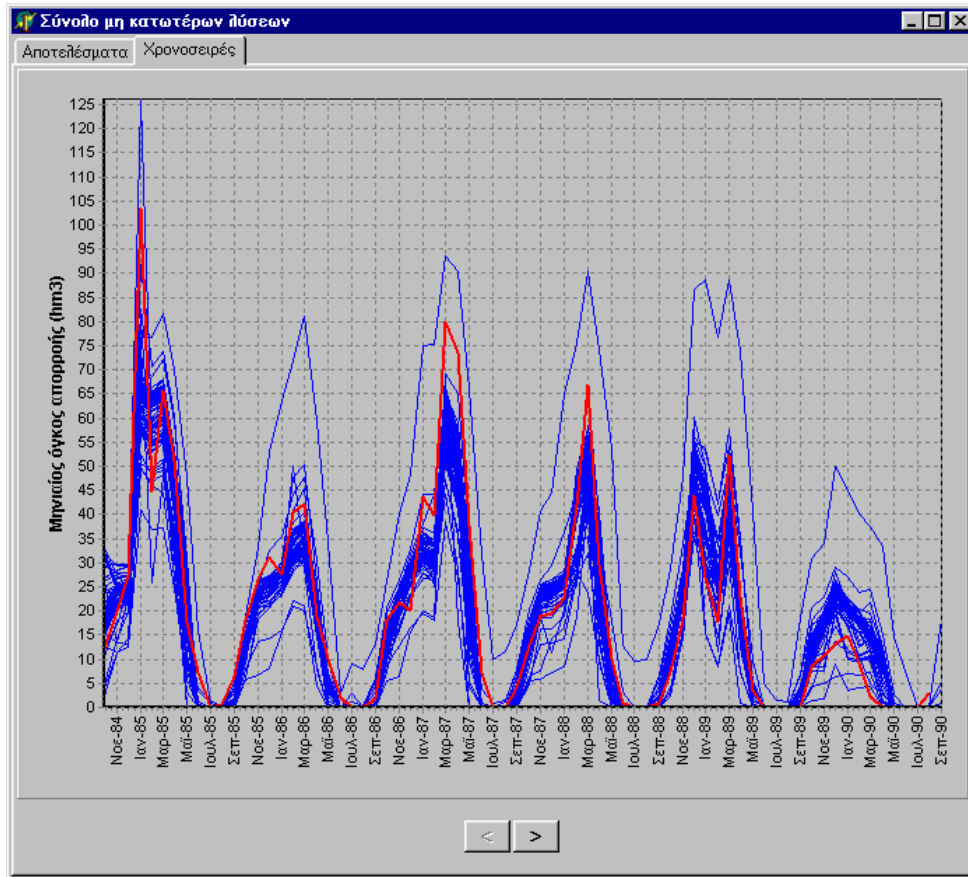
α/α	Συνάρτηση 1	Συνάρτηση 2	Συνάρτηση 3	Συνάρτηση 4	Συνάρτηση 5	Μέτρο επίδοσης
1	0.646697	0.561351	-7.619747	-1.457575	-11.073269	24.543122
2	0.619222	0.571437	-15.727690	-1.639952	-4.372201	15.793095
3	0.837359	0.532055	-1.100208	-1.660242	-6.459827	14.079235
4	0.876351	-0.444766	-1.692504	-1.660067	-11.488792	13.240034
5	0.816968	0.554902	-0.046334	-1.614471	-9.782849	13.240034
6	-0.405031	-0.285150	-41.301725	0.664409	-3.617981	13.240034
7	0.837310	0.583282	-0.219366	-1.663599	-3.957776	11.897950
8	0.742125	0.611796	-1.800510	-1.659390	-9.995079	11.817260
9	0.801120	0.618436	-2.450805	-1.659177	-9.565881	11.817260
10	0.814959	0.566895	-1.083369	-1.365864	-5.246316	11.817260
11	0.848205	0.555110	-1.186579	-1.160631	-8.123309	11.817260
12	0.838756	0.592627	-9.498753	-1.662042	-7.585777	11.817260
13	0.790910	0.632761	-0.322748	-1.624737	-10.403109	11.817260
14	0.818323	0.570585	-0.570551	-1.659732	-9.901521	11.817260
15	0.799987	0.536764	0.246010	-1.659170	-5.714927	11.817260
16	0.793991	0.547309	0.226936	-1.659186	-5.585604	11.817260
17	0.722260	0.590220	-0.473810	-1.659540	-4.312854	11.817260
18	0.816275	0.558641	0.018859	-1.659397	-6.580745	11.817260
19	0.790062	0.599364	-0.168514	-1.667444	-5.155740	11.817260
20	0.873206	0.336217	-1.267089	-1.660527	-5.627626	11.817260
21	0.796907	-0.889406	-6.815847	0.638146	0.245518	11.558535
22	0.805566	0.558470	0.132993	-1.660186	-5.618381	11.221453
23	0.830248	-0.598413	-0.892291	0.759794	-0.785910	8.702166
24	0.799274	0.594850	-0.106501	-1.662608	-2.785389	8.702166
25	0.731267	0.554933	0.108572	-1.659931	-2.709407	8.702166
26	0.507000	0.575661	-21.735516	-1.664524	0.143607	8.702166
27	0.809001	0.484440	0.262910	-1.659208	-2.411485	8.702166

Σχήμα Γ.28: Πρώτη καρτέλα της φόρμας απεικόνισης των μη κατωτέρων λύσεων.

Στην δεύτερη καρτέλα της φόρμας (Σχήμα Γ.29) απεικονίζονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών απόκρισης για το σύνολο των Pareto βέλτιστων λύσεων (μπλε χρώμα), τα οποία συγκρίνονται με την ιστορική (μετρημένη) απόκριση της λεκάνης (κόκκινο χρώμα). Σημειώνεται ότι οι χρονοσειρές απεικονίζονται μόνο για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου. Τα εν λόγω γραφήματα παριστούν την αβεβαιότητα που υπάρχει ως προς τη βαθμονόμηση του μοντέλου δεδομένου ότι, από μαθηματική

τουλάχιστον άποψη, όλες οι προσομοιωμένες αποκρίσεις που ανήκουν στο σύνολο Pareto θεωρούνται ισοδύναμες.

Χρησιμοποιώντας τα βέλη που βρίσκονται στο κάτω μέρος της φόρμας του Σχήματος Γ.29, ο χρήστης μπορεί να μεταβεί στην χρονοσειρά απόκρισης που επιθυμεί. Οι χρονοσειρές κατατάσσονται με την ίδια σειρά που ορίζονται και στην αντικειμενική συνάρτηση (ενότητα 18).



Σχήμα Γ.29: Δεύτερη καρτέλα της φόρμας απεικόνισης των μη κατωτέρων λύσεων.

24. Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο

Το αναλυτικό και συνοπτικό (μέσο ετήσιο) υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης καλείται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Προσαρμογή μοντέλου -> Προσομοιωμένο υδατικό ισοζύγιο. Η φόρμα που καλείται περιλαμβάνει τρεις καρτέλες:

Στην *πρώτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.30) απεικονίζεται το αναλυτικό μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο των επιφανειακών υδατικών πόρων της λεκάνης, βάσει του οποίου η συνολική επιφανειακή βροχόπτωση επιμερίζεται σε απώλειες λόγω εξάτμισης, βαθιά κατεΐσδυση, επιφανειακή απορροή και διαφορά στην αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας.

Στην *δεύτερη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.31) απεικονίζεται το αναλυτικό μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο των υπόγειων υδατικών πόρων της λεκάνης, βάσει του οποίου η συνολική κατεΐσδυση από τις δεξαμενές εδαφικής υγρασίας επιμερίζεται σε πηγαία απορροή, απώλειες λόγω αποφόρτισης του υδροφορέα προς τη θάλασσα, απολήψεις λόγω άντλησης, και διαφορά στην αποθήκευση στις δεξαμενές υπόγειου νερού.

Στην *τρίτη καρτέλα* της φόρμας (Σχήμα Γ.32) απεικονίζεται το συγκεντρωτικό μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, υπό μορφή διαγραμμάτων τύπου πίτας.

Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης

Επιφανειακό Υπόγειο Συγκεντρωτικό

Μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο επιφανειακών υδατικών πόρων σε hm3

Μήνας	Βροχόπτωση	Εξάτμιση	Κατείσδυση	Απορροή	Αποθήκευση	Διαφορά
Οκτ-84	7.3	20.7	21.3	0.0	103.1	-34.7
Νοε-84	185.2	53.2	41.9	4.3	188.9	85.8
Δεκ-84	132.6	41.9	50.2	4.8	224.6	35.7
Ιαν-85	508.2	74.2	109.7	96.7	452.2	227.6
Φεβ-85	136.1	52.4	77.9	34.1	423.8	-28.3
Μαρ-85	158.5	72.0	76.5	33.7	400.1	-23.7
Απρ-85	97.3	104.7	62.0	30.7	299.9	-100.2
Μαϊ-85	46.0	85.0	42.7	17.3	201.0	-98.9
Ιουν-85	11.1	67.1	28.3	0.0	116.7	-84.3
Ιουλ-85	9.1	41.2	16.2	0.0	68.4	-48.3
Αυγ-85	0.7	20.3	9.0	0.0	39.9	-28.6
Σεπ-85	42.1	26.9	10.2	0.0	45.0	5.1
Οκτ-85	193.4	69.4	30.4	2.1	136.5	91.5
Νοε-85	237.4	66.2	57.1	5.6	245.1	108.6
Δεκ-85	141.0	44.1	51.9	16.3	273.8	28.7
Ιαν-86	119.3	46.6	57.1	17.3	272.1	-1.7
Φεβ-86	219.6	65.0	69.8	38.2	318.7	46.7
Μαρ-86	103.2	64.5	61.4	20.9	275.2	-43.5
Απρ-86	27.7	85.3	45.2	3.8	168.6	-106.6
Μαϊ-86	112.0	90.7	37.1	2.5	150.4	-18.3
Ιουν-86	45.7	72.4	25.5	2.0	96.2	-54.2
Ιουλ-86	34.4	47.3	16.9	0.0	66.4	-29.8
Αυγ-86	11.5	26.8	10.2	0.0	40.8	-25.5
Σεπ-86	9.5	13.5	7.0	0.0	29.7	-11.1
Οκτ-86	249.2	85.5	35.2	3.4	154.9	125.1
Νοε-86	184.3	54.7	52.8	5.4	226.3	71.5
Δεκ-86	149.5	42.6	64.8	6.8	261.7	35.3
Ιαν-87	197.4	65.7	66.1	24.9	302.4	40.7
Φεβ-87	161.2	63.3	61.7	25.8	312.7	10.4

Σχήμα Γ.30: Πρώτη καρτέλα φόρμας υδατικού ισοζυγίου (ισοζύγιο επιφανειακών υδατικών πόρων).

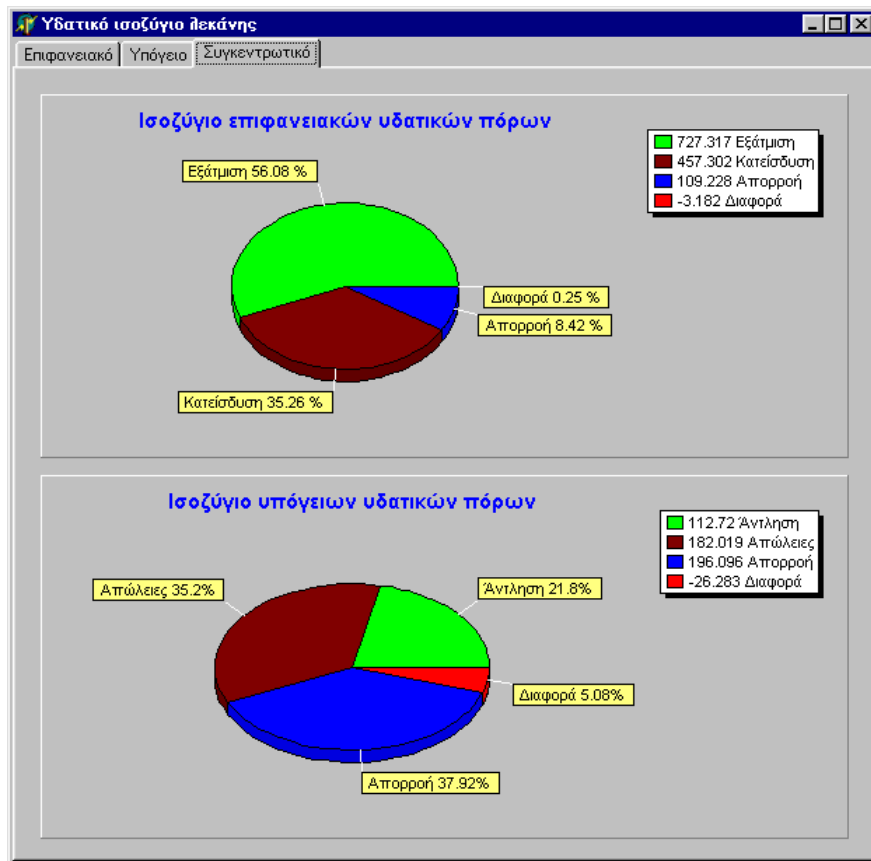
Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης

Επιφανειακό Υπόγειο Συγκεντρωτικό

Μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο υπόγειων υδατικών πόρων σε hm3

Μήνας	Κατείσδυση	Απορροή πηγών	Απόψεις	Ψντλήση	Αποθήκευση	Διαφορά
Οκτ-84	21.3	51.1	50.6	0.0	63459.2	-80.3
Νοε-84	41.9	29.5	48.7	0.0	63422.6	-36.6
Δεκ-84	50.2	25.9	50.5	0.0	63396.5	-26.1
Ιαν-85	109.7	39.9	50.4	0.0	63416.0	19.4
Φεβ-85	77.9	36.4	45.6	0.0	63411.9	-4.1
Μαρ-85	76.5	36.1	50.4	0.0	63401.9	-10.0
Απρ-85	62.0	29.4	48.6	2.5	63383.6	-18.3
Μαϊ-85	42.7	23.7	50.3	6.0	63347.4	-36.2
Ιουν-85	28.3	17.1	48.5	14.7	63296.9	-50.5
Ιουλ-85	16.2	12.7	50.2	23.2	63229.2	-67.7
Αυγ-85	9.0	9.7	50.1	25.6	63154.8	-74.4
Σεπ-85	10.2	8.3	48.2	7.8	63101.1	-53.7
Οκτ-85	30.4	8.8	49.9	0.0	63072.8	-28.3
Νοε-85	57.1	10.5	48.0	0.0	63071.1	-1.7
Δεκ-85	51.9	15.0	49.8	0.0	63058.2	-12.9
Ιαν-86	57.1	18.5	49.7	0.0	63047.1	-11.2
Φεβ-86	69.8	21.5	44.9	0.0	63050.5	3.4
Μαρ-86	61.4	26.3	49.6	0.0	63035.9	-14.6
Απρ-86	45.2	22.7	47.8	2.5	63008.2	-27.7
Μαϊ-86	37.1	19.0	49.5	6.2	62971.6	-36.6
Ιουν-86	25.5	14.1	47.7	21.3	62915.5	-56.1
Ιουλ-86	16.9	10.5	49.3	25.3	62849.5	-66.0
Αυγ-86	10.2	8.1	49.2	25.9	62778.6	-71.0
Σεπ-86	7.0	6.8	47.4	9.3	62722.5	-56.1
Οκτ-86	35.2	7.5	49.0	0.0	62701.2	-21.3
Νοε-86	52.8	9.6	47.2	0.0	62696.9	-4.3
Δεκ-86	64.8	14.9	49.0	0.0	62697.9	0.9
Ιαν-87	66.1	20.1	48.9	0.0	62694.9	-3.0
Φεβ-87	61.7	21.3	44.2	0.0	62691.2	-3.7

Σχήμα Γ.31: Δεύτερη καρτέλα φόρμας υδατικού ισοζυγίου (ισοζύγιο υπόγειων υδατικών πόρων).



Σχήμα Γ.32: Τρίτη καρτέλα φόρμας υδατικού ισοζυγίου (μέσω ετήσιο ισοζύγιο επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων).

25. Παραγωγή σεναρίων πρόγνωσης

Η λειτουργία του μοντέλου υπό μορφή *στοχαστικής πρόγνωσης* συνίσταται στην προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, χρησιμοποιώντας ως είσοδο του μοντέλου συνθετικά σενάρια φορτίσεων (όπου ως φορτίσεις του μοντέλου νοούνται οι χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης, δυναμικής εξατμοδιαπνοής και υδατικών αναγκών). Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατή η αναπαραγωγή των μελλοντικών αποκρίσεων της λεκάνης για κάθε τέτοιο σενάριο.

Η παραγωγή των σεναρίων πρόγνωσης γίνεται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και το μενού Στοχαστική πρόγνωση → Σενάρια πρόγνωσης. Για κάθε σενάριο, εκτελείται μια πλήρης προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης και παράγονται οι αποκρίσεις που αναφέρονται στο εκάστοτε σενάριο.

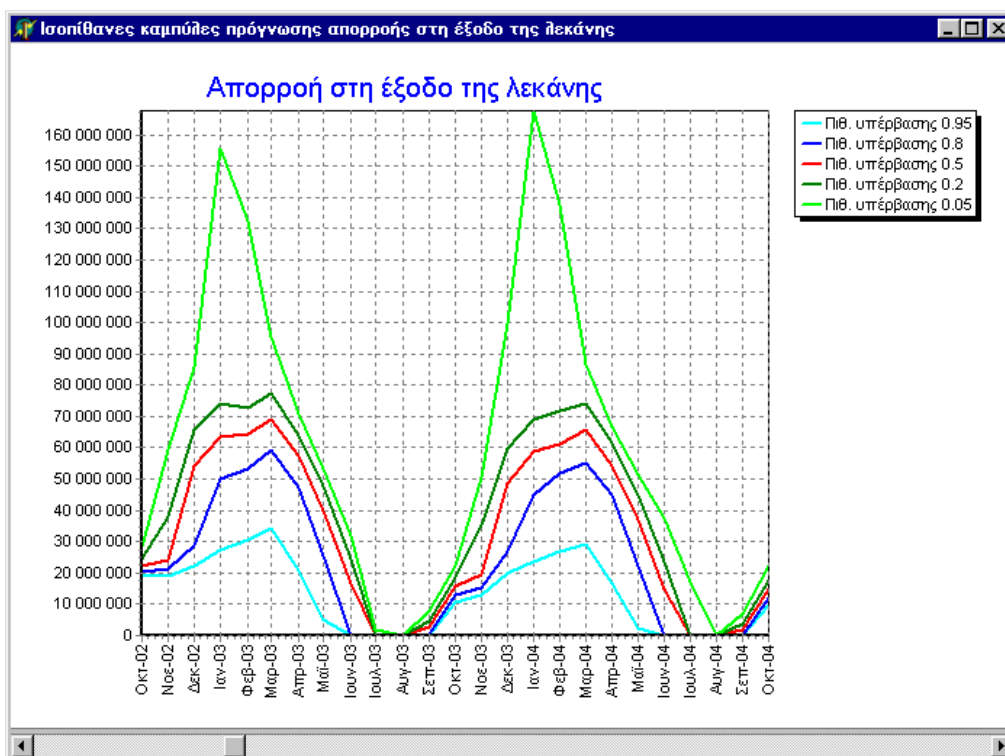
Τονίζεται ότι για να είναι συνεπή τα αποτελέσματα της πρόγνωσης θα πρέπει οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου, ήτοι οι αρχικές στάθμες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας και υπόγειου νερού, να ταυτίζονται με τις επίκαιρες. Η ρύθμιση των αρχικών συνθηκών προϋποθέτει την εκτέλεση του μοντέλου με ιστορικά δεδομένα έως τον μήνα έναρξης της πρόγνωσης, οπότε οι τελικές στάθμες που προκύπτουν από την προσομοίωση εισάγονται ως αρχικές τιμές στην πρόγνωση. Σε περίπτωση που κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, ο χρήστης μπορεί να θέσει αυθαίρετες τιμές, προσέχοντας ώστε οι αποκρίσεις που παράγονται στην αρχή της περιόδου ελέγχου να είναι ρεαλιστικές. Για παράδειγμα, αν είναι γνωστό ότι σε κάποια από τις πηγές του μοντέλου έχει διακοπεί η παραγωγή απορροής, η αρχική στάθμη της γειτονικής στην πηγή δεξαμενής υπόγειου νερού θα πρέπει να είναι χαμηλότερη από το απόλυτο υψόμετρο εκφόρτισης της πηγής.

Ως σενάρια φόρτισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνθετικές χρονοσειρές επιφανειακής βροχόπτωσης που έχουν παραχθεί από το πρόγραμμα Κασταλία και είναι αποθηκευμένες στην κεντρική βάση δεδομένων (Oracle). Αντίθετα, όσον αφορά τις χρονοσειρές δυνητικής εξατμοδιαπνοής και υδατικών αναγκών, δεδομένου ότι η υπερετήσια διακύμανσή τους είναι μικρή, αρκεί να χρησιμοποιηθεί ένα σταθερό ετήσιο πρότυπο, το οποίο ταυτίζεται με τις μέσες μηνιαίες ιστορικές τιμές των τελευταίων ετών.

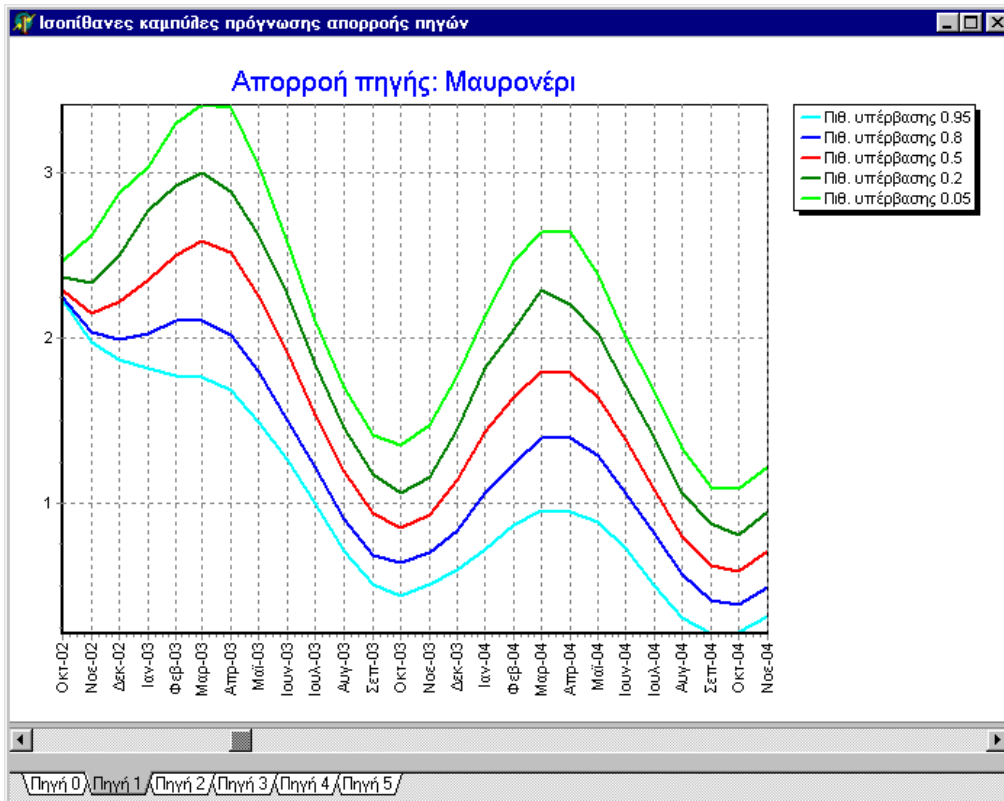
Σημειώνεται ότι στις φόρμες όπου απεικονίζονται οι αναλυτικές χρονοσειρές απόκρισης των διαφόρων συνιστωσών του μοντέλου (μονάδες υδρολογικής απόκρισης, δεξαμενές υπόγειου νερού, κλπ), τα αποτελέσματα αναφέρονται στο τελευταίο από τα σενάρια πρόγνωσης που προσομοιώθηκε.

26. Απεικόνιση ισοπίθανων καμπυλών πρόγνωσης

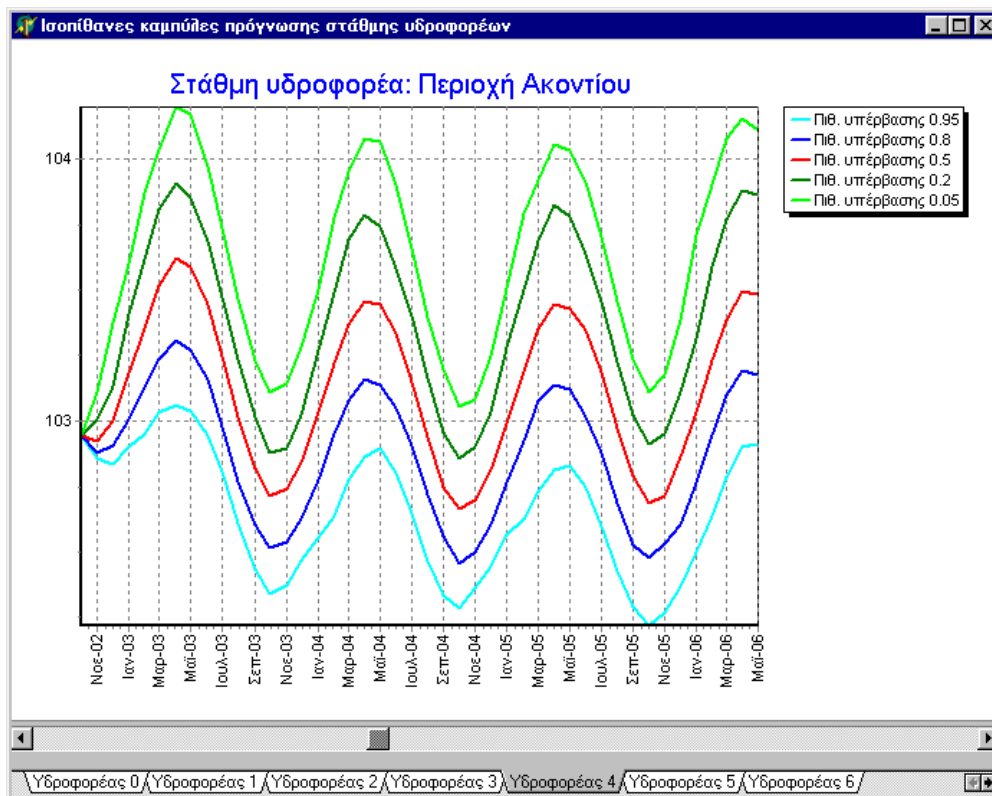
Η απεικόνιση των ορίων υπέρβασης των κύριων αποκρίσεων της λεκάνης (ήτοι της συνολικής απορροής, της παροχής των πηγών και της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού) γίνεται από την κύρια οθόνη του προγράμματος και τα μενού Στοχαστική πρόγνωση → Σενάρια συνολικής απορροής, Στοχαστική πρόγνωση → Σενάρια απορροής πηγών, και Στοχαστική πρόγνωση → Σενάρια στάθμης υπόγειου νερού, οπότε καλούνται οι φόρμες των Σχημάτων Γ.33, Γ.34 και Γ.35, αντίστοιχα. Στα διαγράμματα απεικονίζονται οι μηνιαίες τιμές που αντιστοιχούν σε πιθανότητες υπέρβασης 5%, 20%, 50%, 80% και 95%. Οι εν λόγω πιθανότητες εκτιμώνται εμπειρικά, κατατάσσοντας το δείγμα της εκάστοτε μηνιαίας τιμής του συνόλου των σεναρίων πρόγνωσης σε φθίνουσα σειρά. Η προσέγγιση είναι τόσο καλύτερη όσο αυξάνει το μέγεθος του δείγματος. Το μήκος των καμπυλών είναι εξ ορισμού ίσο με τον χρονικό ορίζοντα της πρόγνωσης. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πυκνώσει τον εν λόγω χρονικό ορίζοντα, μετακινώντας την μπάρα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της φόρμας.



Σχήμα Γ.33: Φόρμα απεικόνισης ισοπίθανων καμπυλών πρόγνωσης της απορροής στην έξοδο της λεκάνης.



Σχήμα Γ.34: Φόρμα απεικόνισης ισοπίθανων καμπυλών πρόγνωσης της παροχής των πηγών.



Σχήμα Γ.35: Φόρμα απεικόνισης ισοπίθανων καμπυλών πρόγνωσης της στάθμης των δεξαμενών υπόγειου νερού.

27. Τερματισμός προγράμματος

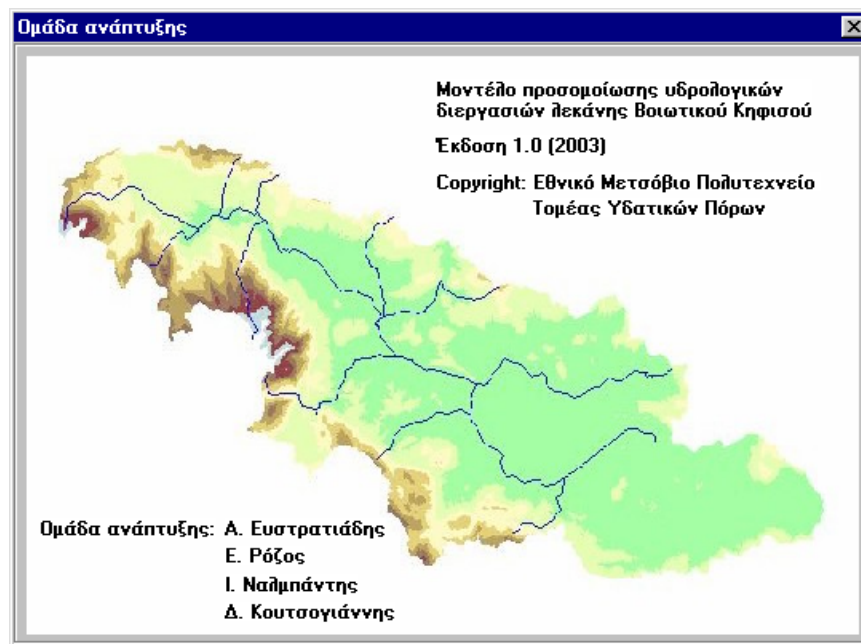
Ο τερματισμός του προγράμματος γίνεται από την κύρια οθόνη, είτε πατώντας στο άνω δεξιά σύμβολο είτε από το μενού Σενάριο → Έξοδος. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, δεν είναι δυνατός ο τερματισμός του προγράμματος.

28. Οδηγίες χρήσης

Το παρόν εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού είναι διαθέσιμο σε ηλεκτρονική μορφή, μέσω της κύριας οθόνης του προγράμματος και του μενού Πληροφορίες → Οδηγίες χρήσης.

29. Ομάδα ανάπτυξης

Πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα έκδοση του προγράμματος, την ομάδα ανάπτυξης και τα πνευματικά δικαιώματα του λογισμικού διατίθενται μέσω της κύριας οθόνης του προγράμματος και του μενού Πληροφορίες → Ομάδα ανάπτυξης, μέσω του οποίου εμφανίζεται η φόρμα του Σχήματος Γ.36.



Σχήμα Γ.36: Φόρμα απεικόνισης της ομάδας ανάπτυξης του προγράμματος.