

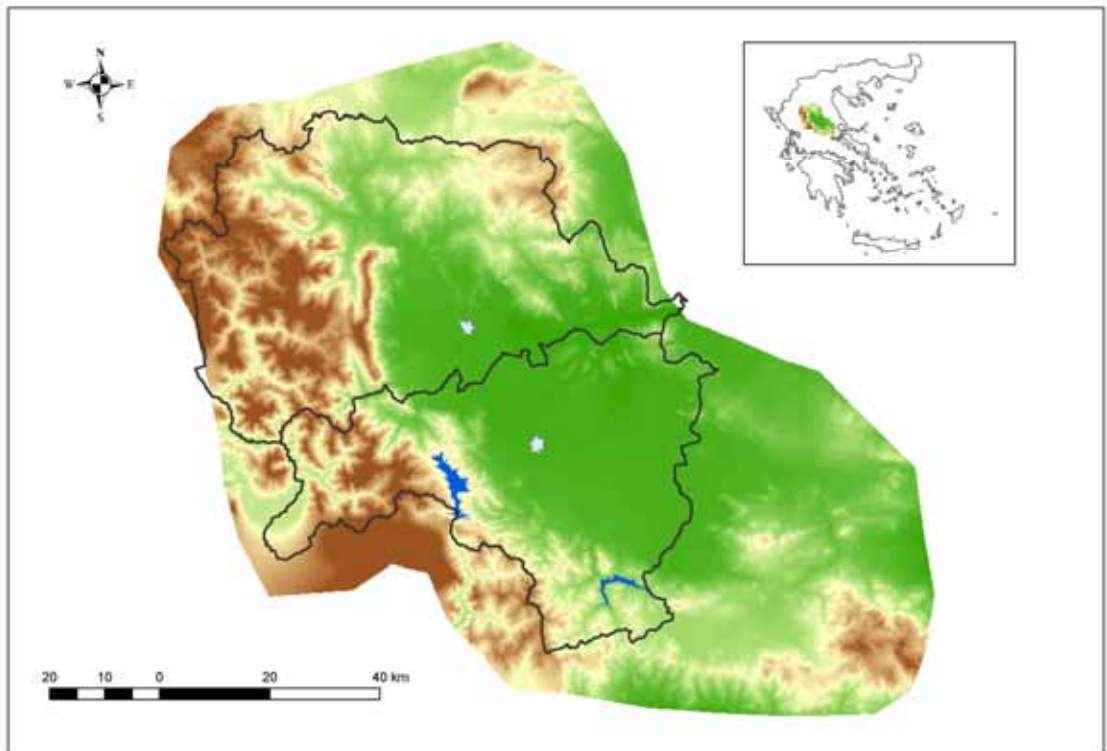


# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων

*Συνδυασμένη προσομοίωση υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών και λειτουργίας υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας*



Διπλωματική εργασία: Αριστοτέλης Τέγος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005

Επιβλέπων: Δ. Κουτσογιάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής

# Ευχαριστίες

---

Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών είναι ένα ιδιαίτερος ενδιαφέρον επιστημονικό αντικείμενο, το οποίο συνοψίζει ένα μεγάλο μέρος των παρεχόμενων γνώσεων του επιστημονικού αντικειμένου του Υδραυλικού Μηχανικού.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η γεωυδρολογική προσομοίωση του υδροσυστήματος της Δυτικής Θεσσαλίας με τη εφαρμογή του νέου μοντέλου «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ». Κλείνοντας τον κύκλο της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δημήτρη Κουτσογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή, για την απλόχερη βοήθεια του. Τον θυμάμαι στο διάλειμμα του πρώτου μαθήματος Τυπικών Υδραυλικών Έργων του βου εξαμήνου, όταν τον πλησίασα και του είπα ότι κάνει ωραίο μάθημα. Μου απάντησε αφοπλιστικά λεγοντάς μου ότι, γεννήθηκε σε ένα χωριό δίπλα σε ένα ποτάμι και προσπαθούσε να εξηγήσει με τη λογική του, τις μεταβολές στη στάθμη του. Η απάντηση του αυτή με ανάγκασε να τον ακολουθήσω μέχρι το τέλος της ακαδημαϊκής μου πορείας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω:

Τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Ευστρατιάδη για την ανεξάντλητη ευγένειά του καθώς και τη βοήθεια του κάθε στιγμή.

Τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Ρόζο για τη πολύτιμη βοήθεια καθόλη τη διάρκεια και για την τιμή που μου έκανε να γνωρίσω και να συνεργαστώ με έναν πειθαρχημένο Ικαριώτη.

Τον Αντώνη Κουκουβίνο, Τοπογράφο Μηχανικό, για τις γεωγραφικές πληροφορίες. Μου έμαθε ότι η Γεωγραφία είναι η Μητέρα των Επιστημών.

Τον Επικουρό Καθηγητή Γιάννη Ναλμπάντη για τις πολύτιμες συμβουλές του

Τον διδάκτορα Στέφανο Κοζάνη για τη πραότητα του, αφού μου απέδειξε ότι πίσω από τους σιωπηλούς κρύβονται μεγάλοι καλλιτέχνες.

Τον Λέκτορα Νίκο Μαμάση για τα υδρολογικά-μετεωρολογικά δεδομένα.

Τους κ. Γιώργο Καραβοκυρό και Γιώργο Λούρμα για τη βοήθεια τους στους υπολογιστές.

Τον Βαγγέλη και τη Χριστίνα για τη παρέα τους.

Τον κ. Λάζαρο Λαζαρίδη, Πολιτικό Μηχανικό, για τις πληροφορίες καθώς και την αγάπη που μοιραστήκαμε για τον κοινό μας τόπο καταγωγής.

Του υπαλλήλους της Διεύθυνσης Εγγείων Βελτιώσεων Καρδίτσας κ.κ Καρακώστα Γ., Μπαρτζώκα Β., Γκούβη Α. καθώς και του υπαλλήλους του τμήματος υδρογεωλογίας και μαθηματικών ομοιομάτων του υπουργείου Γεωργίας.

Τους ξωμάχους του Θεσσαλικού κάμπου που με λίγα λόγια μου περιέγραψαν το πρόβλημα και με βοήθησαν περισσότερο από κάθε τεχνική μελέτη να αντιληφθώ το υδροσύστημα. Αν και με βοήθησαν ουσιαστικά, στάθηκα ανίκανος να βρω μια πλήρη απάντηση στην ερώτηση τους αν θα τους φέρω νερό. Το μόνο που μπορώ να κάνω, προς το παρόν, είναι να τους αφιερώσω τα αποτελέσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αρης Τέγος  
Σεπτέμβριος, 2005

# Περιεχόμενα

---

<b>Ευχαριστίες</b>	<b>i</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	<b>iii</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>vii</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας.....	1
<b>2 Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>3</b>
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.1.1 Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων.....	3
2.1.2 Το πρόβλημα της βαθμονόμησης.....	4
2.2 Συνοπτική επισκόπηση μοντέλων φυσικής βάσης.....	5
2.2.1 Το μοντέλο SWAT.....	5
2.2.2 Το μοντέλο MIKE SHE.....	6
2.3 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	8
2.3.1 Γενικά.....	8
2.3.2 Θεμελιώδεις απαιτήσεις.....	9
2.4 Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου.....	10
2.5 Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας.....	10
2.5.1 Σχηματοποίηση υδρογραφικού δικτύου.....	10
2.5.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης.....	11
2.5.3 Εννοιολογικό μοντέλο προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών εδάφους.....	12
2.5.4 Υπολογιστική διαδικασία.....	14
2.6 Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας.....	14
2.6.1 Σχηματοποίηση υδροφορέα.....	14
2.6.2 Συνιστώσες φόρτισης δεξαμενών υπόγειου νερού.....	15
2.6.3 Σχήμα επίλυσης.....	16
2.7 Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων.....	17
2.7.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	17
2.7.2 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος.....	18
2.7.3 Δικτυακή διατύπωση προβλήματος.....	18
2.8 Σύνοψη διαδικασίας προσομοίωσης.....	20
2.9 Εκτίμηση παραμέτρων.....	22

2.9.1	Διατύπωση προβλήματος .....	22
2.9.2	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης .....	22
<b>3</b>	<b>Περιοχή μελέτης</b> .....	<b>23</b>
3.1	Γεωγραφική τοποθέτηση .....	23
3.2	Αναπτυξιακά δεδομένα.....	24
3.3	Το πρόβλημα του νερού .....	24
3.4	Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές .....	24
3.5	Η ποιότητα του νερού.....	25
3.6	Διοικητικό πλαίσιο διαχείρισης.....	25
<b>4</b>	<b>Σχηματοποίηση υδροσυστήματος</b> .....	<b>26</b>
4.1	Πορεία εργασιών .....	26
4.2	Σχηματοποίηση υδρογραφικού δικτύου .....	26
4.2.1	Υδρομετρικοί σταθμοί .....	26
4.2.2	Χάραξη δικτύου – υδατορεύματα – λεκάνες απορροής.....	26
4.3	Μονάδες υδρολογικής απόκρισης .....	28
4.3.1	Υδρολιθολογία .....	28
4.3.2	Χρήσεις γης.....	29
4.3.3	Καθορισμός μονάδων υδρολογικής απόκρισης .....	30
4.4	Σχηματοποίηση υπόγειου υδροφορέα .....	31
4.4.1	Καρστικές πηγές.....	31
4.4.2	Διακριτοποίηση υδροφορέα .....	32
4.4.3	Γεωτρήσεις.....	35
4.5	Τεχνικά έργα - διαχείριση νερού .....	37
4.5.1	Αρδευτικό σύστημα Δυτικής Θεσσαλίας.....	37
4.5.2	Χειμερινή λειτουργία υδροσυστήματος.....	38
4.5.3	Η επιρροή του Ενιπέα στις μετρήσεις του Αλή Εφέντη.....	39
4.6	Καθορισμός στόχων .....	41
<b>5</b>	<b>Δεδομένα και επεξεργασίες</b> .....	<b>43</b>
5.1	Δεδομένα επιφανειακής υδρολογίας.....	43
5.1.1	Βροχομετρικοί σταθμοί.....	43
5.1.2	Διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου .....	44
5.1.3	Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχόπτωσης .....	45
5.2	Δυνητική εξατμοδιαπνοή.....	49
5.3	Υδρομετρικοί σταθμοί.....	50
5.3.1	Υδρομετρικός σταθμός Αλή Εφέντη.....	50
5.3.2	Υδρομετρικός σταθμός Κέδρου .....	51
5.3.3	Υδρομετρικός σταθμός Σαρακήνας .....	52
5.3.4	Υδρομετρικός σταθμός Μουζακίου .....	53

5.3.5	Υδρομετρικός σταθμός Αμπελιάς .....	54
5.4	Εκροές λίμνης Πλαστήρα .....	54
5.5	Αρδευτικές ανάγκες .....	55
5.6	Εξέλιξη αρδευτικής ζήτησης .....	58
5.6.1	Αρδευτικός κόμβος Αγιοπηγής .....	58
5.6.2	Αρδευτικός κόμβος Μεσενικόλα .....	58
5.6.3	Αρδευτικός κόμβος Παλαμά .....	59
5.6.4	Αρδευτικός κόμβος Πλαστήρα .....	59
5.6.5	Αρδευτικός κόμβος Σοφάδων .....	60
5.6.6	Αρδευτικός κόμβος Σελάνων .....	60
5.6.7	Αρδευτικός κόμβος Ξυνονερίου .....	61
5.6.8	Αρδευτικός κόμβος Τρικάλων .....	61
<b>6</b>	<b>Βαθμονόμηση μοντέλου</b> .....	<b>63</b>
6.1	Διατύπωση του προβλήματος .....	63
6.1.1	Περίοδος ελέγχου .....	63
6.1.2	Ιστορικές χρονοσειρές .....	63
6.1.3	Μεταβλητές ελέγχου .....	64
6.1.4	Αρχικές συνθήκες .....	64
6.1.5	Αντικειμενική συνάρτηση .....	65
6.2	Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης .....	66
6.3	Αναπαραγωγή μετρημένων παροχών .....	68
6.3.1	Υδρομετρικός σταθμός Μουζακίου .....	68
6.3.2	Υδρομετρικός σταθμός Αμπελιάς .....	69
6.3.3	Υδρομετρικός σταθμός Κέδρου .....	70
6.3.4	Υδρομετρικός σταθμός Σαρακήνας .....	70
6.3.5	Υδρομετρικός σταθμός Αλή Εφέντη .....	71
6.4	Πηγές Κεφαλόβρυσου .....	72
6.5	Στάθμες υπόγειου νερού .....	73
6.5.1	Κυψέλη Σοφάδων .....	73
6.5.2	Αγναντερό Καρδίτσας .....	73
6.5.3	Νέο Μοναστήρι Φθιώτιδας .....	74
6.5.4	Γεφύρια Καρδίτσας .....	75
6.5.5	Βλοχός Καρδίτσας .....	75
6.5.6	Φήκη Τρικάλων .....	76
6.5.7	Μεγάρη Τρικάλων .....	76
6.5.8	Ζηλευτή Τρικάλων .....	77
6.5.9	Παλιοκλήσι Καρδίτσας .....	77
6.5.10	Καλλιθηρό Καρδίτσας .....	78
6.5.11	Πατούλια Τρικάλων .....	78
6.6	Βελτιστοποιημένες παράμετροι .....	79
6.6.1	Παράμετροι μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας .....	79
6.6.2	Παράμετροι μοντέλου υπόγειας υδρολογίας .....	80
6.6.3	Συντελεστές διήθησης .....	81

<b>7</b>	<b>Ανάλυση μεγεθών υδατικού ισοζυγίου</b>	<b>82</b>
7.1	Υδατικό ισοζύγιο υδοσυστήματος.....	82
7.1.1	Αθροιστικό ισοζύγιο λεκάνης.....	82
7.1.2	Διαχρονική εξέλιξη υδρολογικών μεγεθών λεκάνης.....	83
7.1.3	Διαχρονική εξέλιξη τροφοδοσίας υπόγειου υδροφορέα.....	87
7.2	Κατανομή αρδευτικών απολήψεων.....	89
7.2.1	Αρδευτικός κόμβος Μεσενικόλα.....	90
7.2.2	Αρδευτικό κόμβος Ξυνονερίου.....	90
7.2.3	Αρδευτικός κόμβος Σελάνων.....	91
7.2.4	Αρδευτικός κόμβος Παλαμά.....	92
7.2.5	Αρδευτικός κόμβος Σοφάδων.....	93
7.2.6	Αρδευτικός κόμβος Αγιοπηγής.....	94
7.2.7	Αρδευτικός κόμβος Πλαστήρα.....	95
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα – Προτάσεις</b>	<b>97</b>
8.1	Συμπεράσματα από τη χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.....	97
8.2	Συμπεράσματα για το υδροσύστημα της Δυτικής Θεσσαλίας.....	98
8.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	98
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>100</b>
	<b>Παράρτημα Α: Χρονοσειρές</b>	<b>103</b>
	<b>Παράρτημα Β: Φωτογραφίες</b>	<b>120</b>

# Περίληψη

---

Σκοπός της εργασίας είναι η ολοκληρωμένη προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας, με χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Αρχικά, έγινε η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων που αφορούν στο υδrosύστημα (δεδομένα υδρομετρικών και βροχομετρικών σταθμών, δεδομένα υπόγειας υδρογεωλογίας, δεδομένα καλλιεργειών). Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στη σχηματοποίηση του φυσικού και τεχνητού συστήματος. Για την προσαρμογή του μοντέλου, δηλαδή την εκτίμηση των παραμέτρων του, ορίστηκε μια αντικειμενική συνάρτηση που περιλαμβάνει μηνιαία δείγματα από μετρήσεις πεδίου για επιφανειακά και υπόγεια νερά. Η συνάρτηση που διαμορφώθηκε περιλαμβάνει 16 συνιστώσες. Μέσω βελτιστοποίησης, επιχειρήθηκε η εύρεση του μικρότερου συνολικού σφάλματος μεταξύ των παρατηρημένων και προσομοιωμένων χρονοσειρών. Η μελέτη αφορά στην περίοδο 1972-73 έως 1992-1993. Η πρώτη δεκαετία αναφέρεται στην περίοδο βαθμονόμησης, ενώ η δεύτερη είναι η περίοδος επαλήθευσης, στην οποία ελέγχθηκε η προγνωστική του ικανότητα του μοντέλου. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνθετότητα του προβλήματος, η προσαρμογή του μοντέλου ήταν ικανοποιητική, ενώ προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να αξιοποιηθούν για διαχειριστικούς σκοπούς.

## Abstract

The scope of the study is the integrated simulation of the hydrological cycle in the Western Thessaly region, through the HYDROGEIOS model. First, the raw data for the hydrosystem was collected (data from hydrometric and pluviometric stations, groundwater data, agricultural data). Next, we proceeded to the schematisation of the physical and artificial system. For the adaptation of the model, i.e. the estimation of its parameters, an objective function was formulated, based on field measurements for surface and groundwater resources. The function comprises 16 components. Through optimisation, we attempted to find the minimum distance between the observed and simulated time series. The study refers to the period 1972-73 to 1992-93. The first decade refers to the calibration period, whereas the second one is the validation period, in which the forecasting capacity of the model was tested. Taking into account the complexity of the problem, the adaptation of the model was satisfactory, while useful conclusions were derived, which may be used for management purposes.





# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας, με χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Το υδροσύστημα της δυτικής Θεσσαλίας είναι ένα πολύπλοκο υδροσύστημα και οι δυσκολίες στη προσομοίωση του απορρέουν από τους εξής λόγους:

- Υπάρχουν εξαιρετικά λίγες μετρήσεις παροχής σε όλο το υδροσύστημα και μάλιστα σε πολλές θέσεις μέτρησης υπάρχουν εκτεταμένα σφάλματα.
- Δεν υπάρχουν μετρήσεις σε πηγές του υδροσυστήματος που θα διευκόλυναν την ανάρθρωση του υπόγειου υδροφορέα και την διαδικασία της βαθμονόμησης.
- Υπάρχουν εκτεταμένες αρδεύσιμες εκτάσεις και απαιτείται η λεπτομερής περιγραφή της τοπολογίας του αρδευτικού συστήματος.
- Εκτός από την διαμόρφωση του αρδευτικού δικτύου υπάρχει μεγάλος υπολογιστικός φόρτος για τον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών του κάθε κόμβου ζήτησης.
- Υπάρχουν παράμετροι του αρδευτικού συστήματος όπως η γνώση της χωρικής κατανομής των γεωτρήσεων που λόγω των εκτεταμένων αρδευτικών χρήσεων είναι δύσκολο να υπολογιστεί.

Η πρώτη φάση της διπλωματικής εργασίας αφορά τη σχηματοποίηση του φυσικού και τεχνητού υδροσυστήματος, ενώ η δεύτερη αφορά τη διαδικασία της βαθμονόμησης, στον ορισμό αντικειμενικής συνάρτησης με μετρήσεις πεδίου που με τη διαδικασία εξελιγμένης τεχνικής βελτιστοποίησης επιχειρήσαμε να μειώσουμε το σφάλμα μεταξύ παρατηρημένων και παρατηρημένων τιμών. Για την διαδικασία της βαθμονόμησης μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα εξής σημεία:

- Διαμορφώθηκε ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών παραμέτρων.
- Απαιτούνταν ο ανθρώπινος έλεγχος και η κρίση των αποτελεσμάτων των παραμέτρων του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου που επιλέγονταν κάθε φορά για βαθμονόμηση για την ερμηνεία των αβεβαιοτήτων που παράγονταν. Η διαδικασία της βαθμονόμησης δεν είναι απλώς μηχανιστική αλλά επιστημονική διαδικασία καθώς απ' αυτήν βελτιώθηκαν και περιγράφηκαν συνθήκες του υδροσυστήματος που αρχικά ήταν άγνωστες.
- Το μοντέλο παρουσιάζει μια ιδιαίτερη ευελιξία στην αξιοποίηση της παρεχόμενης υδρολογικής πληροφορίας ανεξάρτητα από το χρονικό βήμα και το τύπο της πληροφορίας. Για παράδειγμα για τις πηγές του Κεφαλόβρυσου γνωρίζαμε μόνο τη μέση μηνιαία του τιμή και αυτή χρησιμοποιήθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση.

Το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης μας αφήνει ικανοποιημένους με βάση τη πολυπλοκότητα του υδροσυστήματος καθώς και τη πολυπλοκότητα της διαδικασίας της βαθμονόμησης.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Εκτός από τη παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), το τεύχος περιλαμβάνει επτά ακόμη κεφάλαια και δύο παραρτήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, μετά από συνοπτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ. Αυτό περιλαμβάνει τη θεωρητική τεκμηρίωση του επιφανειακού-υπογείου μοντέλου, καθώς και του μοντέλου κατανομής της ζήτησης του νερού. Επίσης, περιλαμβάνει τη μαθηματική μεθοδολογία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία για τη περιοχή μελέτης, που αφορούν στους παραγωγικούς τομείς της Δυτικής Θεσσαλίας, στοιχεία για την αναπτυξιακή της ταυτότητα καθώς και εισαγωγικές πληροφορίες για τις χρήσεις νερού και το διοικητικό πλαίσιο διαχείρισης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχηματοποίηση του υδροσυστήματος. Εξηγούνται τα επίπεδα γεωγραφικής πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και διάφορα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης και έπρεπε να ληφθούν υπόψη στην τελική σχηματοποίηση.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας (βροχομετρικά δεδομένα, δεδομένα παροχής, μετρήσεις στάθμης γεωτρήσεων), και εκτιμώνται οι αρδευτικές ανάγκες σε χαρακτηριστικές θέσεις της περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του μοντέλου του υδροσυστήματος.

Στα έκτο κεφάλαιο διατυπώνεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, παρουσιάζονται οι χρονοσειρές εισόδου καθώς και οι προς βελτιστοποίηση παράμετροι του μοντέλου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και σχολιάζονται οι προσομοιωμένες χρονοσειρές για κάθε θέση μέτρησης του υδροσυστήματος, και επιχειρείται μια φυσική ερμηνεία των βελτιστοποιημένων παραμέτρων.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αναφέρονται στο συνολικό υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης, καθώς και στη χωροχρονική εξέλιξη της κατείδωσης και των υπόγειων απολήψεων στα διαφορά σημεία αρδευτικής κατανάλωσης. Τέλος, παρουσιάζεται η εξέλιξη της κατανομής των απολήψεων από επιφανειακά και υπογεία νερά για κάθε αρδευτικό κόμβο του υδροσυστήματος του Νομού Καρδίτσας.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα από την προσαρμογή του μοντέλου στο υδροσύστημα και προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα, τα οποία στρέφονται σε διαχειριστικά ζητήματα.

Στο παράρτημα Α δίδονται τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, δηλαδή το ύψος της μηνιαίας βροχόπτωσης σε κάθε λεκάνη απορροής, το ύψος της μηνιαίας δυναμικής εξατμοδιαπνοής, οι μετρημένες μηνιαίες απορροές στους υδρομετρικούς σταθμούς, οι μετρημένες στάθμες σε υπόγειες γεωτρήσεις του υδροσυστήματος και οι μηνιαίες αρδευτικές ανάγκες κάθε αρδευτικού κόμβου του υδροσυστήματος.

Τέλος, στο παράρτημα Β παρουσιάζονται φωτογραφίες από διάφορες θέσεις της περιοχής μελέτης που ελήφθησαν κατά την τρέχουσα αρδευτική περίοδο.

## 2 Θεωρητικό υπόβαθρο

---

### 2.1 Εισαγωγή

#### 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 είναι λιγότερο συχνή, 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 ακριβή 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. Το πλεονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι η προσαρμογή σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις καθώς και η δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων αλλαγής των δεδομένων εισόδου, όπως σεναρία κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών επιβάλλει τη γνώση των εν λόγω χαρακτηριστικών σε εξαιρετικά λεπτομερή χωρική κλίμακα, κάτι που στην πράξη καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο. Από την άλλη πλευρά, επειδή τα κατανομημένα μοντέλα δύνανται να περιγράψουν πολύ καλύτερα τις φυσικές διεργασίες, αξιοποιώντας τη διαθέσιμη γεωγραφική πληροφορία, βρίσκουν πλέον όλο και μεγαλύτερη

εφαρμογή, με τη θεώρηση των πλέον σημαντικών δεδομένων εισόδου ως παραμέτρων, και την εκτίμησή τους, σε αντιστοιχία με τα εννοιολογικά μοντέλα, μέσω βελτιστοποίησης (*Refsgaard, 1997· Eckhardt and Arnold, 2001*).

### 2.1.2 Το πρόβλημα της βαθμονόμησης

Οι παράμετροι των υδρολογικών μοντέλων μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα, μέσω μιας συστηματικής διαδικασίας αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών που καλείται *βαθμονόμηση* (calibration). Η βαθμονόμηση γίνεται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες, και επιλέγοντας τον συνδυασμό εκείνο που επιτυγχάνει την καλύτερη προσαρμογή. Η βαθμονόμηση 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 διαδικασία ακολουθείται από την λεγόμενη *επαλήθευση* (validation) του μοντέλου, βάσει την 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. Αυτή 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.

Αν και τα τελευταία χρόνια, η αλματώδης εξέλιξη των υπολογιστικών τεχνικών, με την ανάπτυξη ισχυρών και αξιόπιστων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, επιτρέπει την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων, το πρόβλημα εξακολουθεί να θεωρείται ένα από τα πλέον δύσκολα που απαντά ένας υδρολόγος στην πράξη. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χώρος αναζήτησης είναι έντονα τραχύς και περιέχει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό τοπικών ακροτάτων, σε διάφορες μάλιστα κλίμακες (*Duan et al., 1992*). Όσο αυξάνει το πλήθος των παραμέτρων, τόσο η εύρεση της θεωρητικά βέλτιστης λύσης καθίσταται ανέφικτη. Μάλιστα, στην περίπτωση σύνθετων μοντέλων, το πλήθος των δοκιμών αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεδομένου του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης. Συνεπώς, αυτό που επιζητείται είναι η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης, με λογικό πλήθος δοκιμών.

Μια επιπλέον δυσκολία έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών τιμών των παραμέτρων, που παράγουν ισοδύναμα καλές αποκρίσεις της λεκάνης, και οφείλεται, κατά κύριο λόγο: (α) σε σφάλματα δομής του μοντέλου (απλουστευμένη αναπαράσταση εξαιρετικά σύνθετων διεργασιών, χρήση μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με αυτές που μπορούν να υποστηρίξουν τα δεδομένα των μετρήσεων, αλληλεπίδραση παραμέτρων), και (β) σε σφάλματα δεδομένων (ανεπαρκείς ή και λανθασμένες μετρήσεις, σφάλματα χωρικής και χρονικής ολοκλήρωσης). 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.

Όσον αφορά στο ζήτημα της βαθμονόμησης, η έρευνα έχει στραφεί προς την αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης πληροφορίας, με την ενσωμάτωση πολλαπλών κριτηρίων καλής προσαρμογής (*Gupta et al., 1998*) αλλά και την αξιοποίηση της «εμπειρίας» του υδρολόγου στη διαδικασία της βελτιστοποίησης (*Boyle et al., 2000*), καθώς και στην ανάπτυξη μεθοδολογιών ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας, με σκοπό τη βελτίωση της προγνωστικής ικανότητας του μοντέλου (*Freer et al., 1996· Wagener et al., 2001*).

## 2.2 Συνοπτική επισκόπηση μοντέλων φυσικής βάσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, συνοπτικά, δύο από τα πλέον καταξιωμένα, διεθνώς, υδρολογικά μοντέλα φυσικής βάσης, το SWAT και το MIKE SHE. Η παρουσίαση επικεντρώνεται στο πεδίο εφαρμογής των μοντέλων, τις κύριες λειτουργίες τους, καθώς και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.

### 2.2.1 Το μοντέλο SWAT

Το SWAT (Soil and Water Assessment Tool) είναι ένα ολοκληρωμένο υδρολογικό μοντέλο φυσικής βάσης, που προβλέπει την επίδραση του υδρολογικού κύκλου στο νερό, τα φερτά και τη συγκέντρωση των χημικών ουσιών, σε μεγάλες και πολύπλοκες λεκάνες απορροής με ποικίλους τύπου εδαφών και χρήσεων γης. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, από την USDA Agricultural Research Service<sup>1</sup>.

Ως χωρική κλίμακα αναφοράς του μοντέλου νοείται η μονάδα υδρολογικής απόκρισης, που δεν ταυτίζεται με κάποια υπολεκάνη αλλά χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη χωρική μεταβλητότητα των υδρολογικών παραμέτρων. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει μία ή περισσότερες μονάδες. Στην πρώτη περίπτωση, το μοντέλο λειτουργεί ως συγκεντρωτικό. Στη δεύτερη περίπτωση, το πρόγραμμα ορίζει αυτόματα τις μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά των εκτάσεων που ορίζει ο χρήστης.

Το μοντέλο προσομοίωσης λειτουργεί σε ημερήσια κλίμακα, και απαιτεί τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- ψηφιακό μοντέλο εδάφους·
- ψηφιακός χάρτης με χρήσεις γης·
- ψηφιακό υπόβαθρο υδρογραφικού δικτύου (προαιρετικό)·
- ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης, μέγιστης-ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας·
- διάφορα κλιματικά χαρακτηριστικά (προαιρετικά), όπως ύψος βροχόπτωσης για διάρκειες 0.5 και 6 ωρών και περίοδο επαναφοράς 10 ετών, κατανομή βροχόπτωσης, στατιστικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης, διαδοχή υγρών-ξηρών ημερών, μέσες μηνιαίες τιμές μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνεια, σημείου δρόσου, κλπ.

Το μοντέλο εκτιμά τη δυνητική εξατμοδιαπνοή με μία από τις μεθόδους Priestley-Taylor, Penman-Monteith ή Hargreaves.

Οι παράμετροι του μοντέλου είναι:

- παράμετροι καμπυλών SCS (για τη ρύθμιση της επιφανειακής απορροής ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης)·
- χρόνος υστέρησης (εφόσον ο χρόνος συρροής είναι μεγαλύτερος της ημέρας)·
- δείκτης φυλλικής αγωγιμότητας (επιφάνεια φύλλων που καλύπτουν κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης)·
- παράγοντας αντιστάθμισης εξάτμισης εδάφους (λαμβάνει υπόψη την ασυνέχεια των εδαφικών στρωμάτων)·
- διαθέσιμη υγρασία εδαφικού στρώματος (όγκος νερού που θα έπρεπε να είναι διαθέσιμος στα φυτά αν το έδαφος βρισκόταν στην υδατοϊκανότητα)·
- παράγοντας βασικής απορροής ή συντελεστής αποφόρτισης (~ 1 για ήπιες κλίσεις του καθοδικού κλάδου, ~ 0 για απότομες κλίσεις)·
- αρχική αποθήκευση υπόγειου νερού·
- κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα·

---

<sup>1</sup> Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.brc.tamus.edu/swat>

- χαρακτηριστικά μεγέθη αβαθή υδροφορέα (ο χρόνος, σε ημέρες, που χρειάζεται το νερό για να κινηθεί από τη ζώνη ριζοστρώματος στον αβαθή υδροφορέα, ποσοστό νερού που κινείται προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος νερού που απαιτείται ώστε να υπάρξει κίνηση προς τον αβαθή υδροφορέα, ελάχιστο ύψος που απαιτείται για ροή από το υπέδαφος στο ποτάμι)
- κλάσμα διήθησης βαθιού υδροφορέα

Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να παράξει χρονοσειρές "καιρικών συνθηκών", χρησιμοποιώντας τα στατιστικά κλιματικά μεγέθη. Επιπλέον, με βάση τη μέση ημερήσια θερμοκρασία, επιμερίζει τα συνολικά κατακρημνίσματα σε βροχόπτωση και χιονόπτωση. Η τήξη του χιονιού υπολογίζεται συναρτήσει της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, της ταχύτητας ανέμου και του σημείου δρόσου. Τέλος, εκτιμά τη θερμοκρασία εδάφους, συναρτήσει της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας αέρα, της φυτοκάλυψης και της χιονοκάλυψης.

Το μοντέλο προσομοιώνει τις ακόλουθες υδρολογικές διεργασίες:

- επιφανειακή απορροή
- ροή μέσω των εδαφικών στρωμάτων (διήθηση)
- ενδιάμεση απορροή
- υπόγεια απορροή
- εξατμοδιαπνοή (υπολογίζεται χωριστά για το έδαφος και τα φυτά)
- τήξη χιονιού
- απώλειες υδατορευμάτων.

Τέλος, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις λεγόμενες κατασκευές συγκράτησης, που είναι έργα αναχαίτισης της απορροής πάνω σε υδατορεύματα.

Αν και η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται σε ημερήσια κλίμακα, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει σε ημερήσιο, μηνιαίο και ετήσιο χρονικό βήμα. Το χαρακτηριστικό αυτό βοηθά στη βαθμονόμηση του μοντέλου, στην περίπτωση που οι χρονοσειρές απόκρισης είναι αραιότερης χρονικής κλίμακας σε σχέση με την κλίμακα προσομοίωσης.

### 2.2.2 Το μοντέλο MIKE SHE

Το MIKE SHE (Système Hydrologique Européenne) είναι ένα δυναμικό εργαλείο ολοκληρωμένης προσομοίωσης του επίγειου υδρολογικού κύκλου. Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980, ενώ η ανάπτυξη του λογισμικού υποστηρίζεται από τη Δανέζικη εταιρεία DHI Software<sup>1</sup>.

Το μοντέλο έχει ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα εφαρμογών σε προβλήματα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς και σε προβλήματα περιβάλλοντος, όπως:

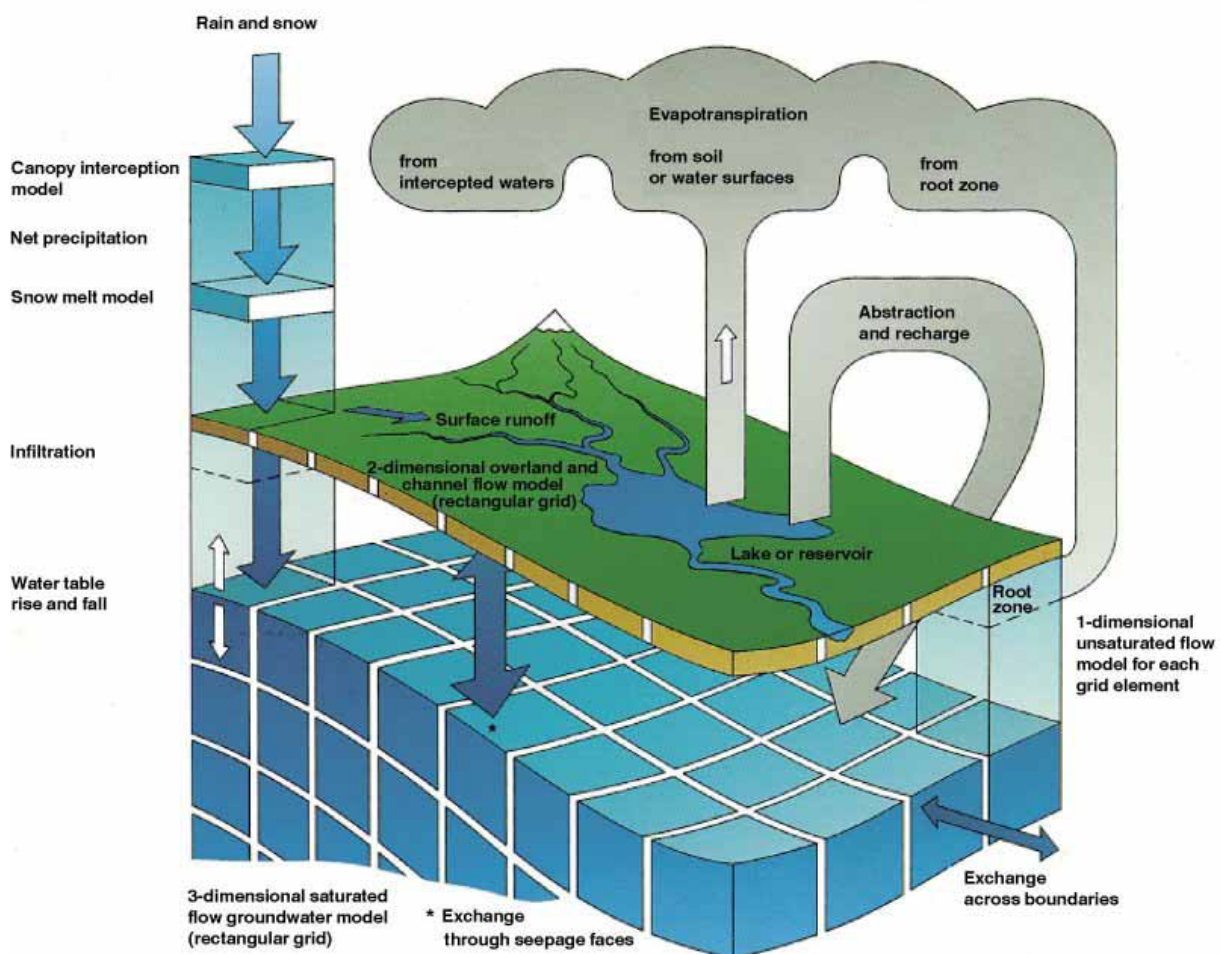
- επιπτώσεις στα επιφανειακά νερά λόγω αντλήσεων
- συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών
- διαχείριση και προστασία υδροβιότοπων
- διαχείριση λεκάνης απορροής
- εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- δυναμική επανατροφοδοσία υδροφορέων
- διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων
- μελέτες πλημμυρών
- εκτίμηση επιπτώσεων από αλλαγές στις χρήσεις γης και στο κλίμα
- εκτίμηση επιπτώσεων από γεωργικές πρακτικές.

<sup>1</sup> Αναλυτικές πληροφορίες δίνονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.dhisoftware.com/mikeshe>

Το μοντέλο αναπαριστά τις ακόλουθες διεργασίες (βλ. Σχήμα 2.1):

- κατακρήμνιση (βροχόπτωση, χιονόπτωση)·
- εξατμοδιαπνοή, περιλαμβανομένης και της παρεμπόδισης από τη χλωρίδα·
- επίγεια απορροή·
- ροή σε υδατορεύματα / ανοιχτούς αγωγούς·
- ακόρεστη ροή στο έδαφος·
- κορεσμένη υπόγεια ροή.

Για κάθε διεργασία, το MIKE SHE παρέχει εναλλακτικούς τρόπους μαθηματικής περιγραφής, που κυμαίνονται από απλές, συγκεντρωτικές προσεγγίσεις έως εξελιγμένες, κατανεμημένες προσεγγίσεις φυσικής βάσης. Οι εν λόγω προσεγγίσεις μπορούν να συνδυαστούν με μεγάλη ευελιξία, παρέχοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να προσαρμόσει το μοντέλο στο υδρολογικό πρόβλημα που εξετάζεται και στα διαθέσιμα δεδομένα.



Σχήμα 2.1: Αλληλουχία υδρολογικών διεργασιών που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE SHE.

Αν στη σχηματοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνεται η ακόρεστη ζώνη, τότε το MIKE SHE υπολογίζει τη διήθηση, την πραγματική εξατμοδιαπνοή και την τροφοδοσία του υδροφορέα (κατείσδυση), διαφορετικά η κατείσδυση δίνεται από το χρήστη. Τα υδρολογικά δεδομένα μπορεί να είναι σταθερές τιμές ή χρονοσειρές, που αναφέρονται είτε σε σημεία του χώρου (οπότε κατανέμονται με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen) είτε σε κυψέλες κανάβου. Για την εκτίμηση της κατείσδυσης, το MIKE SHE συνεργάζεται και με το εξειδικευμένο πρόγραμμα DAISY GIS, που είναι ένα

μονοδιάστατο μοντέλο φυσικής βάσης, που προσομοιώνει τη ροή του νερού σε κατακόρυφες εδαφικές στρώσεις, παράγοντας χάρτες κατανεμημένης κατείδυσης.

Η ακόρεστη ζώνη αποτελεί τη διεπιφάνεια μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων. Το μοντέλο ακόρεστης ροής του MIKE SHE είναι ένα μοντέλο εδαφικού προφίλ, που αλληλεπιδρά τόσο με την επίγεια ροή (μέσω της επιλίμνασης των υδάτων στην επιφάνεια του εδάφους) όσο και με το μοντέλο υπόγειων νερών (αφού η στάθμη του υδροφορέα αποτελεί την κατώτατη οριακή συνθήκη της ακόρεστης ζώνης). Το MIKE SHE παρέχει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, και συγκεκριμένα: (α) ένα απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου, που υποθέτει διακριτοποίηση της ακόρεστης ζώνης σε δύο περιοχές, (β) ένα μοντέλο ροής με βαρύτητα, και (γ) ένα πλήρες μοντέλο επίλυσης των εξισώσεων Richards. Σε κάθε περίπτωση, απαιτείται ο προσδιορισμός ορισμένων χαρακτηριστικών του εδάφους. Το μοντέλο ακόρεστης ροής συνεργάζεται με το μοντέλο εξατμοδιαπνοής, η οποία εκτιμάται με βάση τη δυνητική εξατμοδιαπνοή, τη διαθέσιμη εδαφική υγρασία και τα χαρακτηριστικά της χλωρίδας.

Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής, το MIKE SHE περιλαμβάνει ένα διδιάστατο και ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, που ακολουθεί παρόμοια προσέγγιση με το γνωστό μοντέλο MODFLOW. Η γεωλογία περιγράφεται με τη μορφή ζωνών (layers) ή φακών (lenses), στα οποία δίνονται χαρακτηριστικές υδραυλικές ιδιότητες. Οι τελευταίες ορίζονται είτε ανά κυψέλη είτε ανά περιοχή (πολύγωνο). Για κάθε ζώνη, ο χρήστης δίνει τις οριακές συνθήκες. Ειδικού τύπου όρια είναι ο λίμνες, τα ποτάμια και οι γεωτρήσεις.

Όσον αφορά στην προσομοίωση της ροής σε ποτάμια, το MIKE SHE συνεργάζεται με το μονοδιάστατο υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 11. Το τελευταίο παρέχει υπολογιστικά σχήματα διαφορετικής πολυπλοκότητας, που περιλαμβάνουν από απλά μοντέλα διόδευσης τύπου Muskingum έως σύνθετα σχήματα επίλυσης των εξισώσεων Saint-Venant.

Τέλος, η προσομοίωση της ροής στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται με εφαρμογή ενός σχήματος πεπερασμένων διαφορών, που βασίζεται σε ένα διδιάστατο μοντέλο διάχυσης κύματος. Η επίγεια ροή αλληλεπιδρά με το ποτάμι, την ακόρεστη ζώνη καθώς και τον υδροφορέα.

## 2.3 Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

### 2.3.1 Γενικά

Σε πολύπλοκα υδροσυστήματα, στα οποία οι φυσικές διεργασίες επηρεάζονται σημαντικά από τις ανθρώπινες επεμβάσεις, απαιτείται μοντελοποίηση με ολιστική αντίληψη, ώστε να εξασφαλιστεί πιο πιστή αναπαράσταση των μηχανισμών και, συνεπώς, πιο ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων. Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ (Ευστρατιάδης κ.ά., 2005· *Efstratiadis et al.*, 2005) είναι ένα ολοκληρωμένο σχήμα προσομοίωσης, το οποίο υλοποιεί ένα συνδυαστικό (επιφανειακό και υπόγειο) υδρολογικό μοντέλο που αναπαριστά τις διεργασίες στο έδαφος και το υπέδαφος, σε συνδυασμό με ένα σχήμα διαχείρισης συστημικού προσανατολισμού, το οποίο εκτιμά τις πραγματικές απολήψεις του υδροσυστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων.

Ως προς τη χωρική κλίμακα αναπαράστασης των διεργασιών, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη προσέγγιση, εκτιμώντας το ισοζύγιο των υδατικών πόρων σε χαρακτηριστικά σημεία (κόμβοι) του υδρογραφικού δικτύου μιας λεκάνης απορροής. Ως προς τη χρονική κλίμακα, το μοντέλο χρησιμοποιεί μηνιαίο ή ημερήσιο χρονικό βήμα, ενώ σε μελλοντική του έκδοση θα είναι δυνατή η εφαρμογή ακόμα λεπτότερου βήματος, με την ενσωμάτωση διαδικασιών διόδευσης.

Το πρόγραμμα συνεργάζεται με σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας (ΣΓΠ), για την παραγωγή των δεδομένων εισόδου με γεωαναφορά (θεματικά επίπεδα). Επιπλέον, χρησιμοποιεί υδρολογικά και



διαχειριστικά δεδομένα εισόδου, για την προσαρμογή του μοντέλου στις παρατηρημένες συνθήκες του παρελθόντος (βαθμονόμηση παραμέτρων). Για το σκοπό αυτό, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί μια αυτόματη διαδικασία, που βασίζεται σε πολλαπλά κριτήρια σφάλματος και έναν εύρωστο αλγόριθμο ολικής βελτιστοποίησης.

Το μοντέλο και το σχετικό υπολογιστικό σύστημα, που αποτελούν βελτιωμένη εκδοχή προγενέστερων προσεγγίσεων (Nalbantis *et al.*, 2002· Rozos *et al.*, 2004· Ευστρατιάδης *κ.ά.*, 2004), έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ, στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «ΟΔΥΣΣΕΥΣ»<sup>1</sup>.

### 2.3.2 Θεμελιώδεις απαιτήσεις

Το υπολογιστικό σύστημα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιεί ένα σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία σε λεκάνες με διαπερατό υπόβαθρο, όπου υπάρχουν σημαντικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διεργασιών του εδάφους και του υπεδάφους, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικής βασικής απορροής που προέρχεται από την τροφοδοσία του υδροφορέα από ανάντη επιφανειακά νερά.

Στις θεμελιώδεις απαιτήσεις του μοντέλου εντάσσεται και η περιγραφή των αλληλεπιδράσεων των φυσικών διεργασιών με τις ανθρωπογενείς επεμβάσεις. Η προσέγγιση αυτή απουσιάζει από τα περισσότερα υδρολογικά μοντέλα, κάτι που περιορίζει την επιχειρησιακή τους εφαρμογή σε αδιατάρακτες, πρακτικά, λεκάνες. Αντίθετα, στον μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ, η αναπαράσταση των εν λόγω διεργασιών γίνεται λαμβάνοντας πλήρως υπόψη τη λειτουργία των τεχνικών έργων (διατάξεις εκτροπής, αρδευτικά δίκτυα, συστήματα γεωτρήσεων), κάτι που επιτρέπει τη διερεύνηση των επιπτώσεων στο υδατικό δυναμικό της λεκάνης έναντι συγκεκριμένων πολιτικών διαχείρισης (π.χ. επιπτώσεις στην επιφανειακή απορροή από την εντατική εκμετάλλευση των ανάντη γεωτρήσεων). Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η ασφαλής εκτίμηση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού, επιφανειακού και υπόγειου, σε καθορισμένα σημεία ελέγχου του υδροσυστήματος.

Στο μοντέλο επιχειρείται μια προσέγγιση φυσικής βάσης (δεδομένου ότι η σχηματοποίηση του συστήματος γίνεται με χρήση κατανεμημένης γεωγραφικής πληροφορίας), διατηρώντας, ωστόσο, μια μαθηματική δομή φειδωλή σε παραμέτρους. Αυτό επιτυγχάνεται με την εννοιολογική συσχέτιση των υδρολογικών διεργασιών με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, σε αντίθεση με τα συνήθη ημικατανεμημένα σχήματα που εφαρμόζουν διαφορετικές παραμέτρους για κάθε υπολεκάνη, ήτοι για χωρικές ενότητες με σαφή γεωγραφικά όρια, στο μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ η παραμετροποίηση γίνεται στις μονάδες υδρολογικής απόκρισης, ήτοι σε ακανόνιστες χωρικές ενότητες που προσδιορίζονται με βάση τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος.

Σε αντίθεση με τα περισσότερα κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης που απαιτούν πολύ μεγάλο όγκο γεωγραφικής πληροφορίας, οι απαιτήσεις του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ σε δεδομένα είναι όσο το δυνατό πιο περιορισμένες. Στην πράξη, η σχηματοποίηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας αποκλειστικά και μόνο το ψηφιακό μοντέλο της λεκάνης. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση της διαθέσιμης πληροφορίας, βελτιώνεται η γνώση όσον αφορά στα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη παραμετροποίηση του μοντέλου. Στους βασικούς στόχους εντάσσεται και η αξιοποίηση του συνόλου της διαθέσιμης υδρολογικής πληροφορίας, έτσι ώστε ακόμη και σποραδικές μετρήσεις ή και χονδροειδείς εκτιμήσεις των υδρολογικών μεγεθών να λαμβάνονται υπόψη στην εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου.

---

<sup>1</sup> Πληροφορίες για το έργο δίνονται στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://www.itia.ntua.gr/g/projinfo/118>, καθώς και στην ιστοσελίδα <http://www.odysseusproject.gr>

## 2.4 Συνιστώσες και δεδομένα εισόδου

Ως προς την αναπαράσταση του φυσικού συστήματος, η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διάφορα θεματικά επίπεδα, και συγκεκριμένα:

- το *επιφανειακό σύστημα*, που περιλαμβάνει το υδρογραφικό δίκτυο, τις υπολεκάνες ανάντη κάθε κόμβου του δικτύου και τις πηγές·
- τις *μονάδες υδρολογικής απόκρισης*, που είναι γεωγραφικές ενότητες με κοινά γεωλογικά, γεωμορφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά·
- το *υπόγειο σύστημα* (υδροφορέας) που αναπαρίσταται ως ένα σύστημα κυττάρων πολυγωνικού σχήματος, σε κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί μια εννοιολογική δεξαμενή αποθήκευσης του υπόγειου νερού·
- το *υδροσύστημα*, δηλαδή μια αναπαράσταση του σχήματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης (επιφανειακών και υπόγειων), που περιλαμβάνει τα υδραυλικά έργα (υδραγωγεία, έργα εκτροπής, ομάδες γεωτρήσεων) και τα σημεία ζήτησης (π.χ., αρδευτικοί κόμβοι).

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ χρησιμοποιεί γεωγραφικά, υδρολογικά και διαχειριστικά δεδομένα εισόδου. Συγκεκριμένα, σε μια ολοκληρωμένη εφαρμογή, ζητούνται οι ακόλουθες κατηγορίες δεδομένων:

- *Επίπεδα πρωτογενούς γεωγραφικής πληροφορίας*: ψηφιακό μοντέλο εδάφους, γεωλογία, κάλυψη γης, σταθμοί μέτρησης.
- *Συνιστώσες επιφανειακής υδρολογίας*: υδρογραφικό δίκτυο (κόμβοι και κλάδοι υδατορευμάτων), υπολεκάνες, μονάδες υδρολογικής απόκρισης.
- *Συνιστώσες υπόγειας υδρολογίας*: κύτταρα υδροφορέα, πηγές, γεωτρήσεις.
- *Συνιστώσες διαχείρισης υδατικών πόρων*: κόμβοι απόληξης, υδραγωγεία, ομάδες γεωτρήσεων, αρδευόμενες εκτάσεις, χρήσεις νερού, λειτουργικοί περιορισμοί υδροσυστήματος.
- *Χρονοσειρές*: επιφανειακή βροχόπτωση και δυνητική εξατμοδιαπνοή (ανά υπολεκάνη), υδατικές ανάγκες, χρονοσειρές ελέγχου (μετρημένες παροχές ποταμών και πηγών, παρατηρημένες στάθμες υδροφορέα).
- *Δεδομένα σεναρίου*: υπολογιστικές συνιστώσες διαδικασιών προσομοίωσης και βαθμονόμησης.

Τα δεδομένα εισόδου με γεωαναφορά παράγονται με την εφαρμογή τυποποιημένων αλγορίθμων, σε περιβάλλον ArcGIS. Το σύνολο των δεδομένων αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, και στη συνέχεια ανακτώνται από το κύριο πρόγραμμα του συστήματος ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

## 2.5 Μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας

Ως μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας νοείται το μαθηματικό σχήμα αναπαράστασης των μηχανισμών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε εξατμοδιαπνοή, βαθιά κατείδυση και απορροή. Κύριο ζητούμενο του μοντέλου είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής παροχής σε χαρακτηριστικές θέσεις του υδρογραφικού δικτύου, καθώς και της τροφοδοσίας (φόρτισης) των κυττάρων του υπόγειου υδροφορέα.

### 2.5.1 Σχηματοποίηση υδρογραφικού δικτύου

Όπως έχει αναφερθεί, το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ βασίζεται σε μια ημικατανεμημένη διακριτοποίηση της λεκάνης. Αυτό προϋποθέτει τη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, τον ορισμό των σημείων ελέγχου (κόμβοι) και τη χάραξη των υπολεκανών ανάντη κάθε κόμβου.

Ως υδρογραφικό δίκτυο νοείται το κύριο υδατόρευμα της λεκάνης καθώς και οι συμβάλλοντες κλάδοι σε αυτό. Η σχηματοποίηση του δικτύου γίνεται με τη βοήθεια συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας, χρησιμοποιώντας ως υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης και ορίζοντας κατάλληλο

όριο στη συνάρτηση συσσώρευσης της απορροής (flow accumulation). Όσο μικρότερο είναι το εν λόγω όριο, τόσο πυκνότερο είναι το δίκτυο που διαμορφώνεται. Το δίκτυο, που στη γενική περίπτωση είναι δένδροειδούς τύπου, ορίζεται μέσω των κόμβων, και πρέπει απαραίτητα να καταλήγει σε ένα τελικό σημείο, ήτοι την έξοδο της λεκάνης. Η διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων καλείται «τμήμα υδατορεύματος», με χαρακτηριστικά μεγέθη το μήκος, την τυπική διατομή και τον συντελεστή διήθησης,  $\lambda$ . Ο τελευταίος είναι αδιάστατη παράμετρος, που εκφράζει το ποσοστό της διερχόμενης παροχής που κατεισδύει προς τον υπόγειο υδροφόρα από τον πυθμένα και τα πρανή της διατομής.

Οι κόμβοι τοποθετούνται στην έξοδο της λεκάνης (όπου συγκεντρώνεται το σύνολο της απορροής), στα σημεία συμβολής των κλάδων καθώς και σε ενδιάμεσες θέσεις, στις οποίες ζητείται ο υπολογισμός της παροχής. Τέτοιες μπορεί να είναι θέσεις υδρομετρικών σταθμών, στις οποίες ελέγχεται η προσαρμογή των προσομοιωμένων παροχών στις μετρημένες, θέσεις πραγματοποίησης απολήψεων καθώς και θέσεις εισροής νερού (π.χ. κατάντη φραγμάτων). Ανάντη κάθε κόμβου μπορούν να συμβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου, ενώ κατάντη επιτρέπεται να ξεκινά ένας και μόνο κλάδος. Επιπλέον, οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου μπορούν να συνδέονται με απεριόριστο αριθμό υδραγωγείων.

Ανάντη των κόμβων, χαράσσονται οι υδροκρίτες, με τρόπο ώστε σε κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου να αντιστοιχεί μία και μόνο υπολεκάνη. Ανάντη των ακραίων κόμβων του δικτύου ορίζεται επίσης μία και μοναδική υπολεκάνη, η απορροή της οποίας θεωρείται ότι συγκεντρώνεται στον αντίστοιχο κόμβο, μέσω μικρών χειμάρρων που καταλήγουν σε αυτόν, χωρίς να σχηματίζουν κάποιο συγκεκριμένο υδατόρευμα.

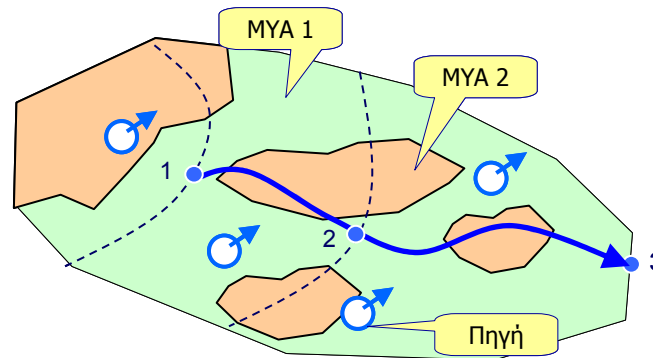
Οι χρονοσειρές εισόδου κάθε υπολεκάνης είναι η επιφανειακή βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή. Μέσω του μοντέλου προσομοίωσης, προκύπτουν η (κατανεμημένη) επιφανειακή απορροή κάθε υπολεκάνης, καθώς και η απορροή όλων των πηγών που ανήκουν στη συγκεκριμένη υπολεκάνη (βασική ή υπόγεια απορροή). Τα δύο μεγέθη θεωρείται ότι μεταφέρονται στον αμέσως κατάντη κόμβο, με τη μορφή σημειακής πλευρικής εισροής.

## 2.5.2 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

Η μονάδα υδρολογικής απόκρισης (MYA) αποτελεί θεμελιώδη έννοια της προσέγγισης που ακολουθείται. Ως τέτοια νοείται μια χωρική ενότητα της λεκάνης, με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή, δεν πρόκειται για μια αυστηρά οριοθετημένη περιοχή, αλλά ένα σύνολο από πολλά μικρά ανεξάρτητα τμήματα. Σε κάθε MYA, ο μηχανισμός γέννησης της απορροής θεωρείται ενιαίος, κάτι που εκφράζεται με τη χρήση κοινών παραμέτρων σε όλη την έκταση που καλύπτει η συγκεκριμένη μονάδα. Με τον τρόπο, η παραμετροποίηση των επιφανειακών υδρολογικών διεργασιών, αντί να γίνεται με βάση τις υπολεκάνες, όπως συνηθίζεται στα ημικατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα, γίνεται με βάση τις MYA, κάτι που αποτελεί πρακτική των πλέον καταξιωμένων κατανεμημένων μοντέλων, όπως το SWAT. Με άλλα λόγια, αντί μιας μοντελοποίησης τύπου «μαύρου κουτιού», που θα προέκυπτε εφόσον οι παράμετροι ορίζονταν με βάση γεωγραφικά όρια, ακολουθείται μια μοντελοποίηση φυσικής βάσης, στην οποία οι παράμετροι συνδέονται, έστω και εννοιολογικά, με χαρακτηριστικά μεγέθη του συστήματος που επηρεάζουν τις υδρολογικές διεργασίες.

Λόγω του κατανεμημένου χαρακτήρα της προσέγγισης, η σχηματοποίηση των MYA προϋποθέτει τη χρήση κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων σε περιβάλλον ArcGIS. Οι MYA ορίζονται ως ενώσεις (unions) μεταξύ θεματικών επιπέδων, που απεικονίζουν κατανεμημένη πληροφορία ταξινομημένη σε κατηγορίες, όπως η γεωλογία, η κάλυψη του εδάφους, οι κλίσεις που αναπτύσσονται, κλπ. Για παράδειγμα, αν διατίθεται ψηφιακά υπόβαθρα με  $n_A$  τύπους από το χαρακτηριστικό A και  $n_B$  τύπους από το χαρακτηριστικό B, τότε με την ένωση των δύο υποβάθρων προκύπτουν  $n_A \times n_B$  συνδυασμοί

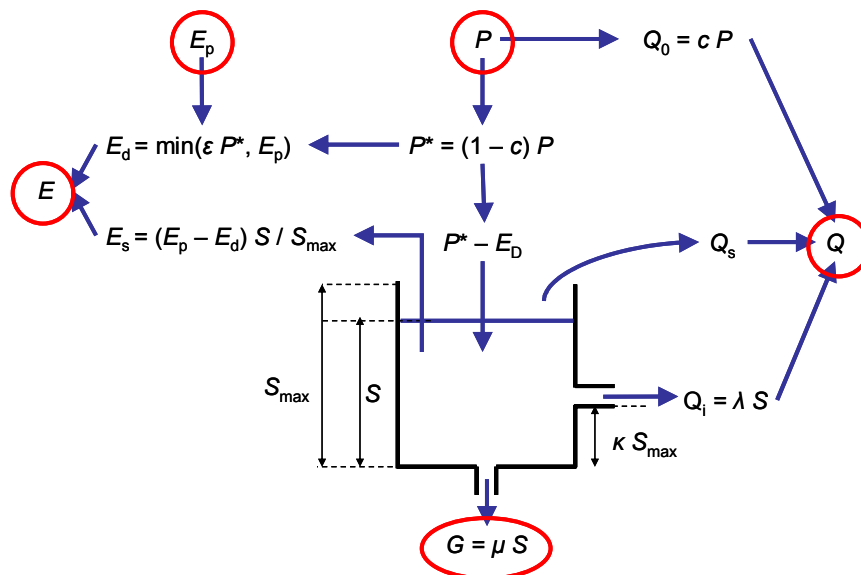
των δύο χαρακτηριστικών της λεκάνης, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί διαφορετική ΜΥΑ, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 2.2.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα σχηματοποίησης υδροσυστήματος που αποτελείται από τρεις υπολεκάνες και δύο μονάδες υδρολογικής απόκρισης.

### 2.5.3 Εννοιολογικό μοντέλο προσομοίωσης υδρολογικών διεργασιών εδάφους

Η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών σε ένα εδαφικό στοιχείο μοναδιαίας επιφάνειας πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας, κατάλληλου για χρονικές κλίμακες από ημερήσια έως μηνιαία. Το μοντέλο αποτελεί γενίκευση της κλασικής προσέγγισης του Thornthwaite, η οποία θεωρείται επαρκής μόνο για απλές υδρολογικές λεκάνες χειμαρρικής διαίτας, χωρίς αξιόλογη υπόγεια αποθήκευση (Dingman, 1994, pp. 299-301· Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 236-243). Η δομή του μοντέλου, οι υδρολογικές μεταβλητές και οι παράμετροι, απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση των διεργασιών του μοντέλου εδαφικής υγρασίας.

Η υδρολογική λειτουργία του εδαφικού στοιχείου εξομοιώνεται με τη λειτουργία μιας εννοιολογικής δεξαμενής συγκέντρωσης της εδαφικής υγρασίας, χωρητικότητας  $S_{max}$ . Σε κάθε χρονικό βήμα  $t$ , το απόθεμα της δεξαμενής αναπαριστά την αποθήκευση της εδαφικής υγρασίας,  $S_t$ . Στοιχεία εισόδου είναι η βροχόπτωση,  $P_t$ , και η δυνητική εξατμοδιαπνοή,  $E_{pt}$ . Το μοντέλο υπολογίζει τη μεταβολή της

υγρασίας στο εδαφικό στοιχείο, εκτιμώντας την πραγματική εξατμοδιαπνοή, την απορροή και την κατείδυση στον υπόγειο υδροφόρα.

Η συνολική απορροή  $Q_t$ , επιμερίζεται σε τρεις συνιστώσες:

- η άμεση απορροή,  $Q_{0t}$ , που εκφράζει την ποσότητα της βροχής που μετασχηματίζεται σε απορροή εντός του χρονικού βήματος (π.χ. απορροή που οφείλεται στην ύπαρξη αδιαπέρατων επιφανειών).
- η ροή λόγω κορεσμού (ταχεία απορροή),  $Q_{St}$ , που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται λόγω κορεσμού του εδάφους σε υγρασία.
- η υποδερμική ροή,  $Q_{it}$ , που εκφράζει την απορροή που πραγματοποιείται με χρονική υστέρηση.

Η λειτουργία του μοντέλου έχει ως εξής: Αρχικά, εκτιμάται η άμεση απορροή, ως ποσοστό  $c$  της βροχόπτωσης, ήτοι:

$$Q_{0t} = c P_t \quad (2.1)$$

Στη συνέχεια ελέγχεται αν η περίσσεια της βροχής  $P_t^* = (1 - c)P_t$  επαρκεί για την ικανοποίηση της ζήτησης για εξάτμιση (δυναμική εξατμοδιαπνοή). Στο μοντέλο επιβάλλεται ένα άνω όριο  $\varepsilon$ , που εκφράζει το μέγιστο ποσοστό της βροχόπτωσης που μπορεί να εξατμιστεί άμεσα. Συνεπώς, η εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{dt} = \min(\varepsilon P_t^*, E_{Pt}) \quad (2.2)$$

Αν δεν είναι δυνατή η ικανοποίηση της εν λόγω ζήτησης, τότε πραγματοποιείται εξάτμιση από την αποθηκευμένη εδαφική υγρασία, με ρυθμό ανάλογο του βαθμού κορεσμού του εδάφους, ήτοι:

$$E_{St} = \frac{E_{Pt} - E_{dt}}{S_{\max}} S_t = v_t S_t \quad (2.3)$$

Στη δεξαμενή θεωρούνται δύο οπές, μία οριζόντια, η οποία βρίσκεται σε ύψος  $\kappa S_{\max}$ , και μία κατακόρυφη. Μέσω μιας οριζόντιας οπής λαμβάνει χώρα η υποδερμική ροή, με ρυθμό ανάλογο της διαθέσιμης υγρασίας και ενός συντελεστή στείρευσης  $\lambda$ , δηλαδή  $Q_{it} = \lambda (S_t - \kappa S_{\max})$ . Από την άλλη, η κατακόρυφη οπή αναπαριστά τη φυσική διεργασία της κατείδυσης προς τον υπόγειο υδροφόρα. Όμοια προηγουμένως, αυτή θεωρείται ανάλογη της διαθέσιμης υγρασίας  $S_t$  κι ενός συντελεστή στείρευσης  $\mu$ , δηλαδή  $G_t = \mu S_t$ .

Το ισοζύγιο της εδαφικής υγρασίας στο μοναδιαίο εδαφικό στοιχείο περιγράφεται από μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης της μορφής:

$$\frac{dS_t}{dt} = -Q_{it} - G_t - E_{St} \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας τις αναλυτικές εκφράσεις των επιμέρους συνιστωσών της διαφορικής εξίσωσης, προκύπτει η τελική έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου της δεξαμενής:

$$\frac{dS_t}{dt} = -\lambda (S_t - \kappa S_{\max}) - \mu S_t - v_t S_t \quad (2.5)$$

Επιλύοντας την (2.5) σε κάθε βήμα  $t$ , εκτιμώνται η αποθήκευση εδαφικής υγρασίας, η υποδερμική απορροή, η εδαφική εξατμοδιαπνοή και η κατείδυση προς τον υπόγειο υδροφόρα.

Μια βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι η ροή λόγω κορεσμού  $Q_{St}$ , δηλαδή η υπερχειλίση της δεξαμενής, 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 υπόθεση αυτή επιτρέπει την παραγωγή πιο ρεαλιστικών αποκρίσεων της λεκάνης, οι οποίες είναι συνεπείς με την μεταβλητότητα της βροχόπτωσης.

Ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου είναι έξι και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τιμές τους συνδέονται με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος, οπότε διαφοροποιούνται για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης. Από τις παραμέτρους, η χωρητικότητα της δεξαμενής εκφράζεται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους (mm), οι παράμετροι  $c$ ,  $\varepsilon$  και  $\kappa$  είναι αδιάστατες, λαμβάνουν δηλαδή τιμές από 0 έως 1, ενώ οι συντελεστές στείρευσης  $\lambda$  και  $\mu$  έχουν μονάδες αντίστροφου χρόνου, με τιμές 0 έως  $1 / \Delta t$ , όπου  $\Delta t$  το χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

#### **2.5.4 Υπολογιστική διαδικασία**

Επειδή οι χρονοσειρές εισόδου διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη, ενώ οι παράμετροι του μοντέλου εδαφικής υγρασίας διαφοροποιούνται ανά μονάδα υδρολογικής απόκρισης, η προσομοίωση των διεργασιών γίνεται θεωρώντας μια σύνθετη γεωγραφική οντότητα, που προκύπτει από την ένωση των δύο θεματικών επιπέδων. Πρόκειται για τον συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης, που αποτελεί την ελάχιστη χωρική ενότητα του επιφανειακού συστήματος. Σε κάθε χρονικό βήμα, και για κάθε τέτοιο συνδυασμό, υπολογίζονται τα διάφορα υδρολογικά μεγέθη (επιφανειακή απορροή, πραγματική εξατμοδιαπνοή, κατείσδυση), που στη συνέχεια ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε υπολεκάνης. Στην επιφανειακή απορροή προστίθεται η εκροή όλων των πηγών της υπολεκάνης, δηλαδή η βασική ροή (έστω ότι είναι γνωστή από την επίλυση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας), και το σύνολο της απορροής μεταφέρεται ως εισροή στον κόμβο εξόδου. Από την εισροή αφαιρούνται οι απώλειες νερού λόγω διήθησης, όπως αυτές εκφράζονται μέσω του σχετικού συντελεστή του υδατορεύματος που διατρέχει τη συγκεκριμένη υπολεκάνη.

## **2.6 Μοντέλο υπόγειας υδρολογίας**

### **2.6.1 Σχηματοποίηση υδροφορέα**

Η προσομοίωση της υπόγειας κίνησης του νερού βασίζεται στην τεχνική των πολυκυτταρικών μοντέλων (Bear, 1979), την οποία συνδέει με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Rozos and Koutsoyiannis, 2005). Σύμφωνα με αυτή, το πεδίο ροής διακριτοποιείται με τη μορφή πολυγωνικών κυττάρων.

Η χάραξη των κυττάρων γίνεται με τρόπο ώστε οι ακμές τους να είναι περίπου παράλληλες προς τις «μέσες» ισοδυναμικές γραμμές. Με τον τρόπο αυτό, η διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιεζομετρία της περιοχής μελέτης λαμβάνεται υπόψη στη σχηματοποίηση του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας. Επιπλέον, το πολυγωνικό σχήμα των κυττάρων παρέχει ιδιαίτερη ευελιξία, καθώς επιτρέπει την περιγραφή υδροφορέων τυχαίας γεωμετρίας, σε αντίθεση με τα περισσότερα σχήματα επίλυσης, τα οποία επιβάλουν την εφαρμογή ορθογωνικού κανάβου, με τη θεώρηση κυρίων αξόνων διεύθυνσης της ροής. Το γεγονός αυτό, όχι μόνο απλοποιεί την υπολογιστική διαδικασία (αφού μειώνεται ο αριθμός των κυττάρων, και συνεπώς ο υπολογιστικός φόρτος) αλλά συμβάλλει στην καλύτερη εποπτεία του συστήματος, αφού η χάραξη των κυττάρων, και συνακόλουθα η παραμετροποίηση του συστήματος, μπορεί να γίνει με βάση τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους (π.χ. γεωλογία), που επηρεάζουν τις υπόγειες υδρολογικές διεργασίες.

Η τοπολογία του δικτύου ροής ορίζεται από τις γεωγραφικές συντεταγμένες του κέντρου βάρους των κυττάρων, το μήκος πραγματοποίησης της ροής μεταξύ των γειτονικών κυττάρων και το μήκος της κοινής τους ακμής. Οι διεργασίες κάθε κυττάρου αναπαρίστανται από εννοιολογικές δεξαμενές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού. Το δίκτυο των δεξαμενών μπορεί να θεωρηθεί ως το υδραυλικό ανάλογο της διακριτής αναπαράστασης του υδροφορέα. Χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε δεξαμενής

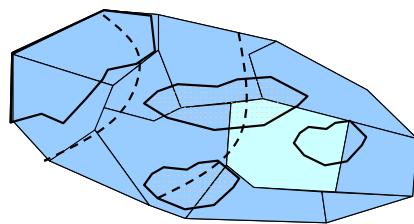
είναι το εμβαδόν της βάσης, η στάθμη της οροφής και του πυθμένα, καθώς και το ύψος νερού στην αρχή της προσομοίωσης (αρχική συνθήκη). Οι δεξαμενές τροφοδοτούνται από την κατείδυση των υπερκείμενων στρωμάτων, και η μεταβολή της στάθμης τους απεικονίζει τη μεταβολή της πιεζομετρίας στον υδροφόρο. Η ροή του νερού πραγματοποιείται από τις δεξαμενές υψηλότερης προς τις δεξαμενές χαμηλότερης στάθμης.

Η εκφόρτιση του υδροφόρου αναπαρίσταται με ειδικούς τύπους δεξαμενών, που αντιπροσωπεύουν είτε σημειακές εξόδους νερού στην επιφάνεια (πηγές) είτε περιοχές συγκέντρωσης του υπόγειου νερού που βρίσκονται εκτός της λεκάνης (π.χ., υποθαλάσσιες εκφορτίσεις). Και στις δύο περιπτώσεις θεωρούνται εικονικές δεξαμενές πολύ μεγάλης βάσης, έτσι ώστε η στάθμη τους να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Οι εν λόγω δεξαμενές δεν δέχονται κατείδυση και δεν τροφοδοτούν γειτονικές τους δεξαμενές.

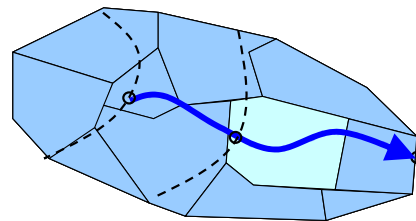
## 2.6.2 Συνιστώσες φόρτισης δεξαμενών υπόγειου νερού

Οι δεξαμενές υπόγειου νερού δέχονται τριών ειδών φορτίσεις:

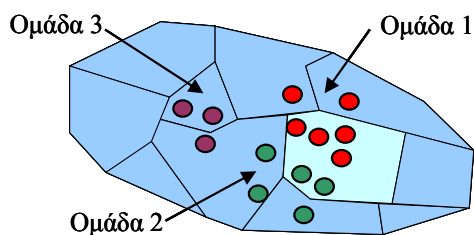
- την επιφανειακή κατείδυση της εδαφικής υγρασίας·
- τη γραμμική διήθηση νερού κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου·
- τη σημειακή άντληση νερού από τις γεωτρήσεις του υδροσυστήματος.



(1) Κατείδυση (διαφορετική από κάθε συνδυασμό λεκάνης – ΜΥΑ)



(2) Διήθηση (διαφορετική από κάθε τμήμα υδατορεύματος)



(3) Άντληση (διαφορετική από κάθε ομάδα γεωτρήσεων, ομοιόμορφα κατανεμημένη στις γεωτρήσεις της ίδιας ομάδας)

Σχήμα 2.4: Συνιστώσες φόρτισης υδροφόρου και αντίστοιχα θεματικά επίπεδα.

Προφανώς, οι δύο πρώτες συνιστώσες αντιπροσωπεύουν εισροή νερού στο υπόγειο σύστημα, που οφείλεται σε φυσική τροφοδοσία του υδροφόρου από τη βροχόπτωση, ενώ η τρίτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει εκροή (απόληψη) νερού, που οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα. Για τον υπολογισμό των τριών τύπων φορτίσεων σε κάθε δεξαμενή, απαιτείται η διαμόρφωση αντίστοιχων επιπέδων γεωγραφικής πληροφορίας, και συγκεκριμένα:

- της ένωσης κυττάρων υδροφόρου – υπολεκανών – μονάδων υδρολογικής απόκρισης·
- της τομής κυττάρων υδροφόρου – τμημάτων υδατορευμάτων·
- της ένωσης κυττάρων υδροφόρου – γεωτρήσεων.

Η κατανεμημένη κατείδυση από κάθε συνδυασμό υπολεκάνης – μονάδας υδρολογικής απόκρισης ολοκληρώνεται στην επιφάνεια των κυττάρων. Οι απώλειες λόγω διήθησης στα υδατορεύματα

επιμερίζονται στα υποκείμενα κύτταρα, αναλογικά με το μήκος ανάπτυξης κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου. Τέλος, οι απολήψεις από τις γεωτρήσεις, όπως εκτιμώνται από το μοντέλο διαχείρισης, αθροίζονται στην επιφάνεια κάθε κυττάρου (βλ. Σχήμα 2.4).

### 2.6.3 Σχήμα επίλυσης

Στο διακριτό μοντέλο του υδροφορέα που διαμορφώνεται, ισχύουν οι εξισώσεις συνέχειας σε κάθε πεπερασμένο όγκο, δηλαδή σε δεξαμενή, καθώς και οι εξισώσεις ροής, που αναφέρονται στην ανταλλαγή νερού μεταξύ των γειτονικών δεξαμενών.

Η εξίσωση συνέχειας σε κάθε δεξαμενή υπόγειου νερού διατυπώνεται ως εξής:

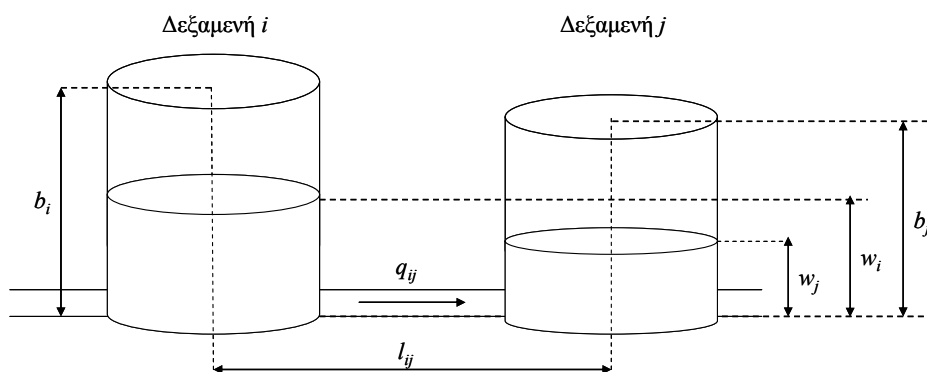
$$\Delta w_i = g_i + \sum_{j=1}^n q_{ij} \quad (2.6)$$

όπου  $\Delta w_i$  η μεταβολή της στάθμης στη δεξαμενή  $i$ ,  $g_i$  το άθροισμα των φορτίσεων και  $q_{ij}$  η μεταφορά νερού από ή προς τη δεξαμενή  $j$  (όλα τα μεγέθη εκφράζονται ως ισοδύναμα ύψη).

Η στάθμη  $w_i$  αποτελεί τη μεταβλητή κατάστασης του συστήματος, και αντιπροσωπεύει μια μέση κατάσταση του υδροφορέα στην περιοχή του κυττάρου. Σε συνθήκες φρεάτιου υδροφορέα, η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ μιας κατώτατης και μιας ανώτατης τιμής, την οποία καθορίζει ο χρήστης κατά τη σχηματοποίηση. Εφόσον η στάθμη ξεπεράσει την οροφή της δεξαμενής, τότε ο υδροφορέας θεωρείται περιορισμένος. Συνεπώς, το υδραυλικό φορτίο  $h_i$  της δεξαμενής  $i$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$h_i = \begin{cases} w_i & w_i \leq b_i \\ b_i + (w_i - b_i) \theta & w_i > b_i \end{cases} \quad (2.7)$$

όπου  $\theta$  είναι ο λόγος της ειδικής απόδοσης προς την αποθηκευτικότητα υπό συνθήκες πίεσης και  $b_i$  η διαφορά μεταξύ της ανώτατης και κατώτατης στάθμης, που εκφράζει το πάχος του υδροφορέα στην περιοχή του κυττάρου. Ο άνω κλάδος στην σχέση (2.7) αντιστοιχεί σε φρεάτιες συνθήκες, ενώ ο κάτω κλάδος αντιστοιχεί σε συνθήκες πίεσης.



Σχήμα 2.5: Σχηματική παράσταση μοντέλου προσομοίωσης υπόγειων υδρολογικών διεργασιών.

Για δεδομένη στάθμη  $w_i$ , ο αντίστοιχος αποθηκευμένος όγκος νερού υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_i = p_i w_i F_i \quad (2.8)$$

όπου  $p_i$  το πορώδες του κυττάρου, που είναι αδιάστατη παράμετρος του μοντέλου, και  $F_i$  το εμβαδόν του κυττάρου. Η μεταβλητότητα της στάθμης της δεξαμενής εξαρτάται από την τιμή του πορώδους. Αν αυτή 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.



Εκτός από το πορώδες, μία ακόμη χαρακτηριστική ιδιότητα της κάθε δεξαμενής, που επίσης αποτελεί παράμετρο του μοντέλου, είναι η υδραυλική αγωγιμότητα, που συμβολίζεται  $k_i$ , και έχει μονάδες ταχύτητας.

Η κίνηση του νερού θεωρείται ότι πραγματοποιείται μέσω ενός δικτύου αγωγών. Το μήκος  $l_{ij}$  κάθε αγωγού ισούται με την απόσταση των κέντρων βάρους των δεξαμενών  $i$  και  $j$  που αυτός συνδέει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Το εμβαδόν της διατομής  $A_{ij}$  ισούται με την κοινή κορεσμένη επιφάνεια των δεξαμενών. Η τελευταία εξαρτάται από το μήκος της κοινής ακμής, το υψόμετρο της βάσης και την επίκαιρη στάθμη των δεξαμενών. Η υδραυλική αγωγιμότητα  $k_{ij}$  του αγωγού προκύπτει με συνδυασμό (π.χ. αριθμητικός, γεωμετρικός μέσος, κλπ.) των αγωγιμοτήτων των δεξαμενών,  $k_i$  και  $k_j$ .

Έστω ότι η ροή πραγματοποιείται από τη δεξαμενή  $i$  προς τη δεξαμενή  $j$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η παροχή  $q_{ij}$  υπολογίζεται από την εξίσωση Darcy, ήτοι:

$$q_{ij} = k_{ij} A_{ij} \frac{h_i - h_j}{l_{ij}} \quad (2.9)$$

όπου τα υδραυλικά φορτία  $h_i$  και  $h_j$  υπολογίζονται από την εξίσωση (2.7).

Ενσωματώνοντας τις εξισώσεις ροής στις εξισώσεις συνέχειας, και αναδιατυπώνοντας τις τελευταίες ως προς τα υδραυλικά φορτία, προκύπτει ένα γραμμικό σύστημα  $n$  εξισώσεων με  $n$  αγνώστους (όπου  $n$  το πλήθος των δεξαμενών). Με γνωστά πλέον τα υδραυλικά φορτία, υπολογίζονται οι τιμές της στάθμης σε κάθε δεξαμενή, μέσω της (2.7), καθώς και οι τιμές των παροχών, μέσω της (2.9), για κάθε δυνατή διαδρομή του υπόγειου νερού.

## 2.7 Μοντέλο κατανομής υδατικών πόρων

### 2.7.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Όπως εξηγείται στο εδάφιο 2.5.4, το μοντέλο επιφανειακής υδρολογίας υπολογίζει σε κάθε χρονικό βήμα την πλευρική εισροή σε κάθε κόμβο του υδρογραφικού δικτύου, ως άθροισμα της επιφανειακής και υπόγειας (πηγαίας) απορροής. Δεδομένου ότι κατά μήκος του δικτύου πραγματοποιούνται απώλειες από φυσικά αίτια (διηθήσεις), απολήψεις αλλά και εισροές λόγω π.χ. της λειτουργίας ενός έργου εκτροπής νερού από γειτονική λεκάνη, απαιτείται η διατύπωση και επίλυση των εξισώσεων συνέχειας σε όλους τους κόμβους, για την κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου και τον υπολογισμό των παροχών στα υδατορεύματα.

Επιπλέον, σε διαταραγμένα συστήματα, είναι προφανές ότι η πραγματοποίηση απολήψεων από επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους επηρεάζει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης. Κατά κανόνα όμως, είναι δύσκολο να βρεθούν ιστορικά στοιχεία (μετρήσεις) όσον αφορά στις απολήψεις, ενώ αντίθετα είναι δυνατό να γίνουν εκτιμήσεις σχετικά με τις υδατικές ανάγκες. Επιπλέον, όταν μελετάται η μελλοντική κατάσταση της λεκάνης, κάτι που προϋποθέτει ότι το υδρολογικό μοντέλο έχει βαθμονομηθεί και λειτουργεί υπό μορφή πρόγνωσης, θεωρούνται δεδομένα τα χαρακτηριστικά του υδροσυστήματος και οι υδατικές ανάγκες και ζητείται η εκτίμηση των πραγματικών απολήψεων.

Εφόσον μάλιστα προκύπτουν αντικρουόμενες ανάγκες σε συνθήκες περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού, καθώς και εναλλακτικοί τρόποι ικανοποίησης των αναγκών, με διαφοροποίηση του σχετικού κόστους, τότε τίθεται ένα επιπλέον ζήτημα, που έχει σχέση με τον εντοπισμό της πλέον πρόσφορης πολιτικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της λεκάνης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στο πρόγραμμα ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ υλοποιήθηκε η δυνατότητα περιγραφής, εκτός του φυσικού συστήματος, και των έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της

λεκάνης. Στο μοντέλο προσομοίωσης, ενσωματώθηκε ένα σχήμα κατανομής των υδατικών πόρων που, για δεδομένες σημειακές εισροές στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου, δεδομένες χρήσεις νερού και προτεραιότητες των εν λόγω χρήσεων, δεδομένους περιορισμούς στη λειτουργία του υδροσυστήματος, και δεδομένα χαρακτηριστικά των υδραυλικών έργων, υπολογίζει τις μεταβλητές του υδροσυστήματος (παροχές, απολήψεις), με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι φυσικοί και λειτουργικοί περιορισμοί και να ελαχιστοποιείται το κόστος των απολήψεων.

### 2.7.2 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

Το υδροσύστημα, εκτός από το υδρογραφικό δίκτυο, περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- *κόμβοι*, δηλαδή θέσεις προσφοράς (π.χ. εκροές ταμιευτήρα) ή ζήτησης νερού ή σημεία αλλαγής της γεωμετρίας και των χαρακτηριστικών μεγεθών του δικτύου·
- *ομάδες γεωτρήσεων*, δηλαδή συστήματα έργων υδροληψίας από υπόγειους υδατικούς πόρους, δεδομένης αντλητικής ικανότητας·
- *υδραγωγεία*, δηλαδή στοιχεία μεταφοράς νερού που συνδέουν ζεύγη κόμβων και αναφέρονται σε ανοιχτούς ή κλειστούς αγωγούς, δεδομένης παροχετευτικότητας·
- *στόχοι*, που εκφράζουν τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος.

Ειδική κατηγορία κόμβων είναι οι *αρδευτικοί*, χαρακτηριστικό των οποίων είναι η δυνατότητα επιστροφής μέρος της αρδευόμενης ποσότητας στο σύστημα, μέσω του αποστραγγιστικού δικτύου. Οι ομάδες γεωτρήσεων είναι εννοιολογικές οντότητες, που αντιπροσωπεύουν συστήματα μεμονωμένων γεωτρήσεων, στη λογική της αδρής σχηματοποίησης ενός διαχειριστικού μοντέλου. Μέσω των υδραγωγείων, υλοποιείται η σύνδεση του τεχνητού με το φυσικό σύστημα, τόσο με τη μορφή απόληψης από επιφανειακά και υπόγεια νερά όσο και με τη μορφή τεχνητής τροφοδοσίας των επιφανειακών αποδεκτών. Τόσο στα υδραγωγεία όσο και στις ομάδες γεωτρήσεων, εισάγεται ένα μοναδιαίο κόστος λειτουργίας (χρηματικές μονάδες ανά μονάδα διερχόμενου όγκου), που λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία υπολογισμού των απολήψεων. Τέλος, οι στόχοι, που ορίζονται κατά σειρά προτεραιότητας και οι τιμές τους μπορούν να διαφοροποιούνται σε κάθε χρονικό βήμα, εντάσσονται σε δύο κατηγορίες, καταναλωτικοί και μη καταναλωτικοί. Οι πρώτοι αναφέρονται στη ζήτηση νερού για ύδρευση ή άρδευση, ενώ οι δεύτεροι αναφέρονται στη διατήρηση της παροχής στα υδραγωγεία ή τα υδατορεύματα μεταξύ ενός επιθυμητού εύρους.

### 2.7.3 Δικτυακή διατύπωση προβλήματος

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται η διαμόρφωση ενός υποθετικού υδροσυστήματος, που περιλαμβάνει τρεις υπολεκάνες, τρεις ομάδες γεωτρήσεων και τέσσερα υδραγωγεία, στο οποίο εισάγονται δύο στόχοι ζήτησης νερού. Ο πρώτος σε προτεραιότητα στόχος μπορεί να ικανοποιηθεί είτε με απευθείας απόληψη επιφανειακών νερών από τον ποταμό (συνεπώς χωρίς κόστος), είτε με άντληση νερού από το παρακείμενο σύστημα γεωτρήσεων. Ο δεύτερος στόχος μπορεί να ικανοποιηθεί με άντληση νερού, από τις υπόλοιπες ομάδες γεωτρήσεων. Έστω ότι σε κάποιο χρονικό βήμα, από την επίλυση του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας είναι γνωστές οι πλευρικές εισροές στους τρεις κόμβους του υδρογραφικού δικτύου,  $Q_1$ ,  $Q_2$  και  $Q_3$ , αντίστοιχα. Στο ανάντη τμήμα υδατορεύματος, είναι επίσης γνωστός ο συντελεστής διήθησης  $\lambda$ , που θεωρείται παράμετρος του μοντέλου. Επιπλέον, είναι γνωστές οι τιμές των στόχων απόληψης  $D_1$  και  $D_2$ , αντίστοιχα, οι παροχετευτικότητες και τα μοναδιαία κόστη των υδραγωγείων, καθώς και η αντλητική ικανότητα και τα μοναδιαία κόστη των ομάδων γεωτρήσεων.

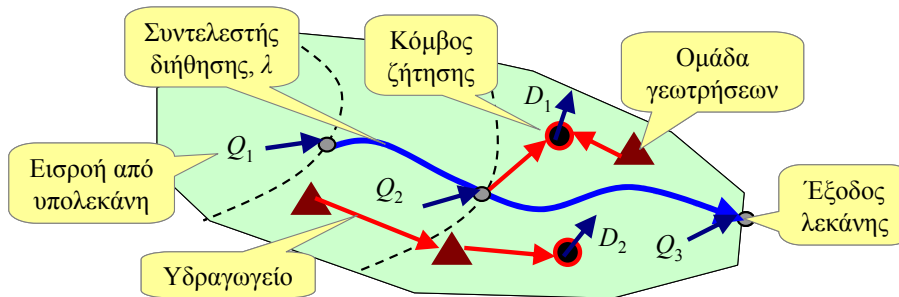
Τα άγνωστα μεγέθη του προβλήματος είναι οι μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου, δηλαδή:

- οι παροχές στους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου και στα υδραγωγεία·
- οι απολήψεις από τους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου και τις ομάδες γεωτρήσεων·

- οι απώλειες κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου λόγω διήθησης.

Ζητούμενο είναι η εύρεση των παραπάνω μεγεθών, με τρόπο ώστε:

- να ικανοποιείται το σύνολο των φυσικών περιορισμών του συστήματος, δηλαδή οι εξισώσεις συνέχειας σε όλους τους κόμβους
- να ικανοποιούνται, εφόσον είναι εφικτό, οι στόχοι και λοιποί λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος, με την επιθυμητή σειρά προτεραιότητας
- να ελαχιστοποιείται το κόστος λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή το κόστος άντλησης και μεταφοράς νερού.



Σχήμα 2.6: Σχηματική παράσταση ενός υποθετικού υδροσυστήματος.

Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικά ως ένα μοντέλο δικτυακού προγραμματισμού, μετασχηματίζοντας τις συνιστώσες του υδροσυστήματος σε συνιστώσες ενός διγράφου, δηλαδή ένα σύνολο από κόμβους και κλάδους. Οι κόμβοι είναι τα μοναδικά σημεία στα οποία πραγματοποιείται προσφορά ή κατανάλωση νερού, ενώ οι κλάδοι, σε κάθε έναν από τους οποίους αντιστοιχεί μία και μοναδική άγνωστη μεταβλητή, αντιπροσωπεύουν πραγματικές ή εικονικές διαδρομές νερού. Η κατανομή των διαθέσιμων υδατικών πόρων στις επιμέρους συνιστώσες του συστήματος διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα γραμμικής βελτιστοποίησης, που σε μορφή μητρώων γράφεται ως:

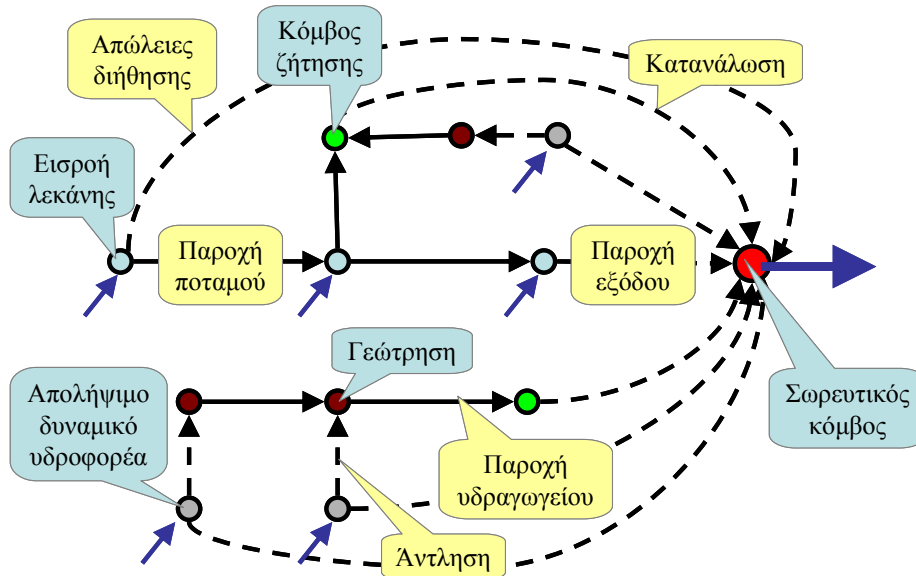
$$\begin{aligned} & \text{minimise } f(\mathbf{x}) = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ & \text{έτσι ώστε } \mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{y} \\ & \mathbf{0} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{aligned} \quad (2.10)$$

όπου  $\mathbf{x}$  το διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου, δηλαδή των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου,  $\mathbf{c}$  το διάνυσμα των τιμών μοναδιαίου κόστους,  $\mathbf{A}$  το λεγόμενο *μητρώο πρόσπτωσης*, που περιγράφει την τοπολογία του διγράφου,  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα προσφοράς και ζήτησης νερού,  $\mathbf{0}$  το μηδενικό διάνυσμα, και  $\mathbf{u}$  το διάνυσμα των τιμών μεταφορικής ικανότητας των κλάδων. Με τον ορισμό κατάλληλων τιμών των διανυσμάτων  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{y}$  και  $\mathbf{u}$ , η επίλυση μπορεί να γίνει με τυποποιημένους αλγόριθμους (π.χ., μέθοδος simplex), που χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ταχύτητα υπολογισμών<sup>1</sup>.

Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται ο μετασχηματισμός του υποθετικού υδροσυστήματος του παραδείγματος σε μοντέλο διγράφου. Με συνεχή γραμμή απεικονίζονται οι κλάδοι που εκφράζουν πραγματικές διαδρομές νερού (τμήματα υδατορευμάτων και υδραγωγεία), οι οποίοι διατηρούν την τοπολογία και

<sup>1</sup> Ο αλγόριθμος simplex που χρησιμοποιείται ([www.solver.com](http://www.solver.com)) είναι ειδικά σχεδιασμένος ώστε να χειρίζεται αραιά μητρώα, δηλαδή μητρώα με μεγάλο ποσοστό μηδενικών στοιχείων, γεγονός που επιταχύνει σημαντικά την υπολογιστική διαδικασία. Σημειώνεται ότι σε ένα τυπικό δίκτυο υδραγωγείων χαρακτηρίζεται από αρκετά απλή δομή, καθώς σπανίζουν οι πολύπλοκες διακλαδώσεις, που θα είχαν ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση μητρώων πρόσπτωσης με αρκετά μη μηδενικά στοιχεία.

τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (παροχευτικότητα και κόστος). Στο μοντέλο, εισάγονται και εικονικοί κλάδοι, που «μεταφέρουν» τις απολήψεις, τις απώλειες λόγω διήθησης και το υπολειπόμενο (μετά την πραγματοποίηση των αντλήσεων) απολήψιμο δυναμικό του υδροφορέα, σε έναν εικονικό σωρευτικό κόμβο, η εκροή του οποίου ισούται με το σύνολο της φυσικής προσφοράς νερού στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα.



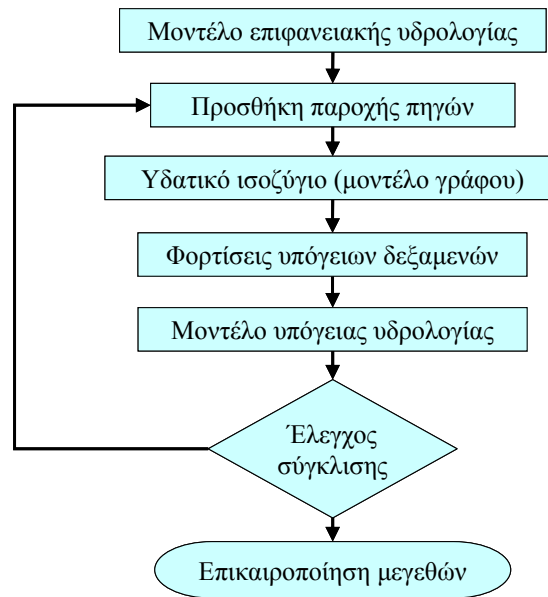
Σχήμα 2.7: Παράδειγμα μετασχηματισμού των συνιστωσών του υποθετικού υδροσυστήματος σε συνιστώσες του μοντέλου διγράφου.

Γενικά, για κάθε λειτουργικό περιορισμό εισάγεται ένας εικονικός κλάδος, το μοναδιαίο κόστος του οποίου εξαρτάται από τη σειρά προτεραιότητας του αντίστοιχου στόχου. Ειδικότερα, στην περίπτωση στόχων απόληψης και περιορισμών ελάχιστης παροχής, το κόστος είναι αρνητικό ώστε να υποχρεώσει την μεταφορά νερού. Αντίθετα, στην περίπτωση περιορισμών μέγιστης παροχής, το κόστος είναι θετικό ώστε να επιβάλει ποινή στην παραβίαση του εν λόγω περιορισμού. Τα ιδεατά αυτά κόστη είναι, κατ' απόλυτη τιμή, μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερα από τα πραγματικά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται κατά προτεραιότητα η ικανοποίηση των περιορισμών έναντι της ελαχιστοποίησης του κόστους μεταφοράς.

Η διαδικασία μαθηματικής αναπαράστασης ενός συστήματος υδατικών πόρων σε μοντέλο διγράφου, σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης της διαχείρισης, περιγράφεται αναλυτικά από τους *Καραβοκυρό κ.ά.* (2004), *Efstratiadis et al.* (2004) και *Koutsoyiannis et al.* (2002).

## 2.8 Σύνοψη διαδικασίας προσομοίωσης

Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2.8 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης σε ένα χρονικό βήμα, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες: Αρχικά, γίνεται εφαρμογή του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας, οι παράμετροι του οποίου διαφοροποιούνται για κάθε μονάδα υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ). Είσοδος του μοντέλου είναι η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή (που είναι διαφορετικές για κάθε υπολεκάνη), ενώ έξοδοί του είναι ο επιμερισμός της βροχόπτωσης σε πραγματική εξατμοδιαπνοή, επιφανειακή απορροή, κατείσδυση προς τον υπόγειο υδροφόρα και αποθήκευση υγρασίας, οι τιμές των οποίων διαφοροποιούνται για κάθε συνδυασμό υπολεκανών και ΜΥΑ. Στη συνέχεια, η κατανομημένη απορροή ολοκληρώνεται στην έκταση κάθε υπολεκάνης και μεταφέρεται, ως συγκεντρωμένη (πλευρική) παροχή, στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου προσομοίωσης του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Στους κόμβους του υδρογραφικού δικτύου συγκεντρώνεται, επιπλέον, η παροχή των πηγών κάθε υπολεκάνης. Στο σημείο αυτό προκύπτει η ανάγκη επαναληπτικών κύκλων, δεδομένου ότι η παροχή επηρεάζεται από τις ανάντη αντλήσεις, που με τη σειρά τους πραγματοποιούνται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα επαρκούς παροχής στα ποτάμια. Ως αρχική εκτίμηση, θεωρείται η παροχή των πηγών του προηγούμενου χρονικού βήματος, διαφορετικά θεωρείται η παροχή που προκύπτει από την επίλυση του μοντέλου υπόγειων νερών. Με γνωστή, πλέον, τη συνολική απορροή (επιφανειακή και πηγαία), είναι γνωστή και η διαθεσιμότητα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών πόρων.

Οι συγκεντρωμένες παροχές στους κόμβους μεταφέρονται μέσω του υδρογραφικού δικτύου έως την έξοδο της λεκάνης, ενώ ενδιάμεσα πραγματοποιούνται απολήψεις μέσω των υδραγωγείων και των γεωτρήσεων. Οι παραπάνω διεργασίες διατυπώνονται ως ένα μοντέλο δικτυακού γραμμικού προγραμματισμού. Το εν λόγω μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη μια προκαθορισμένη προτεραιότητα των υδατικών αναγκών και διαχειριστικών απαιτήσεων του συστήματος, καθώς και τα πραγματικά κόστη μεταφοράς του νερού, υπολογίζει: (α) τις ροές στα ποτάμια και υδραγωγεία, (β) των απώλειες λόγω διήθησης, και (γ) τις απολήψεις από τους κόμβους και τις γεωτρήσεις. Η επίλυση εξασφαλίζει την τήρηση των φυσικών περιορισμών του συστήματος (εξισώσεις συνέχειας, παροχεταιυκτικότητες υδραγωγείων, αντλητική ικανότητα γεωτρήσεων), την ικανοποίηση των διαχειριστικών στόχων και την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς του νερού.

Η φόρτιση του υδροφορέα, κατανεμημένη στα επιμέρους κύτταρα, υπολογίζεται αθροίζοντας την τροφοδοσία λόγω κατείσδυσης και διήθησης και αφαιρώντας τις αντλήσεις. Στη συνέχεια, επιλύεται, με αριθμητικές μεθόδους, το πρόβλημα κίνησης του υπόγειου νερού, με εφαρμογή ενός αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων όγκων, στο διακριτοποιημένο πεδίο ροής. Έξοδος του μοντέλου είναι η στάθμη νερού στις υπόγειες δεξαμενές, η παροχή των πηγών και οι εκροές εκτός υδροφορέα (π.χ. απώλειες προς τη θάλασσα ή προς γειτονικές λεκάνες).

Αν η νέα εκτίμηση της παροχής των πηγών διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την προηγούμενη, τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία, όσον αφορά στα μοντέλα διαχείρισης και υπόγειας υδρολογίας, μέχρι η απόκλιση να γίνει μικρότερη από κάποια ανοχή. Συνήθως, για τη σταθεροποίηση της παροχής των πηγών, επαρκεί ένας και μόνο επαναληπτικός κύκλος.

## 2.9 Εκτίμηση παραμέτρων

### 2.9.1 Διατύπωση προβλήματος

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα μη γραμμικής βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned} & \text{minimise } f(\boldsymbol{\theta}) \\ & \boldsymbol{\theta}^{\min} \leq \boldsymbol{\theta} \leq \boldsymbol{\theta}^{\max} \end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου  $f$  ένα βαθμωτό μέτρο σφάλματος (αντικειμενική συνάρτηση),  $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  το διάνυσμα των παραμέτρων,  $n$  η διάσταση του προβλήματος (πλήθος παραμέτρων), και  $\boldsymbol{\theta}^{\min}$ ,  $\boldsymbol{\theta}^{\max}$  τα όρια διακύμανσης των παραμέτρων (εφικτός χώρος).

Το πρόγραμμα επιτρέπει την επιλογή των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων και τη διατύπωση μιας σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης που περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα μέτρα σφάλματος, ώστε να αξιοποιηθεί όλη η διαθέσιμη πληροφορία που υπάρχει σχετικά με την απόκριση του μοντέλου. Η προσέγγιση αυτή είναι σύμφωνη με τη διεθνή πρακτική, που θεωρεί ότι η ενσωμάτωση πολλαπλών μέτρων προσαρμογής, τα οποία αναφέρονται σε μία ή περισσότερες μετρημένες αποκρίσεις του μοντέλου, επιτρέπει τη μείωση των αβεβαιοτήτων που διέπουν τη λειτουργία του, με σκοπό τη διαμόρφωση πιο ευσταθών σχημάτων (Gupta et al., 1998). Τα μέτρα σφάλματος σταθμίζονται σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, με την επιλογή κατάλληλων συντελεστών βάρους.

### 2.9.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου, χρησιμοποιείται ο εξελικτικός αλγόριθμος ανόπτησης-απλόκου, που είναι μια πιθανοτική ευρετική τεχνική ολικής βελτιστοποίησης, η οποία αναπτύχθηκε για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης υδατικών πόρων (Ευστρατιάδης, 2001· Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002· Rozos et al., 2004).

Η διαδικασία αναζήτησης χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό σημείων, τα οποία παράγονται τυχαία μέσα στον εφικτό χώρο και στη συνέχεια εξελίσσονται, με εφαρμογή ενός πρωτότυπου σχήματος προσομοιωμένης ανόπτησης – κατερχόμενου απλόκου. Η *προσομοιωμένη ανόπτηση* (simulated annealing) είναι μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, που βασίζεται στις αρχές της ομώνυμης θερμοδυναμικής διεργασίας, εισάγοντας μια παράμετρο ελέγχου της τυχαιότητας (θερμοκρασία) και έναν κανόνα αποδοχής ή όχι κινήσεων που χειροτερεύουν, αντί να βελτιώνουν, την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (Kirkpatrick et al., 1983). Από την άλλη πλευρά, η τεχνική του *κατερχόμενου απλόκου* (downhill simplex) είναι μια κλασική μέθοδος αναζήτησης, η οποία βασίζεται σε ένα γεωμετρικό ανάλογο της κλίσης, χρησιμοποιώντας  $n + 1$  σημεία στο  $n$ -διάστατο χώρο. Εισάγοντας κατάλληλους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, αποδεικνύεται ότι το άπλοκο συγκλίνει προς το κοντινότερο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης (Nelder and Mead, 1965).

Στον εξελικτικό αλγόριθμο ανόπτησης-απλόκου, σε κάθε επαναληπτικό κύκλο, επιλέγονται μέσω τυχαίας δειγματοληψίας  $n + 1$  μέλη του πληθυσμού, που συνιστούν τις κορυφές του απλόκου. Το άπλοκο ελίσσεται στον χώρο, μετασχηματιζόμενο βάσει ενός πλέγματος ντετερμινιστικών και πιθανοτικών κανόνων. Ο βαθμός τυχαιότητας στις κινήσεις του απλόκου, άρα και στην εξέλιξη του πληθυσμού, ελέγχεται μέσω της θερμοκρασίας του συστήματος, η οποία ρυθμίζεται αυτόματα έτσι ώστε στα αρχικά στάδια να επιτρέπει μεγάλα βήματα προς όλες τις κατευθύνσεις, ώστε να διερευνήσει όσο το δυνατό περισσότερες περιοχές έλξης ακροτάτων, ενώ στα τελικά στάδια να επικεντρώνει την αναζήτηση γύρω από την περιοχή του ολικού ακροτάτου.

## 3 Περιοχή μελέτης

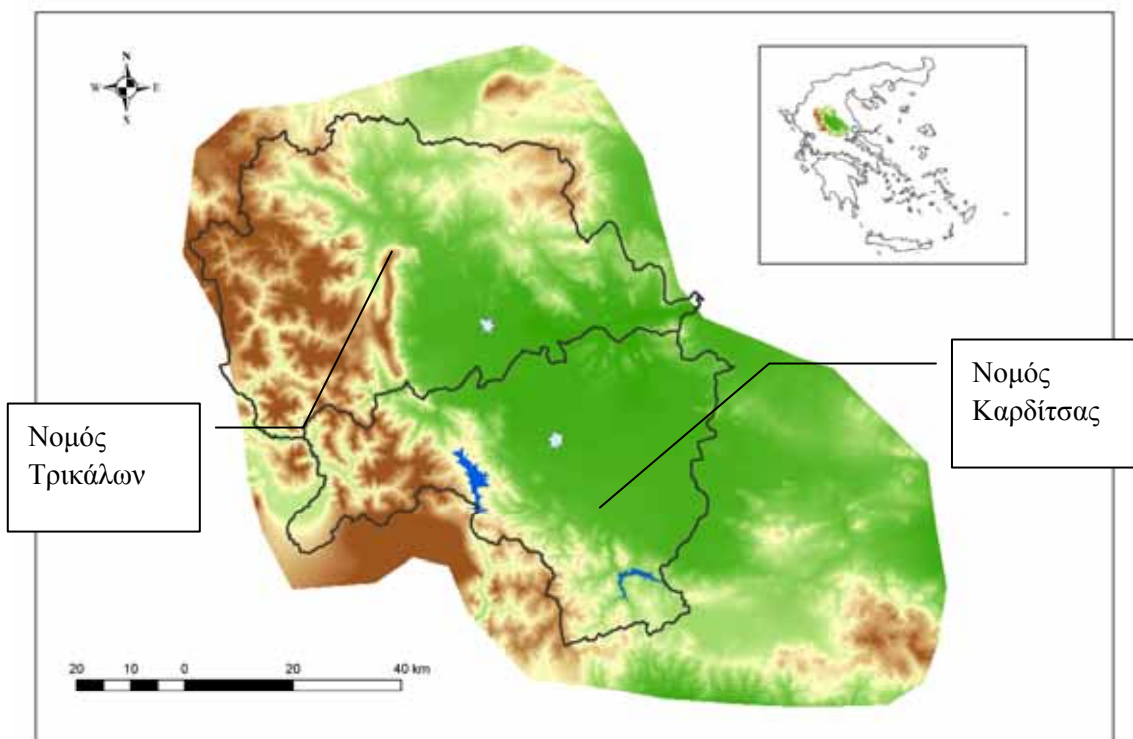
### 3.1 Γεωγραφική τοποθέτηση

Η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει το δυτικό τμήμα της Θεσσαλίας που ορίζεται γεωγραφικά ως εξής: ανατολικά από τα Χαλκοδόνια όρη, βορειανατολικά από το Ζάρκο, βόρεια από τα Χάσια και τα Αντιχάσια όρη, δυτικά από το Κερκότιον όρος (Κόζιακας) και νότια από το Ναθράκιο και τους πρόποδες του όρους Τυμφρηστός.

Η Δυτική Θεσσαλία περιλαμβάνει δύο νομούς, των Τρικάλων και της Καρδίτσας, και ανήκει στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήθηκε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των νομών Τρικάλων, Καρδίτσας και μια μικρή έκταση του νόμου Φθιώτιδας (βλ. Σχήμα 3.1).

Η συνολική έκταση της περιοχής μελέτης είναι 6087,5 km<sup>2</sup>, το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι 2203 m, ενώ το ελάχιστο 46 m.

Στα κεντρικά και ανατολικά της περιοχής μελέτης αναπτύσσονται οι αρδευόμενες πεδινές εκτάσεις των Νομών Καρδίτσας και Τρικάλων. Εκτός από τον Πηνειό, που είναι το κύριο υδατόρευμα της περιοχής μελέτης, υπάρχουν και σημαντικοί παραπόταμοι που συμβάλλουν σε αυτόν, και συγκεκριμένα ο Καλέτζης, ο Πάμισος, ο Ληθαίος, ο Φαρσαλιώτης και ο Ενιπέας.



Σχήμα 3.1: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Δυτικής Θεσσαλίας.

### **3.2 Αναπτυξιακά δεδομένα**

Η περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας κατοικείται από 250000 κατοίκους περίπου. Η κύρια παραγωγική δραστηριότητα είναι η αγροτική, η οποία αποτελεί τη βάση της τοπικής οικονομίας. Σύμφωνα με την απογραφή του 2001, οι πρωτεύουσες των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων έχουν 50000 και 35000 μόνιμους κατοίκους, αντίστοιχα. Επίσης, στους νομούς της Δυτικής Θεσσαλίας αναπτύσσονται μεγάλα ημιαστικά κέντρα, που συγκεντρώνουν σημαντική οικονομική δραστηριότητα (Παλαμάς, Σοφάδες, Φαρκαδόνα, Μουζάκι).

Το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της Θεσσαλίας είναι χαμηλό σε σχέση με το συνολικό της χώρας (84, με δείκτη χώρας το 100), ενώ η περιοχή έχει και χαμηλούς δείκτες ευημερίας. Ο τουρισμός δεν είναι αναπτυγμένος στο σύνολο της Δυτικής Θεσσαλίας, με εξαίρεση το Περτούλι του νομού Τρικάλων και τη λίμνη Πλαστήρα του νομού Καρδίτσας. Εμφανίζεται μια σοβαρή ανισομέρεια στη κατανομή των οικονομικών πόρων στη Θεσσαλία, με τους νομούς Λάρισας και Βόλου να υπερισχύουν σημαντικά σε κρατικές και κοινοτικές ενισχύσεις έναντι των δύο άλλων νομών, με το νομό Καρδίτσας να βρίσκεται στη δυσμενέστερη θέση.

Οι άξονες ανάπτυξης, όπως καθορίζονται από τις κυβερνητικές πολιτικές που υπαγορεύονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, είναι η προώθηση της εντατικής αρδευόμενης γεωργίας και του τουρισμού. Κύριο περιεχόμενο των αναδιαρθρώσεων στην αγροτική οικονομία είναι η ανάπτυξη της ανταγωνιστικότητας των ελληνικών αγροτικών προϊόντων στη διεθνή αγορά. Αυτό απαιτεί μεταβολές στο είδος των καλλιεργειών και στροφή προς αγροτικά προϊόντα με μεγάλη εμπορική ζήτηση.

Σημαντικοί στρατηγικοί στόχοι είναι οι βελτίωση του οδικού δικτύου και των έργων υποδομής της αγροτικής οικονομίας, όπως αυτό αντικατοπτρίζεται στη σύνθεση των κοινοτικών κονδυλίων, που στην πλειονότητα τους (πάνω από 90%) διοχετεύονται προς αυτές τις κατευθύνσεις.

### **3.3 Το πρόβλημα του νερού**

Η αύξηση της αρδευτικής ζήτησης, η οποία σημειώθηκε μετά τη δεκαετία του 1970 σε ολόκληρη τη Θεσσαλία, προκαλεί συχνά σημαντικά ελλείμματα νερού κατά του θερινούς μήνες. Τα μεγέθη των ελλειμμάτων εξαρτώνται από τις υδρολογικές συνθήκες. Πάντως, όπως έχει καταγραφεί από πλήθος τεχνικών μελετών αναγνωρισμένων επιστημονικών φορέων, το πρόβλημα οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στην απουσία αρδευτικών φραγμάτων, τα οποία θα αποθηκεύουν τη χειμερινή απορροή νερού και θα τη διαθέτουν το καλοκαίρι, με σημαντική αξιοπιστία για το υδροσύστημα.

Η λειψυδρία δεν αφορά μόνο τη Δυτική Θεσσαλία, αλλά το σύνολο της. Το σοβαρότερο πρόβλημα έλλειψης νερού εμφανίζονται σε περιοχές της Λάρισας, όπου μειώνονται σημαντικά οι παροχές του Πηνειού ποταμού και υπάρχει μεγάλη ταπείνωση του υδροφορέα σε ξηρές περιόδους.

Η έλλειψη του νερού στη Θεσσαλία μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με την κατασκευή έργων αποθήκευσης νερού και την κατασκευή των αναγκαίων εγγειοβελτιωτικών έργων, ενώ έχει προωθηθεί και η λύση εκτροπής του Αχελώου.

### **3.4 Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές**

Σήμερα, στη Θεσσαλία υπάρχουν δύο ταμιευτήρες που βρίσκονται στο νομό Καρδίτσας, του Πλαστήρα και του Σμοκόβου. Ο ταμιευτήρας Πλαστήρα, νοτιοδυτικά του νομού Καρδίτσας, είναι ένα τεχνητό έργο με έντονες και ανταγωνιστικές χρήσεις νερού (αρδευτική, υδρευτική, ενεργειακή, τουριστική). Κατά την αρδευτική περίοδο, τα νερά του διατίθενται σε πολλαπλάσια, σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά τις περιόδους χαμηλής



υδροφορίας, να υπάρχει κίνδυνος υπερβολικής ταπείνωσης της στάθμης του ταμιευτήρα, με αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες (Ομάδα ερευνητικού έργου Πλαστήρα, 2002).

Ο ταμιευτήρας Σμοκόβου βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του νόμου Καρδίτσας. Η οριστική λειτουργία του έργου έγινε το καλοκαίρι του 2000, ενώ δεν έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή του αρδευτικού δικτύου, το οποίο, σύμφωνα με τη μελέτη του έργου, θα αρδεύει 150000 στρέμματα των νομών Καρδίτσας, Φθιώτιδας και Λάρισας. Σήμερα, ικανοποιούνται οι αρδευτικές ανάγκες των περιοχών που βρίσκονται κατάντη του φράγματος από την ενισχυμένη οικολογική παροχή του, ενώ σε μικρότερο βαθμό αρδεύονται περιοχές από τη σήραγγα του Λεονταρίου.

Για την οριστική επίλυση του προβλήματος της ανεπάρκειας υδατικών πόρων στη Θεσσαλία, έχει προταθεί ένα πλέγμα τεχνικών έργων (φράγματα, υδροηλεκτρικοί σταθμοί, σήραγγες), στα πλαίσια της μελέτης της εκτροπής του Αχελώου ποταμού, που αποσκοπεί στη διοχέτευση 600 hm<sup>3</sup> ετησίως. Πέρα από τα φράγματα που περιλαμβάνει η μελέτη του Αχελώου, έχουν υποδειχθεί και μελετηθεί και άλλες θέσεις φραγμάτων, σε ημιορεινές περιοχές της Θεσσαλίας. Ωστόσο, τα έργα αυτά έχουν πολύ σοβαρά προβλήματα υλοποίησης, δεν στηρίζονται οικονομικά από τις κυβερνήσεις, παρά το γεγονός ότι πλήθος μελετών έχουν αποδείξει την αναγκαιότητα τους.

### **3.5 Η ποιότητα του νερού**

Ο Πηνειός ποταμός έχει πολύ σοβαρά προβλήματα ρύπανσης λόγω των εκτεταμένων χρήσεων φυτοφαρμάκων, ενώ δεν έχουν ολοκληρωθεί σημαντικά έργα υπόδομής για τη ύδρευση πολλών περιοχών της Δυτικής Θεσσαλίας. Συγκεκριμένα, στο νομό Καρδίτσας μόνο ο μισός πληθυσμός των Δήμων Καρδίτσας, Μητρόπολης, Παλαμά και Κάμπου χρησιμοποιεί καλής ποιότητας νερό από τη Λίμνη Πλαστήρα, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές του κάμπου υδρεύονται από υπόγεια νερά που συχνά εμφανίζουν αυξημένες συγκεντρώσεις νιτρικών (Πηγή: ΔΕΥΑ Καρδίτσας, προσωπική επικοινωνία).

### **3.6 Διοικητικό πλαίσιο διαχείρισης**

Η διαχείριση του αρδευτικού νερού κάθε νομού ανήκει στις διευθύνσεις Εγγείων Βελτιώσεων των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων και στους κατά τόπους Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων, που έχουν την ευθύνη συντήρησης του αρδευτικού δικτύου καθώς και τη λειτουργία των κρατικών γεωτρήσεων. Στο νομό Καρδίτσας υπάρχουν οι εξής οργανισμοί:

- ΤΟΕΒ Θεσσαλιώτιδος
- ΤΟΕΒ Μεσενικόλα
- ΤΟΕΒ Σελλάνων
- ΤΟΕΒ Τιτανίου
- ΤΟΕΒ Πλαστήρα

## 4 Σχηματοποίηση υδροσυστήματος

---

### 4.1 Πορεία εργασιών

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο του θεωρητικού υποβάθρου, για τη εφαρμογή και χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ απαιτούνται διάφορες γεωγραφικές επεξεργασίες. Οι εργασίες που έγιναν στα πλαίσια της μελέτης του υδροσυστήματος της Δυτικής Θεσσαλίας ήταν:

- Ο καθορισμός των θέσεων μέτρησης παροχής σε υδατορεύματα
- Ο καθορισμός του κατωφλιού επιφανειακής συγκέντρωσης νερού, που απαιτείται για την αυτόματη χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, που επιλέχθηκε ίσο με 24 km<sup>2</sup>.
- Ο καθορισμός των μονάδων υδρολογικής απόκρισης που βασίστηκε στη τομή δύο γεωγραφικών επιπέδων πληροφοριών, της υδρολιθολογίας και των χρήσεων γης του υδροσυστήματος.
- Η διακριτοποίηση του υπόγειου υδροφορέα, με βάση τον πιεζομετρικό χάρτη της πεδινής περιοχής.
- Η σχηματοποίηση του αρδευτικού δικτύου της περιοχής.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι αρχικά προσανατολιζόμασταν στη προσομοίωση αποκλειστικά του υδροσυστήματος της Καρδίτσας. Όμως, η απουσία θέσεων μέτρησης παροχής στα διοικητικά όρια του νόμου και στους παραποτάμους του Πηνειού, οδήγησαν στο να συμπεριλάβουμε και το νομό Τρικάλων στη σχηματοποίηση. Έτσι, το τελικό υδροσύστημα περιλαμβάνει και τον υδρομετρικό σταθμό του Αλή Εφέντη στον Πηνειό ποταμό, για τον οποίο διατίθεται αξιόπιστο δείγμα παρατηρημένης απορροής, για μεγάλο χρονικό διάστημα.

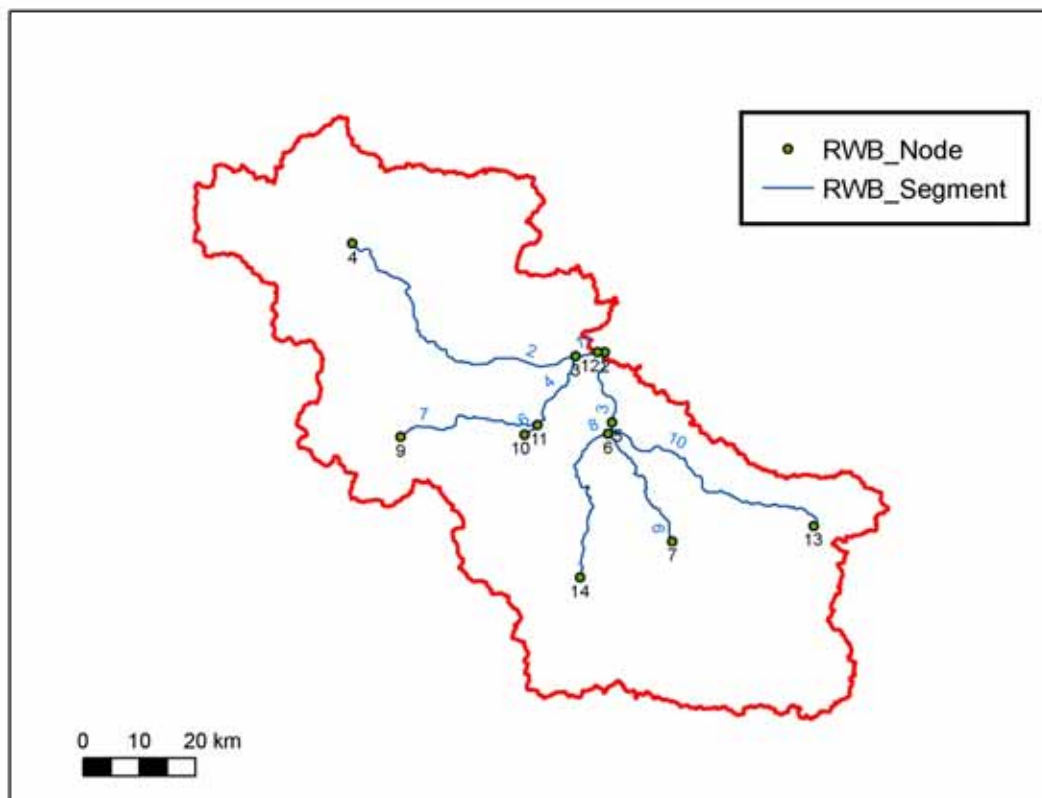
### 4.2 Σχηματοποίηση υδρογραφικού δικτύου

#### 4.2.1 Υδρομετρικοί σταθμοί

Στη Δυτική Θεσσαλία υπάρχουν υδρομετρικοί σταθμοί σε θέσεις φραγμάτων, σε ορισμένες θέσεις του Πηνειού ποταμού καθώς και σε ορισμένους παραποτάμους του. Οι θέσεις μέτρησης παροχής που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη είναι του Αλή Εφέντη, του Μουζακίου, του Κέδρου, της Αμπελιάς και της Σαρακήνας.

#### 4.2.2 Χάραξη δικτύου – υδατορεύματα – λεκάνες απορροής

Η Δυτική Θεσσαλία ανήκει στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, ο οποίος είναι το κύριο υδατόρευμα του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας. Ο Πηνειός πηγάζει από τα βόρεια του νομού Τρικάλων και διασχίζει τους νομούς Τρικάλων και Λάρισας, πριν καταλήξει στη θάλασσα. Οι παραπόταμοι Πάμισος, Καλέντζης, Σοφαδίτικος, Φαρσαλιώτης και Ενιπέας αποτελούν τα κύρια υδατορεύματα που διασχίζουν τη περιοχή της Καρδίτσας, πριν καταλήξουν στον Πηνειό (κοντά στο χωριό Κεραμίδι). Οι κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου ορίστηκαν ανάντη των υδατορευμάτων, στις θέσεις συμβολής και στις θέσεις των υδρομετρικών σταθμών Αλή Εφέντη, Μουζακίου, Κέδρου, Σαρακήνας και Αμπελιάς. Ανάντη κάθε κόμβου, χαράχθηκαν οι λεκάνες απορροής, με της εφαρμογή εργαλείων ΣΓΠ. Με την διαδικασία αυτή, προέκυψαν 13 κόμβοι του υδρογραφικού δικτύου και 12 λεκάνες απορροής ανάντη κάθε κόμβου, όπως απεικονίζεται και στον χάρτη του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Υδρογραφικό δίκτυο και αρίθμηση κόμβων.

Τα μήκη των υδατορευμάτων, οι κόμβοι του δικτύου και οι ονομασίες των υδατορευμάτων δίνονται στο Πίνακα 4.1.

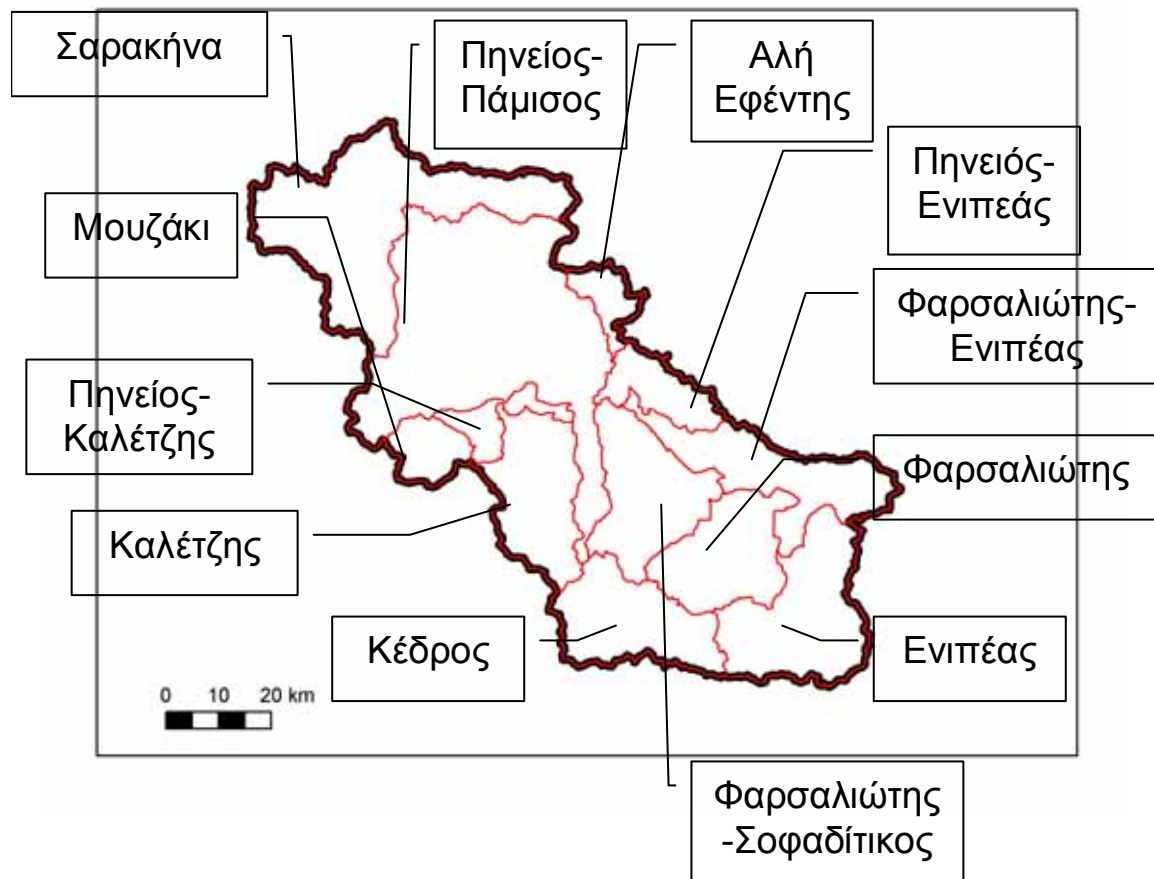
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά υδρογραφικού δικτύου.

ΚΟΜΒΟΣ ΑΡΧΗΣ	ΚΟΜΒΟΣ ΤΕΛΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ	ΜΗΚΟΣ ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ (m)
12	2	Έξοδος Πηνειός	73,3
4	3	Πηνειός	57495,8
5	2	Ενιπέας	15098,9
11	3	Πάμισος	16608,0
6	5	Φαρσαλιώτης	2573,3
10	11	Καλέτζης	2911,6
9	11	Πάμισος	29230,4
14	6	Κέδρος	34394,1
7	6	Φαρσαλιώτης	27402,5
13	5	Ενιπέας	50122,4
3	12	Πηνειός	4663,8
12	2	Πηνειός	1324,5

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, ανάντη κάθε κόμβου του υδρογραφικού δικτύου (θέσης υδρομετρικού σταθμού ή συμβολής υδατορευμάτων) κατασκευάστηκαν από το ΣΓΠ οι λεκάνες απορροής που συμβάλλουν στους κόμβους. Προέκυψαν 12 λεκάνες, τα χαρακτηριστικά των οποίων δίνονται στο Πίνακα 4.2. Η απεικόνιση των λεκανών φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά λεκανών απορροής.

	Όνομασία	Έκταση (km <sup>2</sup> )
1	Πηνείος- Ενιπέας	204,2
2	Πηνείος- Πάμισος	1565,2
3	Σαρακήνα	1023,6
4	Ενιπέας-Φαρσαλιώτης	486,0
5	Φαρσαλιώτης- Σοφαδίτικος	479,6
6	Φαρσαλιώτης	425,2
7	Μουζάκι	152,7
8	Καλέτζης	453,2
9	Καλέτζης-Πάμισος	130,9
10	Αλή Εφέντης	116,9
11	Αμπελία	593,3
12	Κέδρος	456,5



Σχήμα 4.2: Λεκάνες απορροής υδροσυστήματος Δυτικής Θεσσαλίας.

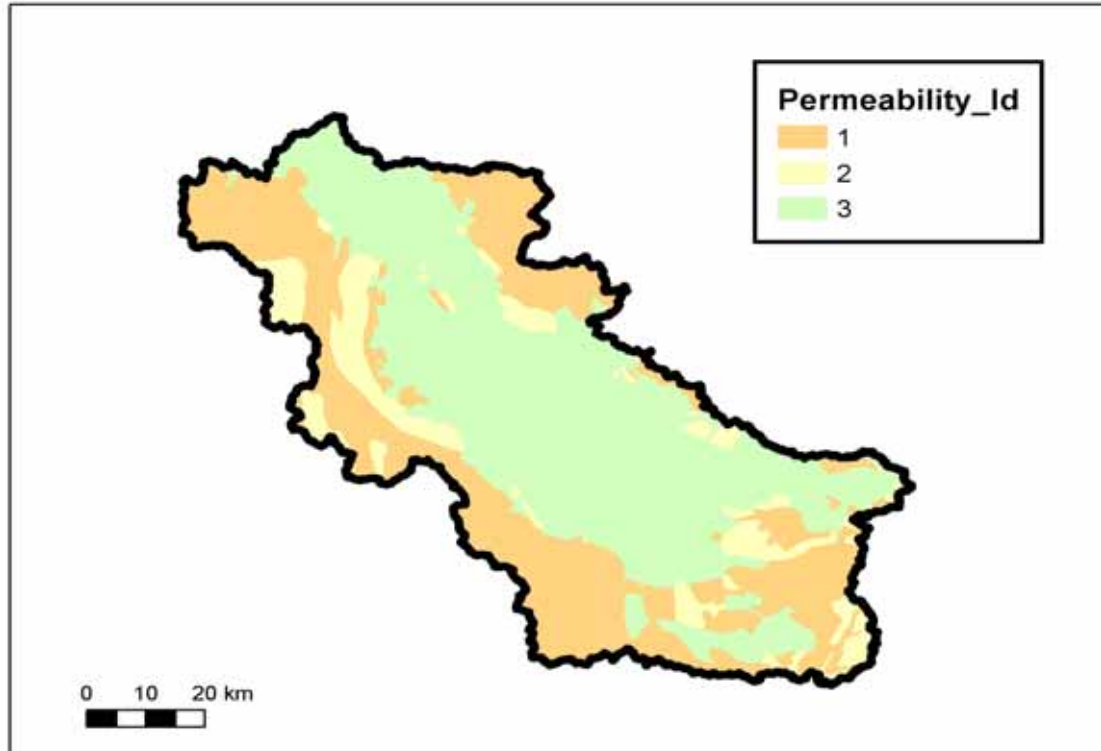
### 4.3 Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

#### 4.3.1 Υδρολιθολογία

Οι σχηματισμοί που δομούν το υδατικό διαμέρισμα της Δυτικής Θεσσαλίας ομαδοποιούνται σε υδροπερατούς (ανθρακικοί σχηματισμοί-αδρομερείς αποθέσεις Τεταρτογενούς), ημιπερατούς (νεογενείς αποθέσεις κατά περίπτωση γνευσιοσχιστολιθικά πετρώματα) και υδατοστεγείς

(λεπτομερείς φάσεις Τριτογενούς-Τεταρτογενούς και συμπαγή μεταμορφωμένα πετρώματα). Η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες αυτοτελείς υδρολογικές λεκάνες, της Δυτικής και της Ανατολικής Θεσσαλίας.

Στον χάρτη του Σχήματος 4.3 εμφανίζονται οι περιοχές εξάπλωσης των τριών τύπων πετρωμάτων, ενώ στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι εκτάσεις των στρωμάτων



Σχήμα 4.3: Χωρική εξάπλωση πετρωμάτων.

Πίνακας 4.3: Κατηγορίες και εκτάσεις πετρωμάτων.

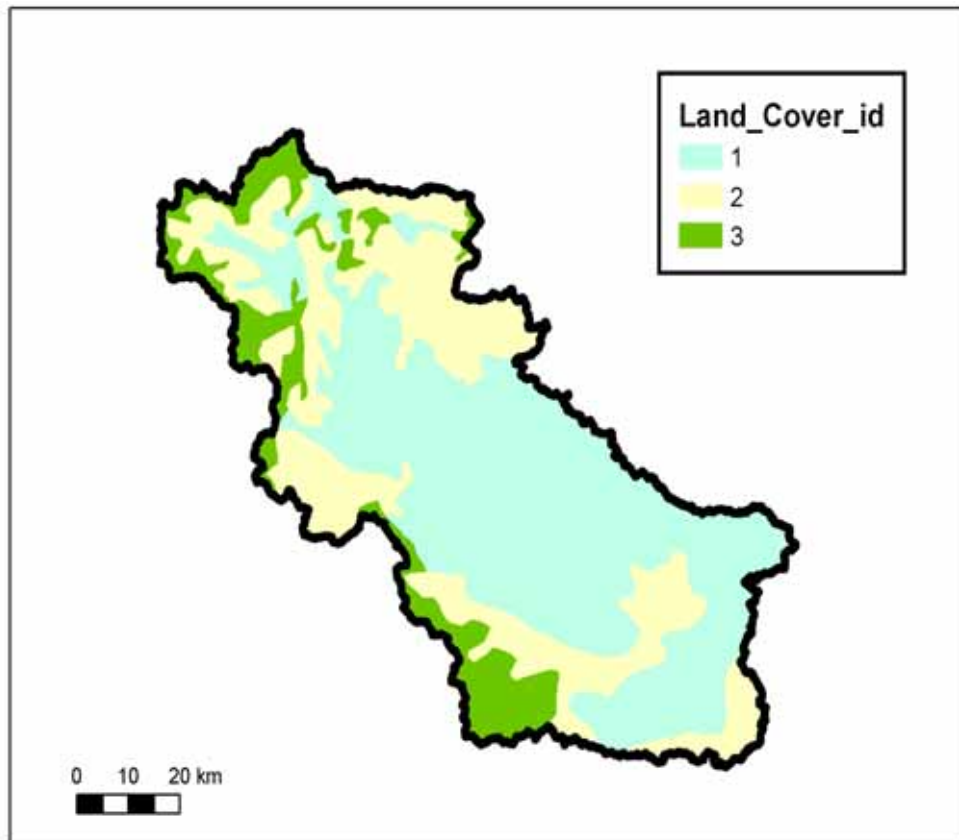
Δείκτης εδάφους	Κατηγορία Εδάφους	Έκταση (km <sup>2</sup> )
1	Αδιαπέρατα πετρώματα	24361.7
2	Περατά πετρώματα	7519.9
3	Ημιπερατά πετρώματα	30794.7

#### 4.3.2 Χρήσεις γης

Ο καθορισμός των χρήσεων γης στη περιοχή μελέτης στηρίχθηκε σε εργασία της υπηρεσίας του εθνικού κτηματολογίου του ΥΠΕΧΩΔΕ (1993). Με βάση τη συγκεκριμένη χαρτογράφηση, ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες οι χρήσεις γης που αναπτύσσονται στη Δυτική Θεσσαλία. (Σχήμα 4.4).

Η μεγαλύτερη κατηγορία που αναπτύσσεται είναι οι αρδευόμενες εκτάσεις η οποία περιλαμβάνει περιοχές μόνιμων αρδευόμενων εκτάσεων, λιβάδια κ.α. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι περιοχές χαμηλής βλάστησης και αναπτύσσονται φυσικοί βοσκότοποι, εκτάσεις με αραιή βλάστηση, σκληροφυλλική βλάστηση, θάμνοι και χερσότοποι. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει δασικές εκτάσεις, όπου αναπτύσσονται δάση πλατύφυλλων, κωνοφόρων μικτά.

Στο Πίνακα 4.4 περιλαμβάνονται οι εκτάσεις της κάθε ομαδοποιημένης κατηγορίας χρήσης γης.



Σχήμα 4.4: Χωρική ανάπτυξη ομαδοποιημένων χρήσεων γης.

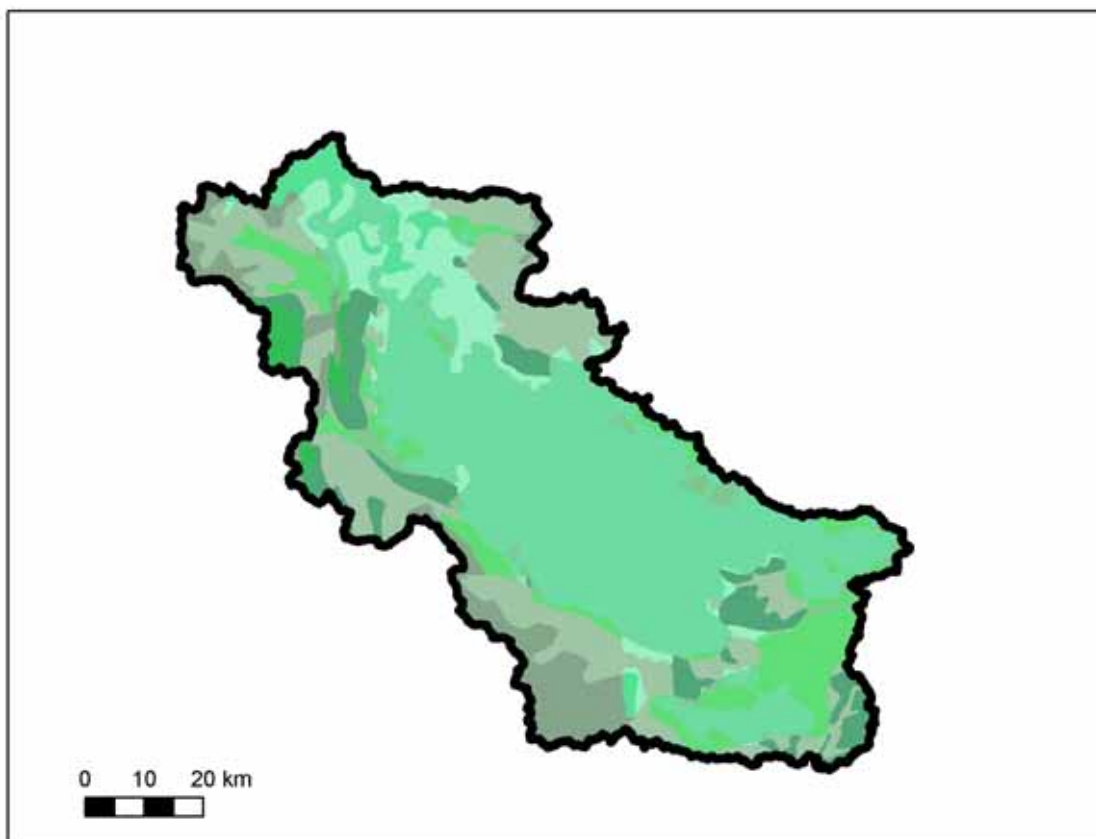
Πίνακας 4.4: Ομάδες και εκτάσεις χρήσεων γης.

Κατηγορία	Ομαδοποίηση χρήσεων γης	Έκταση (km <sup>2</sup> )
1	Αρδευόμενες εκτάσεις	3222.3
2	Χαμηλή βλάστηση	2049.9
3	Δασώδεις περιοχές	994.9

### 4.3.3 Καθορισμός μονάδων υδρολογικής απόκρισης

Ο καθορισμός των μονάδων υδρολογικής απόκρισης βασίστηκε στην ομαδοποίηση των υδρογεωλογικών ενοτήτων και των χρήσεων γης, με βάση τους χάρτες φυτοκάλυψης του εθνικού κτηματολογίου (1993).

Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν 9 μονάδες υδρολογικής απόκρισης για την περιοχή μελέτης, οι οποίες απεικονίζονται χωρικά στον χάρτη του Σχήματος 4.5. Οι εκτάσεις της κάθε μονάδας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.



Σχήμα 4.5: Χωρική ανάπτυξη μονάδων υδρολογικής απόκρισης.

Πίνακας 4.5: Εκτάσεις μονάδων υδρολογικής απόκρισης (ΜΥΑ).

ΜΥΑ	Έδαφος	Χρήσεις γης	Έκταση (km <sup>2</sup> )
1	Αδιαπέρατο	Αρδευόμενη	599.9
2	Αδιαπέρατο	Χαμηλή βλάστηση	1159.4
3	Αδιαπέρατο	Δασώδης	676.3
4	Περατά	Αρδευόμενη	156.2
5	Περατά	Χαμηλή βλάστηση	450.7
6	Περατά	Δασώδης	144.8
7	Ημιπερατά	Αρδευόμενη	2466.1
8	Ημιπερατά	Χαμηλή βλάστηση	439.7
9	Ημιπερατά	Δασώδης	173.6

#### 4.4 Σχηματοποίηση υπόγειου υδροφορέα

Οι συνιστώσες του μοντέλου υπόγειων νερών είναι η διακριτοποίηση του υδροφορέα σε πολυγωνικά κύτταρα, οι πηγές και οι αρδευτικές γεωτρήσεις.

##### 4.4.1 Καρστικές πηγές

Η περιγραφή της υδρολογικής συμπεριφοράς των καρστικών πηγών κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για την περιγραφή των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των ιδιοτήτων του υδροφορέα. Ωστόσο, οι

γνώσεις για τις πηγές της Δυτικής Θεσσαλίας είναι εξαιρετικά ελλιπείς και προέρχονται είτε από αναφορές του Ι.Γ.Μ.Ε είτε από επιτόπιες επισκέψεις.

Συγκεκριμένα, σημαντικές πηγές αναπτύσσονται στα όρια των υπολεκανών Καλαμπάκας και Τρικάλων. Πρόκειται για τις πηγές του Μεγάλου και Μικρού Κεφαλόβρυσου, οι οποίες εμφανίζονται σε υψόμετρο περίπου 150 m. Σύμφωνα με τη μελέτη του Ι.Γ.Μ.Ε (Μόρφης, Α., Μ. Παγούνης, και Γ. Γκιώνη 1996), η μέση μηνιαία παροχή των πηγών είναι της τάξεως των 2 m<sup>3</sup>/s. Λόγω της συνεχούς ταπείνωσης της στάθμης που παρατηρήθηκε στην περιοχή, η υδροφορία των πηγών διακόπηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (Μόρφης, Α., Μ. Παγούνης, και Γ. Γκιώνη 1996).

Ένα δεύτερο σημαντικό σύστημα πηγών αναπτύσσεται στη βορειοδυτική πλευρά της περιοχής μελέτης, στους πρόποδες του Κόζιακα, και συγκεκριμένα στα χωριά Πρόδρομος και Γοργύρη, σε υψόμετρο της τάξεως των 400 m. Η ύπαρξη και λειτουργία των συγκεκριμένων πηγών εντοπίστηκε από επίσκεψη στη περιοχή, καθώς δεν υπήρχε αναφορά σε διαθέσιμες τεχνικές μελέτες. Δεν υπάρχουν γνωστά στοιχεία για την παροχή των πηγών, αλλά λόγω της σπουδαιότητας τους συμπεριλήφθηκαν στο τελικό υδrosύστημα.

#### 4.4.2 Διακριτοποίηση υδροφορέα

Η διακριτοποίηση του υδροφορέα της Δυτικής Θεσσαλίας στηρίχθηκε σε μελέτη της Γαλλικής μελετητικής εταιρίας Sogreah, η οποία εκπονήθηκε τη περίοδο 1971-1978. Στη Δυτική Θεσσαλία εγκαταστάθηκαν 40 γεωτρήσεις παρατήρησης στάθμης και καταγράφηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές τους.

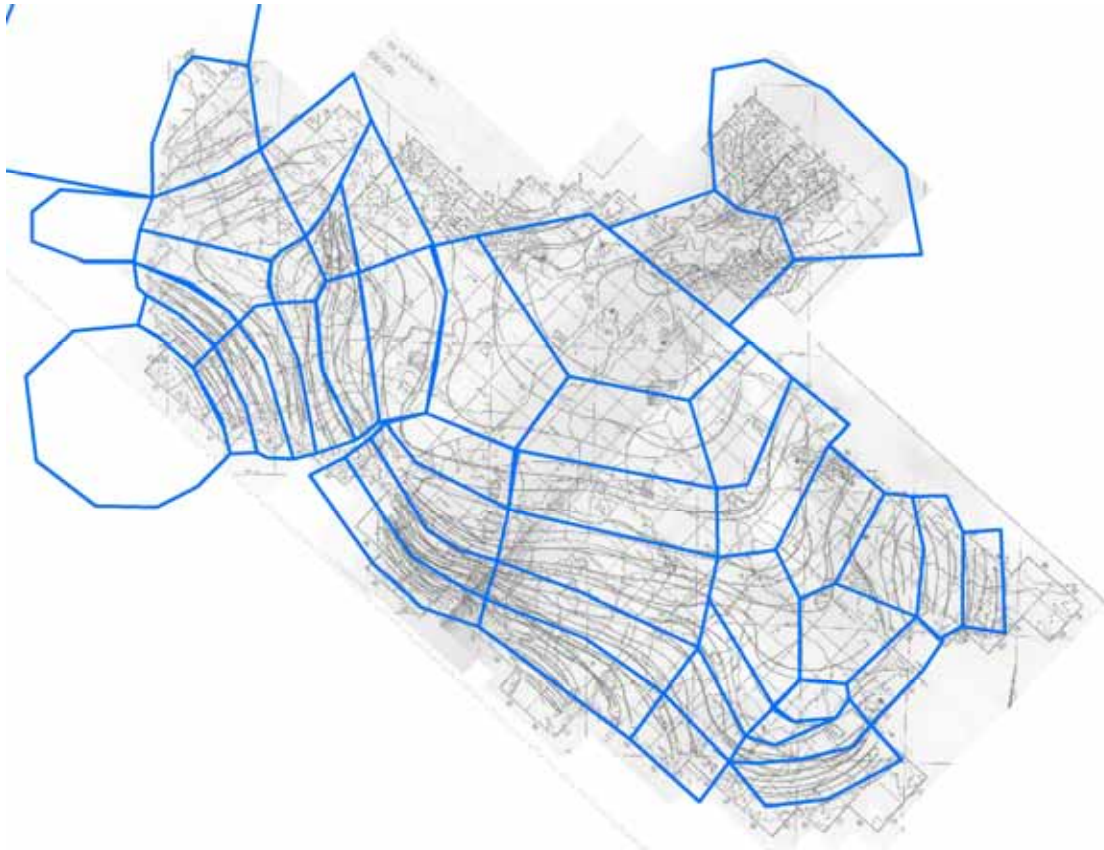
Από τις παρατηρημένες στάθμες, χαράχθηκε ο πιεζομετρικός χάρτης (Σχήμα 4.6) για την πεδινή έκταση της περιοχής μελέτης. Με βάση τη μεθοδολογία που εξηγείται στην ενότητα 2.6.1, χαράχθηκαν τα κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα, με τις ακμές τους παράλληλα προς τις ισοδυναμικές γραμμές του πιεζομετρικού χάρτη και για καθένα κύτταρο έγινε εκτίμηση της αρχικής του στάθμης (Σχήμα 4.7). Στον Πίνακα 4.6 φαίνονται τα στοιχεία των μεμονομένων γεωτρήσεων παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην αντικειμενική συνάρτηση.

Πίνακας 4.6: Θέσης παρατήρησης στάθμης υπόγειου υδροφορέα με βάση τη μελέτη της Sogreah.

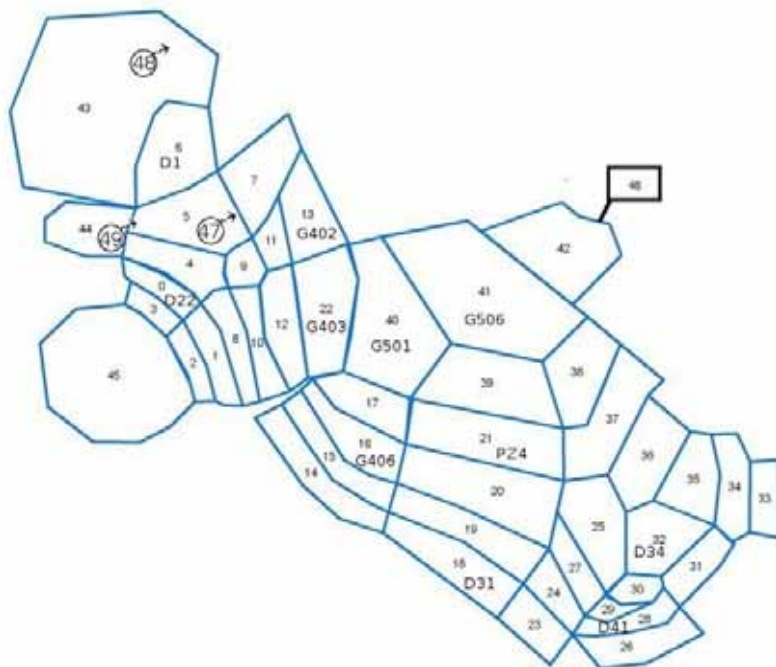
Ονομασία	Θέση γεώτρησης	Διαθέσιμο δείγμα (*)
G406	Παλιοκλήσι Καρδίτσας	10/72-5/78
D1	Μεγάρχη Τρικάλων	10/72-3/85
D22	Φήκη Τρικάλων	10/72-1/83
G402	Ζηλευτή Τρικάλων	10/72-2/84
G403	Αγναντερό Καρδίτσας	10/72-2/84
D41	ΝέοΜοναστήρι Φθιώτιδας	10/72-3/84
D34	Γεφύρια Καρδίτσας	10/72-1/84
D30	Καλλίθηρο Καρδίτσας	10/72-4/78
PZ4	Κυψέλη Σοφάδων	5/73-2/84
G501	Πατούλια Τρικάλων	10/72-2/77
G506	Βλοχός Καρδίτσας	10/72-1/84

(\*) Στις χρονοσειρές στάθμης υπάρχουν ορισμένες ελλείψεις τιμών που δεν αναγράφονται αναλυτικά.





Σχήμα 4.6: Η διακριτοποίηση του υδροφορέα με βάση τον πιεζομετρικό χάρτη της πεδινής περιοχής.



Σχήμα 4.7: Υδροφορέας Δυτικής Θεσσαλίας (διακριτοποίηση, πηγές, μετρημένες στάθμες γεωτρήσεων).

Στο Πίνακα 4.7 φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των 46 κυτάρων, στα οποία διακριτοποιείται ο υδροφορέας (έκταση, στάθμες δεξαμενής). Από τα 46 κύτταρα, τα 41 αναπαριστούν πραγματικές

χωρικές ενότητες, ενώ τα υπόλοιπα είναι τεχνητά και προσομοιώνουν ειδικές διεργασίες (π.χ. πηγές). Συγκεκριμένα, τα κύτταρα 43, 44 και 45 προσομοιώνουν τις εισροές από τους ανάντη ορεινούς υδροφορείς, ενώ το κύτταρο 42 προσομοιώνει την επικοινωνία με την Ανατολική Θεσσαλία. Το τελευταίο έχει πολύ μεγάλη έκταση, ώστε να διατηρεί πρακτικά σταθερή τη στάθμη του. Τέλος, οι δεξαμενές 45 και 46 προσομοιώνουν τη λειτουργία των πηγών του υδροσυστήματος, έχουν αμελητέα επιφάνεια και η αρχικές στάθμες αντιστοιχούν στο απόλυτο υψόμετρο εκφορτίσής τους (Πίνακας 4.7). Για τα κύτταρα στα οποία υπήρχαν γεωτρήσεις με παρατηρήσεις στάθμης, η αρχική τους στάθμη θεωρήθηκε ίση με την παρατηρημένη, παρόλο που τα δύο μεγέθη αντιπροσωπεύουν διαφορετικές χωρικές κλίμακες.

Πίνακας 4.7: Χαρακτηριστικά μεγέθη κυττάρων υδροφορέα.

Αριθμός	Έκταση	Ύψος οροφής	Ύψος βάσης	Αρχική στάθμη
0	22,95	150	0	125,5
1	30,15	150	0	125
2	19,88	170	0	130
3	16,16	165	0	130
4	44,38	140	0	125
5	69,86	145	125	0
6	72,51	170	0	131,6
7	59,19	145	0	125
8	32,87	140	0	124
9	18,26	130	0	128
10	31,85	130	0	115
11	18,96	125	0	110
12	46,68	115	0	100
13	50,70	110	0	93,6
14	52,48	155	0	140
15	41,76	135	0	126
16	47,53	120	0	99
17	43,33	110	0	95
18	63,09	150	0	135
19	63,08	140	0	125
20	102,35	125	0	110
21	91,01	110	0	97
22	76,88	105	0	97,4
23	33,30	150	0	125
24	27,00	145	0	120
25	63,38	115	0	103
26	41,71	155	0	126,5
27	28,02	125	0	105
28	23,70	145	0	116
29	9,35	125	0	110
30	15,60	115	0	107
31	31,05	130	0	115
32	51,99	115	0	106,3
33	26,56	150	0	120

34	38,22	140	0	116
35	45,74	130	0	110
36	59,76	120	0	100
37	73,42	110	0	95
38	59,64	100	0	90
39	91,47	95	0	90
40	124,86	100	0	94
41	186,95	90	0	84,7
42	89,76	85	0	80
43	321,85	400	0	0
44	45,98	170	145	20
45	187,76	170	0	130
46	195,74	140	0	75

### 4.4.3 Γεωτρήσεις

Οι αρδευτικές ανάγκες της Δυτικής Θεσσαλίας καλύπτονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από γεωτρήσεις και η γνώση της χωρικής κατανομής τους είναι ιδιαίτερος σημαντική για την ορθή προσομοίωση του υδροσυστήματος. Κατά την συλλογή των πρωτογενών δεδομένων επιχειρήθηκε και η συλλογή πληροφοριών που αφορούν στη χωρική κατανομή των γεωτρήσεων. Οι αρδευτικές γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι είτε ιδιωτικές είτε κρατικές. Στο Νομό Καρδίτσας λειτουργούν περίπου 150 κρατικές γεωτρήσεις που ανήκουν σε κάθε Τοπικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων, ενώ ο αριθμός των ιδιωτικών γεωτρήσεων υπολογίζεται στις 7000. Προφανώς, ο τεράστιος αριθμός γεωτρήσεων, για τις οποίες δεν διατίθεται πληροφορία σε ηλεκτρονική μορφή, επιβάλλει την αναζήτηση άλλων μεθόδων και παραδοχών για την εύρεση της χωρικής κατανομής τους. Στο Πίνακα 4.8 διακρίνονται οι δυναμικότητες των γεωτρήσεων κάθε αρδευτικού κόμβου.

Πίνακας 4.8: Δυναμικότητα ανά αρδευτικό κόμβο.

	Ομάδα γεωτρήσεων	Δυναμικότητα ( m <sup>3</sup> /s)
1	Πλαστήρας	2,2
2	Ξυνονέρι	0,5
3	Μεσενικόλας	0,2
4	Σέλινα	17,8
5	Παλαμάς	24,7
6	Σοφάδες	44,3
7	Αγιοπηγή	8,8
8	Τρίκαλα	94,0
9	Φθιώτιδα	19,9
10	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	10,0

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είναι η εξής: Μετά τη χάραξη του αρδευτικού δικτύου και τον καθορισμό των αρδευτικών κόμβων, συλλέχθηκαν στοιχεία από την Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων Καρδίτσας, τα οποία περιλάμβαναν τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις ανά κοινότητα του νομού και τη πηγή υδροδότησης των εκτάσεων κάθε χωριού. Τα στοιχεία αφορούσαν την τελευταία δεκαετία. Στη συνέχεια, ομαδοποιήθηκαν ανά αρδευτικό κόμβο τα είδη των καλλιεργήσιμων εκτάσεων που αρδεύτηκαν από υπόγεια νερά. Επιλέχθηκαν τα έτη που για κάθε κόμβο είχαμε τις μεγαλύτερες απολήψεις από υπόγεια νερά και υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman-Monteith οι συνολικές μηνιαίες

υδατικές ανάγκες κάθε κόμβου ζήτησης. Έγινε η παραδοχή ότι η δυναμικότητα των γεωτρήσεων ταυτίζεται με την εκάστοτε μέγιστη μηνιαία ζήτηση του αντίστοιχου κόμβου. Επειδή η περιοχή των Τρικάλων θεωρήθηκε ενιαίος κόμβος, έγινε η παραδοχή ότι έχει την ίδια εγκατεστημένη παροχή γεωτρήσεων με όλο το νομό Καρδίτσας (οι αρδευόμενες εκτάσεις των δύο νομών είναι περίπου ίσες), ενώ για τον κόμβο της Φθιώτιδας έγινε η παραδοχή ότι έχει την ίδια εγκατεστημένη παροχή με το κόμβο της Αγιοπηγής.

Πίνακας 4.9: Δυναμικότητα γεωτρήσεων ανά κύτταρο υδροφορέα

Κύτταρο	Ομάδα	Δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /s)	Κύτταρο	Ομάδα	Δυναμικότητα (m <sup>3</sup> /s)
17	Πλαστήρας	0,4	21	Σοφάδες	2,0
16	Πλαστήρας	0,4	19	Αγιοπηγή	4,4
18	Πλαστήρας	0,4	20	Αγιοπηγή	4,4
40	Πλαστήρας	0,2	6	Τρίκαλα	11,7
22	Πλαστήρας	0,4	7	Τρίκαλα	12,2
21	Πλαστήρας	0,4	8	Τρίκαλα	9,9
15	Ξυνονέρι	0,5	23	Τρίκαλα	3,2
15	Μεσενικόλας	0,2	41	Τρίκαλα	5,2
13	Σέλινα	2,5	42	Τρίκαλα	7,8
23	Σέλινα	4,1	27	Φθιώτιδα	3,2
41	Σέλινα	6,7	29	Φθιώτιδα	1,8
42	Σέλινα	3,3	32	Φθιώτιδα	2,4
31	Σέλινα	1,1	33	Φθιώτιδα	4,0
39	Παλαμάς	4,76	34	Φθιώτιδα	2,05
42	Παλαμάς	7,47	35	Φθιώτιδα	2,95
40	Παλαμάς	5,48	36	Φθιώτιδα	3,53
38	Παλαμάς	5,86	1	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	3,85
22	Παλαμάς	1,12	2	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	5,05
24	Σοφάδες	4,96	3	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	3,33
26	Σοφάδες	9,45	4	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	2,71
19	Σοφάδες	4,7	5	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	7,44
25	Σοφάδες	4,02	9	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	5,51
30	Σοφάδες	1,39	10	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	3,06
20	Σοφάδες	4,7	11	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	5,34
28	Σοφάδες	4,18	12	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	3,18
37	Σοφάδες	8,91	13	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	1,96
			43	Τρίκαλα (γεωτρήσεις)	2

Ένα ακόμη σημαντικό δεδομένο εισόδου του μοντέλου είναι η δυναμικότητα κάθε γεώτρησης σε κάθε κύτταρο του υδροφορέα. Ο υπολογισμός αυτό έγινε έμμεσα, ακολουθώντας τις παραδοχές που διατυπώθηκαν. Συγκεκριμένα, με γνωστά την έκταση του κυττάρου και τη συνολική δυναμικότητα του κάθε αρδευτικού κόμβου, έγινε ομοιόμορφος επιμερισμός για κάθε μεμονωμένη γεώτρηση. Τελικά, σε κάθε κύτταρο προέκυψε η τελική δυναμικότητα (σε  $m^3/s$ ), αθροίζοντας τα επιμέρους αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.9.

Οι παραδοχές που έγιναν για το υπολογισμό της δυναμικότητας των γεωτρήσεων ήταν αναγκαία διαδικασία για την περιγραφή του αρδευτικού δικτύου, και δεν επηρεάζουν τις φυσικές διεργασίες του υδροσυστήματος.

## 4.5 Τεχνικά έργα - διαχείριση νερού

### 4.5.1 Αρδευτικό σύστημα Δυτικής Θεσσαλίας

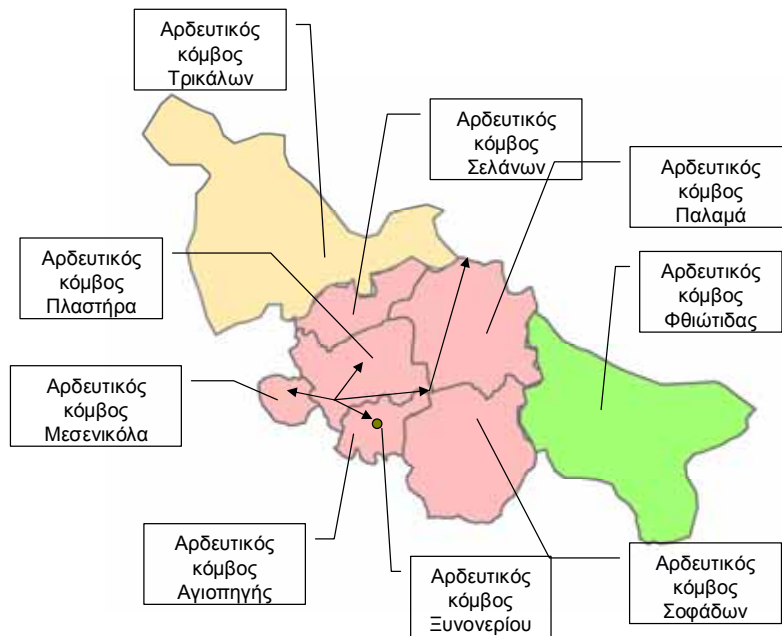
Αρχικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η εκτίμηση του επιφανειακού και υπόγειου δυναμικού του Νομού Καρδίτσας. Κατά την διάρκεια των εργασιών θεωρήθηκε σκόπιμο στο σύστημα να συμπεριληφθεί και ο Νομός Τρικάλων, λόγω της απουσίας υδρομετρικών σταθμών στους ποταμούς Καλέντζη, Φαρσαλιώτη, Ενιπέα. Ο πλέον αξιόπιστος υδρομετρικός σταθμός της Θεσσαλίας βρίσκεται στη θέση Αλή Εφέντη του Πηνειού Ποταμού, αμέσως ανάντη της εκβολής των υδατορευμάτων του Νομού Καρδίτσας. Ο νομός Τρικάλων θεωρήθηκε ένας κόμβος απόληξης που αντλεί επιφανειακά νερό από τη θέση Αλή Εφέντη καθώς και από τις γεωτρήσεις που είναι κατανομημένες στη πεδιάδα των Τρικάλων.

Στο νομό Καρδίτσας πραγματοποιήθηκε λεπτομερέστερη (σε επίπεδο ΤΟΕΒ) περιγραφή του αρδευτικού δικτύου και σύνδεση των αρδευτικών κόμβων κατανάλωσης με τα επιφανειακά υδατορεύματα, καθώς και με το σύστημα των ανοιχτών αγωγών που μεταφέρουν το νερό από τη λίμνη Πλαστήρα. Επισημαίνουμε ότι στην κλίμακα της μελέτης, το σύστημα αυτό περιγράφηκε αδρομερώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

Ο Νομός Καρδίτσας, σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό αρδεύσιμης έκτασης, εξυπηρετείται από τη τεχνητή λίμνη Πλαστήρα. Κατά την αρδευτική περίοδο, δηλαδή τους θερινούς μήνες, η υπερεκμετάλλευση των υδατικών πόρων του ταμιευτήρα, σε συνδυασμό με και με τη μόνιμη χρήση του ως υδροηλεκτρικού έργου, προκαλεί σε τακτά χρονικά διαστήματα μείωση των αποθεμάτων του, που δεν επαρκούν για την κάλυψη των πολλαπλάσιων αρδευτικών αναγκών.

Μετά την έξοδο φυγής του υδροηλεκτρικού σταθμού, το νερό του ταμιευτήρα οδηγείται στην αναρρυθμιστική λίμνη που βρίσκεται στο δήμο Μητρόπολης. Από την αναρρυθμιστική λίμνη ξεκινούν τέσσερις διαφορετικοί αγωγοί. Ο πρώτος εξυπηρετεί το κύριο αρδευτικό έργο του Πλαστήρα (έκτασης 150000 στρεμμάτων), το οποίο περιλαμβάνει αρδεύσιμες εκτάσεις των δήμων Καρδίτσας, Μητρόπολης, Κάμπου και Ιθώμης. Ο δεύτερος αγωγός αντλεί ποσότητες νερού από την αναρρυθμιστική λίμνη προς τρία ορεινά χωριά του δήμου Πλαστήρα (Μεσενικόλας, Μορφοβούνι, Μοσχάτο), τα οποία βρίσκονται στα δυτικά της αναρρυθμιστικής λίμνης, αρδεύοντας εκτάσεις 3000 στρεμμάτων. Ο τρίτος αγωγός εξυπηρετεί με απευθείας άντληση δύο χωριά του δήμου Μητρόπολης που δεν βρίσκονται στο κύριο αρδευτικό έργο του Πλαστήρα (Ξυνονέρι, Ρούσσο). Ο τέταρτος αγωγός είναι ένα τεχνητό κανάλι, που έχει διανοιχτεί περιμετρικά του αρδευτικού δικτύου του Πλαστήρα (νότια του αρδευτικού δικτύου), διοχετεύοντας ποσότητες νερού σε αρδεύσιμες εκτάσεις των δήμων Παλαμά, Ιτάμου, Καλιφωνίου, Άρνης και Φύλλου. Στη συνέχεια, η περίσσεια νερού οδηγείται μέσω του Πηνειού στο Νομό Λάρισας. Η αρδευόμενη περιοχή του Τ.Ο.Ε.Β Θεσσαλιώτιδος που περιλαμβάνει τους δήμους Σοφάδων, Ταμασίου και Μενελαΐδος εξυπηρετείται από κρατικές και

ιδιωτικές γεωτρήσεις, καθώς και από τα επιφανειακά νερά του Σοφαδίτικου, του Φαρσαλιώτη και του Ενιπέα. Μέχρι το 1992, δεν είχε ολοκληρωθεί η κατασκευή του φράγματος του Σμοκόβου, οπότε την περίοδο ενδιαφέροντος δεν θα μελετήσουμε αυτή τη συνιστώσα του υδροσυστήματος.

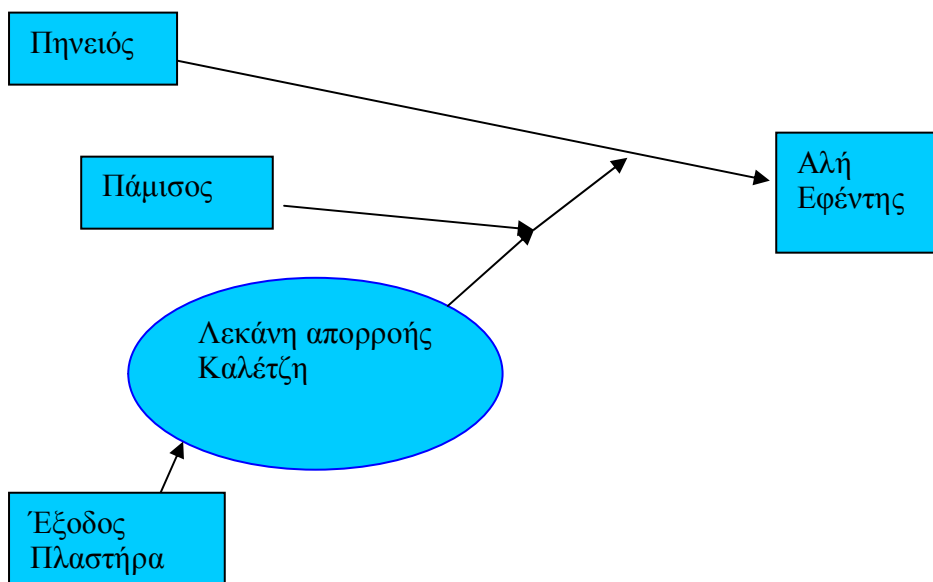


Σχήμα 4.8: Η τοπολογία των αρδευτικών κόμβων της περιοχής μελέτης. Η παραπάνω διάταξη είναι επικεντρωμένη στη διαδοχή των κόμβων με βάση τη χρήση των νερών του Πλαστήρα.

#### 4.5.2 Χειμερινή λειτουργία υδροσυστήματος

Κατά τις αρχικές δοκιμές του μοντέλου, η προσαρμογή του αποτύπωνε μεγάλες διαφορές μεταξύ της παρατηρημένης και μετρημένης παροχής του Αλή Εφέντη κατά τους χειμερινούς μήνες. Μετά από διερεύνηση των παραδοχών που ακολουθήσαμε στη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, προέκυψε το εξής ζήτημα που αφορά τη χάραξη του τεχνητού δικτύου: Ο ταμιευτήρας του Πλαστήρα, εκτός από την αρδευτική του χρήση, είναι και ένα σημαντικό υδροηλεκτρικό έργο, που συνεπάγεται ότι όλους του μήνες του έτους απελευθερώνονται ποσότητες νερού για την παραγωγή ενέργειας. Κατά την διάρκεια των μηνών στους οποίους δεν έχουμε αρδευτική ζήτηση, το νερό δεν ακολουθεί την ίδια διαδρομή με το καλοκαίρι, αλλά διοχετεύεται στον Καλέτζη, και στη συνέχεια στον Πηνειό, ανάντη του Αλή Εφέντη. Κατά συνέπεια, η ποσότητα νερού που μετριέται στον Αλή Εφέντη περιλαμβάνει και τις εκροές του Πλαστήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9.

Η ιδιαιτερότητα αυτή αντιμετωπίστηκε στη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, εισάγοντας έναν αγωγό που διοχετεύει το νερό από τον αρδευτικό κόμβο Ταυρωπού απευθείας προς τον Καλέτζη, με μηδενικό κόστος. Κατά τους χειμερινούς μήνες, το μοντέλο κατανομής των απολήψεων επιλέγει τη συγκεκριμένη διαδρομή ως τη βέλτιστη από πλευράς κόστους, ενώ κατά τη θερινή περίοδο επιλέγει κατά προτεραιότητα την κάλυψη των αρδευτικών στόχων. Υπενθυμίζεται ότι αυτή εξασφαλίζεται αυτόματα από το μοντέλο, με τη θεώρηση εικονικού αρνητικού κόστους.

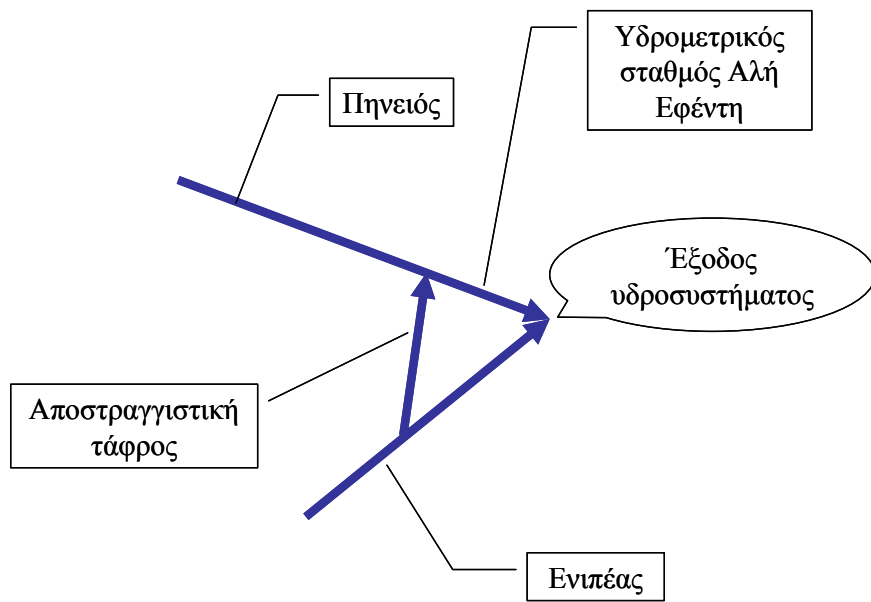


Σχήμα 4.9: Χειμερινή διάταξη υδροσυστήματος.

#### 4.5.3 Η επιρροή του Ενιπέα στις μετρήσεις του Αλή Εφέντη.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προέκυψε κατά τη διαδικασία των δοκιμών και αφορά τη χάραξη του υδροσυστήματος είναι το εξής: Σε ορισμένες περιπτώσεις, παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές της παροχής στον Αλή Εφέντη (π.χ. Δεκέμβριος 1976), οι οποίες δεν δικαιολογούνται ούτε από τις βροχοπτώσεις των ανάντη λεκανών ούτε από την εκροή νερού από τη λίμνη Πλαστήρα για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Η εξήγηση που δόθηκε σε αυτό το φαινόμενο είναι η παρακάτω: Η έξοδος του υδροσυστήματος ταυτίζεται με τη θέση συνάντησης του Ενιπέα με τον Πηνεϊό, και βρίσκεται πολύ κοντά (μόλις λίγες δεκάδες μέτρα) από τη γέφυρα του Αλή Εφέντη, όπου βρίσκεται ο ομώνυμος υδρομετρικός σταθμός. Στα τελευταία μέτρα του Ενιπέα υπάρχουν αποστραγγιστικές τάφροι κάθετα στη διατομή του, έτσι ώστε στην περίπτωση που αυτός πλημμυρίσει, μια ποσότητα νερού να μπορεί να διωχθεί μέσω των αποστραγγιστικών τάφρων. Επειδή όμως οι εκβολές των τάφρων βρίσκονται αμέσως ανάντη του Αλή Εφέντη, μέρος της παροχής που μετράται περιλαμβάνει πλημμυρικά νερά του Ενιπέα, για τα οποία δεν υπάρχει καμία μέτρηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι στον Ενιπέα οφείλονται οι περισσότερες πλημμύρες στη Θεσσαλία (Κουτσογιάννης κ.ά, 1988), που σημαίνει ότι σε περιόδους πλημμυρών οι καταγραφές του σταθμού είναι εντελώς αναξιόπιστες. Αυτό το πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του υδροσυστήματος ελήφθη υπόψη και στην τελική του χάραξη, θέτοντας μια μέγιστη παροχευτικότητα στον Ενιπέα, ίση με  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , και ορίζοντας έναν ανακουφιστικό αγωγό, με μικρό θετικό κόστος. Αυτό σημαίνει ότι σε συνήθεις συνθήκες τα νερά οδηγούνται μέσω της πραγματικής κοίτης του Ενιπέα στην έξοδο του συστήματος, δηλαδή κατάντη του Αλή Εφέντη, ενώ στην περίπτωση που η παροχή του ποταμού υπερβεί την τιμή των  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , η περίσσεια διοδεύεται ανάντη του Αλή Εφέντη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 (βλ. και Φωτ. 4.1).



Σχήμα 4.10: Η επιρροή του Ενιπέα στις μετρήσεις του υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη.





Φωτογραφία 4.1: Η αποστραγγιστική τάφρος που διοδεύει ποσότητες νερού ανάντη του Αλή Εφέντη. Στο βάθος διακρίνεται η διατομή του Ενιπέα.

#### 4.6 Καθορισμός στόχων

Βασική συνιστώσα του μοντέλου είναι ο καθορισμός της διαχείρισης των απολήψεων, δηλαδή τον υπολογισμό των υδατικών αναγκών και η ιεράρχηση των εναλλακτικών τρόπων εξυπηρέτησης των αναγκών αυτών. Με βάση τη χάραξη του αρδευτικού δικτύου, ακολουθήθηκε η εξής φιλοσοφία:

- Κάθε αρδευτικός κόμβος θεωρείται ότι εξυπηρετείται, κατά προτεραιότητα, από τα επιφανειακά νερά του ανάντη κλάδου του υδρογραφικού δικτύου ή από τα νερά του τεχνητού αρδευτικού δικτύου. Η λογική υπαγορεύεται με βάση το κόστος χρήσης του αρδευτικού νερού, που είναι μικρότερο (πρακτικά μηδενικό) για τα επιφανειακά από ότι για τα υπόγειες απολήψεις.
- Σε περίπτωση που η ζήτηση του κόμβου δεν καλυφθεί από τα επιφανειακά νερά, τότε το έλλειμμα καλύπτεται από γεωτρήσεις.

Στο υδροσύστημα της Δυτικής Θεσσαλίας, εκτός από την αρδευτική χρήση, υπάρχει και υδρευτική χρήση του νερού, με σημαντικότερη αυτή που πραγματοποιείται από τη λίμνη Πλαστήρα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για μια ποσότητα  $2 \text{ hm}^3/\text{μήνα}$ , που χρησιμοποιείται και για την εξυπηρέτηση 50000 κατοίκων των δήμων Καρδίτσας, Μητρόπολης, Κάμπου, Σοφάδων και Παλαμά. Αυτή η χρήση τέθηκε ως ο στόχος μέγιστης προτεραιότητας του υδροσυστήματος.

Με βάση τα παραπάνω, και με δεδομένη την τοπολογία του υδροσυστήματος και του υδρογραφικού δικτύου, καθορίστηκε η αλληλουχία εκπλήρωσης των υδατικών αναγκών σε κάθε κόμβο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10: Στόχοι υδροσυστήματος.

Σειρά προτεραιότητας	Είδος στόχου
1	Υδρευση Καρδίτσας
2	Άρδευση Πλαστήρα
3	Άρδευση Τρικάλων
4	Άρδευση Αγιοπηγής
5	Άρδευση Ξυνονερίου
6	Άρδευση Μεσενικόλα
7	Άρδευση Παλαμά
8	Άρδευση Σοφάδων
9	Άρδευση Σελάνων
10	Άρδευση Φθιώτιδας

## 5 Δεδομένα και επεξεργασίες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι χρονοσειρές εισόδου που απαιτεί το μοντέλο «ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ» και αναφέρονται στις χρονοσειρές βροχής και δυνητικής εξατμοδιαπνοής, τις χρονοσειρές παροχής που χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση και τις χρονοσειρές υδατικών αναγκών.

Με βάση την ταυτόχρονη διαθεσιμότητα των παραπάνω δεδομένων, καθορίστηκε η περίοδος μελέτης, που αναφέρεται στην εικοσαετία 1972-1992.

### 5.1 Δεδομένα επιφανειακής υδρολογίας

#### 5.1.1 Βροχομετρικοί σταθμοί

Στη Δυτική Θεσσαλία υπάρχουν πολλοί βροχομετρικοί σταθμοί, εγκατεστημένοι κατά κύριο λόγο στις παρυφές των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων. Για τη συγκεκριμένη μελέτη αξιοποιήθηκαν τα μηνιαία δεδομένα 19 βροχομετρικών σταθμών, που καλύπτουν ικανοποιητικά τη περιοχή μελέτης. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από υδρολογική διερεύνηση των *Κουτσόγιαννη κ.ά.* (1996). Αναλυτικά στοιχεία των σταθμών δίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Βροχομετρικοί σταθμοί Θεσσαλίας που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

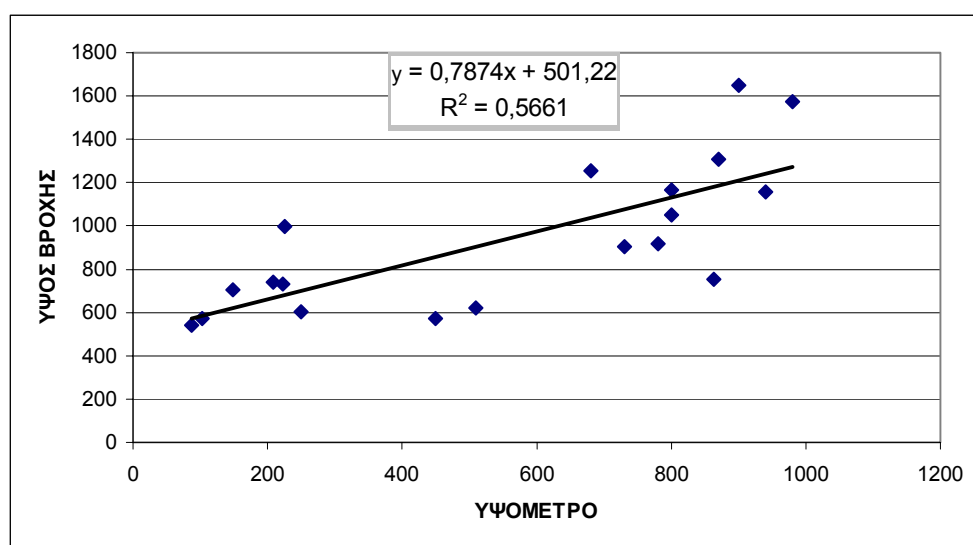
Σταθμός	Υπηρεσία	Δείγμα	Υψόμετρο (m)	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Κάρδιτσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	103	603,9
Ανάβρα	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	208	715,4
Λουτροπηγή	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	730	893
Μούχα	ΔΕΗ	1960-93	870	1296
Καροπλέσι	ΔΕΗ	1960-93	910	1513
Βαθύλακος	ΔΕΗ	1960-93	800	1057,5
Αμάραντος	ΥΠ.ΓΕ	1960-93	800	1118,1
Δρακότρυπα	ΔΕΗ	1960-93	680	1331,1
Αργιθέα	ΔΕΗ	1960-93	980	1612,7
Ταυρωπός	ΔΕΗ	1960-93	220	1103,5
Μορφοβούνι	ΥΠ.ΓΕ	1960-93	780	888,6
Μουζάκι	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	226	1067,2
Τρίκαλα	ΕΜΥ	1960-93	149	693,7
Καλαμπάκα	ΕΜΥ	1960-93	222	738,1
Φαρκαδώνα	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	87	553,5
Σκοπιά	ΥΠ.ΓΕ	1960-93	450	536,9
Φάρσαλα	ΥΠ.Ε	1960-93	250	621,7
Ελάτη	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	900	1638,2
Χρυσομηλιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	940	1124
Βερδικούσα	ΥΠΕΧΩΔΕ	1960-93	863	811,1
Δεσκάτη	ΔΕΗ	1960-93	830	672,6

### 5.1.2 Διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου

Για τη διερεύνηση της σχέσης βροχής-υψομέτρου χρησιμοποιήθηκαν τα μηνιαία στοιχεία όλων των βροχομετρικών σταθμών, με αρχή το έτος 1972-73 (Πίνακας 5.2). Στο Σχήμα 5.1 μπορούμε να δούμε τη σχέση υψομέτρου και μέσης ετήσιας βροχής. Από την συσχέτιση των δύο μεγεθών προκύπτει συντελεστής προσδιορισμού  $r^2 = 0,57$ , τιμή που είναι σχετικά υψηλή. Η ετήσια βροχοβαθμίδα της λεκάνης απορροής, δηλαδή η αύξηση του ετησίου ύψους βροχόπτωσης ανά μέτρο αύξησης του υψομέτρου, προκύπτει ίση με  $\beta = 0,787 \text{ mm/m}$ .

Πίνακας 5.2: Υψόμετρο βροχομετρικών σταθμών και μέση ετήσια βροχόπτωση.

	ΥΨΟΜΕΤΡΟ (m)	ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΒΡΟΧΗ (mm)
ΚΑΡΔΙΤΣΑ	103	569,7
ΑΝΑΒΡΑ	208	742,3
ΛΟΥΤΡΟΠΗΓΗ	730	904,5
ΜΟΥΧΑ	870	1309,8
ΒΑΘΥΛΑΚΟΣ	800	1052
ΑΜΑΡΑΝΤΟΣ	800	1167,4
ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ	680	1256,1
ΑΡΓΙΘΕΑ	980	1571,8
ΜΟΡΦΟΒΟΥΝΙ	780	916,9
ΜΟΥΖΑΚΙ	226	999,6
ΤΡΙΚΑΛΑ	149	704,1
ΚΑΛΑΜΠΑΚΑ	222	733,4
ΦΑΡΚΑΔΩΝΑ	87	542,5
ΣΚΟΠΙΑ	450	571,9
ΦΑΡΣΑΛΑ	250	604,7
ΕΛΑΤΗ	900	1648,3
ΧΡΥΣΟΜΗΛΙΑ	940	1158,9
ΒΕΡΔΙΚΟΥΣΑ	863	754,8
ΚΑΡΠΙΕΡΟ	510	619,4



Σχήμα 5.1.: Γραφική απεικόνιση της σχέσης μέσης ετήσιας βροχής-υψομέτρου σταθμών.

### 5.1.3 Επιφανειακή ολοκλήρωση βροχόπτωσης

Για την μοντελοποίηση των υδρολογικών διεργασιών απαιτείται η ολοκλήρωση της βροχής στην επιφάνεια κάθε λεκάνης απορροής. Όπως εξηγείται στο εδάφιο 4.2, η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε 12 υπολεκάνες. Η σημειακή βροχομετρική πληροφορία ολοκληρώθηκε στις επιφάνειες αυτών των λεκανών, με εφαρμογή της τεχνικής των πολύγωνων Thiessen.

Σύμφωνα με αυτή τη κλασική μέθοδο, η συνολική επιφάνεια  $S$  κάθε λεκάνης απορροής χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής  $S_i$ , μία για κάθε βροχομετρικό σταθμό  $i$ , έτσι ώστε:

$$\sum_{i=1}^k S_i = S \quad (5.1)$$

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού  $i$  να απέχει λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Ο λόγος του εμβαδού κάθε ζώνης επιρροής προς το συνολικό εμβαδό της λεκάνης ορίζει έναν συντελεστή βάρους του αντίστοιχου σταθμού, δηλαδή:

$$w_i = \frac{S_i}{S} \quad (5.2)$$

Για την περιοχή μελέτης, και για κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές βάρους, με βάση τους οποίους εκτιμήθηκε το επιφανειακό ύψος βροχόπτωσης από τη σχέση:

$$h_s = \sum_{i=1}^k w_i h_i \quad (5.3)$$

όπου  $h_i$  το σημειακό ύψος του σταθμού  $i$ , διαφορετικό για κάθε μήνα.

Στη συνέχεια, έγινε υψομετρική αναγωγή των αρχικών εκτιμήσεων των επιφανειακών βροχοπτώσεων με τη μέθοδο του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής. Ο συντελεστής δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (5.4)$$

όπου  $z_s$  είναι το μέσο υψόμετρο της κάθε ζώνης σε m (το οποίο εκτιμάται με βάση την υψογραφική καμπύλη της λεκάνης),  $z_\sigma$  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  $\beta$  η βροχοβαθμίδα σε mm/m (θεωρήθηκε κοινή τιμή για όλη τη περιοχή). Οι υψομετρικά ανηγμένες επιφανειακές βροχοπτώσεις προέκυψαν πολλαπλασιάζοντας τα αρχικά επιφανειακά δείγματα επί τον συντελεστή  $\lambda$ .

Στον Πίνακα 5.3 δίνονται τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, με βάση τα οποία έγινε η υψομετρική αναγωγή των βροχοπτώσεων. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων της κάθε λεκάνης απορροής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής που χρησιμοποιούνται στην υψομετρική αναγωγή των βροχοπτώσεων.

Λεκάνη	Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)	Μέσο υψόμετρο σταθμών (m)	Ετήσιο ύψος βροχής (mm)	Συντελεστής αναγωγής
Άνω Σοφαδίτης	643,9	644,9	895,2	1,00
Άνω Ενιπείας	580,3	440,8	573,6	1,19
Ανάτη Αλή Εφέντη	317,6	203,1	574,3	1,16
Κάτω Πάμισσος	224,2	368,6	850,6	0,87
Καλέτζης	319,7	530,4	893,8	0,81
Άνω Πάμισος	796,6	688,9	1225,6	1,07
Φαρσαλιώτης	274,5	278,2	645,7	1,00
Κάτω Σοφαδίτης	129,6	177,6	659,9	0,94
Κάτω Ενιπέας	212,5	242,1	600,3	0,96
Ανάτη Σαρακήνας	858,0	660,0	888,9	1,18
Πηνειός	355,3	331,7	829,1	1,02
Ανάτη Πηνειού-Ενιπέα	129,7	107,8	550,9	1,03

Πίνακας 5.4: Στατιστικά χαρακτηριστικά μηνιαίας βροχόπτωσης ανά λεκάνη απορροής

Πηνειός (Τρίκαλα)	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιάν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Μέσος όρος	103	114,2	111	84	97	85	85,5	64,3	32,6	18,5	23	28,8
Τυπ.απόκλ.	54	45,6	61,1	50	48	59	57,8	41,4	30	17,6	21	30,6
Μέγιστο	234	205,1	261	167	178	206	207,7	160,2	109	58,8	68	130
Ελάχιστο	10,6	26,1	31,5	5,7	26	17	13,21	17,9	7,6	1,71	0,6	4,7
<b>Ανάτη Πηνειού- Ενιπέα</b>												
Μέσος όρος	63,5	76,7	67,3	55	58	55	53,7	52	26,9	21,9	21	23
Τυπ.απόκλ.	39	40,7	49,5	37	37	32	43,2	33,3	25,2	27,9	26	31,4
Μέγιστο	153	165,6	219	142	134	144	164,1	126,2	80,9	117	105	128
Ελάχιστο	6,9	8,4	9,7	0	11	19	8,3	12,7	1,8	0,1	0	1,1
<b>Ανάτη Σαρακήνας</b>												
Μέσος όρος	137	147,7	153	100	112	96	95,3	80,5	38,6	26,1	29	36,4
Τυπ.απόκλ.	78,4	65,2	96,3	73	53	79	68,4	56,6	32	30,5	24	40,4
Μέγιστο	350	305,4	432	241	197	295	239,2	184,3	151	123	95	162
Ελάχιστο	2,8	36,5	27,8	1	16	15	8,5	17,3	8,3	0,6	1,5	4,0
<b>Κάτω Ενιπέας</b>												
Μέσος όρος	72,1	69,7	65,2	57	53	56	62,6	47,2	27,3	21,5	22	22,1
Τυπ.απόκλ.	55,1	41,4	54,4	41	34	40	41,9	32,9	28,7	17,5	29	42,3
Μέγιστο	221	158,5	231	148	145	191	169	126,1	101	49	103	177
Ελάχιστο	1,5	19,4	6,8	1	6,3	7,6	13,6	6,6	0,4	0,1	0	0,2
<b>Κάτω Σοφαδίτης</b>												

Μέσος όρος	77,6	76,5	73,2	61	75	73	60,3	47,9	29	15,7	23	19,3
Τυπ.απόκλ.	54,1	41,5	44	44	37	55	42,7	32,1	31,3	16,8	27	20,7
Μέγιστο	197	166,6	180	165	134	229	160,4	112,9	113	57,3	98	93,6
Ελάχιστο	14	18,8	8,05	0,4	18	9,9	10,7	4,4	3,05	0,02	0	1,23

#### Φαρσαλιώτης

Μέσος όρος	72,9	80,4	76,9	67	69	74	62,7	49,5	30,9	20,7	21	22
Τυπ.απόκλ.	49,8	37,5	50,2	45	35	50	38,5	30,3	27,4	15,8	24	27,2
Μέγιστο	197	155,2	217	171	160	225	140,1	126,2	109	51,6	77	116
Ελάχιστο	4,7	35,2	7,7	11	16	11	19,6	8,3	4,3	0,4	0	0,6

#### Άνω Πάμισος

Μέσος όρος	166	168,8	202	146	178	128	124,5	83,8	34,2	19,2	29	44,9
Τυπ.απόκλ.	89	51,4	87,3	89	75	69	60,9	39,7	25,1	18,6	22	43,1
Μέγιστο	343	303,9	374	329	301	281	263	172,3	110	72,1	79	179
Ελάχιστο	9,5	82,8	49,1	19	57	25	29,6	26,3	6,6	0,3	3	3,8

#### Καλέτζης

Μέσος όρος	102	92,1	96,8	69	86	79	74,2	48,9	28,6	13,1	22	24,8
Τυπ.απόκλ.	68,5	32,1	42,4	41	36	43	43,8	26,5	28	14,8	22	25,9
Μέγιστο	244	152,3	181	175	160	168	160,1	98,6	92,1	62,6	81	115
Ελάχιστο	15,3	45,7	15,3	7,7	39	18	22,5	13,8	4,2	0,3	0,7	3,2

#### Κάτω

#### Πάμισος

Μέσος όρος	99,7	97,9	97,6	72	88	80	76,3	47,5	25,1	13,1	21	25,1
Τυπ.απόκλ.	54,7	37,2	46,7	37	44	47	45,5	27,6	23,8	14	19	27,8
Μέγιστο	210	168,2	215	131	160	171	165,3	115,2	85,6	57,1	57	120
Ελάχιστο	15	23	16,8	11	29	19	15,8	13,8	5,1	0,2	2,3	3,3

#### Ανάτη Αλή

#### Εφέντη

Μέσος όρος	73,9	93,6	76,7	62	67	66	60,7	62,8	31,4	25	27	27
Τυπ.απόκλ.	45,1	48,8	50,7	40	44	39	50,8	40	27,9	32,5	30	34,2
Μέγιστο	186	202,4	221	150	160	165	187,8	143,5	92,3	137	114	139
Ελάχιστο	7,1	7,1	16,7	0	14	20	7,4	14,4	7,3	0	0	1,2

#### Άνω Εννιπέας

Μέσος όρος	45,6	88,1	92,9	81	64	94	55,6	54	42,1	28,7	18	24,5
Τυπ.απόκλ.	42,3	51,3	73,5	53	57	67	35,8	37,9	39	23,5	15	22,2
Μέγιστο	170	184	298	206	213	271	130,1	142,4	177	73,8	46	89,2
Ελάχιστο	2,3	12,8	9,3	13	1,6	22	9,7	7,7	0,01	0	0	0

#### Άνω

#### Σοφαδίτης

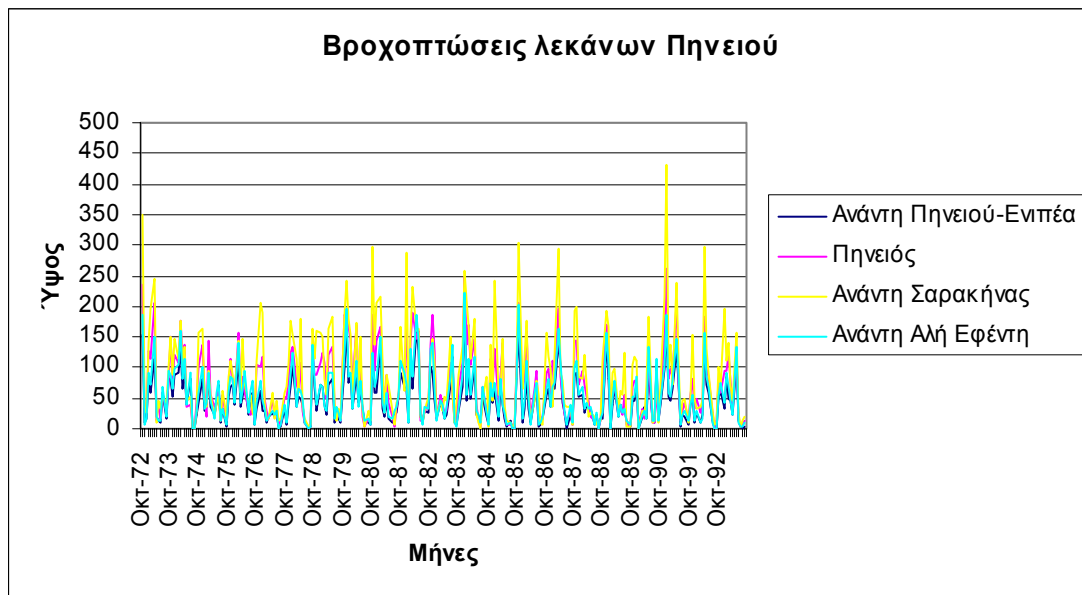
Μέσος όρος	103	117,6	120	111	108	96	81,8	56,1	35,6	18	25	32,5
Τυπ.απόκλ.	60,9	40,1	53,9	77	39	62	46,1	32,6	35,9	17	26	32
Μέγιστο	231	200,9	226	279	178	234	184,8	136,7	142	63,3	112	145
Ελάχιστο	17,5	49,5	30,3	21	42	24	25,5	9,1	4,8	0,3	2,5	2,7

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.2 έως 5.5 απεικονίζονται οι μηνιαίες βροχοπτώσεις σε κάθε λεκάνη απορροής του υδροσυστήματος. Από την στατιστική επεξεργασία των μηνιαίων χρονοσειρών βροχής καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

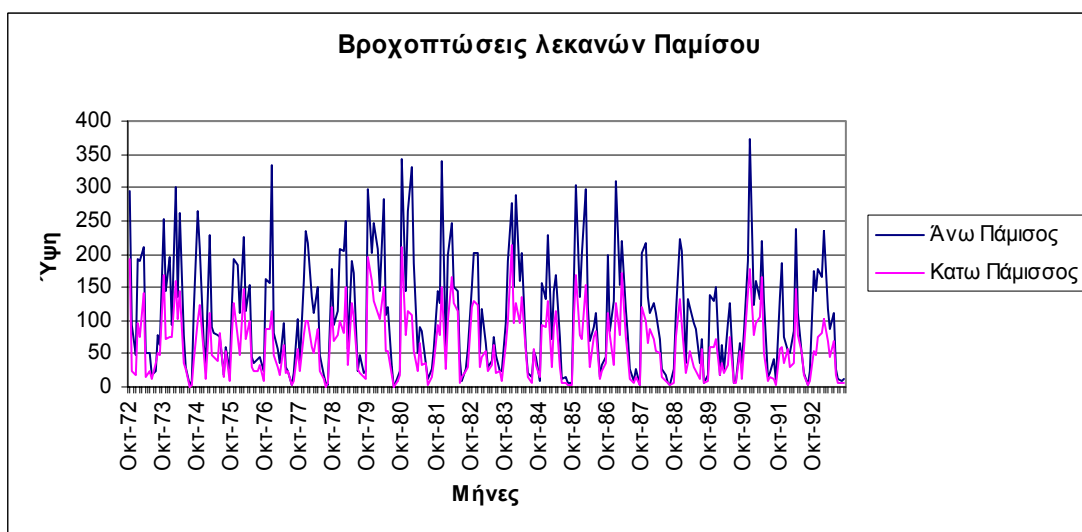
- Τα μεγαλύτερη ύψη βροχής παρατηρούνται στις βόρειες και Δυτικές λεκάνες της περιοχής μελέτης (Ανάτη Σαρακήνας και Άνω Παμίσου).
- Η λεκάνη απορροής Άνω Παμίσου παρουσιάζει σημαντικά ύψη βροχοπτώσεως καθόλη τη περίοδο μελέτης. Εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τις άλλες λεκάνες, λόγω της επίδρασης της οροσειράς της Πίνδου.
- Στη νότια και νοτιοανατολική πλευρά μειώνονται οι αιχμές των βροχοπτώσεων.

Μπορούμε να χωρίσουμε τη περίοδο μελέτης σε τρεις περιόδους

- 1972-1977 σχετικά χαμηλά ύψη βροχοπτώσεις
- 1977- 1988 υγρή περίοδος, με εξαίρεση σε κάποιες λεκάνες απορροής.
- 1989-1993 ξηρή περίοδος.

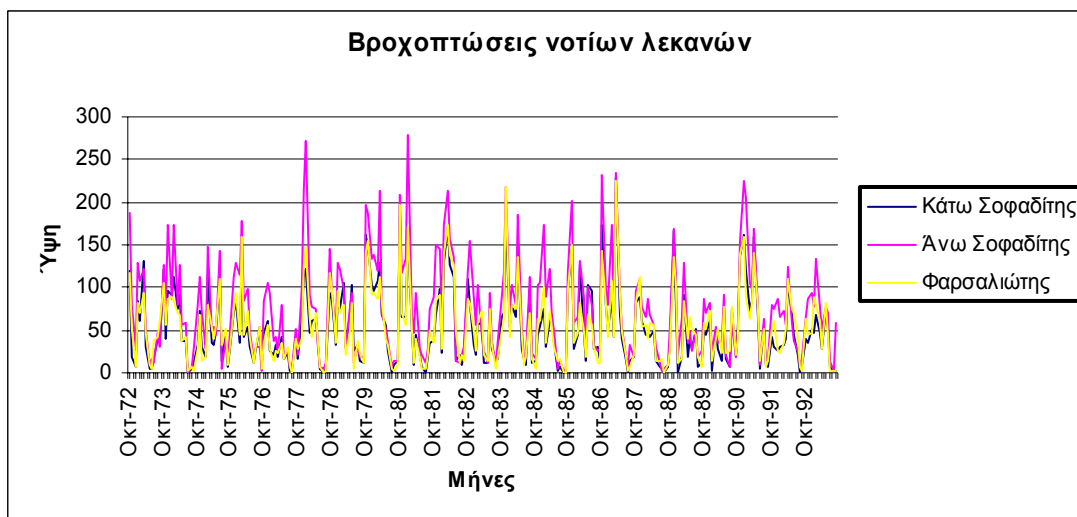


Σχήμα 5.2: Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στις λεκάνες απορροής του Πηνειού.

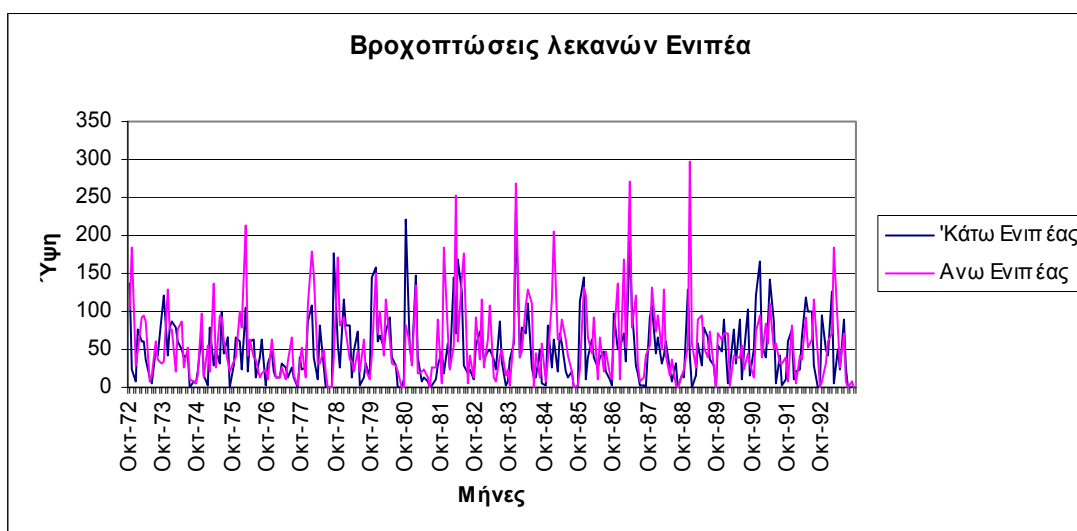


Σχήμα 5.3 Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις στις λεκάνες απορροής του Παμίσου.





Σχήμα 5.4 Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις νότιων λεκανών του υδροσυστήματος.



Σχήμα 5.5 Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις λεκανών Ενιπέα.

## 5.2 Δυνητική εξατμοδιαπνοή

Ο υπολογισμός έγινε με τη μέθοδο Penman-Monteith για το σύνολο της λεκάνης καθώς δεν διατίθονται επαρκή μετεωρολογικά δεδομένα που να κάνουν δυνατή τον υπολογισμό της ανά υπολεκάνη. Δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία, η σχετική ηλιοφάνεια και η ταχύτητα ανέμου. Τα δεδομένα προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό Τρικάλων. Στο Πίνακα 5.5 δίνονται τα μέσα μηνιαία ύψη δυνητικής εξατμοδιαπνοής που προέκυψαν.

Πίνακας 5.5: Μηνιαία ύψη δυνητικής εξατμοδιαπνοής (mm).

Ιαν.	Φεβρ	Μάρτ	Απρ	Μάιος	Ιούν	Ιούλ	Αυγ	Σεπτ	Οκτ	Νοέ	Δεκ
23,8	33,4	52,2	95,5	135,0	178,0	182,2	155,5	111,6	57,4	27,6	20,3

### 5.3 Υδρομετρικοί σταθμοί

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, απαιτούνται μετρήσεις παροχής σε αντιπροσωπευτικές θέσεις της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, στην ανάλυση συμπεριλάβαμε όλους τους υδρομετρικούς σταθμούς, για τους οποίους υπήρχε ικανοποιητικό δείγμα μηνιαίων παροχών.

Συγκεκριμένα, στη Δυτική Θεσσαλία υπάρχουν υδρομετρικοί σταθμοί σε εξεταζόμενες θέσεις φραγμάτων και σε αρκετά σημεία του Πηνειού Ποταμού. Ωστόσο, στους σημαντικούς παραποτάμους του Πηνειού που αναπτύσσονται στην περιοχή της Καρδίτσας (Καλέτζης, Φαρσαλιώτης, Ενιπέας), δεν πραγματοποιούνται συστηματικές μετρήσεις παροχής, αν και τη δεκαετία του 1980 γίνονταν κάποιες σποραδικές μετρήσεις παροχών από την τοπική υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, οι οποίες όμως θεωρήθηκαν αναξιόπιστες και δεν χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

Στον Πίνακα 5.6 διακρίνονται οι υδρομετρικοί σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν, με σημαντικότερο αυτόν του Αλή Εφέντη, με μετρήσεις καθόλη την διάρκεια της εικοσαετίας. Εκτός των σταθμών αυτών, υπήρξαν και σταθμοί που δεν χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τον σταθμό της Πύλης, σε θέση εξεταζόμενου φράγματος, που βρίσκεται πολύ κοντά στο σταθμό του Μουζακίου, και διαθέτει περιορισμένο και μικρού ενδιαφέροντος δείγμα, και ο σταθμός της Θεόπετρας, στον Ληθαίο ποταμό, επειδή ελέγχει μικρό μόνο τμήμα της λεκάνης του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που βασίζονται σε πρωτογενή στοιχεία (υδρομετρήσεις και σταθμημετρήσεις), και όχι δεδομένα παροχών που έχουν συμπληρωθεί με στατιστικές μεθόδους.

Πίνακας 5.6: Υδρομετρικοί σταθμοί περιοχής Δυτικής Θεσσαλίας.

Σταθμός	Υδατόρευμα	Υπηρεσία	Περίοδος μετρήσεων
Μουζάκι	Πάμισος	ΥΠΕΧΩΔΕ	1/10/1985-1/9/1993
Αλή Εφέντης	Πηνειός	ΥΠΕΧΩΔΕ	1/10/1972-1/9/1993
Αμπελιά	Ενιπέας	ΥΠΕΧΩΔΕ	1/3/1974-1/5/1993
Κέδρος	Σοφαδίτης	ΥΠΕΧΩΔΕ	1/10/1972-1/9/1982
Σαρακήνα	Πηνειός	ΥΠΕΧΩΔΕ	1/10/1972-1/2/1985

#### 5.3.1 Υδρομετρικός σταθμός Αλή Εφέντη

Ο υδρομετρικός σταθμός στη γέφυρα Αλή Εφέντη βρίσκεται στο χωριό Κεραμίδι του νομού Λαρίσης, στα σύνορα των νομών Καρδίτσας και Λάρισας. Τα μηνιαία δείγματα αφορούν όλη τη περίοδο μελέτης, με εξαίρεση λίγες ελλείψεις (Δεκέμβριος 1975, Ιανουάριος 1976, Ιούνιος-Σεπτέμβριος 1990, Ιανουάριος-Φεβρουάριος 1993).

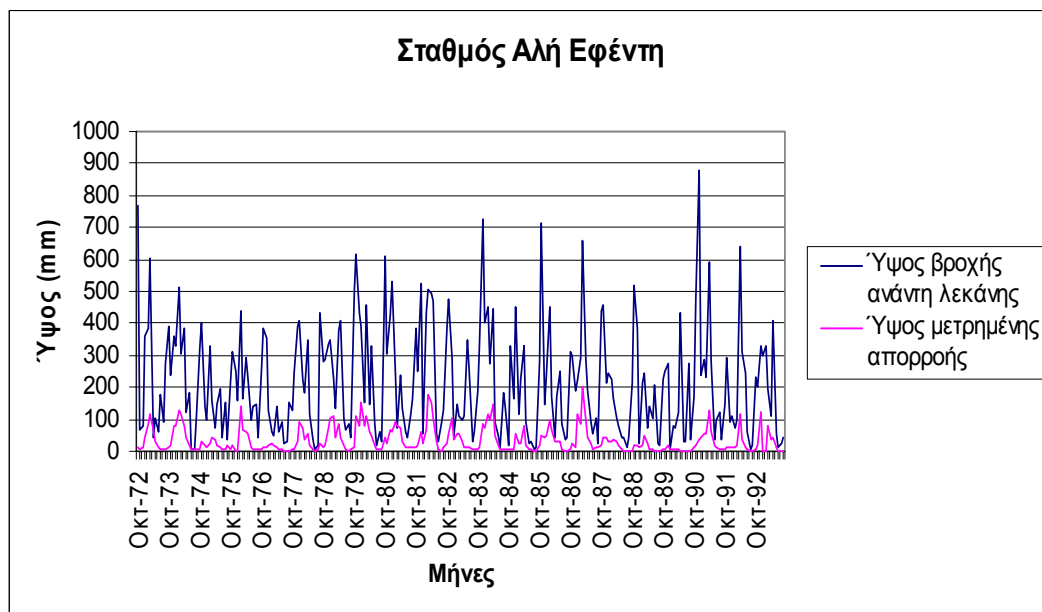
Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης της μέσης μηνιαίας παροχής με την βροχόπτωση της ανάντη λεκάνης έχει τιμή  $r = 0,53$ . Η μέτρια συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών θα πρέπει να αναζητηθεί στους παρακάτω λόγους:

- Αμέσως κατάντη του Αλή Εφέντη εκβάλλει ο Ενιπέας, ο οποίος ευθύνεται για τις περισσότερες πλημμύρες στην περιοχή της Θεσσαλίας (Κουτσογιάννης κ.ά, 1988). Επομένως, υπάρχει η περίπτωση, σε ορισμένες περιπτώσεις, να έχουμε επιρροή στο πεδίο ροής από τις κατάντη συνθήκες, στη θέση εκβολής του Ενιπέα στον Πηνειό.
- Οι μετρήσεις του Αλή Εφέντη περιλαμβάνουν και ποσότητες νερού που διοχετεύονται από το υδροηλεκτρικό έργο της λίμνης Πλαστήρα. Σε περιόδους κατά τις οποίες δεν υπάρχει αρδευτική ζήτηση νερού (φθινόπωρο, χειμώνας, αρχές άνοιξης), τα νερά του Πλαστήρα διοδεύονται μέσω ενός μικρού υδατορεύματος (Μέγας) και ενός τεχνικού καναλιού (Κρούπι) πολύ κοντά στον σταθμό του Αλή Εφέντη (βλ. 4.5.2).

- Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η διάταξη των αποστραγγιστικών καναλιών λίγο πριν ο Ενιπέας εκβάλλει στον Πηνειό. Συγκεκριμένα υπάρχουν αποστραγγιστικά κανάλια που ξεκινούν δίπλα από τη κοίτη του Ενιπέα και καταλήγουν κοντά στο Πηνειό ανάντη του Αλή Εφέντη. Σε περίπτωση που υπερχειλίσει ο Ενιπέας, ένα μέρος των νερών διοδεύονται από τα αποστραγγιστικά κανάλια ανάντη του Αλή Εφέντη. Το σημαντικό αυτό χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σχηματοποίηση διαπιστώθηκε και από επιτόπια αυτοψία (βλ. 4.5.3).

Τα παραπάνω καθιστούν προφανές ότι η επιρροή του φυσικού υδροσυστήματος και των ανθρώπινων παρεμβάσεων έχει σοβαρές επιπτώσεις στην αντικειμενικότητα των μετρήσεων, με συνέπεια να υπάρχει προφανής αβεβαιότητα στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αν και, στο μέτρο του δυνατού, έγινε προσπάθεια περιγραφής των παραπάνω ιδιαιτεροτήτων στη σχηματοποίηση του υδροσυστήματος, δεν είναι δυνατό να εξαλειφθεί η αβεβαιότητα των αποκρίσεων στον Αλή Εφέντη.

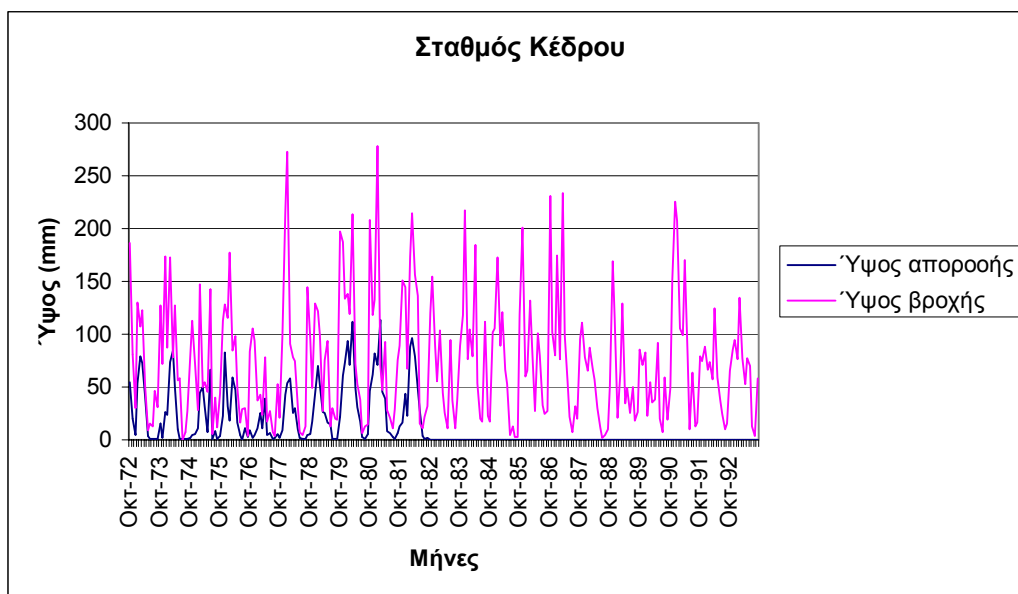
Στο Σχήμα 5.6 διακρίνουμε σε ορισμένους χειμερινούς μήνες πολύ μεγάλες μετρημένες απορροές κυρίως την περίοδο της βαθμονόμησης οι οποίες δεν δικαιολογούνται από τη βροχόπτωση των ανάντη λεκανών.



Σχήμα 5.6: Ύψος απορροής Αλή Εφέντη και ύψους μηνιαίας βροχόπτωσης ανάντη λεκάνης.

### 5.3.2 Υδρομετρικός σταθμός Κέδρου

Ο υδρομετρικός σταθμός του Κέδρου βρίσκεται στο ομώνυμο χωριό της Καρδίτσας και στον ποταμό Σοφαδίτικο. Το χωριό βρίσκεται λίγα χιλιόμετρα κατάντη του φράγματος Σμοκόβου και οι υδρομετρήσεις αφορούν στην περίοδο 1/10/1972-1/9/1982. Ο συντελεστής συσχέτισης βροχής-απορροής έχει τιμή  $r = 0,67$ , την υψηλότερη από τους πέντε υδρομετρικούς σταθμούς. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται οι χρονοσειρές του ύψους βροχής και του ύψους απορροής στο σταθμό.

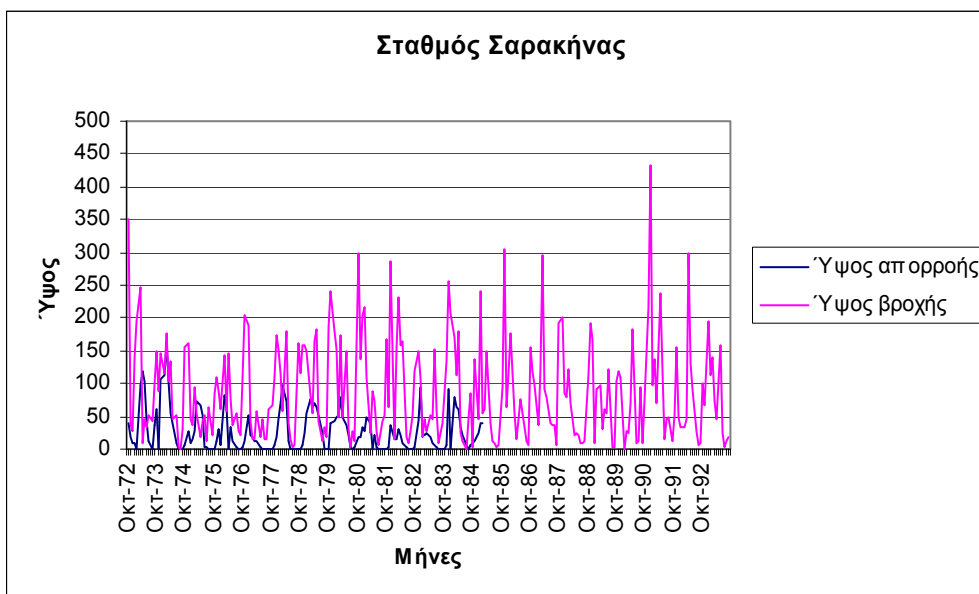


Σχήμα 5.7: Μηνιαία ύψη βροχής (Ανω Σοφαδίτη) και μετρημένης απορροής στον υδρομετρικό σταθμό του Κέδρου.

### 5.3.3 Υδρομετρικός σταθμός Σαρακήνας

Ο υδρομετρικός σταθμός της Σαρακήνας είναι ο δεύτερος σταθμός κατά μήκος του Πηνειού ποταμού και βρίσκεται στην ομώνυμη γέφυρα. Οι υδρομετρήσεις αφορούν στο χρονικό διάστημα 1/10/1972-1/2/1985, που καλύπτει την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου και τρία χρόνια από την περίοδο της επαλήθευσης. Ο συντελεστής συσχέτισης βροχής-απορροής είναι πολύ χαμηλός, με τιμή  $r = 0,37$ . Σύμφωνα με τους Κουτσογιάννη κ.ά. (1988), για μια μεγάλη περίοδο μέτρησης της στάθμης υπάρχουν ενδεχόμενα λάθη του σταθμηγράφου, επομένως δεν πρέπει να θεωρούμε αξιόπιστα τα δεδομένα του σταθμού αυτού. Λόγω του ότι όμως δεν υπάρχουν πολλοί υδρομετρικοί σταθμοί στο υδροσυστημά μας, ο σταθμός συμπεριλήφθηκε τελικά στη σχηματοποίηση γιατί ελέγχει το μηχανισμό γέννησης της απορροής του Πηνειού στο ανάντη (ορεινό) τμήμα του. Η κακή συσχέτιση μεταξύ βροχής-απορροής οφείλεται σε σφάλματα μετρήσεων, καθώς και στην επίδραση της χιονόπτωσης, η οποία δεν λήφθηκε υπόψη στη συγκεκριμένη μελέτη, αλλά βεβαίως δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, κυρίως όσον αφορά στις εαρινές παροχές.

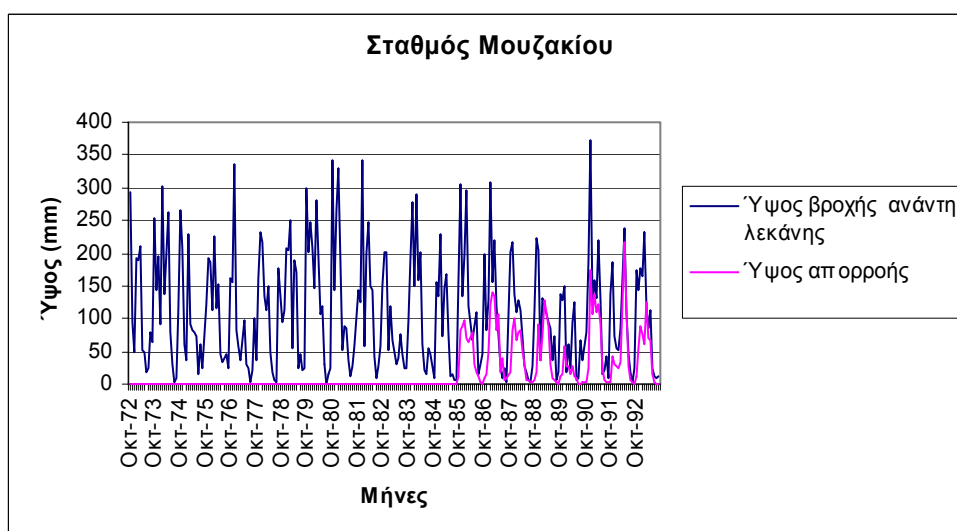
Στο Σχήμα 5.8 διακρίνουμε τη μεταβολή του ύψους βροχής ανάντη της Σαρακήνας και την μετρημένη μέση μηνιαία παροχή.



Σχήμα 5.8: Ύψος απορροής σταθμού Σαρακίνας και ύψος μηνιαίας βροχόπτωσης ανάτη λεκάνης.

### 5.3.4 Υδρομετρικός σταθμός Μουζακίου

Ο υδρομετρικός σταθμός του Μουζακίου βρίσκεται στη θέση του ομώνυμου φράγματος, το οποίο μαζί με το φράγμα της Πύλης αποτελούν τα βασικά τεχνικά έργα της μελέτης εκτροπής του Αχέλωου ποταμού, στην πλευρά της Θεσσαλίας. Ο υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται στον παραπόταμο του Πηνειού, Πάμισο. Οι υδρομετρήσεις αφορούν μόνο στην περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου, πιο συγκεκριμένα από 1/10/1985 μέχρι 1/9/1993. Ο συντελεστής συσχέτισης βροχής-απορροής έχει καλή τιμή  $r = 0,65$ , παρόλο που ούτε σε αυτή την περίπτωση έχει ληφθεί υπόψη η συνεισφορά του χιονιού. Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται το ύψος μετρημένης απορροής στον υδρομετρικό σταθμό και το ύψος μηνιαίας βροχόπτωσης της ανάτη λεκάνης.



Σχήμα 5.9: Ύψος απορροής υδρομετρικού σταθμού Μουζακίου και ύψος μηνιαίας βροχόπτωσης ανάτη λεκάνης.

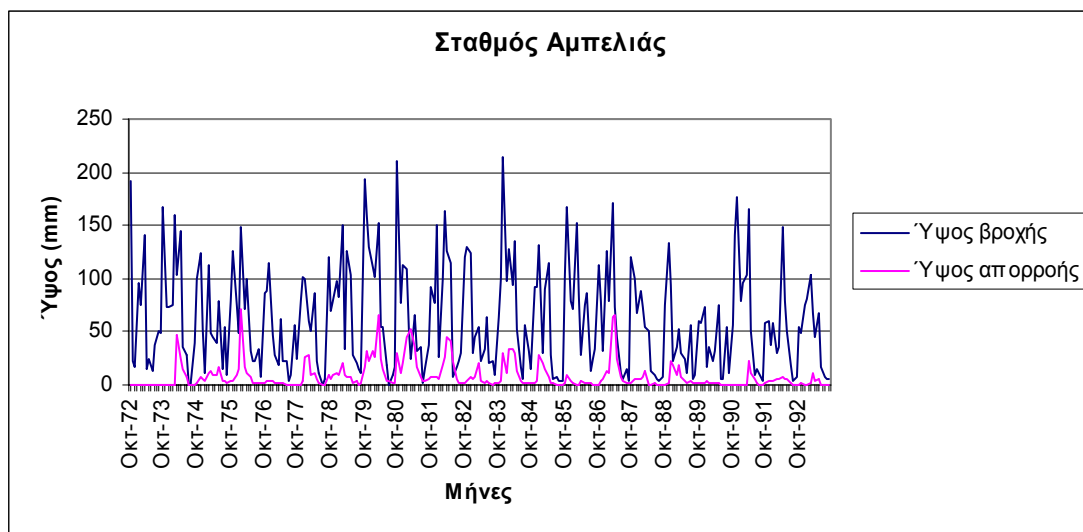
### 5.3.5 Υδρομετρικός σταθμός Αμπελιάς

Ο Ενιπέας, που είναι ο μεγαλύτερος παραπόταμος του Πηνειού, πηγάζει από τα νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης (Δομοκό) και στη συνέχεια εκβάλλει στο Πηνειό. Στον Ενιπέα πραγματοποιούνταν υδρομετρήσεις στις θέσεις Σκοπιά και Αμπελιά. Όπως τονίζεται από τους Κουτσογιάννη κ.ά. (1988), οι υδρομετρήσεις στον Ενιπέα παρουσιάζουν σφάλματα λόγω:

- της κακής διαμόρφωσης της κοίτης του ποταμού στα σταθμό Αμπελιά.
- την έλλειψη σταθμηγράφου στο σταθμό της Σκοπιάς.
- την ύπαρξη εκτεταμένων σφαλμάτων στις μετρήσεις στάθμης στη Σκοπιά.

Στη μελέτη, θεωρήθηκε ως σημείο ελέγχου της παροχής ο σταθμός της Σκοπιάς. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών δοκιμών του μοντέλου έδειχναν πολύ κακή προσαρμογή, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες θέσεις ελέγχου της λεκάνης. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η αντικατάσταση του δείγματος μηνιαίων παροχών της Σκοπιάς με αυτό της Αμπελιάς, που επιτεύχθηκε με αναγωγή των παροχών με βάση το λόγο των εκτάσεων των δύο λεκανών απορροής. Η διαδικασία της βαθμονόμησης συνεχίστηκε με τα ανηγμένα δεδομένα της Αμπελιάς, με γνωστά βεβαίως τα προβλήματα στις μετρήσεις που έχει και αυτός ο σταθμός.

Για το τελικό δείγμα της απορροής, ο συντελεστής συσχέτισης με τη βροχής της ανάντη λεκάνης έχει τιμή  $r = 0,49$ . Η χαμηλή αυτή τιμή οφείλεται, εκτός των παραγόντων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και στην ύπαρξη προβλημάτων στη σωστή λειτουργία του βροχομετρικού σταθμού της Σκοπιάς, όπως επισημαίνεται από τους Κουτσογιάννη κ.ά. (1988).



Σχήμα 5.10: Ύψος ανηγμένης απορροής υδρομετρικού σταθμού Αμπελιάς και ύψος μηνιαίας βροχόπτωσης ανάντη λεκάνης.

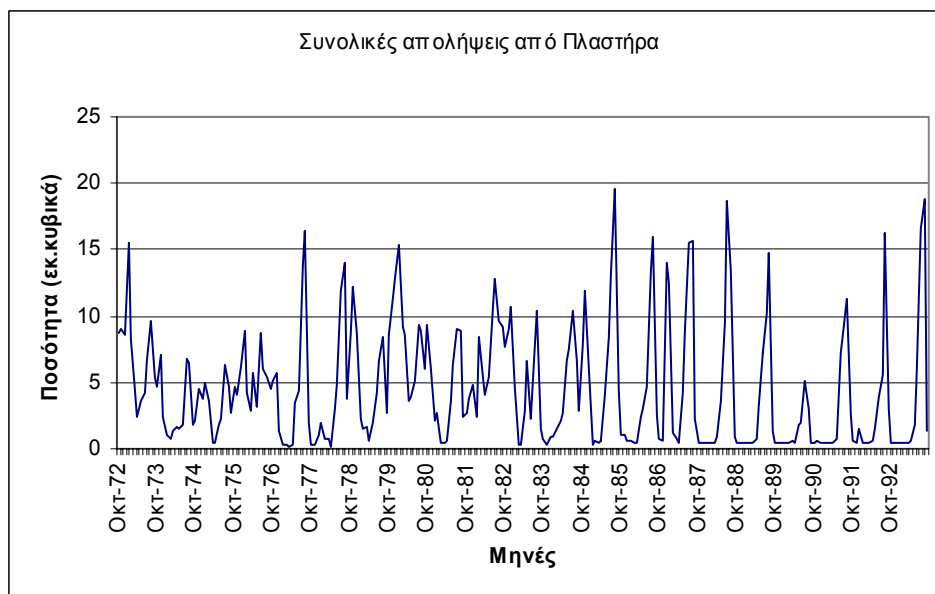
## 5.4 Εκροές λίμνης Πλαστήρα

Η λίμνη Πλαστήρα βρίσκεται στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης και κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1950, ως έργο ενεργειακού χαρακτήρα. Το φράγμα βρίσκεται στον ποταμό Μέγδοβα που είναι παραπόταμος του Αχελώου. Η λεκάνη απορροής του έχει έκταση  $165 \text{ km}^2$ . Η στάθμη υδροληψίας βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο  $+776 \text{ m}$ , ενώ η στάθμη υπερχειλίσσης βρίσκεται στα  $+792 \text{ m}$ . Σε αυτή τη στάθμη, ο συνολικός όγκος είναι  $400 \text{ hm}^3$ , ενώ η επιφάνεια είναι  $25,2 \text{ km}^2$ . Ο υπερχειλιστής του φράγματος είναι απλός χωρίς θυρόφραγμα, με παροχετευτικότητα  $460 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου, και λόγω των υψηλών αναγκών σε αρδευτικό νερό, η κύρια χρήση του ταμιευτήρα έγινε σταδιακά η αρδευτική. Οι μέσες ετήσιες εισροές εκτιμώνται σε 158 hm<sup>3</sup>, ενώ οι μέσες ετήσιες εκροές εκτιμώνται σε 145 hm<sup>3</sup>, με ένα ποσοστό της τάξης του 90% να πηγαίνει για την άρδευση. Επιπλέον, από τον ταμιευτήρα πραγματοποιείται η ύδρευση περίπου 50000 κατοίκων του Νομού Καρδίτσας. Συνεπώς, αν και ο ταμιευτήρας βρίσκεται εκτός της περιοχής μελέτης (αφού υδρολογικά ανήκει στη λεκάνη του Αχελώου), οι εκροές του πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διαμόρφωση του υδροσυστήματος. Συγκεκριμένα, οι ιστορικές απολήψεις από τον ταμιευτήρα θεωρήθηκαν ως τεχνητή προσφορά νερού στο υδροσύστημα, εισάγοντας στη σχηματοποίηση του αρδευτικού δικτύου έναν κόμβο που αναπαριστά την αναρρυθμιστική δεξαμενή κατάντη του υδροηλεκτρικού σταθμού.

Στο Σχήμα 5.11 διακρίνουμε τις συνολικές απολήψεις κατά τη διάρκεια της εικοσαετίας 1972-1993. Η μέγιστη απόληψη πραγματοποιήθηκε τον Αύγουστο του 1986 και ήταν 19,6 hm<sup>3</sup>, ενώ η ελάχιστη τιμή πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο του 1977 και ήταν 0.2 hm<sup>3</sup>. Στο διάγραμμα διακρίνουμε ακόμη τα εξής:

- Την πρώτη δεκαετία, το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο είναι αιχμής στο σύστημα της ΔΕΗ και τον χειμώνα χρησιμοποιούνται σημαντικές ποσότητες νερού για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.
- Τη δεύτερη δεκαετία το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο γίνεται βάσεως και μειώνονται σημαντικά οι ποσότητες που διοχετεύονται το χειμώνα.
- Τη δεύτερη δεκαετία σημειώνονται σημαντική αύξηση στις θερινές απολήψεις του ταμιευτήρα, σε σύγκριση με τη πρώτη δεκαετία.



Σχήμα 5.11: Μηνιαίες απολήψεις από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα.

## 5.5 Αρδευτικές ανάγκες

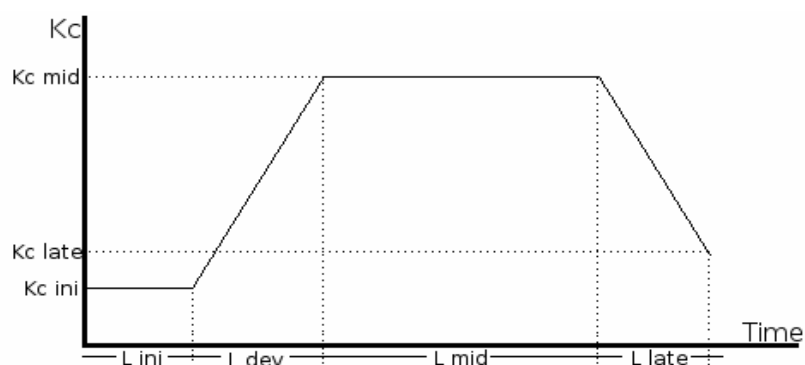
Ο υπολογισμός των υδατικών αναγκών κάθε αρδευτικού κόμβου του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ειδικού λογισμικού «Δίψος» (Ρόζος, 2005).

Η εκτίμηση της υδατικής κατανάλωσης των φυτών που αρδεύονται βασίζεται στη σχέση:

$$E_c = k_c E_{TC} \quad (5.5)$$

όπου  $E_c$  η δυνητική εξατμοδιαπνοή της συγκεκριμένης καλλιέργειας,  $E_{rc}$  η εξατμοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς και  $k_c$  εμπειρικός συντελεστής, γνωστός ως φυτικός συντελεστής. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (ύψος και διάπλαση των φυτών, επιφανειακή και αεροδυναμική αντίσταση τους, κλιματολογικές συνθήκες, κ.α.). Μετά από συστηματικές πειραματικές μελέτες έχουν βρεθεί οι τιμές του συντελεστή  $k_c$  ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και με το στάδιο ανάπτυξης της ή την εποχή (μήνα). Τυπική καμπύλη της εξέλιξης του συντελεστή φαίνεται στο Σχήμα 5.12.

Στην περιοχή μελέτης, οι καλλιέργειες που αναπτύσσονται, κατά κύριο λόγο, είναι το βαμβάκι, το καλαμπόκι, η μηδική, ο καπνός και τα μπιστόνια. Στον Πίνακα 5.7 διακρίνονται οι βασικές τιμές του σταδίου ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας (FAO), ενώ στο Σχήμα 5.12 διακρίνονται τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα σταδίων ανάπτυξης καλλιέργειας.

Πίνακας 5.7: Φυτικοί συντελεστές και στάδια ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας.

	L ini	L dev	L mid	L late	Kc ini	Kc mid	Kc end
Καλαμπόκι	27	72	125	160	0.30	1.20	0.60
Βαμβάκι	45	135	180	225	0.35	1.15	0.70
Μηδική	10	30	50	60	0.40	0.95	0.90
Οπώρες	60	150	270	365	0.80	1.00	0.80
Σακχαρότευτλο	30	75	165	180	0.35	1.20	0.70
Καπνός	10	35	70	105	0.35	1.20	0.75
Καρπούζι	20	50	80	110	0.40	1.00	0.75

Η δυνητική εξατμοδιαπνοή εκτιμάται με τη μέθοδο Penman-Monteith, χρησιμοποιώντας μέσες μηνιαίες τιμές ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, σχετικής ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου.

Ο υπολογισμός των αναγκών κάθε αρδευτικού κόμβου του δικτύου έγιναν ως εξής:

- Με βάση την τοπολογία των κόμβων ζήτησης του υδροσυστήματος, ομαδοποιήθηκαν οι κοινότητες.
- Υπολογίστηκαν οι αθροιστικές καλλιέργειες του κάθε κόμβου, χρησιμοποιώντας το αρχείο καλλιεργειών του Υπουργείου Γεωργίας (Τμήμα Υδρογεωλογίας και Μαθηματικών Ομοιομάτων) της Δυτικής Θεσσαλίας, το οποίο περιλαμβάνει τα είδη καλλιεργειών και τις εκτάσεις ανά κοινότητα των νομών Καρδίτσας και Τρικάλων.



- Για κάθε είδος καλλιέργειας και για κάθε κόμβο, υπολογίστηκε η αρδευτική ζήτηση για τα έτη 1972, 1982 και 1993. Συγκεκριμένα, με βάση τη μέθοδο Penman-Monteith, εκτιμήθηκαν οι θεωρητικές ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό, με βάση τα μέσα μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού Τρικάλων για την περίοδο μελέτης (Πίνακας 5.8). Αυτά είναι τα αντιπροσωπευτικότερα για την περιοχή, στην οποία δεν λειτουργούν αρκετοί μετεωρολογικοί σταθμοί. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο φυτικός συντελεστής  $k_c$  για τα στάδια ανάπτυξης κάθε φυτού, με βάση τις υποδείξεις του FAO. Για όλες τις καλλιέργειες, θεωρήθηκε κοινή ημερομηνία σποράς η 20η Απριλίου. Η παραδοχή αυτή έγινε γιατί οι κύριες καλλιέργειες της περιοχής είναι το βαμβάκι και ο αραβόσιτος.
- Για τα έτη 1972, 1982 και 1993, υπολογίστηκαν οι συνολικές ανάγκες κάθε κόμβου, αθροίζοντας τις επιμέρους ανάγκες κάθε καλλιέργειας.
- Για όλα τα ενδιάμεσα έτη, οι υδατικές ανάγκες κάθε κόμβου εκτιμήθηκαν μέσω γραμμικής παρεμβολής.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και οι αναγκαίες παραδοχές που έγιναν οφείλονται, κατά κύριο λόγο, στο τεράστιο πλήθος των πρωτογενών δεδομένων καλλιεργειών για την περίοδο μελέτης. Ο αναλυτικός μηνιαίος υπολογισμός των υδατικών αναγκών κάθε κόμβου ζήτησης ήταν κάτι που ξεφεύγει από το σκοπό μιας διπλωματικής εργασίας.

Επισημαίνεται ότι επειδή δεν βρέθηκαν αντίστοιχα αρχεία καλλιεργειών για την περιοχή της Φθιώτιδας, έγινε η παραδοχή ότι ο αντίστοιχος αρδευτικός κόμβος ζήτησης έχει τις ίδιες ανάγκες με το, κόμβο της Αγιοπηγής, με τον οποίο έχει παρόμοια σχεδόν έκταση. Οι συνολικές μηνιαίες αρδευτικές ανάγκες του υδροσυστήματος διακρίνονται στο Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.8: Μέσα μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Τρικάλων.

ΜΗΝΑΣ	Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Κλάσμα ηλιοφάνειας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
Ιανουάριος	1,5	10,0	75,5	0,6	1,4
Φεβρουάριος	2,8	11,8	72,7	0,5	1,5
Μάρτιος	5,2	15,4	66,8	0,6	1,8
Απρίλιος	8,5	20,0	59,3	0,6	2,1
Μάιος	13,3	25,8	55,6	0,6	2,1
Ιούνιος	17,2	31,1	46,9	0,7	2,1
Ιούλιος	18,9	32,8	47,6	0,8	1,7
Αύγουστος	18,3	31,9	51,8	0,8	1,6
Σεπτέμβριος	15,2	28,8	55,6	0,8	1,5
Οκτώβριος	11,2	22,1	68,1	0,6	1,2
Νοέμβριος	6,4	15,1	77,1	0,6	1,1
Δεκέμβριος	2,8	10,9	78,1	0,5	1,3

Πίνακας 5.9: Μέσες μηνιαίες υδατικές ανάγκες υδροσυστήματος.

	Ποσότητα (hm <sup>3</sup> )	Ποσοστό (%)
Μάιος	0,127	0,02
Ιούνιος	97,892	18,08
Ιούλιος	145,617	26,89
Αύγουστος	165,502	30,57
Σεπτέμβριος	132,192	24,41

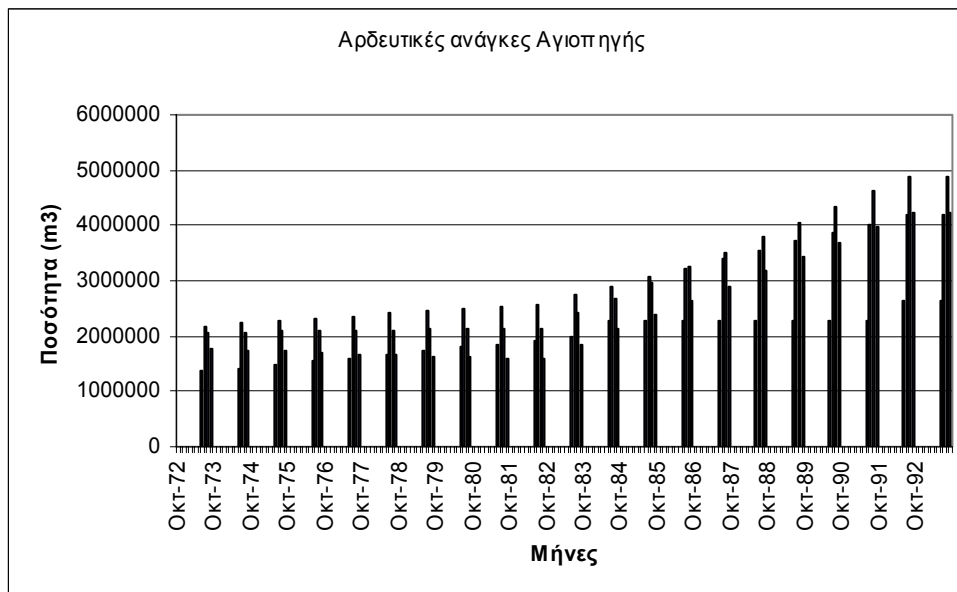
## 5.6 Εξέλιξη αρδευτικής ζήτησης

### 5.6.1 Αρδευτικός κόμβος Αγιοπηγής

Ο κόμβος της Αγιοπηγής βρίσκεται στα νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνει καλλιεργήσιμες εκτάσεις των δήμων Καλλιφωνίου, Μητρόπολης, Ιτάμου και Καρδίτσας. Πρόκειται για εκτάσεις που κατά κύριο λόγο αρδεύονται από ιδιωτικές και κρατικές γεωτρήσεις, και κατά ένα μικρό ποσοστό από νερά της λίμνης Πλαστήρα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.13, οι υδατικές ανάγκες συνεχώς αυξάνονται, ενώ τη δεύτερη δεκαετία οι μεταβολές της αύξησης γίνονται ακόμα μεγαλύτερες σε σύγκριση με την πρώτη.

Υπενθυμίζεται ότι οι ανάγκες του συγκεκριμένου αρδευτικού κόμβου θεωρήθηκαν ίσες με αυτές του κόμβου της Φθιώτιδας (βλ. 5.5).

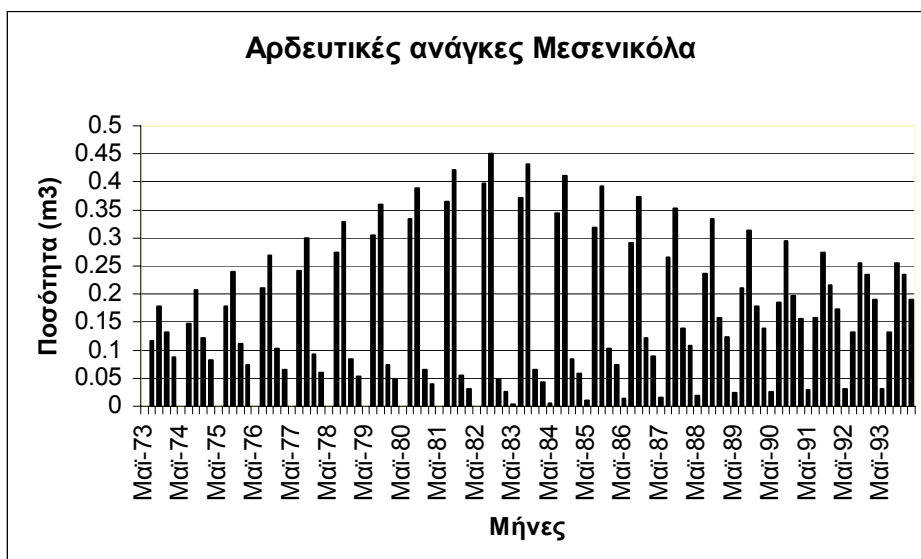


Σχήμα 5.13: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Αγιοπηγής.

### 5.6.2 Αρδευτικός κόμβος Μεσενικόλα

Ο κόμβος του Μεσενικόλα βρίσκεται στα δυτικά της περιοχής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει τρία χωριά του δήμου Πλαστήρα (Μεσενικόλας, Μορφοβούνη, Μοσχάτο), τα οποία ικανοποιούν τη αρδευτική τους ζήτηση από νερά του ταμιευτήρα Πλαστήρα.

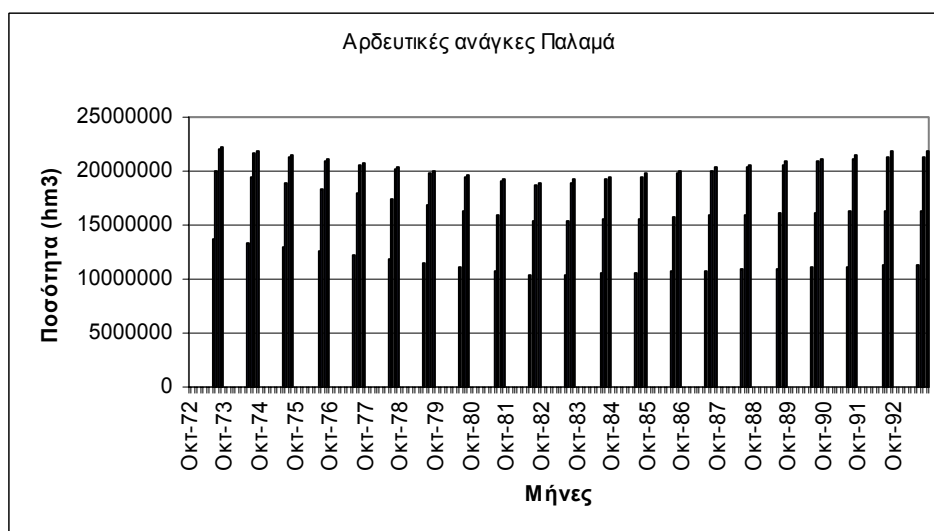
Με βάση το Σχήμα 5.14, η μέγιστη ζήτηση του αρδευτικού κόμβου παρουσιάστηκε το καλοκαίρι του 1981. Την πρώτη δεκαετία έχουμε συνεπώς αύξηση της ζήτησης, ενώ τη δεύτερη μείωση.



Σχήμα 5.14: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Μεσσηνικόλα.

### 5.6.3 Αρδευτικός κόμβος Παλαμά

Ο κόμβος του Παλαμά βρίσκεται στα κεντροανατολικά της περιοχής μελέτης και αφορά καλλιεργήσιμες εκτάσεις των δήμων Παλαμά, Φύλλου, Άρνης και Κάμπου. Η ζήτηση της περιοχής καλύπτεται από γεωτρήσεις και επιφανειακά νερά από τη λίμνη Πλαστήρα. Οι μηνιαίες υδατικές ανάγκες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15, παρουσιάζουν μια σχετική σταθερότητα, με μέγιστες τιμές το καλοκαίρι του 1972.

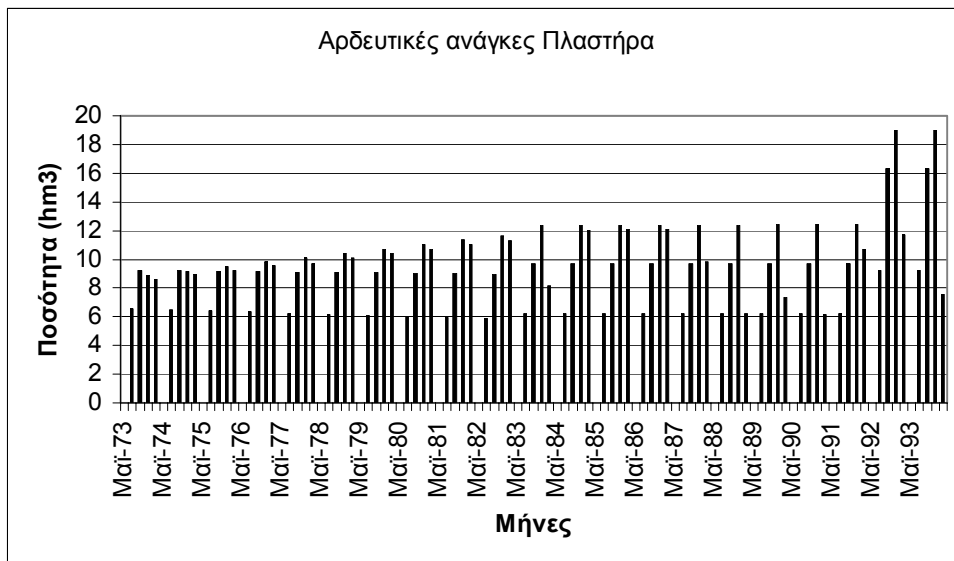


Σχήμα 5.15: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Παλαμά.

### 5.6.4 Αρδευτικός κόμβος Πλαστήρα

Ο αρδευτικός κόμβος του Πλαστήρα περιλαμβάνει εκτάσεις των δήμων Καρδίτσας, Μητρόπολης, Κάμπου και Ιθώμης, έκτασης 150000 στρεμμάτων. Πρόκειται για την περιοχή στην οποία αναπτύσσεται το αρδευτικό δίκτυο του Πλαστήρα. Η αρδευτική ζήτηση καλύπτεται, κατά κύριο λόγο, από τα νερά της λίμνης, ενώ μικρές ποσότητες αντλούνται από ιδιωτικές γεωτρήσεις. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 5.16, την πρώτη δεκαετία η ζήτηση παρουσιάζει μια μικρή

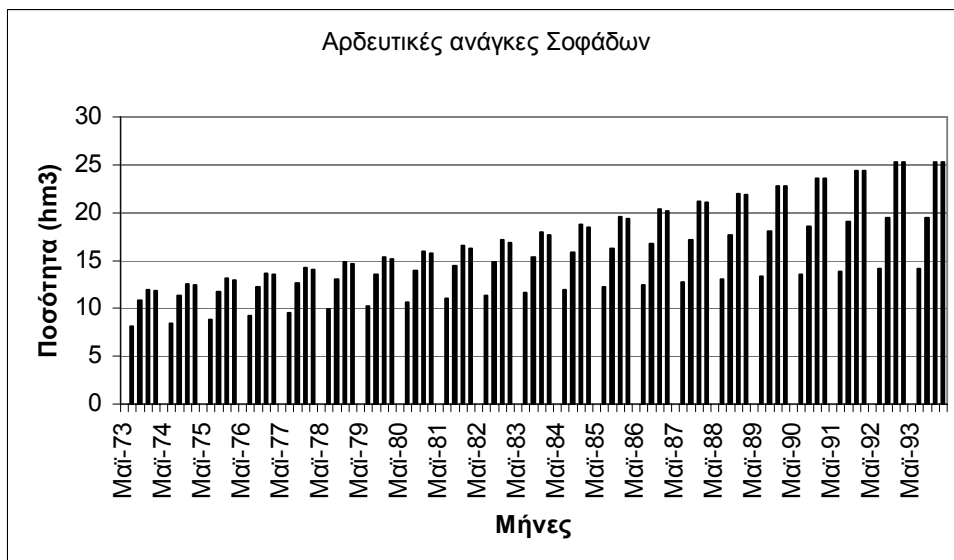
αύξηση. Την περίοδο 1983-90 έχουμε μια σταθεροποίηση της αγροτικής ζήτησης, ενώ τις δύο τελευταίες χρονιές η ζήτηση αυξάνεται κατακόρυφα.



Σχήμα 5.16: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Πλαστήρα.

### 5.6.5 Αρδευτικός κόμβος Σοφάδων

Ο αρδευτικός κόμβος Σοφάδων είναι ο μεγαλύτερος σε έκταση του δικτύου της Καρδίτσας. Περιλαμβάνει εκτάσεις των δήμων Σοφάδων, Ταμασίου και Μενελαίδος. Βρίσκεται νότια της περιοχής μελέτης και ικανοποιεί τη ζήτηση του σχεδόν από ιδιωτικές και κρατικές γεωτρήσεις, και κατά ένα μικρό ποσοστό από επιφανειακά νερά του Σοφαδίτικου και του Φαρσαλιώτη. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο Σχήμα 5.18, η αρδευτική ζήτηση σχεδόν διπλασιάζεται κατά την περίοδο μελέτης.

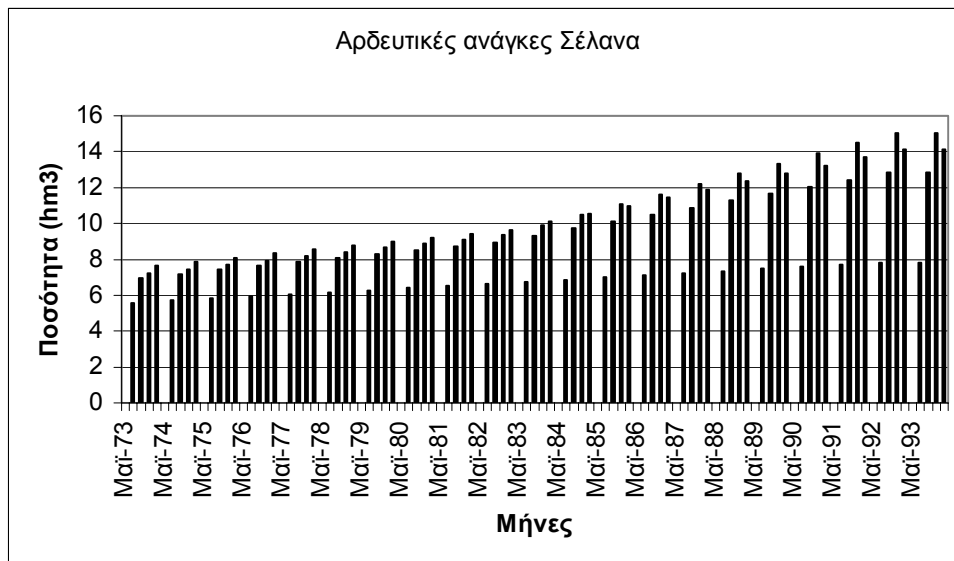


Σχήμα 5.17: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Σοφάδων.

### 5.6.6 Αρδευτικός κόμβος Σελάνων

Ο κόμβος των Σελάνων βρίσκεται στη κεντρική περιοχή της περιοχής μελέτης και βόρεια της Καρδίτσας. Περιλαμβάνει αρδευόμενες περιοχές των δήμων Σελάνων, Παμίσου και Μουζακίου. Η άρδευση των εκτάσεων γίνεται από γεωτρήσεις και σε μικρό ποσοστό από νερά του Πλαστήρα και

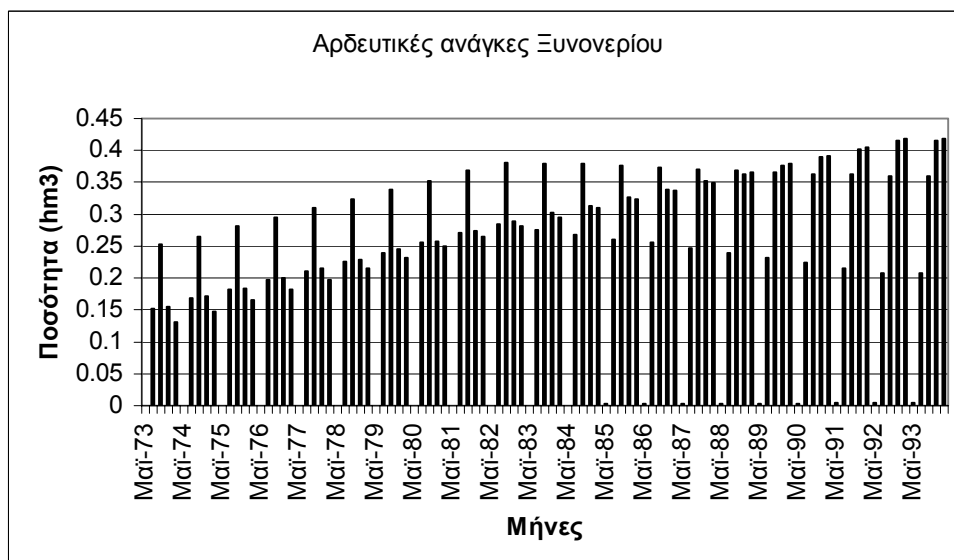
του Παμίσου. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.18, οι υδατικές ανάγκες του κόμβου αυξάνονται καθόλη τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, με μεγαλύτερες ρυθμό τη δεύτερη δεκαετία



Σχήμα 5.18: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Σελάνων.

### 5.6.7 Αρδευτικός κόμβος Ξυνονερίου

Ο αρδευτικός κόμβος αφορά τις αρδευόμενες εκτάσεις των χωριών Ρούσο και Ξυνονέρι. Η αρδευτική ζήτηση του συγκεκριμένου κόμβου καλύπτεται αποκλειστικά από νερά της λίμνης Πλαστήρα. Τα δύο χωριά βρίσκονται μέσα στη περιοχή του κόμβου της Αγιοπηγής, αλλά λόγω του διαφορετικού αρδευτικού δικτύου ομαδοποιούνται και μορφώνονται σε ξεχωριστό κόμβο ζήτησης. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.19, η ζήτηση αυξάνεται τη πρώτη δεκαετία, ενώ σταθεροποιείται τη δεύτερη.

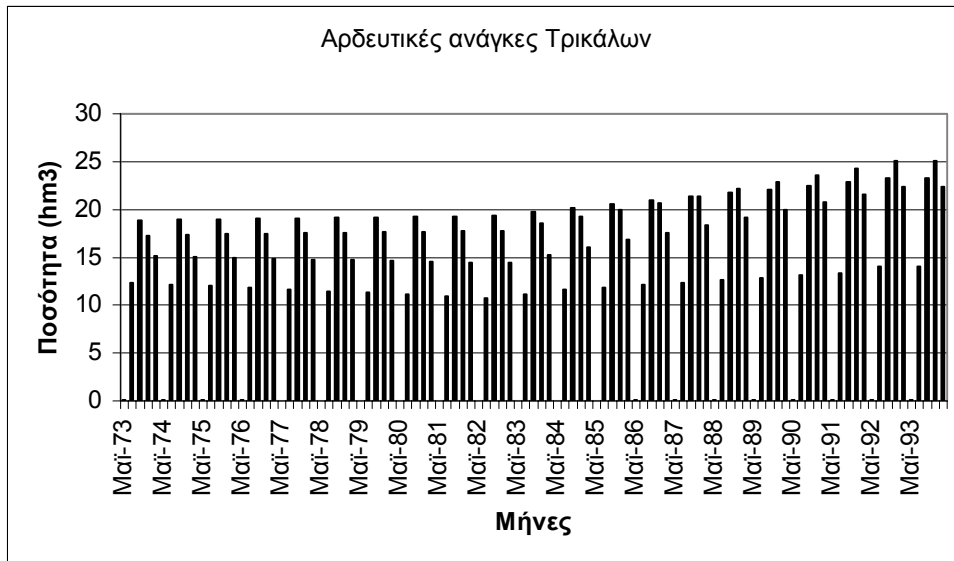


Σχήμα 5.19: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Ξυνονερίου.

### 5.6.8 Αρδευτικός κόμβος Τρικάλων

Ο αρδευτικός κόμβος των Τρικάλων περιλαμβάνει όλες τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις των κοινοτήτων του νομού Τρικάλων και βρίσκεται βόρεια στη περιοχή μελέτης. Η έκταση του κόμβου είναι της

τάξεως των 70000 στρεμμάτων. Στο Σχήμα 5.20 απεικονίζεται η εξέλιξη της αρδευτικής ζήτησης. Μπορούμε να διακρίνουμε μια μικρή διαχρονική αύξηση των υδατικών αναγκών του κόμβου.



Σχήμα 5.20: Μηνιαίες υδατικές ανάγκες αρδευτικού κόμβου Τρικάλων.

## 6 Βαθμονόμηση μοντέλου

---

### 6.1 Διατύπωση του προβλήματος

#### 6.1.1 Περίοδος ελέγχου

Για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου είναι επιθυμητή η ύπαρξη συστηματικών μετρήσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε αντιπροσωπευτικές θέσεις της λεκάνης. Οι μετρήσεις αυτές πρέπει να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υδροκλιματικών συνθηκών και να εκτείνονται μέχρι το πρόσφατο παρελθόν, έτσι ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την προγνωστική ικανότητα του μοντέλου. Οι περιορισμοί που αφορούν τη διαθεσιμότητα του συνόλου των δεδομένων οδήγησαν στην επιλογή της περιόδου 1972-1993, για την οποία παρέχεται ο απαιτούμενος όγκος πληροφοριών.

Η περίοδος ελέγχου του μοντέλου περιλαμβάνει 20 υδρολογικά έτη, από τον Οκτώβριο του 1972 μέχρι το Σεπτέμβριο του 1993. Πρόκειται για αντιπροσωπευτικό ιστορικό δείγμα της λεκάνης, καθώς περιλαμβάνει αλληλουχία υγρών και ξηρών υδρολογικών περιόδων. Επίσης, στη συγκεκριμένη περίοδο αποτυπώνεται μια μεγάλη αυξητική τάση της αρδευτικής ζήτησης και των υπόγειων απολήψεων, οπότε θεωρείται και από αυτή τη πλευρά κατάλληλη περίοδος για τη προσαρμογή του μοντέλου.

Η περίοδος ελέγχου χωρίστηκε σε δύο χρονικές ενότητες. Η πρώτη αφορά στην περίοδο 1972-1982, κατά την οποία έγινε η βαθμονόμηση του μοντέλου, ενώ η δεύτερη αφορά στην περίοδο 1982-1993, η οποία αντιστοιχεί στην περίοδο επαλήθευσης του μοντέλου.

#### 6.1.2 Ιστορικές χρονοσειρές

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

- Υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου.
- Χρονοσειρές υδατικών αναγκών.
- Χρονοσειρές ελέγχου, δηλαδή χρονοσειρές με τις οποίες ελέγχεται η προσαρμογή του μοντέλου.

Αναλυτικότερα:

Οι υδρολογικές χρονοσειρές εισόδου είναι τα μηνιαία ύψη βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής, που αναφέρονται στις 12 λεκάνες απορροής του υδροσυστήματος. Υπενθυμίζεται ότι για την κατασκευή των βροχοπτώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα μηνιαία δεδομένα 19 βροχομετρικών σταθμών, η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε με τη μέθοδο Thiessen, και ακολούθησε υψομετρική αναγωγή των δειγμάτων, θεωρώντας κοινή βροχοβαθμίδα για όλη την περιοχή μελέτης. Η δυνητική εξατμοδιαπνοή θεωρήθηκε κοινή για όλες τις λεκάνες απορροής, ενώ ο υπολογισμός της έγινε με τη μέθοδο Penman-Monteith, χρησιμοποιώντας τα μέσα μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού Τρικάλων.

Οι μηνιαίες υδατικές ανάγκες αναφέρονται στους δέκα αρδευτικούς κόμβους του υδροσυστήματος. Μετά τη σχηματοποίηση του αρδευτικού δικτύου της Δυτικής Θεσσαλίας, ομαδοποιήθηκαν στους αρδευτικούς κόμβους τα είδη και η έκταση των καλλιεργειών. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι

υδατικές ανάγκες των αρδευτικών κόμβων για τα έτη 1972, 1982 και 1993 με τη μέθοδο Penman-Monteith και ακολουθηθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στα κεφάλαιο 5.5.

Για το έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν 16 δείγματα μετρημένων τιμών. Πρόκειται για τις μέσες μηνιαίες παροχές των σταθμών Αλή Εφέντη, Κέδρου, Μουζακίου, Αμπελιάς και Σαρακίνας, καθώς και στις παρατηρήσεις στάθμης σε 11 γεωτρήσεις που εκτείνονται σε όλη την πεδινή περιοχή μελέτης. Υπενθυμίζεται ότι τα περισσότερα δείγματα δεν καλύπτουν όλη την περίοδο ελέγχου. Για παράδειγμα, στον σταθμό του Κέδρου υπάρχουν μετρήσεις μόνο στη περίοδο της βαθμονόμησης, ενώ στο Μουζάκι μόνο την περίοδο της επαλήθευσης.

Εκτός από τις χρονοσειρές, στον έλεγχο της προσαρμογής του μοντέλου ελήφθη υπόψη η εκτίμηση της μέσης μηνιαίας απορροής των πηγών του Κεφαλόβρυσου, σύμφωνα με μελέτη του Ι.Γ.Μ.Ε.

### 6.1.3 Μεταβλητές ελέγχου

Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος αναφέρονται στις προς βελτιστοποίηση παραμέτρους του μοντέλου. Συνολικά, το μοντέλο έχει 164 παραμέτρους για το σύνολο των υπολεκάνων που είναι:

- οι  $6 \times 9 = 54$  παράμετροι του μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας (6 για κάθε μία από τις 9 μονάδες υδρολογικής απόκρισης)
- οι 12 συντελεστές διήθησης των υδατορευμάτων
- οι  $2 \times 49 = 98$  παράμετροι του μοντέλου υπόγειας υδρολογίας (υδραυλική αγωγιμότητα και πορώδες των 49 κυττάρων).

Για την απλοποίηση του προβλήματος, θεωρήθηκε ενιαίο το άνω όριο πραγματοποίησης της άμεσης εξατμοδιαπνοής (καθώς συνδέεται περισσότερο με κλιματικούς παράγοντες παρά με υδρολογικούς) και το πορώδες. Όσον αφορά στους συντελεστές διήθησης, θεωρήθηκαν τέσσερις από αυτούς μη μηδενικοί, στον Πηγιό (στο τμήμα ανάντη του Αλή Εφέντη), τον Ενιπέα και τον Σοφαδίτη (στα δύο τμήματα ανάντη της συμβολής του με τον Φαρσαλιώτη), με βάση παρατηρήσεις της SOGREAH (1978). Συνεπώς, ο τελικός αριθμός των μεταβλητών ελέγχου ήταν 100.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης προϋποθέτει τον ορισμό ενός επιτρεπόμενου εύρους διακύμανσης των τιμών των μεταβλητών ελέγχου. Ο καθορισμός τους βασίστηκε αρχικά στη φυσική ερμηνεία των παραμέτρων, ωστόσο, κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, τα όρια αυτά μεταβλήθηκαν πολλές φορές, με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη διερεύνηση του χώρου αναζήτησης για την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης.

### 6.1.4 Αρχικές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου αναφέρονται: (α) στην αρχική εδαφική υγρασία των δεξαμενών συσσώρευσης του επιφανειακού υδρολογικού μοντέλου, και (β) στην αρχική στάθμη των δεξαμενών υπόγειου νερού.

Η αρχική εδαφική υγρασία, η οποία διαφοροποιείται για κάθε συνδυασμό λεκάνης και μονάδας υδρολογικής απόκρισης, θεωρήθηκε παντού μηδενική, δεδομένου ότι η προσομοίωση ξεκινά τον Οκτώβριο, που συμπίπτει με το πέρας της ξηρής περιόδου.

Όσον αφορά στις αρχικές στάθμες των δεξαμενών, αξιοποιήθηκαν οι διαθέσιμες μετρήσεις στα 11 από τα 49 κύτταρα του μοντέλου του υδροφορέα. Για υπόλοιπα κύτταρα, οι στάθμες ορίστηκαν κατά προσέγγιση, ώστε να είναι συμβατές με τον διαθέσιμο πιεζομετρικό χάρτη, που υποδεικνύει τη φορά κίνησης του νερού.

Το γεγονός ότι ήταν γνωστές οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος, είχε ως αποτέλεσμα να μην οριστεί περίοδος «προθέρμανσης» του μοντέλου (πρόκειται για ένα μικρό διάστημα στην αρχή κατά



το οποίο δεν ελέγχεται η προσαρμογή του μοντέλου, μέχρι να αποκατασταθεί ισορροπία στις μεταβλητές κατάστασης).

Οι στάθμες που υποδείκνυαν οι υδρογεωλογικές μελέτες τροποποιήθηκαν κατά την διάρκεια της βελτιστοποίησης, ιδίως στα κύτταρα που συνορεύαν με τις πηγές, καθώς οι απορροές των πηγών και η φυσική συμπεριφορά αυτών των κυττάρων παρουσίαζαν μεγάλη ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες. Ακόμη, οι αρχικές εκτιμήσεις αναθεωρήθηκαν στις περιπτώσεις κυττάρων που εμφάνιζαν μεγάλες μετακινήσεις όγκων νερού στα πρώτα βήματα της προσομοίωσης. Σε αυτή τη περίπτωση, μεταβλήθηκαν οι αρχικές στάθμες τις οποίες γνωρίζαμε κατ'εκτίμηση, για να ομαλοποιηθεί η φυσική συμπεριφορά του υπόγειου υδροσυστήματος.

### 6.1.5 Αντικειμενική συνάρτηση

Για την αυτόματη βαθμονόμηση των υδρολογικών παραμέτρων με τη χρήση τεχνικών ολικής βελτιστοποίησης απαιτείται η διατύπωση ενός μέτρου επίδοσης, το οποίο αντιστοιχεί στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Επειδή ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου είναι αρκετά μεγάλος, κρίθηκε αναγκαίος ο ταυτόχρονος έλεγχος πολλών κριτηρίων καλής προσαρμογής, κάτι που είναι σύμφωνο με την πρακτική που ακολουθείται διεθνώς (*Wagner et al.*, 2001).

Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε μια σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση, με τις ακόλουθες συνιστώσες:

- τους συντελεστές προσδιορισμού των υδρογραφημάτων στις 5 θέσεις μέτρησης κατά μήκος του υδρογραφικού δικτύου (Αλή Εφέντη, Μουζάκι, Κέδρος, Αμπελιά, Σαρακήνα)
- τη μεροληψία όσον αφορά στην αναπαραγωγή της μέσης τιμής, στις παραπάνω θέσεις
- τη μεροληψία όσον αφορά στην αναπαραγωγή της μέσης τιμής στις πηγές Κεφαλόβρυσου
- τους συντελεστές προσδιορισμού των παρατηρήσεων στάθμης στις 11 γεωτρήσεις του πεδινού υδροφορέα
- ένα μέτρο αναπαραγωγής της φυσικής συμπεριφοράς των υπόγειων κυττάρων, για τα οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Τα παραπάνω μεγέθη σταθμίστηκαν σε μια ενιαία αριθμητική έκφραση, χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές βάρους, που τέθηκαν με τρόπο ώστε να δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην αναπαραγωγή των παροχών, που είναι και το βασικό κριτήριο ελέγχου της αξιοπιστίας του μοντέλου.

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

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.1)$$

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  $\bar{x}$ .

Επειδή, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επιλύει συμβατικά προβλήματα βελτιστοποίησης, το κριτήριο που αναφέρεται στο κριτήριο υπολογισμού διατυπώθηκε τελικά ως:

$$\text{NSERR} = 1 - R \quad (6.2)$$

Η παραπάνω ποσότητα λαμβάνει τιμές από μηδέν μέχρι άπειρο. Προφανώς, η ελαχιστοποίηση του NSERR ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση του συντελεστή προσδιορισμού.

Η *μεροληψία* (bias) είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την ποσοστιαία απόκλιση της μέσης τιμής,  $\bar{y}$ , της προσομοιωμένης χρονοσειράς σε σχέση με τη μέση τιμή,  $\bar{x}$ , της παρατηρημένης. Η μεροληψία δίνεται από τη σχέση:

$$\text{BIAS} = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (6.3)$$

Αν  $\text{BIAS} > 0$  το μοντέλο υπερεκτιμά την ιστορική απορροή και αντίστροφα, αν  $\text{BIAS} < 0$ , τότε το μοντέλο υποεκτιμά την ιστορική απορροή. Από τον ορισμό του συντελεστή προσδιορισμού στην περίπτωση που  $R = 1$  το μοντέλο είναι αμερόληπτο, χωρίς να ισχύει το αντίθετο.

Η αναπαραγωγή της φυσικής συμπεριφοράς των υπόγειων κυττάρων για τα οποία δεν υπήρχαν μετρήσεις με τη χρήση ενός αριθμητικό μέτρο ελέγχου της τάσης, που βασίζεται στη *δοκιμή Kendall*. Η δοκιμή αυτή γίνεται ως εξής: Σε παρατηρημένη χρονοσειρά  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  εξετάζονται όλα τα δυνατά ζεύγη παρατηρήσεων  $x_i, x_j$  με  $j > i$  και υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός  $p$  των ζευγών για τα οποία ισχύει  $x_i < x_j$ . Το μέτρο τάσης είναι η ανηγμένη μεταβλητή:

$$\alpha = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (6.4)$$

Ορίζοντας ένα κατώφλι  $\alpha^* = 0.3$ , ελέγχεται αν  $|\alpha| > \alpha^*$ , που υποδηλώνει ότι η χρονοσειρά έχει έντονη τάση, αρνητική ή θετική. Μια τέτοια συμπεριφορά δεν θεωρείται ρεαλιστική, εφόσον αναφερόμαστε σε στάθμη υδροφορέα, που οφείλει να έχει ομαλές διακυμάνσεις.

## 6.2 Περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε σταδιακά με τον συνδυασμό των αυτομάτων υπολογιστικών μεθόδων και της ανθρώπινης κρίσης (*Boyle et al.*, 2000). Θα πρέπει να τονιστεί ότι καθ'όλη τη διάρκεια της βελτιστοποίησης έγινε προσπάθεια να αποκτηθεί ολιστική αντίληψη για τις υδρολογικές διεργασίες, αντίληψη η οποία υπαγόρευε ότι σε κάθε βήμα της βαθμονόμησης δεν θα αποκλείονταν από το μέτρο επίδοσης της αντικειμενικής συνάρτησης όποιες αποκρίσεις αύξαναν το σφάλμα του μέτρου επίδοσης. Αντίθετα, προχωρήσαμε σε μία σύνθετη στρατηγική ημιαυτόματης βαθμονόμησης, στην οποία μετά από κάθε βήμα σταθμίζονταν τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος ώστε να προχωρήσουμε στη βελτίωση των αποκρίσεων.

Ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι πολύ μεγάλος (διάστασης 100) και, παρά την εξέλιξη των τεχνικών βελτιστοποίησης, είναι ανέφικτη η βαθμονόμηση όλων ταυτόχρονα των παραμέτρων, ανεξάρτητα από το πλήθος των δοκιμών (που αποτελεί επιπλέον περιοριστικό παράγοντα, λόγω του υπολογιστικού φόρτου της προσομοίωσης). Όσες φορές στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιχειρήθηκε η ταυτόχρονη βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων δεν ήταν δυνατό να μειωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα του προβλήματος και στο γεγονός ότι στα προβλήματα βαθμονόμησης υδρολογικών μοντέλων ο χώρος των εφικτών λύσεων που παράγεται είναι έντονα μη κυρτός, και υπάρχει κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικό ακρότατο. Επομένως, καμία τεχνική βελτιστοποίησης, όσο εξελιγμένη υπολογιστικά και να είναι, δεν μπορεί να

υποκαταστήσει τη κρίση του μελετητή, ο οποίος πρέπει κάθε φορά να κρίνει τη λύση και να «υποβοηθά», με την επιστημονική του εμπειρία, τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων ακολούθησε τα εξής στάδια: Αρχικά, ρυθμίστηκαν οι παράμετροι του επιφανειακού μοντέλου (46 συνολικά), και μετά από επιλογή αυτών των παραμέτρων που μείωναν το σφάλμα του μέτρου επίδοσης μόνο της επιφανειακής απορροής προσεγγίσαμε τη βέλτιστη λύση όσον αφορά αυτές τις αποκρίσεις. Στη συνέχεια, μετά τη ρύθμιση των επιφανειακών παραμέτρων και αφού υπολογίστηκε η κατείδυση στον υπόγειο υδροφορέα προχωρήσαμε στην βαθμονόμηση των παραμέτρων του, δηλαδή των 49 παραμέτρων υδραυλικής αγωγιμότητας και μίας παράμετρου που αντιστοιχεί απλοποιητικά στο ενιαίο πορώδες της περιοχής μελέτης. Το υπόγειο μοντέλο της περιοχής έχει μια φυσική ιδιομορφία λόγω της κυκλοειδούς μορφής του, και η διαδικασία της βαθμονόμησης έγινε κατά περιοχή, επιλέγοντας τις αντίστοιχες παραμέτρους υδραυλικής αγωγιμότητας και μεταβάλλοντας κάποιες φορές τις αρχικές στάθμες για τη φυσικοποίηση της ροής του υπόγειου υδροσυστήματος.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης δεν είναι μηχανιστική, αλλά χρειάζεται τη ενεργή συμμετοχή και κρίση του μελετητή. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, την πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη στρατηγική, δεν προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον υδρομετρικό σταθμό του Αλή Εφέντη, ο οποίος θεωρείται πολύ σημαντικός λόγω του μεγάλου μήκους της παρατηρημένης χρονοσειράς και στις δύο περιόδους της μελέτης (ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν της τάξεως του 70%). Σε αυτή τη φάση, υπήρχαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρημένων τιμών κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Μετά από διερεύνηση πάνω στις διεργασίες του φυσικού υδροσυστήματος αποφασίστηκαν ορισμένες τροποποιήσεις στην αρχικές συνθήκες του οι οποίες περιλάμβαναν τα εξής:

- Διάκριση μεταξύ θερινής και χειμερινής λειτουργίας του υδροσυστήματος όσο αφορά τη ροή των νερών της λίμνης Πλαστήρα, τα οποία ακολουθούν διαφορετική διαδρομή τις δύο περιόδους.
- Τροποποίηση του υδροσυστήματος κοντά στον Αλή Εφέντη καθώς, όπως φαίνεται από τη διάταξη των αποστραγγιστικών καναλιών, σε περίπτωση υπερχείλισης του Ενιπέα, ποσότητες νερού διοδεύονται ανάντη του Αλή Εφέντη.

Όσον αφορά στον υπόγειο υδροφορέα, στην αρχική φάση της βαθμονόμησης ορισμένα κύτταρα συσσώρευαν σημαντικές ποσότητες νερού, γεγονός που ήταν ένδειξη απουσίας πηγών που θα αναρρύθμιζαν το υπόγειο μοντέλο. Πράγματι, μετά από επίσκεψη στο νομό Τρικάλων, βρέθηκαν οι πηγές Προδρόμου-Γοργυρίου, οι οποίες δεν αναφέρονταν σε προηγούμενες τεχνικές μελέτες και συμπεριλήφθηκαν στο υδροσύστημα.



Φωτογραφία των πηγών Προδρόμου-Γοργυρίου που εντοπίστηκαν μετά την χρήση και ερμηνεία βαθμονομήσεων του μοντέλου και ήταν απαραίτητες για την αναρρύθμιση του υδροσυστήματος

### 6.3 Αναπαραγωγή μετρημένων παροχών

Η προσαρμογή του επιφανειακού μοντέλου στις θέσεις των υδρομετρικών σταθμών και ο συντελεστής προσδιορισμού για κάθε χρονική περίοδο διακρίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Συντελεστές προσαρμογής στους υδρομετρικούς σταθμούς.

	Περίοδος	Βαθμονόμηση	Επαλήθευση
	Θέση	Συντελεστής Προσδιορισμού	Συντελεστής Προσδιορισμού
1	Αλή Εφέντης	81%	61,2%
2	Μουζάκι		57,7%
3	Κέδρος	68,7%	
4	Σαρακήνα	37,4%	83,9%
5	Αμπελιά	38,5%	24,1%

Στο κεφάλαιο 6.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσαρμογής στα κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα. Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι σημειακές μετρήσεις των γεωτρήσεων δεν μπορούν να εκφράσουν τη φυσική συμπεριφορά ενός υπόγειου κυττάρου υδροφορέα μεγάλης έκτασης. Οι μεγάλες τιμές του συντελεστή προσδιορισμού οφείλονται κατά κύριο λόγο στις μετρημένες υπόγειες στάθμες. Αυτό ήταν γνωστό και πριν την διαδικασία της βελτιστοποίησης αλλά και κατά την διάρκεια της. Το ζητούμενο για τις αντικειμενικές συναρτήσεις των υπόγειων κελιών ήταν να προσεγγίσουμε το μέσο όρο των μετρημένων τιμών και τις τάσεις των μετρημένων χρονοσειρών.

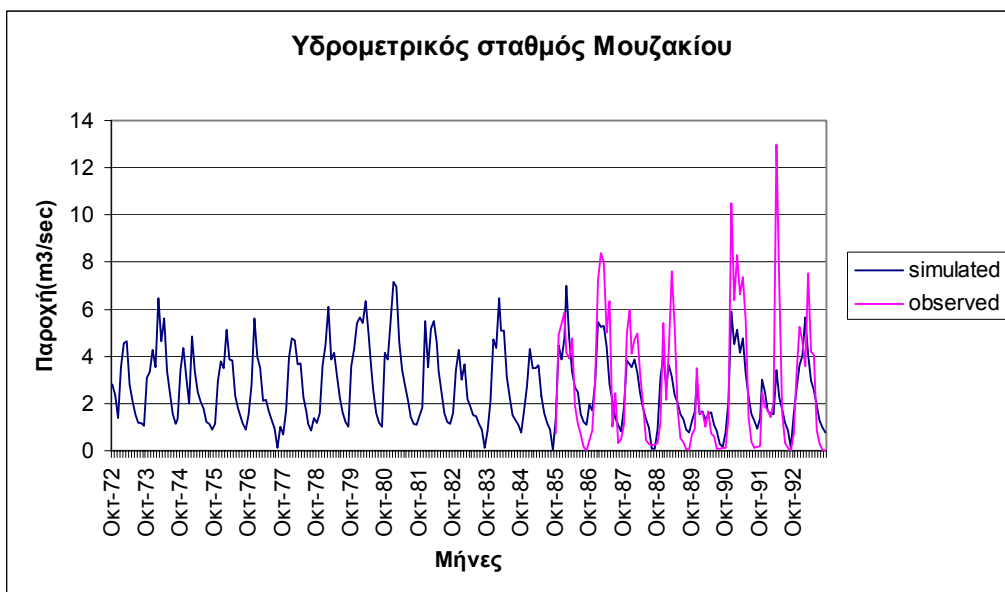
Στην παραπάνω παράμετρο πρέπει να συνυπολογίσουμε και τις κακές μετρήσεις στους υδρομετρικούς σταθμούς, τέτοια παρατεταμένα σφάλματα υπάρχουν και σε σταθμούς της περιοχής μελέτης (π.χ Σαρακήνα). Οι εσφαλμένες μετρήσεις αυξάνουν το σφάλμα και αναπαράγουν την αβεβαιότητα του υδροσυστημάτος.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης έπρεπε να στηριχθούμε σε αυτούς τους υδρομετρικούς σταθμούς στους οποίους έγιναν σωστές μετρήσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, όπως ο Αλή Εφέντης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε συνιστώσα της αντικειμενικής συνάρτησης.

#### 6.3.1 Υδρομετρικός σταθμός Μουζακίου

Ο υδρομετρικός σταθμός του Μουζακίου που βρίσκεται στη θέση του υπό μελέτη φράγματος. Τα πρωτογενή δεδομένα παροχής του υπάρχουν μόνο για την περίοδο επαλήθευσης (Οκτώβριος του 85 μέχρι το τέλος). Ο συντελεστής προσδιορισμού έχει τιμή  $R=57,7\%$  μια σχετικά μέτρια τιμή, σημαντικές αποκλίσεις εμφανίζονται την άνοιξη του 1991 και μικρότερες του 1990 οι οποίες και αυξάνουν το σφάλμα. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης βροχής-απορροής έχει επίσης μέτρια τιμή  $r = 50\%$ , αποτέλεσμα που ίσως να οφείλεται στην απουσία από την μελέτη της τήξης του χιονιού καθώς παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις τη περίοδο της Άνοιξης. Στο Σχήμα 6.1 διακρίνονται οι μετρημένες και προσομοιωμένες μέσες μηνιαίες παροχές.



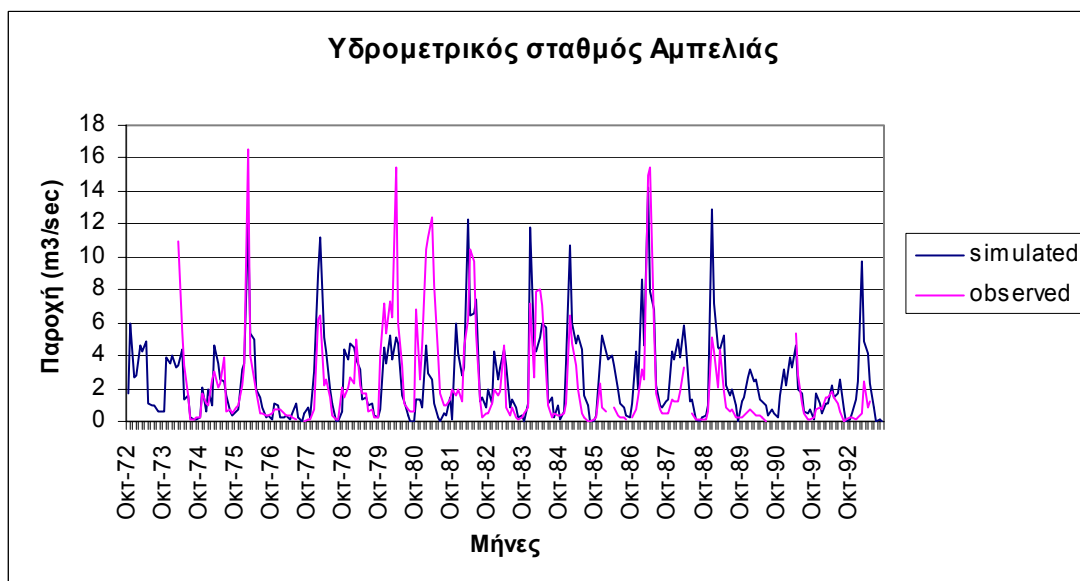
Σχήμα 6.1: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή Μουζακίου.

### 6.3.2 Υδρομετρικός σταθμός Αμπελιάς.

Έχουν αναφερθεί ήδη οι λόγοι των κακών πρωτογενών δεδομένων στο ποταμό Ενιπέα. Συνοψίζοντας μπορούμε να επαναλάβουμε ότι:

- Η κακή διαμόρφωση της κοίτης στη θέση του σταθμού Αμπελιάς οδήγησε σε παρατεταμένα σφάλματα πρωτογενών δεδομένων παροχής.
- Υπάρχουν σφάλματα στη μέτρηση της βροχής στο σταθμό της Σκοπιάς.
- Δεν λήφθηκε υπόψη η τήξη του χιονιού.

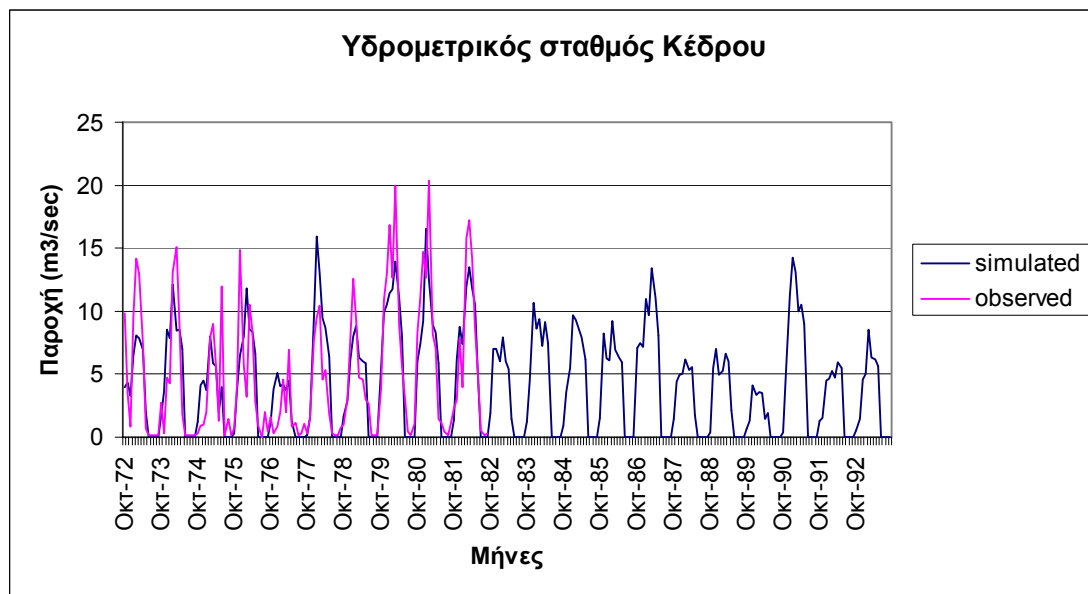
Με δεδομένα τα παραπάνω, η προσαρμογή του μοντέλου είναι μέτρια και στις δύο περιόδους. Ο συντελεστής προσδιορισμού για την περίοδο της βαθμονόμηση είναι 38,5% και 24,1% για την περίοδο της επαλήθευσης (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή σταθμού Αμπελιάς.

### 6.3.3 Υδρομετρικός σταθμός Κέδρου

Η θέση του υδρομετρικού σταθμού του Κέδρου που βρίσκεται κατάντη της θέσης του φράγματος Σμοκόβου έχει πρωτογενείς μετρημένες παροχές μόνο για τη περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου και προκύπτει μια καλή τιμή συντελεστή προσδιορισμού  $r=68,7\%$  ενώ η μεροληψία του μοντέλου για την ίδια περίοδο αποτυπώνει τάση υπερεκτίμησης της απόκρισης κατά 5,1%. Καθόλη τη διαδικασία της βελτιστοποίησης τα αποτελέσματα του υδρομετρικού σταθμού έδειχναν μεγάλη σταθερότητα ανεξάρτητα από τις παραμέτρους του επιφανειακού μοντέλου που επιλέγαμε για βαθμονόμηση (Σχήμα 6.3).

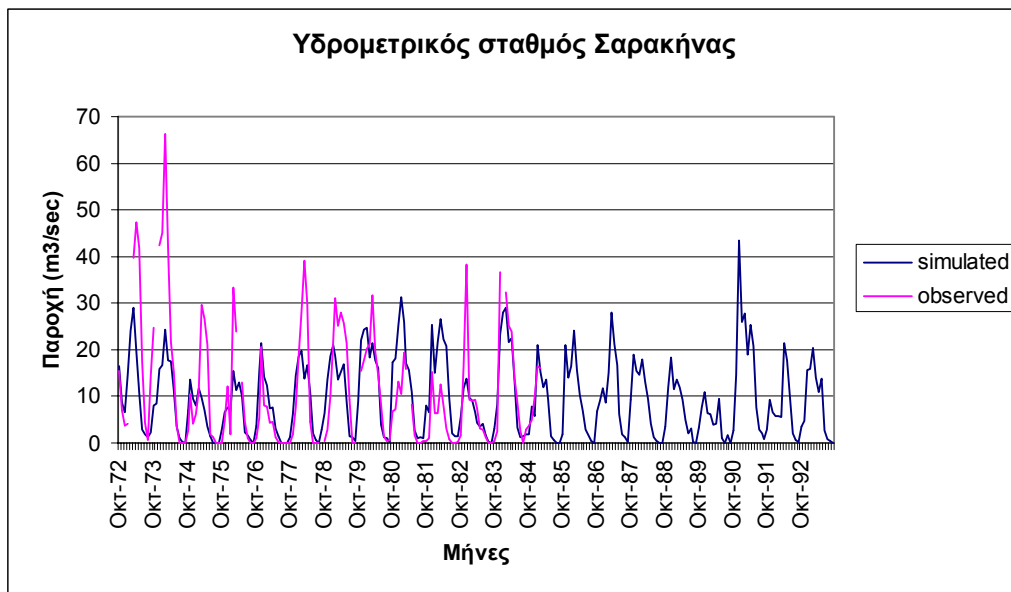


Σχήμα 6.3: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή υδρομετρικού σταθμού Κέδρου.

### 6.3.4 Υδρομετρικός σταθμός Σαρακήνας

Ο υδρομετρικός σταθμός στη γέφυρα της Σαρακήνας είναι ο πρώτος κατά μήκος του Πηνειού ποταμού και δέχεται την άνοιξη τις απορροές από τη τήξη του χιονιού. Το αποτέλεσμα του συντελεστή προσδιορισμού δεν είναι ικανοποιητικό για την περίοδο της βαθμονόμησης  $r = 37,4\%$  και όπως μπορούμε να διακρίνουμε από το παρακάτω διάγραμμα υπάρχουν εκτεταμένες αποκλίσεις της μετρημένης και της προσομοιωμένης παροχής κατά την διάρκεια της άνοιξης των ετών 1972, 1973, 1974, 1975 και 1977. Εξάλλου, ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης βροχής- απορροής είναι 37,5% και είναι μια μέτρια τιμή που δικαιολογεί τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν εκτεταμένα σφάλματα στις μηνιαίες μετρήσεις του σταθμού (Κουτσογιάννης κ.ά., 1988).

Αντίθετα, ο συντελεστής προσδιορισμού για την περίοδο της επαλήθευσης έχει πολύ καλή τιμή 83,9% αλλά το μήκος της χρονοσειράς είναι σχετικά μικρό (Οκτώβριος 1982-Φεβρουάριος 1985).



Σχήμα 6.4: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή υδρομετρικού σταθμού Σαρακήνας.

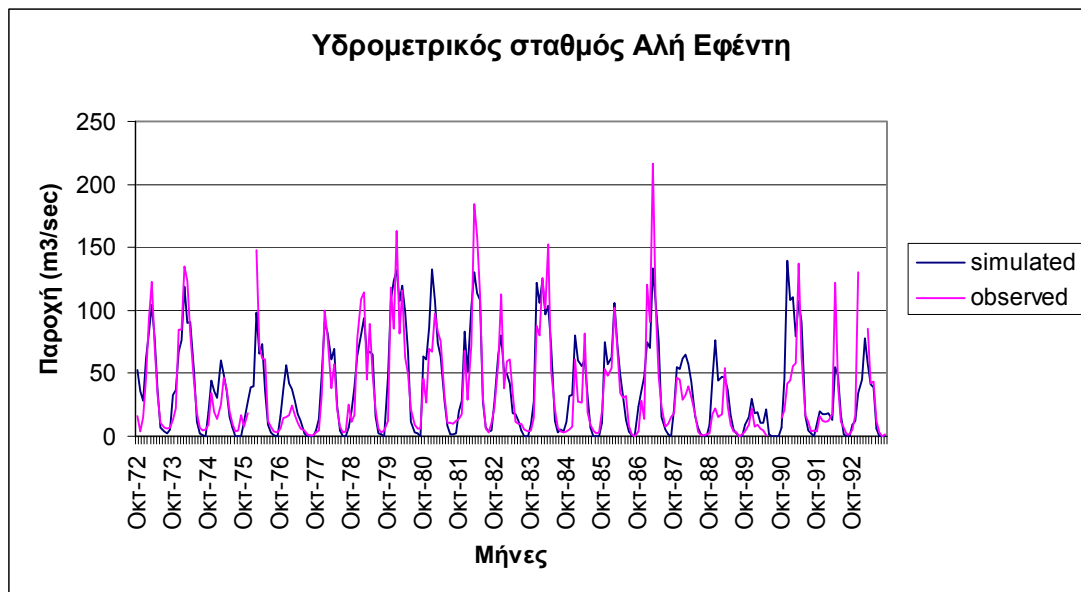
### 6.3.5 Υδρομετρικός σταθμός Αλή Εφέντη

Ο υδρομετρικός σταθμός του Άλη Εφέντη έχει μεγάλο μήκος μετρημένων χρονοσειρών παροχών για όλη τη περίοδο μελέτης και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης κρίνονται από τα αποτελέσματα του συντελεστή προσδιορισμού, τόσο στην περίοδο της βαθμονόμησης όσο και στην περίοδο της επαλήθευσης.

Στην περίοδο της βαθμονόμησης ο συντελεστής προσδιορισμού είναι ικανοποιητικός με τιμή  $R=81\%$  ενώ στην περίοδο της επαλήθευσης έχει τιμή  $R = 61.2\%$ . Οι ιδιαιτερότητες του υδρομετρικού σταθμού παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.5.2 και 4.5.3. Η αύξηση του σφάλματος τη περίοδο της βαθμονόμησης οφείλεται και σε μία πολύ μεγάλη τιμή παροχής που μετρήθηκε το Δεκέμβρη του 1976 ( $148 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Αυτή η τιμή που δεν δικαιολογείται από την βροχόπτωση στην ανάντη λεκάνη «δυσκόλεψε» το μοντέλο κατά την διάρκεια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

Πάντως πρέπει να τονιστεί ότι η ενδελεχής μελέτη των τιμών του σταθμού βοήθησε στη κατανόηση των διεργασιών του υδροσυστήματος και η τελική του τιμή μας αφήνει ικανοποιημένους.

Η μεροληψία των μετρήσεων υποεκτιμά ελαφρά τις αποκρίσεις και στις δύο περιόδους κατά  $4,5\%$  την περίοδο της βαθμονόμησης και κατά  $11,3\%$  την περίοδο της επαλήθευσης. Στο Σχήμα 6.5 διακρίνονται οι μετρημένες και προσομοιωμένες μηνιαίες παροχές του υδρομετρικού σταθμού.

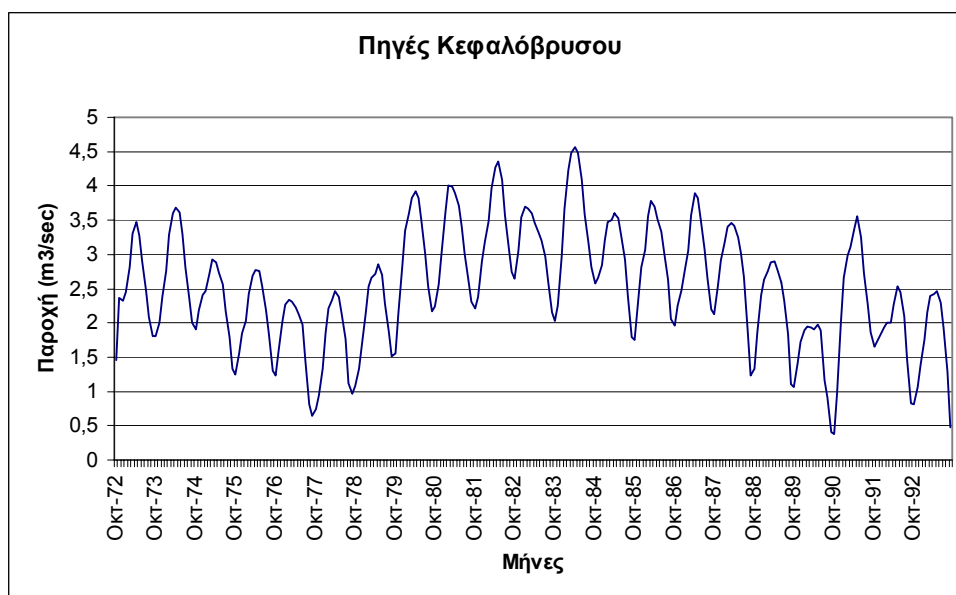


Σχήμα 6.5: Μετρημένη και προσομοιωμένη απορροή υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη.

#### 6.4 Πηγές Κεφαλόβρυσου

Για τις πηγές του Κεφαλόβρυσου με βάση μια σχετική μελέτη του ΙΓΜΕ αναφέρεται μόνο ο μέσος μηνιαίος όρος παροχής εκτιμημένος  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Αφού δεν έχουμε συστηματικές μετρήσεις, στον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης για τις πηγές του Κεφαλόβρυσου η επιδίωξη μας είναι οι προσομοιωμένες μηνιαίες τιμές παροχής να προσεγγίζουν το μέσο όρο που υποδεικνύεται στη μελέτη του ΙΓΜΕ.

Το τελικό αποτέλεσμα του προσομοιωμένου μέσου όρου είναι  $2,5 \text{ m}^3/\text{sec}$ , ενώ όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο Σχήμα 6.6, εμφανίζεται τάση μείωσης της παροχής στο τέλος της περιόδου επαλήθευσης, στοιχείο το οποίο επιβεβαιώνεται και στη μελέτη του ΙΓΜΕ, στην οποία αναφέρεται ότι η πηγή στερεύει στο τέλος της δεκαετίας του 80.



Σχήμα 6.6: Μέση μηνιαία προσομοιωμένη παροχή πηγών Κεφαλόβρυσου.



## 6.5 Στάθμες υπόγειου νερού

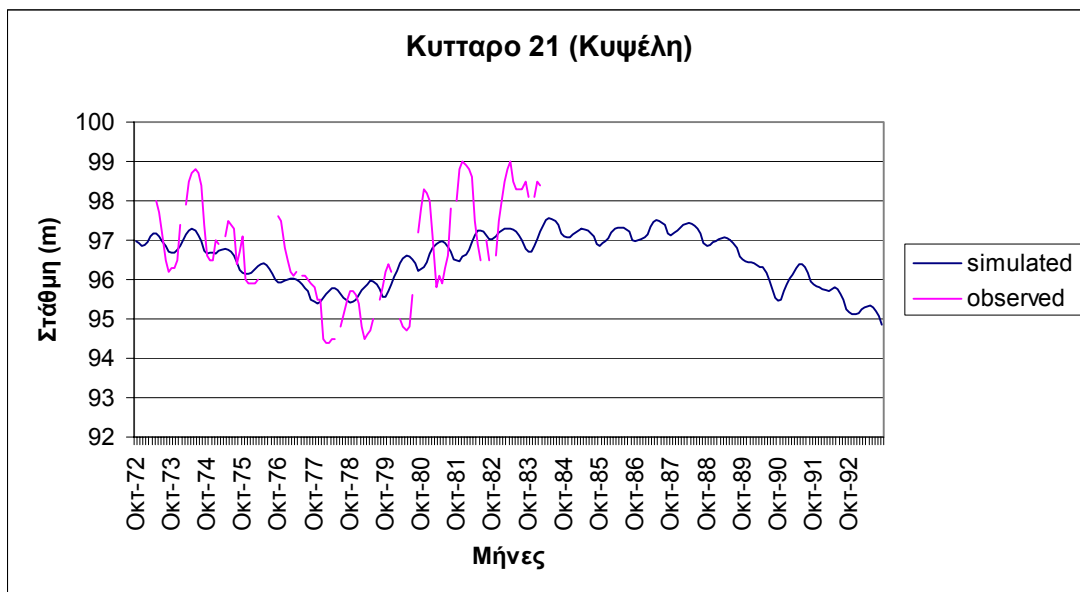
Στην αντικειμενική συνάρτηση εισήχθησαν θέσεις μέτρησης υπόγειας στάθμης σε 11 κύτταρα του υπόγειου υδροφορέα. Επειδή οι σημειακές μετρήσεις υπόγειας στάθμης δεν μπορούν να αντιστοιχηθούν στις μεταβολές της στάθμης των υπόγειων κύτταρων μεγάλης έκτασης, το ζητούμενο είναι να προσεγγίσουμε τη διακύμανση μεταξύ των παρατηρημένων και μετρημένων χρονοσειρών στάθμης για τις περιόδους της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης. Τα κριτήρια στα οποία στηρίχθηκε η βαθμονόμηση των παραμέτρων του υπόγειου υδροφορέα είναι ο συντελεστής προσδιορισμού όπου υπάρχουν μετρημένες στάθμες στον οποίο μας ενδιαφέρει χονδρικά να περιγράψουμε τη συμπεριφορά του υδροφορέα και ο έλεγχος των τάσεων για τα κύτταρα όπου δεν υπάρχουν μετρημένες στάθμες.

### 6.5.1 Κυψέλη Σοφάδων

Η θέση της γεώτρησης βρίσκεται στην περιοχή του αρδευτικού κόμβου των Σοφάδων. Η χρονοσειρά παρατηρημένης στάθμης αφορά τη περίοδο 5/73 μέχρι 2/84 δηλαδή περιλαμβάνει και τις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου. Ο συντελεστής προσδιορισμού για την περίοδο της βαθμονόμησης είναι 36,7% (θεωρείται πολύ καλή τιμή με βάση τις παραδοχές που έγιναν).

Η μέση προσομοιωμένη στάθμη είναι 96,4 m για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 96,6 m για τη περίοδο της επαλήθευσης, ενώ ο μέσος όρος των μετρημένων τιμών για τις ίδιες περιόδους είναι 96,7 m και 98,3 m αντίστοιχα.

Η ταπεινώση της στάθμης για την διάρκεια μελέτης της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι της τάξεως των 3 μέτρων που επιβεβαιώνει το πρόβλημα υπεράντληση του υπόγειου υδροφορέα στη περιοχή μελέτης.

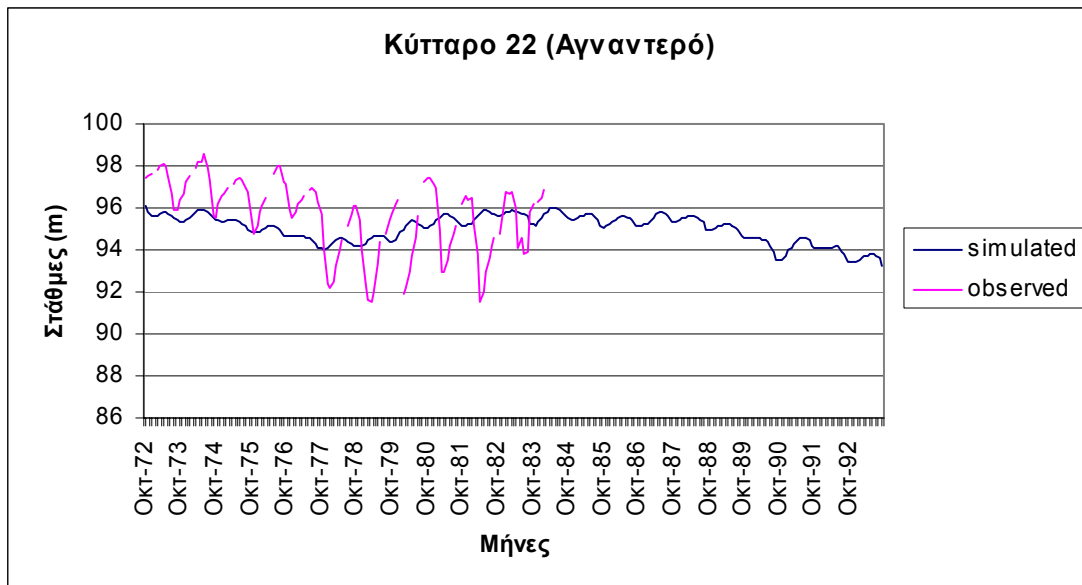


Σχήμα 6.7: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Κυψέλης

### 6.5.2 Αγναντερό Καρδίτσας

Η θέση της γεώτρησης ανήκει στον αρδευτικό κόμβο των Σελλάνων. Η περίοδο μέτρησης αφορά στην περίοδο 10/72 μέχρι 2/84 δηλαδή και στις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών των τιμών υπόγειας στάθμης είναι 95,1 μέτρα για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 94,9 μέτρα για τη περίοδο της επαλήθευσης. Οι αντίστοιχες τιμές για τη μετρημένη χρονοσειρά είναι 95,6 και 96,5 μέτρα. Η προσαρμογή του μοντέλου είναι καλύτερη τη

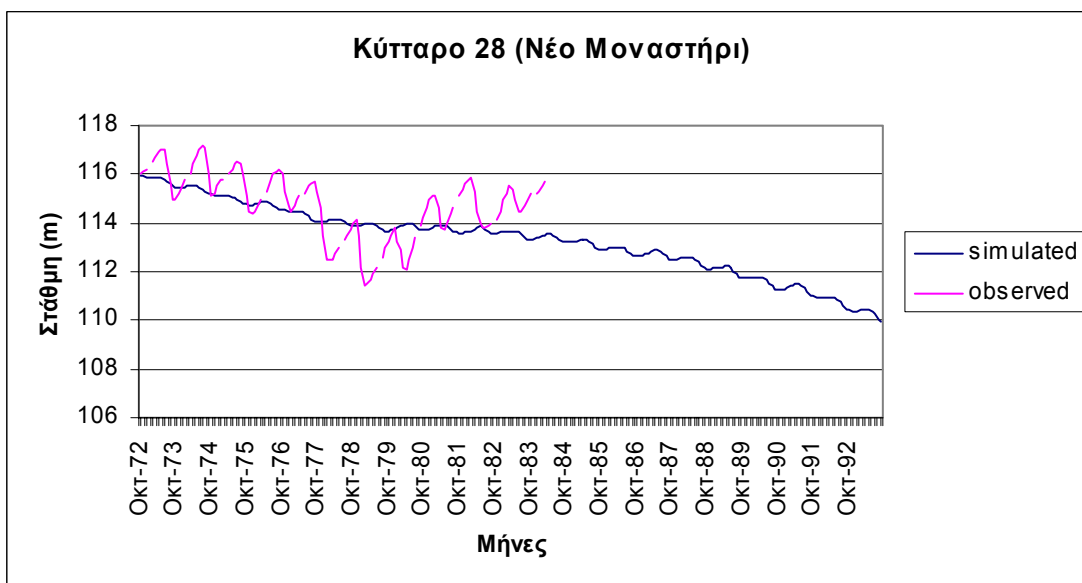
περίοδο της βαθμονόμησης. Η ταπείνωση της στάθμης για τη προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι της τάξεως των 3 μέτρων (Σχήμα 6.8).



Σχήμα 6.8: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Αγναντερού

### 6.5.3 Νέο Μοναστήρι Φθιώτιδας.

Η υπόγεια γεώτρηση στο Νέο Μοναστήρι Φθιώτιδας, στα σύνορα των νομών Καρδίτσας και Φθιώτιδας αφορά στην περίοδο 10/72 έως 3/84, δηλαδή και τις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου. Ο συντελεστής προσδιορισμού για τη περίοδο της βαθμονόμησης είναι 32,8% μια σχετικά καλή τιμή. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών είναι 114,4 m για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 112,1 m για τη περίοδο της επαλήθευσης. Οι αντίστοιχες μετρημένες τιμές είναι 114,718 και 115,38 m, παρατηρείται και σε αυτό το κύτταρο καλύτερη προσαρμογή στη περίοδο της επαλήθευσης. Η πτώση στάθμης των προσομοιωμένων τιμών αγγίζει τα 6 μέτρα για τη περίοδο μελέτης. Αυτή η σχετικά μεγάλη πτώση οφείλεται στο γεγονός ότι η γεώτρηση βρίσκεται στο αρδευτικό κόμβο των Σοφάδων όπου ασκούνται οι μεγαλύτερες τιμές αντλήσεως της περιοχής μελέτης (Σχήμα 6.9).

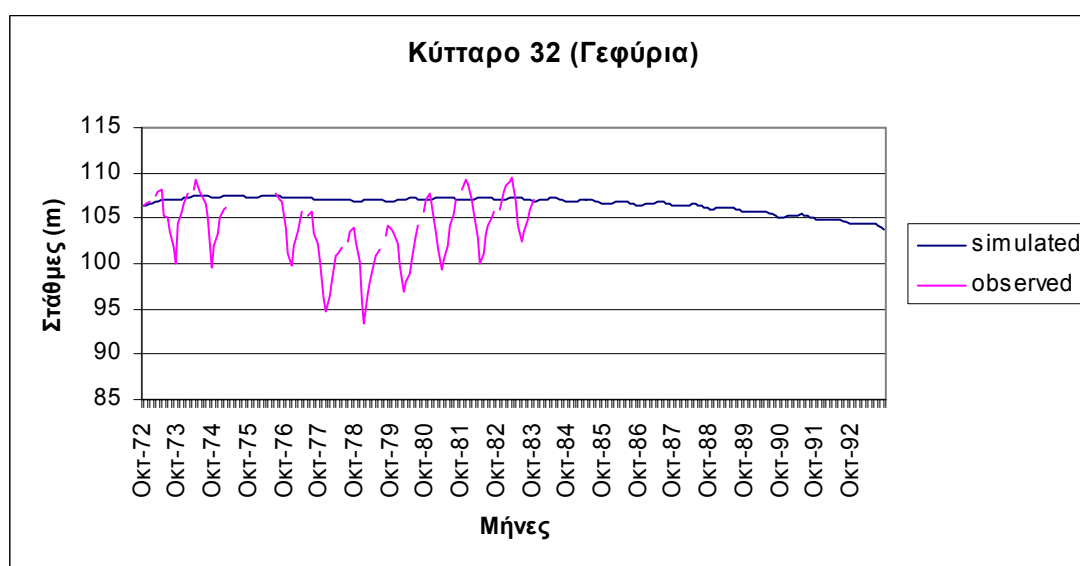


Σχήμα 6.9: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Νέο Μοναστηρίου.

#### 6.5.4 Γεφύρια Καρδίτσας

Η υπόγεια γεώτρηση ανήκει στον αρδευτικό κόμβο των Σοφάδων. Η περίοδος μέτρησης αφορά τη περίοδο 10/72 έως 1/84 δηλαδή και τις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων χρονοσειρών είναι 107,2 για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 105,9 για τη περίοδο επαλήθευσης. Αντιστοίχως για τη μετρημένη χρονοσειρά τα αποτελέσματα είναι 103,7 και 107 μέτρα. Η προσαρμογή στο συγκεκριμένο κύτταρο είναι καλύτερη τη περίοδο της επαλήθευσης από ότι τη περίοδο της βαθμονόμησης, πάντως το τελικό αποτέλεσμα δεν μπορεί να μας ικανοποιήσει για αυτό το κύτταρο.

Η προσομοιωμένη στάθμη εμφανίζει μικρή πτωτική τάση στη διάρκεια προσαρμογής του μοντέλου (Σχήμα 6.10).

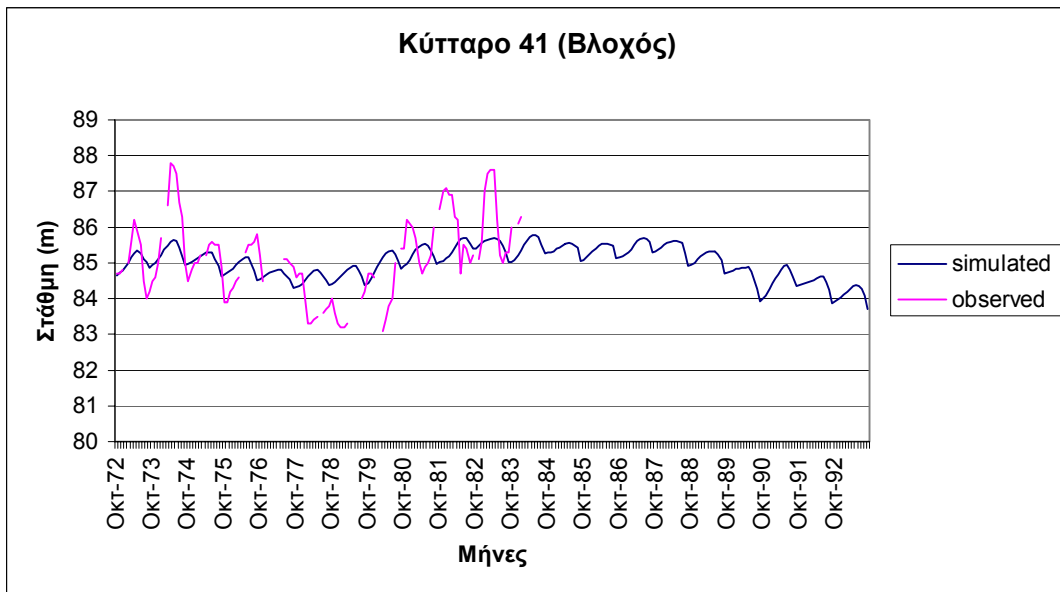


Σχήμα 6.10: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Γεφυριών.

#### 6.5.5 Βλοχός Καρδίτσας

Η υπόγεια γεώτρηση βρίσκεται στον αρδευτικό κόμβο του Παλαμά. Η περίοδος μέτρησης αφορά τη περίοδο 10/72 έως 1/84 δηλαδή και τις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου. Ο συντελεστής προσδιορισμού για τη περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου είναι 28,7% μια πολύ καλή τιμή με βάση τις παραδοχές που κάναμε. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών είναι 85,1 για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 85 m για τη περίοδο της επαλήθευσης. Οι αντίστοιχες τιμές για τις μετρημένες χρονοσειρές είναι 85,1 και 86,1 m.

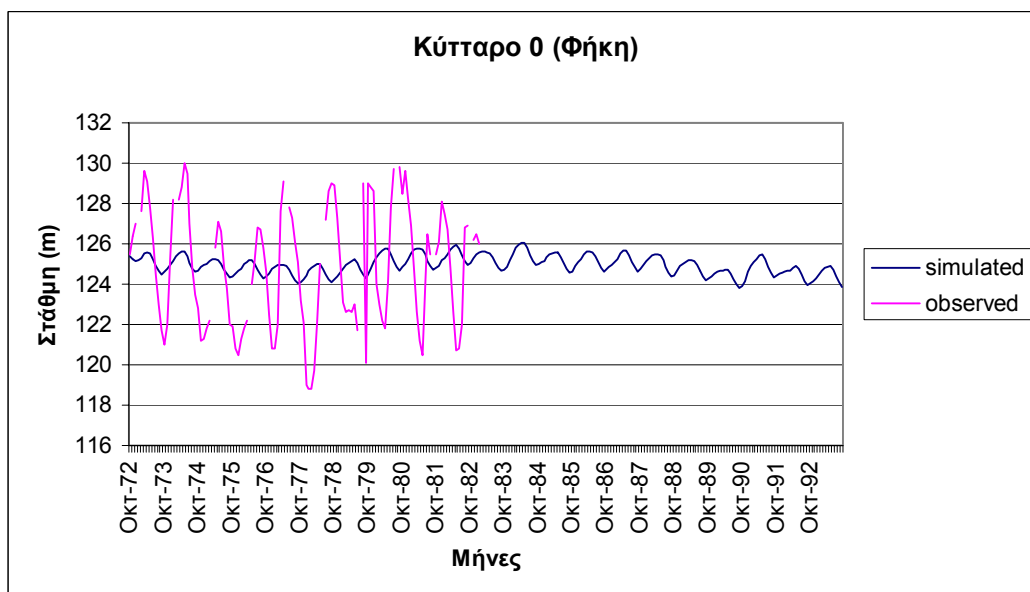
Η προσομοιωμένη στάθμη εμφανίζει μικρή πτωτική τάση (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Βλοχού.

### 6.5.6 Φήκη Τρικάλων

Η υπόγεια γεώτρηση αφορά τη περίοδο 10/72 έως 1/82 δηλαδή τη περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου. Ο μέσος όρος τιμών των προσομοιωμένων χρονοσειρών είναι 125,1 ενώ η αντίστοιχη τιμή των μετρημένων είναι 124,8 m. Η πτώση στάθμης για όλη τη περίοδο μελέτη είναι της τάξεως των 2 μέτρων (Σχήμα 6.12).

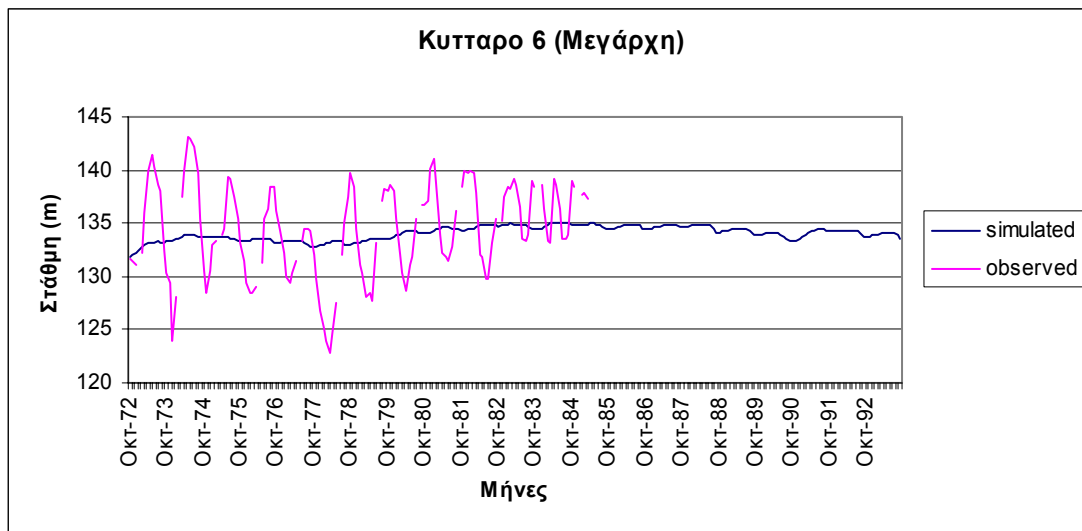


Σχήμα 6.12: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Φήκης.

### 6.5.7 Μεγάρχη Τρικάλων

Η υπόγεια γεώτρηση έχει μετρημένες τιμές και για τις δύο περιόδους προσαρμογής, συγκεκριμένα από 10/72 μέχρι 3/85. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων χρονοσειρών είναι 134,1 m για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 133,7 m για τη περίοδο της επαλήθευσης. Οι αντίστοιχες τιμές για τις μετρημένες χρονοσειρές είναι 134,1 και 136,6 m. Η προσαρμογή είναι πολύ καλή τη περίοδο της επαλήθευσης ενώ μέτρια τη περίοδο της επαλήθευσης.

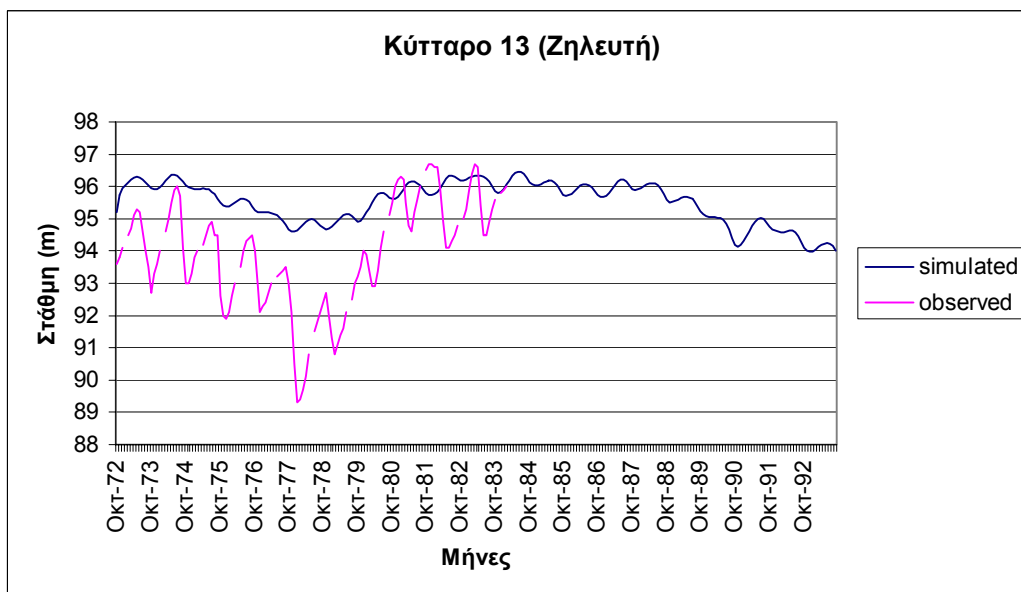
Στο συγκεκριμένο κύτταρο παρουσιάζεται μια αύξηση της στάθμης κατά 2 μέτρα (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Μεγάρχης.

### 6.5.8 Ζηλευτή Τρικάλων

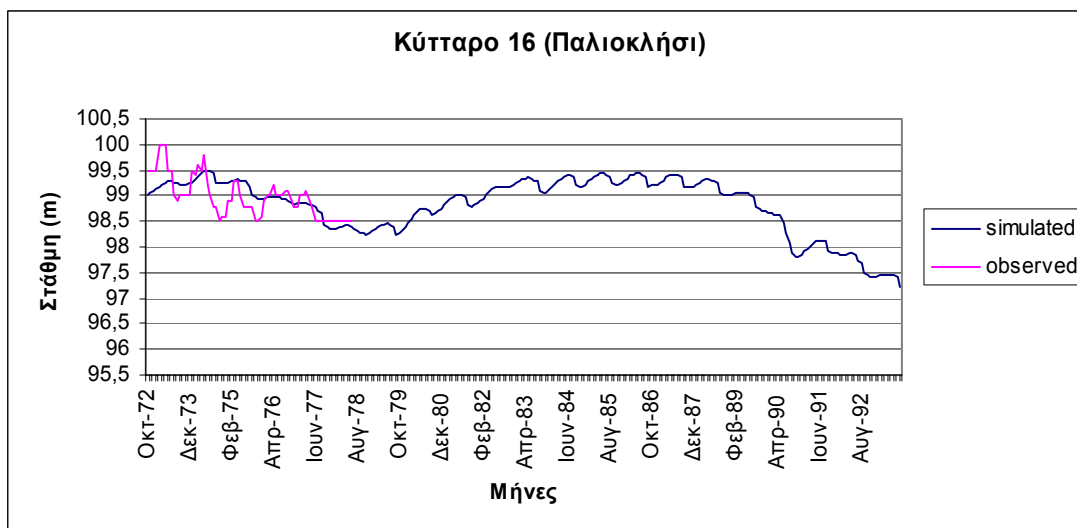
Η περίοδος μέτρησης βρίσκεται και στις δύο περιόδους προσαρμογής του μοντέλου από 10/72 μέχρι 2/84. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών 95,6 m για τη περίοδο της βαθμονόμησης και 95,4 m για τη περίοδο της επαλήθευσης. Οι αντίστοιχες τιμές για τη μετρημένη χρονοσειρά είναι 93,7 και 95,8 m. Αν και υπάρχει απόκλιση ως προς τις απόλυτες τιμές, η γενική συμπεριφορά είναι συμβατή με τη μετρημένη χρονοσειρά (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Ζηλευτής Τρικάλων.

### 6.5.9 Παλιοκλήσι Καρδίτσας

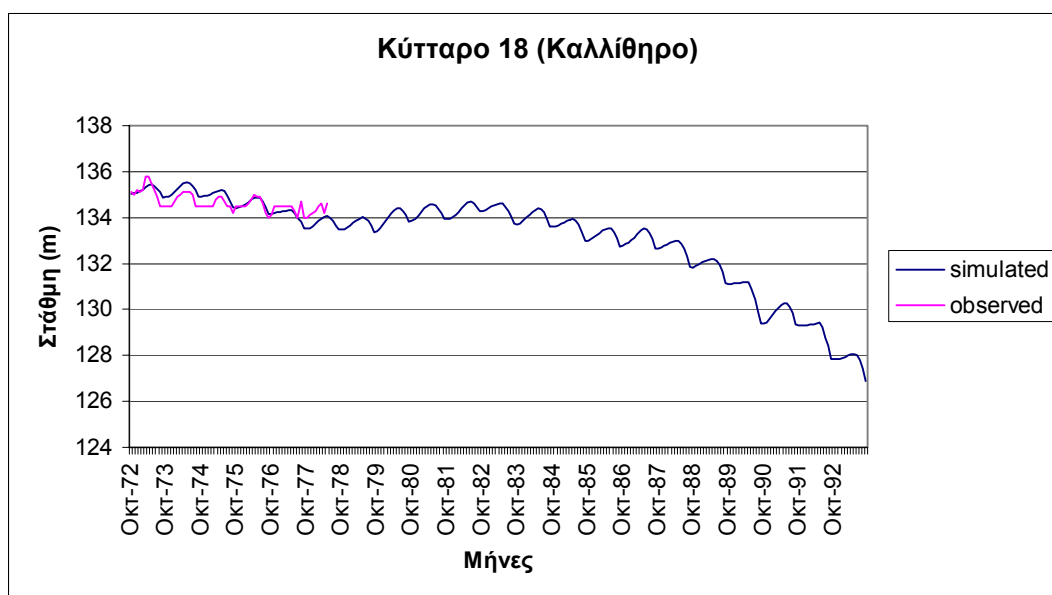
Η υπόγεια γεώτρηση έχει μετρημένες τιμές μόνο στη περίοδο της βαθμονόμησης από 10/72 έως 5/78. Ο μέσος όρος της προσομοιωμένης χρονοσειράς για τη περίοδο της βαθμονόμησης είναι 98,9 m ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη μετρημένη χρονοσειρά είναι 98,9 m. Η προσαρμογή είναι ικανοποιητική και η πτώση στάθμης της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι 2 μέτρα για τη περίοδο μελέτης (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Παλιοκλήσιου.

### 6.5.10 Καλλιθηρό Καρδίτσας

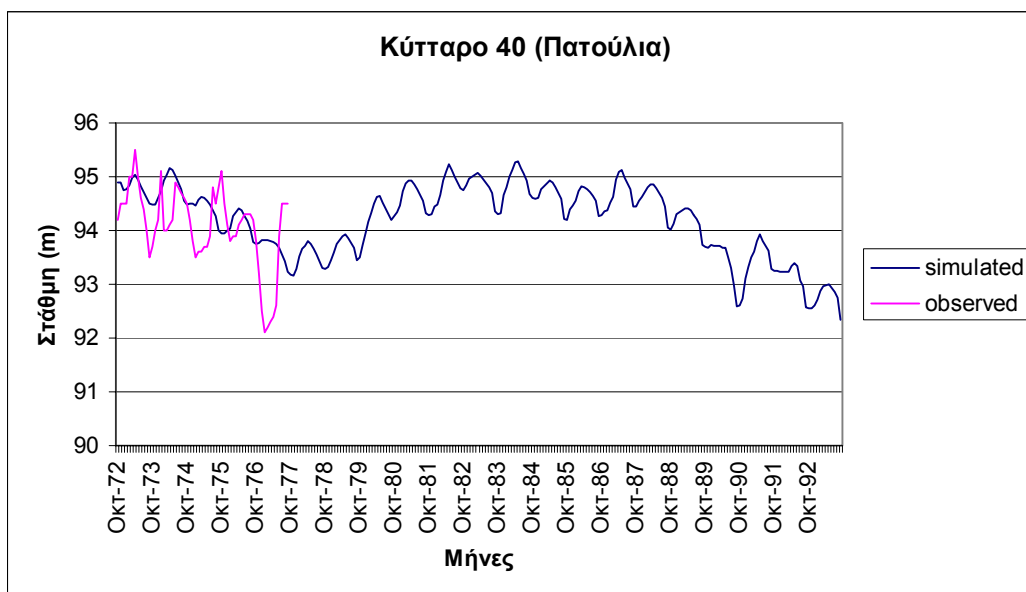
Οι μετρημένες τιμές αφορούν την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου και συγκεκριμένα από 10/72 μέχρι 5/78. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών της χρονοσειράς της στάθμης είναι 134,4 m ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη μετρημένη χρονοσειρά είναι 134,6 m. Η προσαρμογή είναι ικανοποιητική. Στο συγκεκριμένο κύτταρο παρατηρείται μια σημαντική πτώση στάθμης από την αρχή της περιόδου της τάξεως των 9 m (Σχήμα 6.16).



Σχήμα 6.16: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη Καλλιθήρου.

### 6.5.11 Πατούλια Τρικάλων

Η μετρημένη χρονοσειρά ανήκει στη περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου. Ο μέσος όρος των προσομοιωμένων τιμών για τη περίοδο της βαθμονόμησης είναι 94,3 m ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη μετρημένη χρονοσειρά είναι 94,1 m. Η προσαρμογή είναι ικανοποιητική ενώ η πτώση στάθμης της προσομοιωμένης χρονοσειράς είναι της τάξεως των 3 m (Σχήμα 6.17).



Σχήμα 6.17: Μετρημένη και προσομοιωμένη στάθμη γεώτρησης Πατουλιών Τρικάλων.

## 6.6 Βελτιστοποιημένες παράμετροι

### 6.6.1 Παράμετροι μοντέλου επιφανειακής υδρολογίας

Μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης, προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του επιφανειακού και υπόγειου μοντέλου. Όσον αφορά τις 54 παραμέτρους του επιφανειακού μοντέλου, στα οποία αντιστοιχούν τα χαρακτηριστικά των 9 μονάδων υδρολογικής απόκρισης, οι βέλτιστες τιμές δίνονται στο Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2: Βέλτιστες τιμές παραμέτρων επιφανειακού μοντέλου.

HRU	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Συντελεστής άμεσης απορροής	Χωρητικότητα (mm)	Στάθμη υποερμικής ροής (mm)	Συντελεστής στείρευσης υποερμικής ροής	Συντελεστής στείρευσης κατεισδυσής
1	599,98	0,03	700,04	588,03	0,47	0,31
2	1159,37	0,01	789,21	102,6	0,12	0,08
3	676,32	0,05	428,78	90,04	0,33	0,11
4	156,19	0,40	796,01	445,77	0,53	0,42
5	450,76	0,20	322,89	113,01	0,54	0,25
6	144,88	0,03	713,77	463,95	0,44	0,50
7	2466,11	0,03	289,04	92,49	0,37	0,06
8	439,70	0,07	602,75	271,24	0,63	0,03
9	173,60	0,11	838,19	202,17	0,68	0,37

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, θα επιχειρήσουμε να δώσουμε μια φυσική ερμηνεία στις παραμέτρους:

- Η μεγαλύτερη σε έκταση μονάδα υδρολογική απόκρισης που είναι η 7 (ημιπερατά πετρώματα-αρδευόμενες εκτάσεις) παρουσιάζει μικρό συντελεστή άμεσης απορροής, μικρή δεξαμενή

εδαφικής υγρασίας και μικρή τιμή συντελεστή στείρευσης κατείσδυσης. Η πλημμυρική ροή λόγω κορεσμού φαίνεται ότι είναι η κύρια συνιστώσα της απορροής. Παρά τις μικρές κλίσεις των αρδευόμενων πεδινών εκτάσεων, που θα είχαν ως συνέπεια τη συγκέντρωση της απορροής, άρα τη διαμόρφωση μεγάλων δεξαμενών αποθήκευσης υγρασίας, παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο. Μια ερμηνεία που μπορεί να δοθεί είναι η επίδραση του αποστραγγιστικού δικτύου, που κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων βροχής λειτουργεί, πρακτικά, ως αντιπλημμυρικό έργο.

- Τα αδιαπέρατα πετρώματα (μονάδες υδρολογικής απόκρισης 1,2,3) παρουσιάζουν μικρούς συντελεστές στείρευσης κατείσδυσης, που είναι φυσικό λόγω της ιδιομορφίας των πετρωμάτων αυτών.
- Οι δασικές εκτάσεις (μονάδες υδρολογικής απόκρισης 3, 6, 9) παρουσιάζουν μεγάλες χωρητικότητες των δεξαμενών εδαφικής υγρασίας, και αυτό θεωρείται φυσικό λόγω της αυξημένης δυνατότητας κατακράτησης νερού.
- Τα περατά πετρώματα (μονάδες υδρολογικής απόκρισης 4, 5, 6) εμφανίζουν μεγάλους συντελεστές στείρευσης κατείσδυσης.

Βεβαίως, δεν είναι δυνατό να δοθεί απόλυτη φυσική ερμηνεία για κάθε παράμετρο, εξαιτίας των πολλών αβεβαιοτήτων του προβλήματος (π.χ., αβεβαιότητες στη σχηματοποίηση, απλοποιημένη περιγραφή διεργασιών, σφάλματα μετρήσεων).

### 6.6.2 Παράμετροι μοντέλου υπόγειας υδρολογίας

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, για λόγους διευκόλυνσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης, θεωρήθηκε ενιαίο πορώδες για όλη της περιοχής μελέτης. Η τιμή του πορώδους συνδέεται με τη ευαισθησία στη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα. Με μικρές τιμές πορώδους απαιτούνται μεγάλες μεταβολές της στάθμης για την αποθήκευση όγκου νερού, ενώ αντίθετα για μεγάλες τιμές του πορώδους απαιτούνται μικρές μεταβολές της στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου νερού.

Η βέλτιστη τιμή του πορώδους προέκυψε ίση με  $\rho = 0,137$ , που είναι αρκετά υψηλή. Η μεγάλη αυτή τιμή σημαίνει ότι μεγάλες μεταβολές της στάθμης αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές όγκων αποθήκευσης.

Οι βέλτιστες τιμές των όρων υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και οι τελικές αρχικές στάθμες που προέκυψαν διακρίνονται στο Πίνακα 6.3. Μεγάλες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας εμφανίζονται στα ανάντη του υδροφορέα (περιοχή Τρικάλων) καθώς και στα κύτταρα εξόδου. Υπενθυμίζεται ότι μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα συνεπάγεται μεγάλες ταχύτητες ροής. Αντίθετα μικρές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας εμφανίζονται στην υπόλοιπη περιοχή (Καρδίτσα, Φθιώτιδα), όπου και μειώνονται οι ταχύτητες υπόγειας ροής σε σύγκριση με τη βόρεια περιοχή. Αυτό είναι συμβατό με τις παρατηρήσεις των υδρογεωλόγων, όπως φαίνεται και από το πιεζομετρικό χάρτη.

Πίνακας 6.3: Βέλτιστες τιμές παραμέτρων υπόγειου υδροφορέα.

Κύτταρο	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)	Αρχική στάθμη (m)	Κύτταρο	Έκταση (km <sup>2</sup> )	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/s)	Αρχική στάθμη (m)
1	22,954	0,00043	125,5	26	63,38	0,000865	103
2	30,146	0,000099	125	27	41,711	0,000001	126,5
3	19,881	0,0634	130	28	28,016	0,000024	105
4	16,162	0,000175	130	29	23,701	0,0000016	116
5	44,376	0,0868	125	30	9,3466	0,000064	110
6	69,858	0,013958896	0	31	15,596	0,00003	107
7	72,514	0,013386347	131,6	32	31,047	0,000015	115



8	59,191	0,00000805	125	33	51,987	0,000468	106,3
9	32,869	0,000758	124	34	26,561	0,000044	120
10	18,263	0,000158	128	35	38,224	0,0000017	116
11	31,85	0,000107	115	36	45,742	0,00004	110
12	18,956	0,000388	110	37	59,763	0,0000083	100
13	46,681	0,000522	100	38	73,416	0,000017	95
14	50,696	0,0000063	93,6	39	59,642	0,000074	90
15	52,48	0,00000256	140	40	91,466	0,000928	90
16	41,764	0,0000403	126	41	124,86	0,00612	94
17	47,534	0,0000016	99	42	186,95	0,004027	84,7
18	43,331	0,000757	95	43	89,765	0,0306	80
19	63,088	0,0000014	135	44	321,85	0,000147	0
20	63,082	0,000000942	125	45	45,975	0,003355	20
21	102,35	0,0000488	110	46	187,76	0,000779	130
22	91,01	0,000082	97	47	195,74	0,000167	75
23	76,877	0,048948753	97,4	48	0	0,228497	0
24	33,302	0,000311	125	49	0	0,000926	0
25	26,996	0,0000197	120				

### 6.6.3 Συντελεστές διήθησης

Οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών διήθησης ήταν 7,9% στον Πηνειό, 5,0% στον Ενιπέα, 8.7% στην ανάντη κλάδο του Σοφαδίτη και 11,4% στον κατόντη κλάδο του, πριν τη συμβολή του με τον Φαρσαλιώτη. Πρόκειται για σημαντικές απώλειες νερού, που επιβεβαιώνουν τις εκτιμήσεις της SOGREAΗ (1978).

## 7 Ανάλυση μεγεθών υδατικού ισοζυγίου

### 7.1 Υδατικό ισοζύγιο υδοσυστήματος

#### 7.1.1 Αθροιστικό ισοζύγιο λεκάνης

Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ αναπαράγει τα μεγέθη του υδατικού ισοζυγίου για όλες τις συνιστώσες του συστήματος, τα οποία ολοκληρώνει σε όλη της έκταση της λεκάνης. Τα μέσα ετήσια μεγέθη των υδρολογικών μεταβλητών για την εικοσαετία 1972-73 έως 1992-93 δίνονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Μέσα ετήσια μεγέθη υδατικού ισοζυγίου λεκάνης Δυτικής Θεσσαλίας.

Μεταβλητή ισοζυγίου	Ισοδύναμο ύψος (mm)	Όγκος νερού (hm <sup>3</sup> )
Βροχόπτωση	842,2	5126,8
Εισροές από Πλαστήρα	24,9	151,5
Πραγματική εξατμοδιαπνοή	476,0	2897,7
Κατείσδυση	183,2	1115,2
Διηθήσεις ποταμών	20,0	121,7
Επιφανειακή απορροή	259,1	1577,4
Απορροή πηγών	16,4	99,6
Συνολικές απολήψεις	60,0	365,5
Αντλήσεις	27,7	168,6
Απορροή εξόδου	242,6	1477,0

Η περιοχή μελέτης δεν είναι ένα κλειστό υδρολογικό σύστημα, δεδομένου ότι δέχεται επιφανειακές εισροές από εξωτερικές λεκάνες (Πλαστήρας) και υπόγειες εισροές από τους ορεινούς περιμετρικούς όγκους (οι οποίοι, ωστόσο, δεν έχουν περιγραφεί στη σχηματοποίηση του υδροφορέα, καθώς δεν υπάρχει πληροφορία σχετικά με την πιεζομετρία), ενώ εκφορτίζεται προς την πλευρά της Ανατολικής Θεσσαλίας, με το μέτωπο των υπόγειων εκφορτίσεων να είναι, προφανώς, μη ελεγχόμενο. Αλλά και λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιφανειακών και υπόγειων νερών, δεν είναι ασφαλής η εξαγωγή ξεχωριστού υδατικού ισοζυγίου για το επιφανειακό και υπόγειο σύστημα. Για παράδειγμα, υπάρχει περίπτωση νερά που κατεισδύουν ανάντη, στη συνέχεια να εκφορτίζονται επιφανειακά μέσω των πηγών και ακολούθως να επανατροφοδοτούν τον υδροφορέα, μέσω των διηθήσεων.

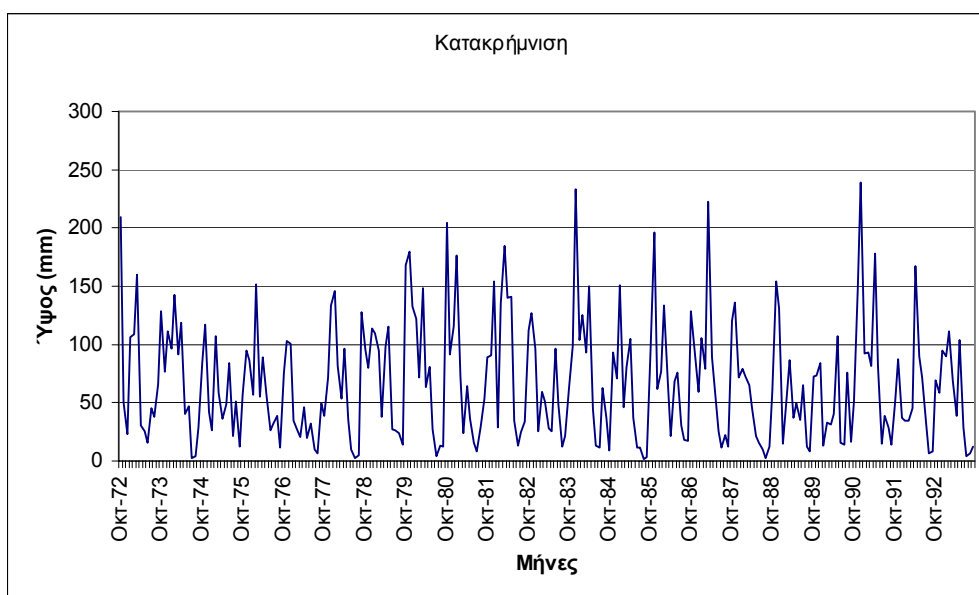
Έχοντας υπόψη τις παραπάνω δυσκολίες, επιχειρείται η εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων σχετικά με την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης, με βάση τα μεγέθη υδατικού ισοζυγίου του Πίνακα 7.1:

- Οι συνολικές εισροές στη λεκάνη ανέρχονται σε 867.1 mm, και προέρχονται από τη βροχόπτωση (842,2 mm) και σε πολύ μικρότερο ποσοστό από την εξωτερική τροφοδοσία του Πλαστήρα (24,9 mm). Οι συνολικές εκροές ανέρχονται σε 778,6 mm, και αναφέρονται στην εξάτμιση (476,0 mm), στην απορροή στην έξοδο της λεκάνης (242,6 mm) και τις απολήψεις από επιφανειακά και υπόγεια νερά (60,0 mm). Η διαφορά των 88,5 mm, ποσοστό δηλαδή περίπου ίσο με το 10% της βροχόπτωσης, αναφέρεται στην τροφοδοσία του υδροφορέα της Ανατολικής Θεσσαλίας, και περιλαμβάνει ακόμη διαφορές στο ισοζύγιο των υπόγειων υδατικών πόρων που οφείλονται στην ταπείνωση του υδροφορέα κατά το διάστημα 1972-1993.

- Από τα 842,2 mm της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης στη λεκάνη, τα 476,0 mm είναι απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής, ποσοστό δηλαδή 56,5%, που είναι τυπικό για τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες.
- Η επιφανειακή απορροή ανέρχεται σε 259,1 mm (σε αυτή περιλαμβάνεται και μια μικρή, σχετικά, ποσότητα που προέρχεται από τις χειμερινές εκροές του Πλαστήρα), ενώ η συνεισφορά των πηγών σε μόλις 16,4 mm, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού στην περιοχή δεν αναπτύσσονται σημαντικές πηγές.
- Η συνολική απορροή, επιφανειακή και υπόγεια, ανέρχεται σε 275,5 mm, συνεπώς ο υπερετήσιος συντελεστής απορροής της λεκάνης εκτιμάται σε  $275,5 / 842,2 = 32,7\%$ , τιμή που είναι τυπική για τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης (επικράτηση ημιπερατών πετρωμάτων). Επισημαίνεται ότι ο αντίστοιχος συντελεστής στη γειτονική λεκάνη του Αχελώου κυμαίνεται στα επίπεδα του 70%, λόγω του υγρού κλίματος, σε συνδυασμό με την έντονη ανάπτυξη αδιαπερατών σχηματισμών (φλύσχης).
- Αν από στη συνολική απορροή (275,5 mm) προστεθούν οι εκροές του Πλαστήρα (24,9 mm) και στη συνέχεια αφαιρεθούν οι απώλειες λόγω διήθησης (20,0 mm) και η απορροή που καταλήγει στην έξοδο του συστήματος (242,6 mm), τότε η διαφορά που μένει, δηλαδή τα 12,9 mm ή  $78,2 \text{ hm}^3$ , αναφέρεται στις απολήψεις που πραγματοποιούνται από επιφανειακά νερά.
- Αν από τις συνολικές απολήψεις ( $365,5 \text{ hm}^3$ ) αφαιρεθούν οι απολήψεις από επιφανειακά νερά ( $78,2 \text{ hm}^3$ ) και οι αντλήσεις ( $168,6 \text{ hm}^3$ ), προκύπτει μια διαφορά  $118,6 \text{ hm}^3$ , που προέρχεται από τη συνεισφορά των υδατικών πόρων του Πλαστήρα.
- Με βάση τα παραπάνω, οι συνολικές υδατικές ανάγκες της λεκάνης καλύπτονται σε ποσοστό 46,1% από γεωτρήσεις, 21,4% από επιφανειακά νερά (απολήψεις από υδατορεύματα) και 32,5% από νερά του Πλαστήρα, κάτι που αποδεικνύει την κρισιμότητα του μοναδικού έργου ταμίευσης στην περιοχή και την ανάγκη ορθολογικής του διαχείρισης.

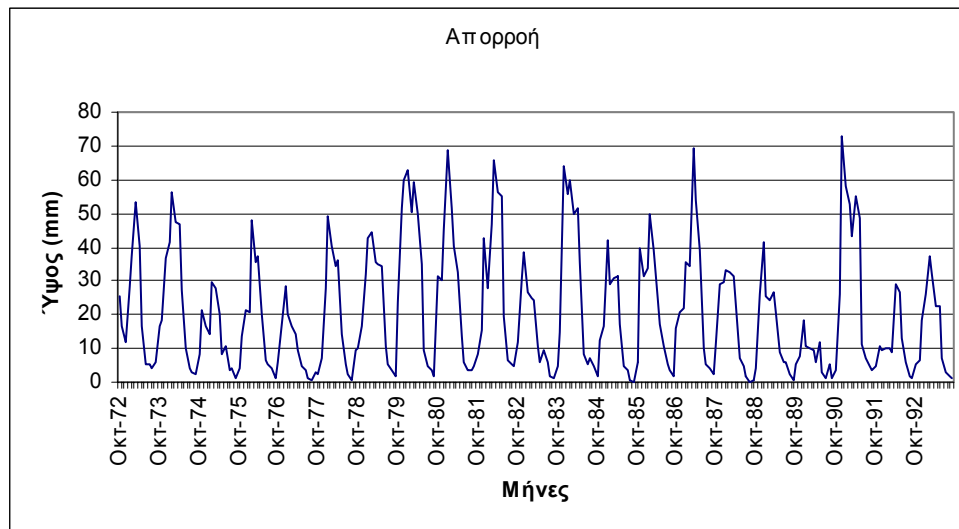
### 7.1.2 Διαχρονική εξέλιξη υδρολογικών μεγεθών λεκάνης

Η περίοδος προσαρμογής του μοντέλου καλύπτει διαφορετικές υδροκλιματικές καταστάσεις, όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο διάγραμμα του Σχήματος 7.1, όπου απεικονίζεται η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στη λεκάνη. Συγκεκριμένα, την περίοδο 1972-78 έχουμε σχετικά χαμηλή υδροφορία, την οποία διαδέχεται το διάστημα 1979-86 στο οποίο παρατηρείται υψηλή υδροφορία, ενώ η περίοδος από το 1987 έως το 1993, με εξαίρεση το 1990-91, είναι ιδιαίτερα ξηρή.



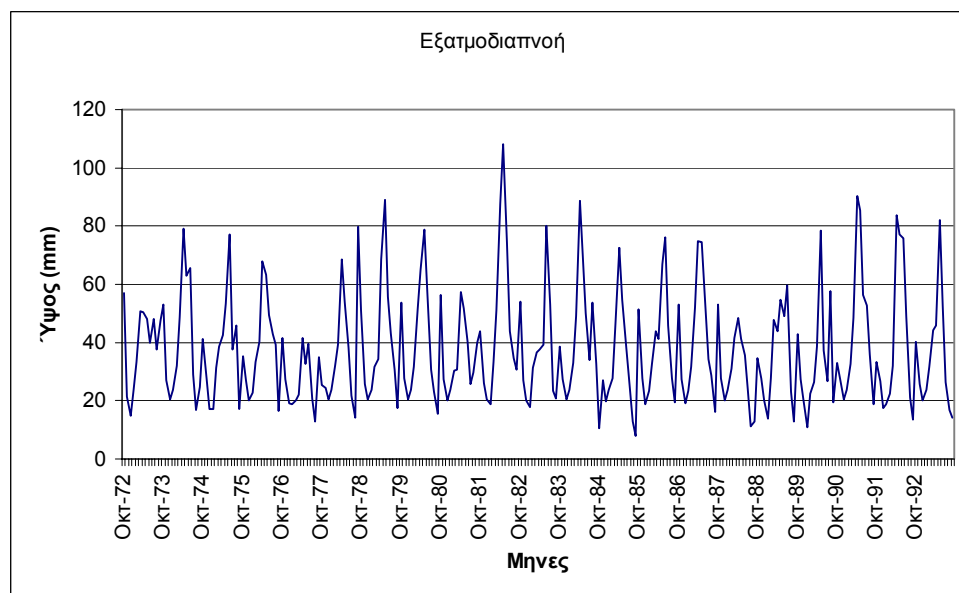
Σχήμα 7.1: Μηνιαίο ύψος κατακρήμισης υδροσυστήματος.

Η επιφανειακή απορροή εμφανίζει σχετικά υψηλό συντελεστή συσχέτισης με την κατακρήμιση, με τιμή  $r = 0,74$ . Η μέγιστη τιμή της απορροής παρουσιάζεται τον Δεκέμβριο του 1990 (73,1 mm), ενώ η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται τον Αύγουστο του 1988 (0,2 mm).



Σχήμα 7.2: Μηνιαίο ύψος απορροής υδροσυστήματος.

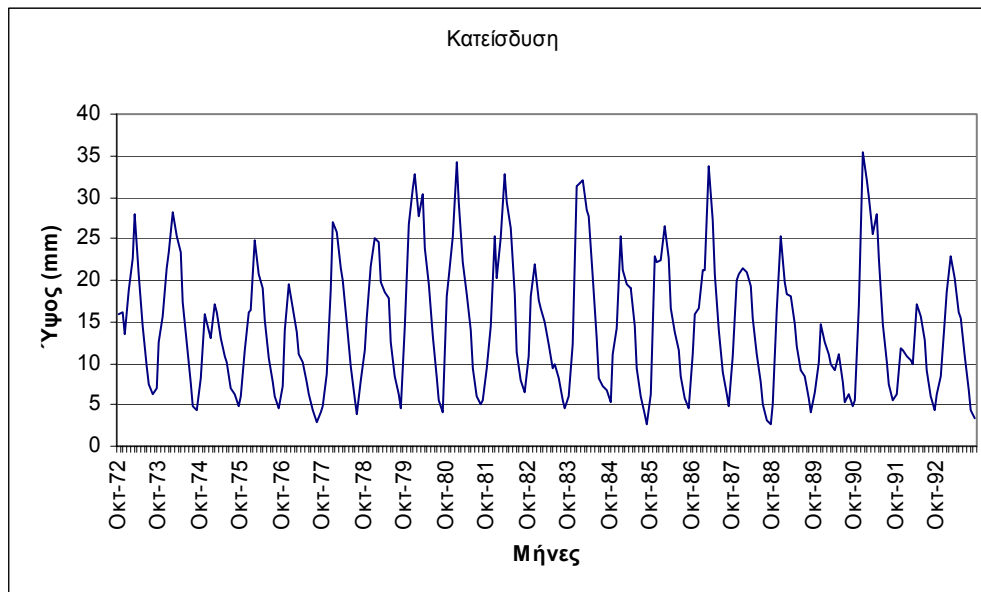
Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.3 απεικονίζεται η εξέλιξη της μηνιαίας εξατμοδιαπνοής. Από τη σύγκριση με την αντίστοιχη χρονοσειρά της βροχόπτωσης (Σχήμα 7.1) προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα σημαντικό ποσοστό της κατακρήμισης, η οποία πραγματοποιείται τους χειμερινούς μήνες, παραμένει στα αποστραγγιστικά έργα των αγροτικών εκτάσεων δίχως να απορρέει επιφανειακά, λόγω των μικρών κλίσεων του εδάφους, και τελικά εξατμίζεται στο τέλος της άνοιξης (Μάιος).



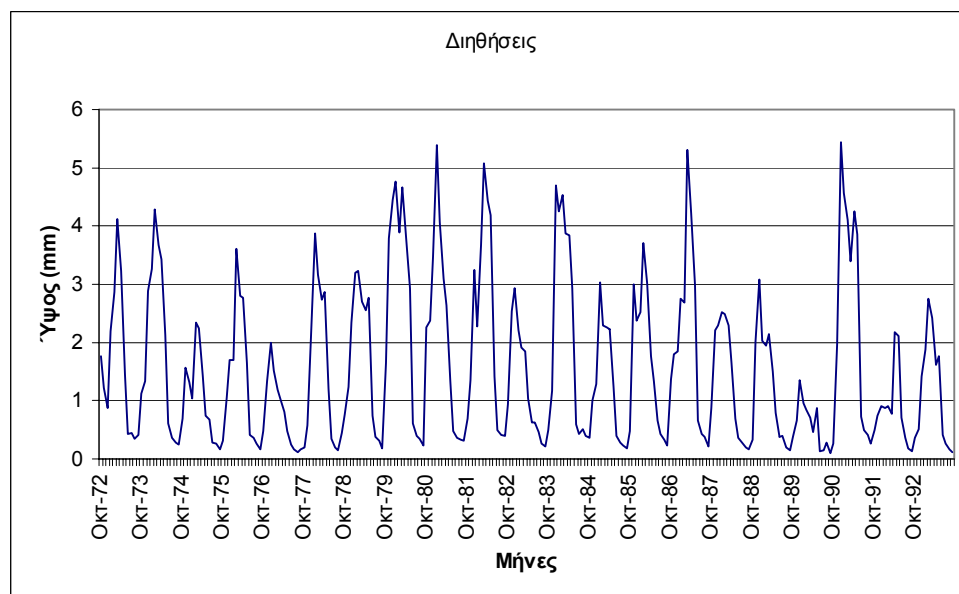
Σχήμα 7.3: Μηνιαίο ύψος πραγματικής εξατμοδιαπνοής υδροσυστήματος.

Η κατείδυση (Σχήμα 7.4) εμφανίζει ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση με την κατακρήμιση ( $r = 0,71$ ), αποτέλεσμα που θεωρείται φυσιολογικό, καθώς τις υγρές περιόδους έχουμε αυξημένες τιμές μηνιαίας κατείδυσης, σε αντίθεση με τις ξηρές περιόδους. Χαρακτηριστικό είναι ότι κατά την περίοδο της ξηρασίας, οι τιμές της κατείδυσης είναι πολύ χαμηλές, που συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει φυσική επανατροφοδοσία του υδροφορέα, ενώ αντίθετα υπάρχουν αυξημένες (πολλαπλάσιες,

μάλιστα, της κατείδυσης) απολήψεις από υπόγεια νερά. Παρόμοια είναι η εικόνα της διήθησης στα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης (Σοφαδίτικος, Πηνηϊός, Ενιπέας), αφού η τελευταία εκτιμάται ως ποσοστό της διερχόμενης παροχής (βλ. Σχήμα 7.5).

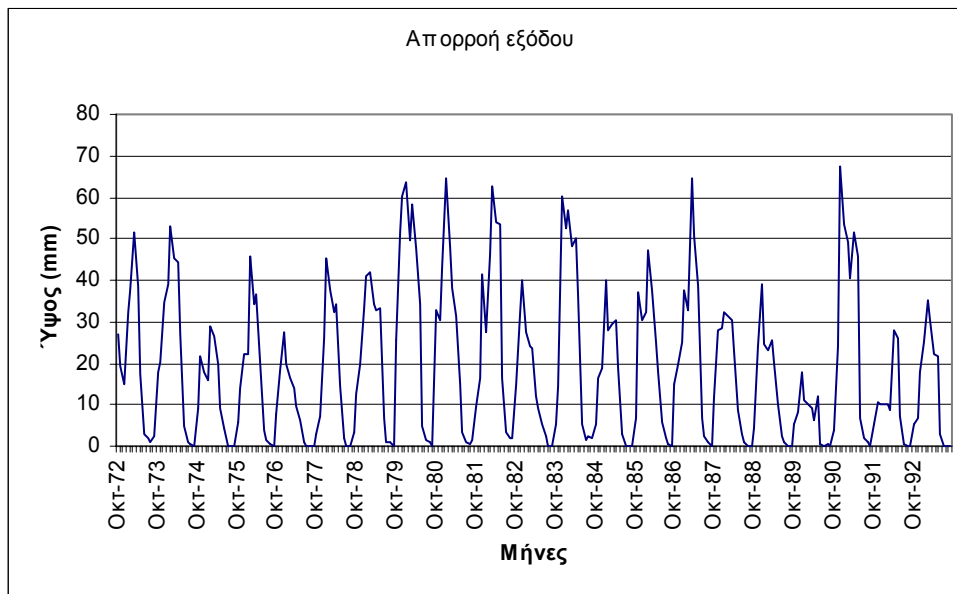


Σχήμα 7.4: Μηνιαίο ύψος κατείδυσης υδροσυστήματος.



Σχήμα 7.5: Μηνιαίο ύψος διηθήσεων υδροσυστήματος.

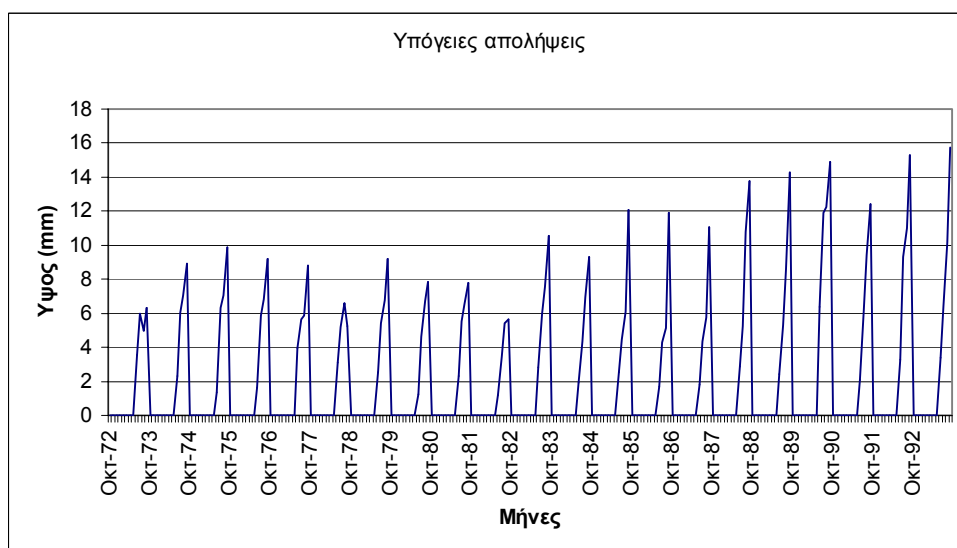
Στο διάγραμμα του Σχήματος 7.6 απεικονίζεται η χρονοσειρά επιφανειακής απορροής στην έξοδο του υδροσυστήματος. Τους θερινούς μήνες, και ιδίως στο τέλος Σεπτεμβρίου, παρατηρούμε ότι, ανεξάρτητα από τη χειμερινή υδροφορία, οι διαθέσιμες ποσότητες επιφανειακού νερού στην έξοδο της λεκάνης απορροής μηδενίζονται, κάτι το οποίο οφείλεται στις συνεχώς αυξανόμενες ποσότητες που εκτρέπονται για άρδευση. Συνεπώς, η ανυπαρξία έργων αποθήκευσης νερού (φράγματα, λιμνοδεξαμενές) προκαλεί εξάντληση των επιφανειακών αποθεμάτων στο τέλος της αρδευτικής περιόδου.



Σχήμα 7.6: Μηνιαίο ύψος απορροής εξόδου.

Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζονται οι υπόγειες απολήψεις για τη κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Υπενθυμίζουμε ότι για την κάλυψη των στόχων του υδροσυστήματος, ορίστηκαν ιεραρχικά οι πηγές απόληψης, με βάση τη πρακτική που ακολουθούν οι ίδιοι οι αγρότες, οι οποίοι πρώτα χρησιμοποιούν τα επιφανειακά νερά των υδατορευμάτων ή άλλων οργανωμένων δικτύων για άρδευση, και κατά δεύτερο λόγο τα υπόγεια νερά.

Όπως τονίζεται στο εδάφιο 5.5, οι αρδευτικές ανάγκες στην περιοχή μελέτης αυξάνονται συνεχώς. Ειδικότερα, οι υπόγειες απολήψεις αυξήθηκαν από  $37,6 \text{ hm}^3$  το 1972 σε  $100,3 \text{ hm}^3$  το 1992, ποσοστό δηλαδή 167%. Βεβαίως, στην περιοχή μελέτης, η χρήση των υπόγειων νερών εξαρτάται όχι μόνο από τις αρδευτικές ανάγκες, αλλά και από τις υδρολογικές συνθήκες κάθε χρονιάς. Το αρνητικό είναι ότι σε περιόδους ξηρασίας, στις οποίες υπάρχει περιορισμένη φυσική πλήρωση του υδροφορέα, μεγιστοποιούνται οι αντλήσεις, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική ταπείνωση του υδροφορέα και προκαλεί ποικίλα περιβαλλοντικά προβλήματα. Αυτό εξετάζεται αναλυτικότερα στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί.



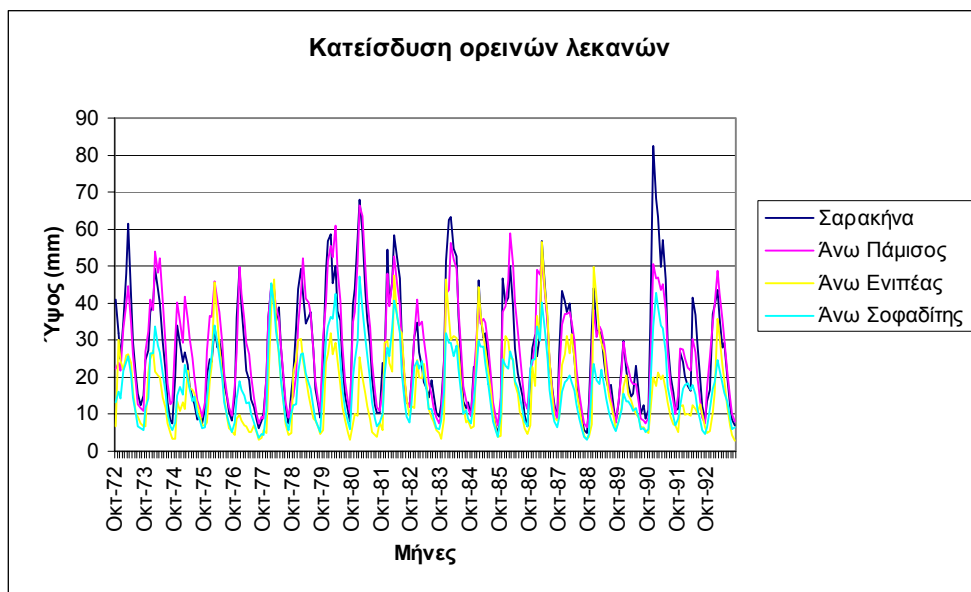
Σχήμα 7.7: Μηνιαίο ύψος απολήψεων από υπόγεια νερά.

### 7.1.3 Διαχρονική εξέλιξη τροφοδοσίας υπόγειου υδροφορέα

Στην περιοχή μελέτης υπάρχει μεγάλη αρδευτική ζήτηση που καλύπτεται με εκτεταμένες απολήψεις, κυρίως από τον υπόγειο υδροφόρα. Το σχετικό ποσοστό, σε μέση ετήσια βάση, ανέρχεται στο 46,1% (βλ. 7.1.1), αλλά κατά τις ξηρές περιόδους είναι ακόμη μεγαλύτερο.

Η διερεύνηση της φυσικής διεργασίας της κατείδυσης είναι πολύ σημαντική για τη κατανόηση της συμπεριφοράς του υδροσυστήματος. Με τη προσαρμογή του μοντέλου, εκτιμήθηκαν το ενιαίο πορώδες και η υδραυλική αγωγιμότητα των κυττάρων της περιοχής μελέτης. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 7.8 έως 7.10 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της κατείδυσης, σε διάφορες λεκάνες απορροής του υδροσυστήματος. Συγκρίνοντας τις τιμές των τριών διαγραμμάτων μπορούμε να διακρίνουμε μεγαλύτερα ύψη κατείδυσης στις ορεινές λεκάνες (που είναι φυσικό, σε σύγκριση με τις πεδινές, λόγω της αυξημένης βροχόπτωσης) και μεγαλύτερες τιμές τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα στα πεδινά των Τρικάλων, σε σύγκριση με τις πεδινές περιοχές του νομού Καρδίτσας. Αυτή η τελευταία παρατήρηση πρέπει να θεωρηθεί θετική για το υδροσύστημα καθώς, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, τα κύτταρα του υδροφορέα της περιοχής των Τρικάλων παρουσιάζουν μεγάλες ταχύτητες ροής προς την έξοδο της λεκάνης, σε αντίθεση με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στον υδροφόρα της Καρδίτσας, οι οποίες εμφανίζουν σημαντικές μικρότερες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας του υδροφορέα της Καρδίτσας από τα ανάντη κύτταρα είναι ταχύτερος σε σχέση με τον ρυθμό εκφόρτισης προς την Ανατολική Θεσσαλία. Συνεπώς, παρά τη σημερινή υποβάθμιση του συστήματος, εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης των γεωτρήσεων, ο υδροφόρας θα μπορέσει να επανέλθει σε μια περιβαλλοντικά αποδεκτή κατάσταση, εφόσον γίνει ορθολογικότερη χρήση του νερού.

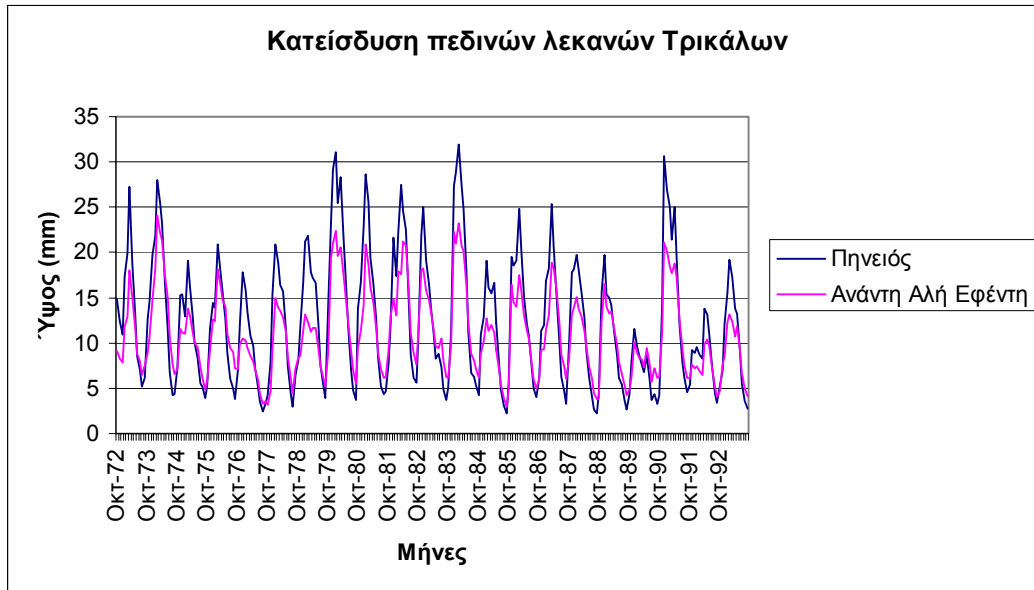
Όσο αφορά στις ορεινές λεκάνες, οι μεγαλύτερες τιμές κατείδυσης εμφανίζονται ανάντη τις Σαρακίνας και στη λεκάνη απορροής Άνω Παμίσου, ενώ οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής του Άνω Σοφαδίτη (Σχήμα 7.8), κάτι που πρέπει να θεωρείται φυσικό λόγω της εξάπλωσης στη συγκεκριμένη περιοχή αδιαπέρατων πετρωμάτων. Επίσης, θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα μεγαλύτερη ύψη βροχόπτωσης κατά την περίοδο μελέτης εμφανίζονται ανάντη της Σαρακίνας και στη περιοχή του Άνω Παμίσου, οπότε και αυτός είναι ένας ακόμη λόγος, εκτός από τις γεωμορφολογικές συνθήκες, για τις μεγαλύτερες τιμές κατείδυσης που παρατηρούνται σε αυτές τις λεκάνες.



Σχήμα 7.8: Μηνιαίες τιμές κατείδυσης ορεινών λεκανών υδροσυστήματος.

Όσον αφορά στην κατείδυση στις πεδινές λεκάνες του νομού Τρικάλων (Σχήμα 7.9), εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές στη λεκάνη απορροής ανάντη του Πηνειού σε σύγκριση με αυτή ανάντη του Αλή Εφέντη. Αυτό προκύπτει επειδή στη μεγαλύτερη έκταση αναπτύσσονται οι μονάδες υδρολογικής απόκρισης 4 και 5, με μεγάλο συντελεστή στέρησης κατείδυσης, σε αντίθεση με τη λεκάνη ανάντη του Αλή Εφέντη, όπου αναπτύσσεται σχεδόν αποκλειστικά η μονάδα υδρολογικής απόκρισης 7, με χαμηλό συντελεστή στέρησης της κατείδυσης..

Πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι η κατείδυση στα πεδινά των Τρικάλων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα πεδινά της Καρδίτσας, και αυτό είναι ένας ακόμη λόγος που καθιστά μεγαλύτερο το πρόβλημα της ταπεινώσης του υδροφορέα στην περιοχή αυτή.



Σχήμα 7.9: Μηνιαίες τιμές κατείδυσης πεδινών λεκανών του νομού Τρικάλων.

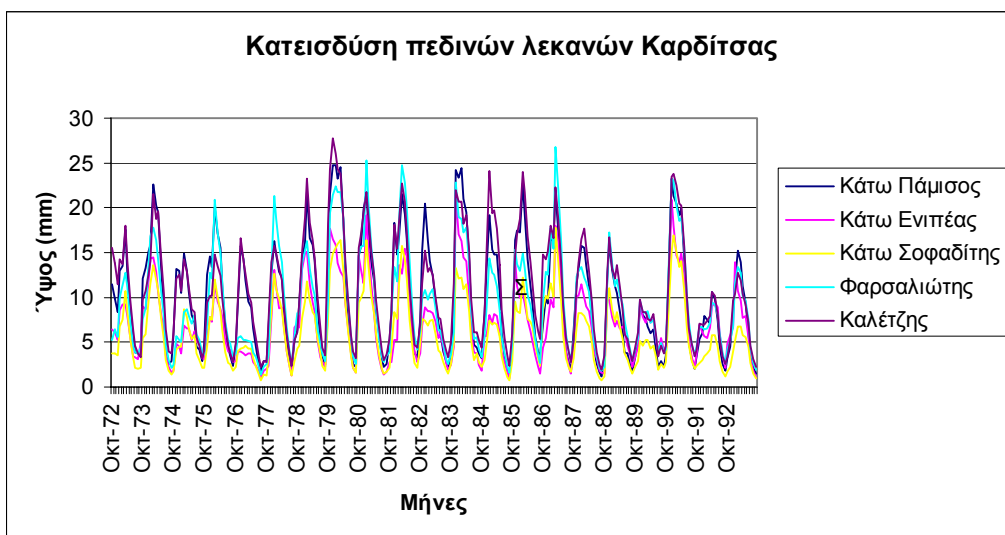
Η χρονική εξέλιξη της κατείδυσης στις πεδινές λεκάνες απορροής του νομού Καρδίτσας εμφανίζεται στο Σχήμα 7.10. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

- Οι σημαντικότερες μηνιαίες τιμές κατείδυσης εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής ανάντη του Φαρσαλιώτη, και αυτό πρέπει να θεωρηθεί φυσικό καθώς εξαπλώνονται στη συγκεκριμένη λεκάνη η μονάδα υδρολογικής απόκρισης 5, με μεγάλο συντελεστή στέρησης κατείδυσης.
- Σημαντικές τιμές κατείδυσης εμφανίζονται στη λεκάνη απορροής του Κάτω Παμίσου, κυρίως λόγω της παρουσίας περατών πετρωμάτων.

Μικρότερες τιμές εμφανίζονται στις υπόλοιπες λεκάνες.

Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε το γεγονός ότι παρατηρούνται μεγάλες κατειδύσεις σε περιοχές αρδευτικής ζήτησης με μικρή επάρκεια σε επιφανειακά νερά (Φαρσαλιώτης, Κάτω Πάμισος).





Σχήμα 7.10: Μηνιαίες τιμές κατεισδυσής πεδινών λεκανών Καρδίτσας.

## 7.2 Κατανομή αρδευτικών απολήψεων

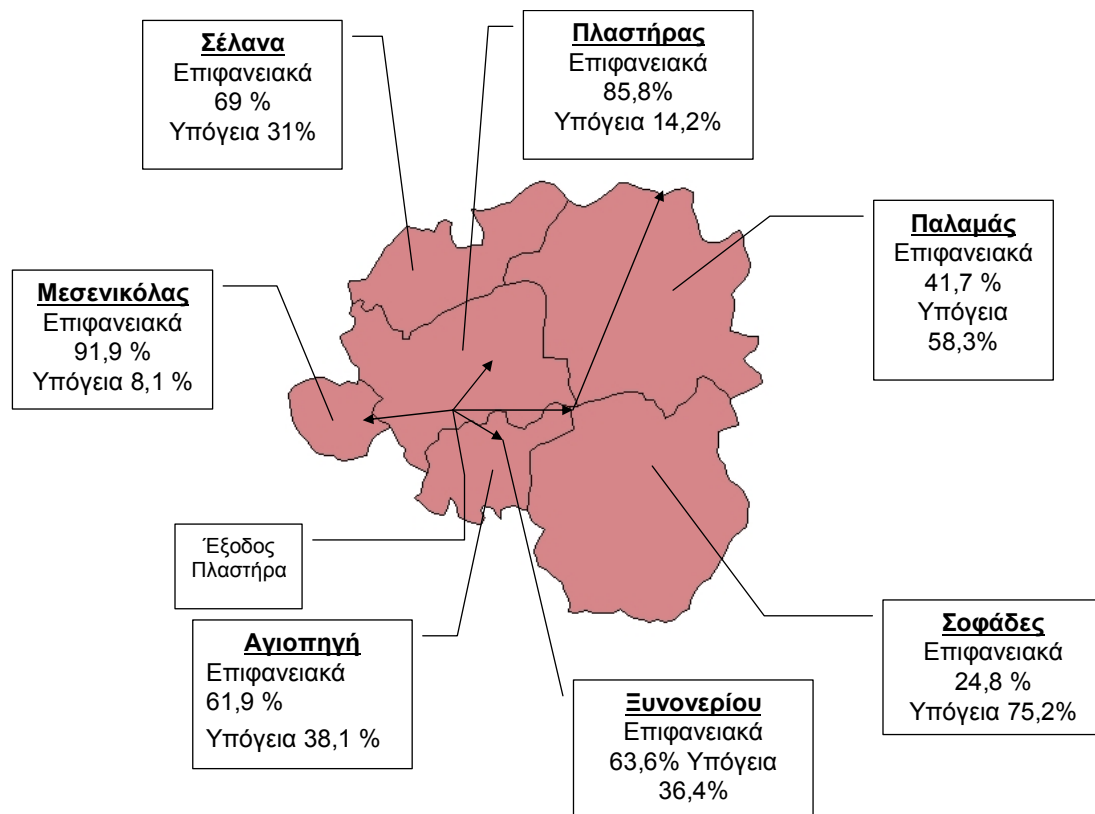
Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μηνιαίες ποσότητες νερού που καταναλώθηκαν από επιφανειακά και υπόγεια νερά για κάθε κόμβο άρδευσης του υδροσυστήματος της Καρδίτσας. Επικεντρωθήκαμε στην Καρδίτσα, λόγω του ότι στην περιοχή αυτή πραγματοποιήθηκε πολύ πιο αναλυτική περιγραφή του υδροσυστήματος.

Στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των αρδευτικών απολήψεων ανά πηγή υδροδότησης για όλη την περίοδο μελέτης. Παρατηρούμε τα εξής:

- Υψηλά ποσοστά επιφανειακών απολήψεων παρουσιάζουν οι κόμβοι του Πλαστήρα και του Μεσενικόλα, που προέρχονται από τη λίμνη Πλαστήρα.
- Το χαμηλότερο ποσοστό απολήψεων επιφανειακών νερών παρουσιάζεται στο, κόμβο των Σοφάδων, που είναι ο μεγαλύτερος κόμβος κατανάλωσης του υδροσυστήματος της Καρδίτσας.

Πίνακας 7.2: Απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης για κάθε αρδευτικό κόμβο του Νομού Καρδίτσας

	Ξυνονέρι	Μεσενικόλας	Σέλινα	Παλαμάς	Σοφάδες	Αγιοπηγή	Πλαστήρας
Επιφανειακά νερά (hm <sup>3</sup> )	15,5	15,4	765,8	602,8	329,9	134,6	690,0
Ποσοστιαία συμμετοχή (%)	63,6	91,9	69,0	41,7	24,8	61,9	85,8
Υπόγεια νερά (hm <sup>3</sup> )	8,9	1,4	343,3	843,7	1002,6	82,8	114,2
Ποσοστιαία συμμετοχή (%)	36,4	8,1	31,0	58,3	75,2	38,1	14,2
Απολήψεις (hm <sup>3</sup> )	24,4	16,8	1109,1	1446,5	1332,4	217,3	804,2



Σχήμα 7.11 Ποσοστά απολήψεων ανά πηγή υδροδότησης στο τεχνητό υδροσύστημα της Καρδίτσας

Στη συνέχεια, δίνονται οι μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης και σχολιάζονται οι επιδράσεις στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Γενικά, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η πηγή υδροδότησης εξαρτάται από:

- το αρδευτικό σύστημα.
- το υδρολογικό καθεστώς κάθε έτους.
- τη εξέλιξη της αρδευτικής ζήτησης

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξετάζονται ενιαία για κάθε κόμβο ζήτησης του υδροσυστήματος της Καρδίτσας.

### 7.2.1 Αρδευτικός κόμβος Μεσενικόλα

Οι αρδευτικές ανάγκες του Μεσενικόλα ικανοποιούνται από νερά του Πλαστήρα. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε από το παρακάτω διάγραμμα, ο συγκεκριμένος κόμβος κατά το μεγαλύτερο ποσοστό ικανοποιείται από τα επιφανειακά νερά της τεχνητής και ελάχιστες αρδευτικές περιόδους ικανοποιεί τη ζήτηση από γεωτρήσεις

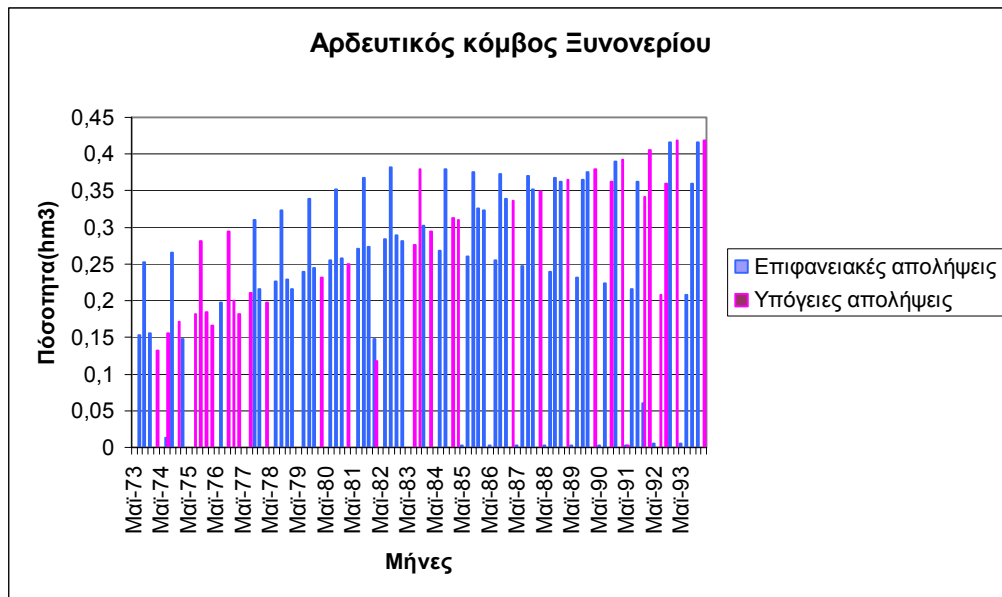
**Error! Objects cannot be created from editing field codes.**

Σχήμα 7.12: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Μεσενικόλα.

### 7.2.2 Αρδευτικό κόμβος Ξυνονερίου

Ο αρδευτικός κόμβος του Ξυνονερίου παρουσιάζει μια γραμμική αύξηση της αρδευτικής ζήτησης για την περίοδο της μελέτης. Τα δύο χωριά εξυπηρετούνται κατά μεγάλο ποσοστό από νερά της λίμνης του Πλαστήρα, εκτός από τα έτη 1975, 1976, 1983, 1992. τα δύο πρώτα χρόνια έχουμε πολύ μικρές ποσότητες νερού, τα οποία διοχετεύονται από τον Πλαστήρα, ενώ στο τέλος της περιόδου μελέτης (1992), αν και παρέχονται μεγάλες ποσότητες από τον Πλαστήρα, εντούτοις επειδή τα νερά του

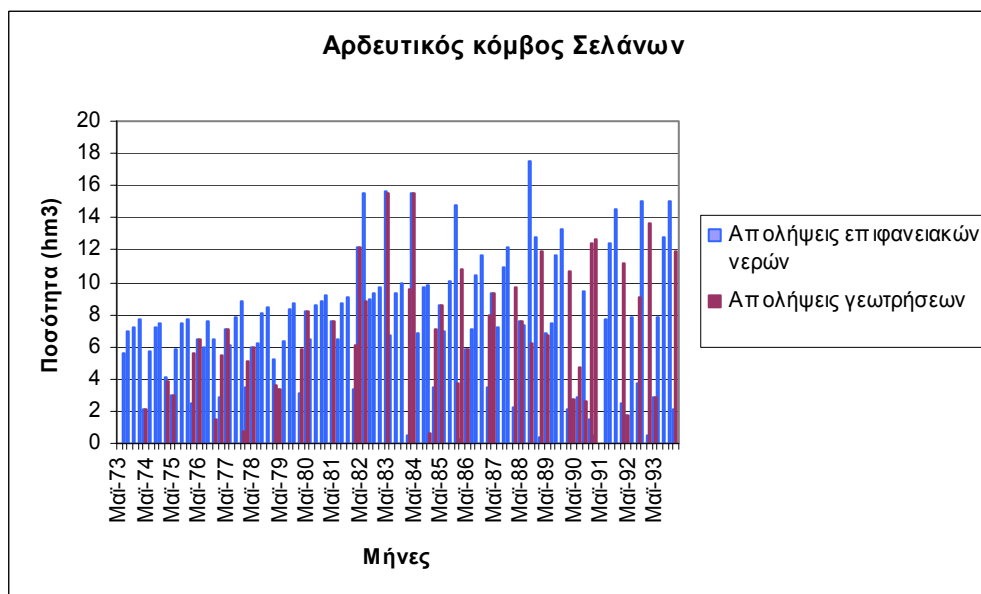
εξυπηρετούν κατά προτεραιότητα άλλες περιοχές αυξάνονται οι απολήψεις από τον υπόγειο υδροφόρα (Σχήμα 7.13).



Σχήμα 7.13: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Ξυνονερίου.

### 7.2.3 Αρδευτικός κόμβος Σεράνων

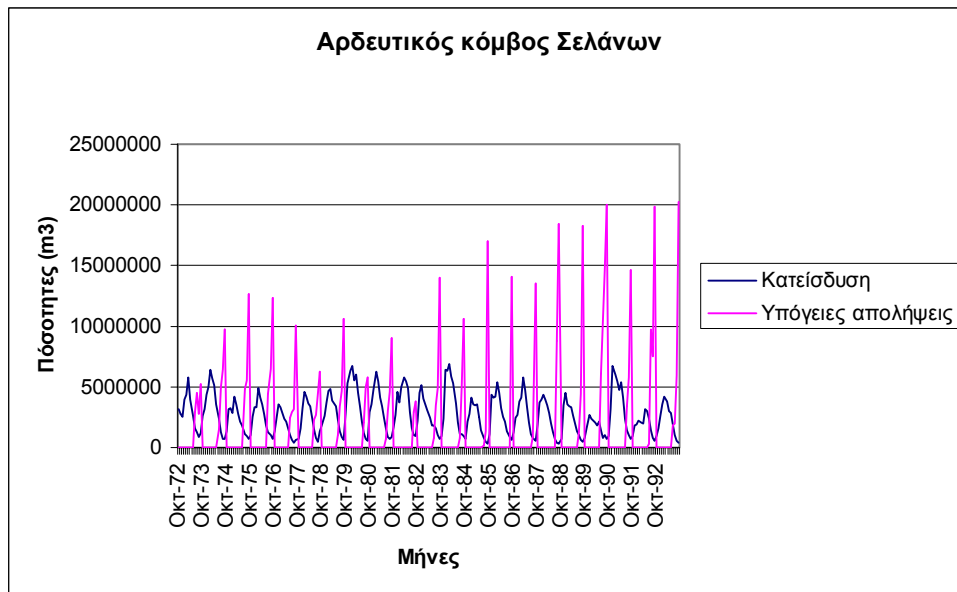
Ο αρδευτικός κόμβος των Σεράνων εξυπηρετείται από επιφανειακά νερά του Παμίσου και από υπόγειες γεωτρήσεις. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο παρακάτω διάγραμμα, στην αρχή κάθε αρδευτικής περιόδου ο κόμβος εξυπηρετείται από επιφανειακές απολήψεις, ενώ στα τέλη οπότε αυξάνονται οι αρδευτικές ανάγκες, ο κόμβος εξυπηρετείται κυρίως από υπόγειες γεωτρήσεις. Οι αρδευτικές ανάγκες στο συγκεκριμένο αυξάνονται γραμμικά στη περίοδο μελέτης και αυξάνονται οι απολήψεις από τον υπόγειο υδροφόρα (Σχήμα 7.14).



Σχήμα 7.14: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Σεράνων.

Στο Σχήμα 7.15 εμφανίζονται οι κατεισδύσεις στα υπόγεια κύτταρα που βρίσκονται στη περιοχή του κόμβου των Σεράνων. Παρατηρούμε χαρακτηριστικά ότι ενώ οι απολήψεις πολλαπλασιάζονται,

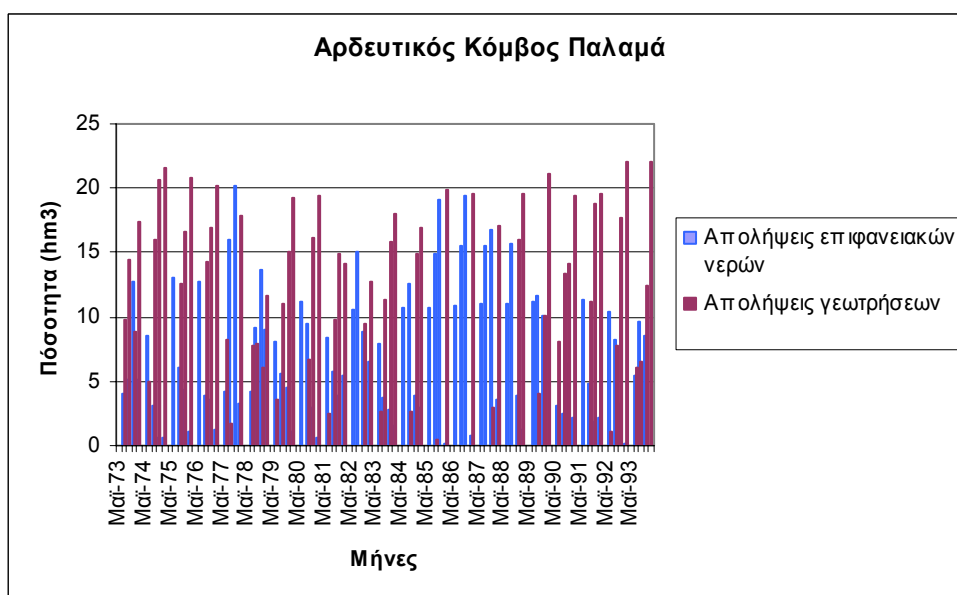
κυρίως στο τέλος της δεύτερης δεκαετίας, η κατείδυση παραμένει η ίδια. Αυτή η εκμετάλλευση προκαλεί μια πτώση στάθμης του υπόγειου υδροφορέα από την αρχή της περιόδου κατά 3 μέτρα.



Σχήμα 7.15: Υπόγειες απολήψεις και τιμές κατειδύσεως αρδευτικού κόμβου Σελάνων.

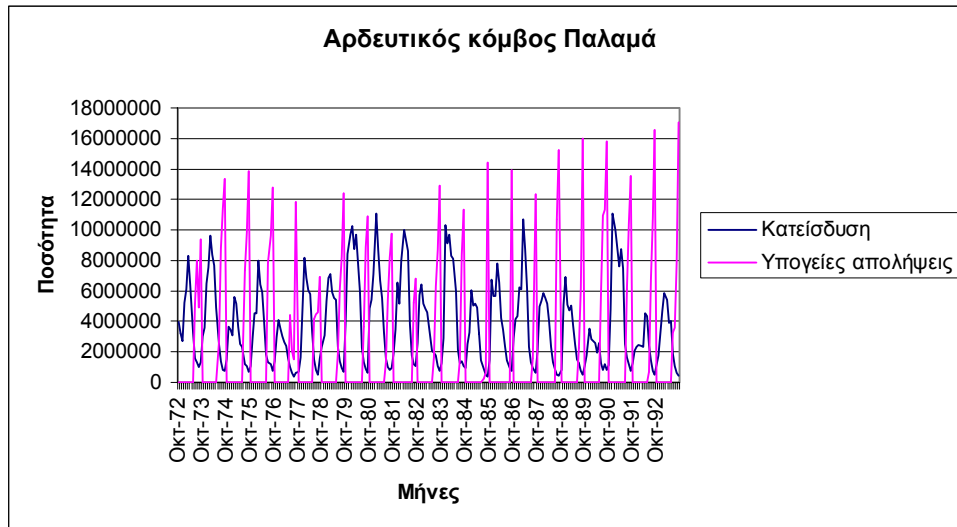
#### 7.2.4 Αρδευτικός κόμβος Παλαμά

Ο αρδευτικός κόμβος του Παλαμά δεν εμφανίζει σημαντική αύξηση της αρδευτικής ζήτησης πλην των δύο τελευταίων χρόνων (1992, 1993). Ο συγκεκριμένος κόμβος εξυπηρετείται από επιφανειακά νερά των κόμβων υδατορευμάτων που εκβάλλουν σ' αυτόν, από νερά του Πλαστήρα καθώς και από υπόγειες γεωτρήσεις. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο Σχήμα 7.16, στην αρχή και στο τέλος της περιόδου μελέτης εμφανίζονται οι μεγαλύτερες απολήψεις από υπόγεια νερά. Την περίοδο 1985-1987 παρατηρούνται σημαντική κάλυψη των αναγκών του κόμβου από επιφανειακές απολήψεις. Αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι τη συγκεκριμένη περίοδο είναι αυξημένες οι απολήψεις από τη λίμνη Πλαστήρα και έχουμε μεγάλη ύψη βροχοπτώσεων.



Σχήμα 7.16: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Παλαμά

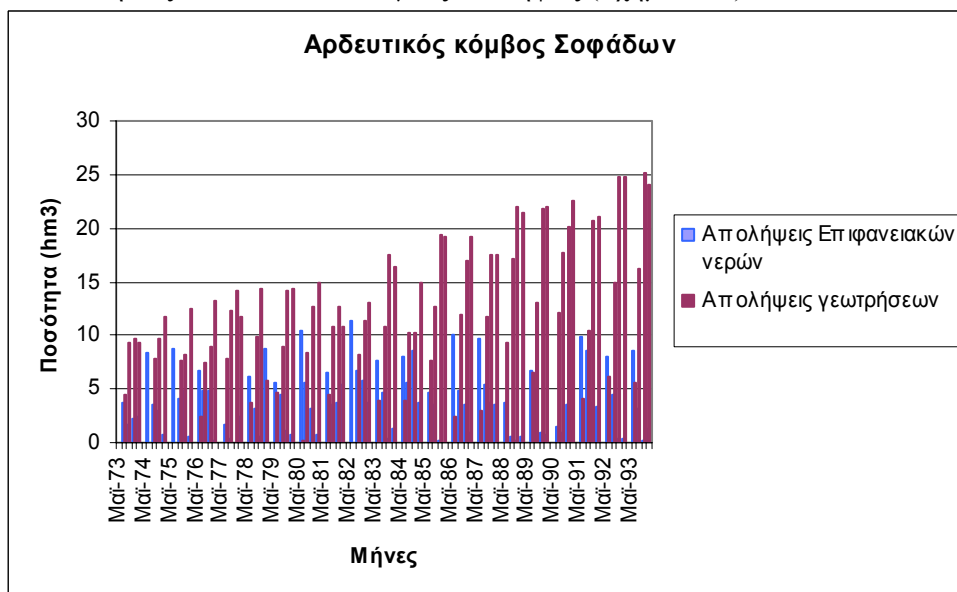
Στο Σχήμα 7.17 εμφανίζεται η αθροιστική κατείδυση στον υδροφορέα της περιοχής του Παλαμά και οι μηνιαίες υπόγειες απολήψεις. Παρά το γεγονός ότι τη δεύτερη δεκαετία αυξάνονται οι υπόγειες απολήψεις ενώ ταυτόχρονα μειώνεται σημαντικά η κατείδυση (1985-1993) εντούτοις όπως μπορούμε να διακρίνουμε από την αποθήκευση των υπόγειων κυττάρων, δεν παρατηρούνται σημαντικές ταπεινώσεις στις στάθμες τους.



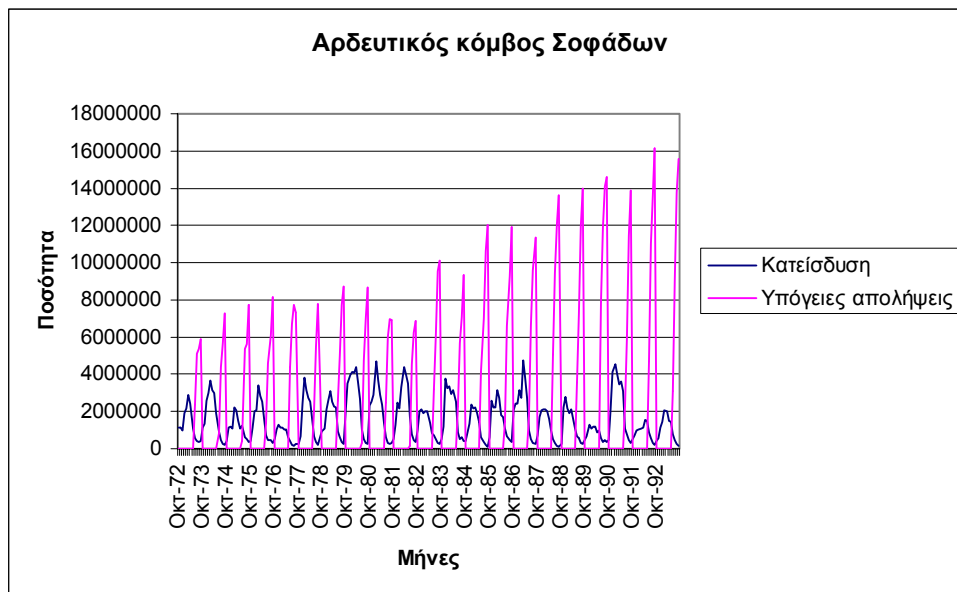
Σχήμα 7.17: Μηνιαία κατείδυση και υπόγειες απολήψεις αρδευτικού κόμβου Παλαμά.

### 7.2.5 Αρδευτικός κόμβος Σοφάδων

Ο αρδευτικός κόμβος των Σοφάδων είναι ο μεγαλύτερος κόμβος ζήτησης του υδροσυστήματος της Καρδίτσας και αυτός ο οποίος εξυπηρετείται κυρίως από υπόγειες απολήψεις. Οι επιφανειακές απολήψεις προέρχονται κυρίως από κόμβους υδατορευμάτων που διασχίζουν την περιοχή και συνεισφέρουν κυρίως στην αρχή κάθε αρδευτικής περιόδου ενώ τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο όπου έχουμε μεγάλη ζήτηση, αυτή καλύπτεται από το υπόγειο νερό. Η ζήτηση αυξάνεται γραμμικά και με την ίδια τάση αυξάνονται και οι υπόγειες απολήψεις (Σχήμα 7.18).



Σχήμα 7.18: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Σοφάδων.

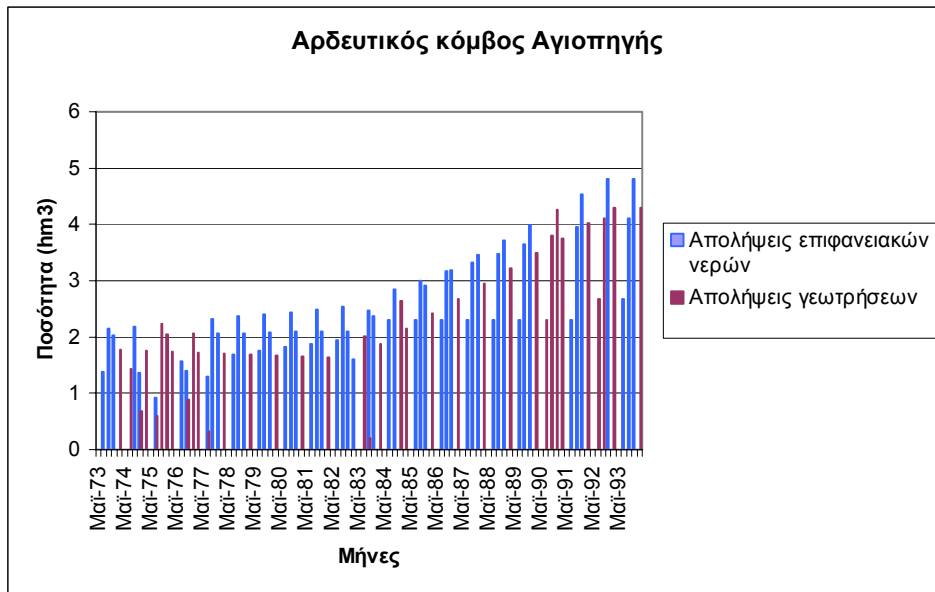


Σχήμα 7.19: Μηνιαίες τιμές κατείσδυσης και υπόγειων απολήψεων αρδευτικού κόμβου Σοφάδων.

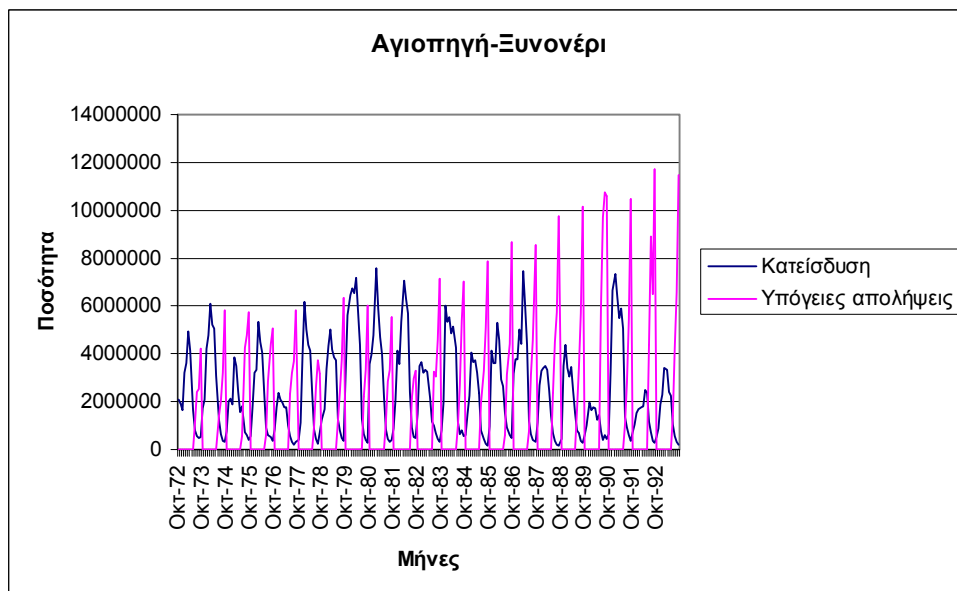
Στο Σχήμα 7.19 αποτυπώνεται η δυσμενέστερη περιοχή του υδροσυστήματος της Καρδίτσας. Οι υπόγειες απολήψεις πολλαπλασιάζονται στην εικοσαετία, η κατείσδυση είναι μειωμένη τη δεύτερη δεκαετία, ενώ οι απολήψεις είναι πολλαπλάσιες της κατείσδυσης. Η απουσία επιφανειακών νερών οδηγεί στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα. Στον υπόγειο υδροφορέα των Σοφάδων παρατηρούνται οι μεγαλύτερες πτώσεις στάθμες σε σύγκριση με όλη τη περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, η πτώση στάθμης είναι της τάξεως των 11 μέτρων, ενώ ο αποθηκευμένος όγκος μειώνεται κατά 8%. Η πτώση στάθμης στη περίοδο μελέτης είναι συμβατή με παρατηρήσεις και άλλων τεχνικών μελετών και καταδεικνύει το μέγεθος του προβλήματος στη Δυτική Θεσσαλία.

### 7.2.6 Αρδευτικός κόμβος Αγιοπηγής

Ο αρδευτικός κόμβος της Αγιοπηγής ικανοποιεί τη ζήτηση του από νερά του Πλαστήρα και από υπόγειες γεωτρήσεις. Η ζήτηση του κόμβου ακολουθεί μια γραμμική αύξηση για όλη τη περίοδο μελέτης και τις ξηρές περιόδους όταν είναι μικρές οι ποσότητες που διοχετεύονται από τον Πλαστήρα, χρησιμοποιούνται κυρίως οι γεωτρήσεις. Κατά κύριο λόγο γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται στα τέλη κάθε αρδευτικής περιόδου (Ιούλιο, Σεπτέμβριο).



Σχήμα 7.20: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Αγιοπηγής.



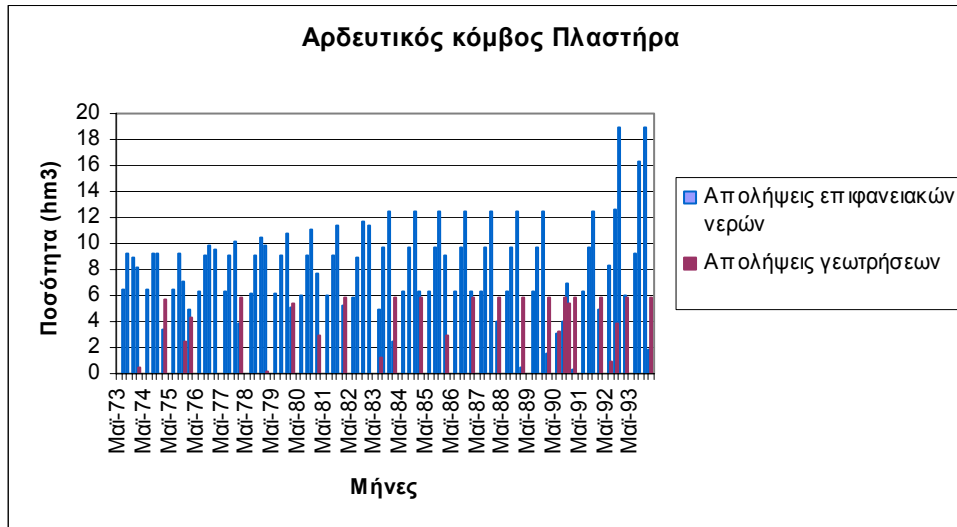
Σχήμα 7.21: Μηνιαία κατείσδυση και υπόγειες απολήψεις αρδευτικού κόμβου Αγιοπηγής.

Η μελέτη των επιδράσεων στον υπόγειο υδροφορέα των κόμβων Αγιοπηγής και Ξυνονερίου είναι κοινή, γιατί ο κόμβος Ξυνονερίου εμπεριέχεται γεωγραφικά σε αυτόν της Αγιοπηγής, όπως διαμορφώθηκε η τοπολογία του αρδευτικού δικτύου. Με βάση το Σχήμα 7.21, την πρώτη δεκαετία ο υδροφορέας επαναπληρώνεται κανονικά και δεν διακρίνονται τάσεις υπερεκμετάλλευσης, ενώ τη δεύτερη δεκαετία πραγματοποιούνται μεγάλες απολήψεις από υπόγεια νερά. Την ίδια περίοδο, η κατείσδυση είναι μικρή και ο υδροφορέας παρουσιάζει πτώση στάθμης της τάξεως των 6 μέτρων.

### 7.2.7 Αρδευτικός κόμβος Πλαστήρα

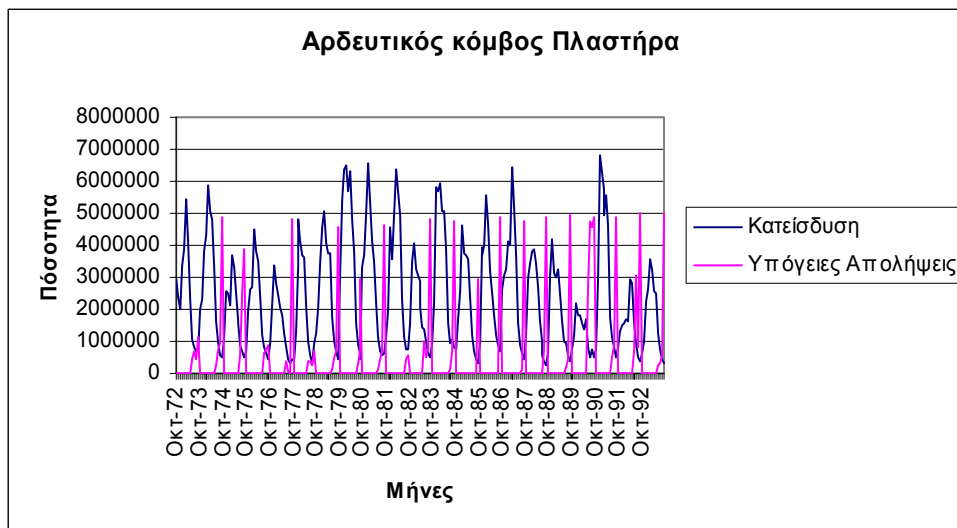
Ο αρδευτικός κόμβος του Πλαστήρα είναι ο αποδέκτης των νερών της τεχνητής λίμνης Πλαστήρα και κατά μεγάλο ποσοστό καλύπτει τη ζήτηση του από τα νερά του τεχνητού ταμιευτήρα. Επίσης στην κατανάλωση επιφανειακών νερών πρέπει να συμπεριληφθούν και οι απολήψεις από τον Καλέτζη καθώς ο αρδευτικός κόμβος βρίσκεται σε αυτή τη λεκάνη. Η ζήτηση του κόμβου παρουσιάζει μια

σταθερότητα με εξαίρεση τις δύο τελευταίες χρονιές, κατά τις οποίες αυξάνεται σημαντικά. Η ζήτηση του κόμβου καλύπτεται όπως τα επιφανειακά νερά στο μεγαλύτερο διάστημα της αρδευτικής περιόδου όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο Σχήμα 7.22. Μερικές χρονιές στο τέλος κάθε αρδευτικής περιόδου, οι ανάγκες του κόμβου καλύπτονται από γεωτρήσεις. Αυτό ίσως να οφείλεται ότι δεν διοχετεύτηκαν οι αναγκαίες ποσότητες από την τεχνητή λίμνη Πλαστήρα.



Σχήμα 7.22: Μηνιαίες απολήψεις ανά πηγή υδροδότησης αρδευτικού κόμβου Πλαστήρα.

Στο Σχήμα 7.23 μπορούμε να διακρίνουμε την κατείσδυση στον υπόγειο υδροφόρα του κόμβου και τις υπόγειες απολήψεις. Στον υπόγειο υδροφόρα δεν παρατηρείται υπερεκμετάλλευση καθόλη τη περίοδο μελέτης λόγω επάρκειας των επιφανειακών νερών εντούτοις παρουσιάζεται πτώση στάθμης της τάξεως των 3 μέτρων από την αρχή της περιόδου λόγω της υπεράντλησης γειτονικών κελιών.



Σχήμα 7.23: Μηνιαίες τιμές κατείσδυσης και υπόγειες απολήψεις αρδευτικού κόμβου Πλαστήρα.



## 8 Συμπεράσματα – Προτάσεις

---

### 8.1 Συμπεράσματα από τη χρήση του μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε συνδυασμένη προσομοίωση του υδροσυστήματος της Δυτικής Θεσσαλίας, με εφαρμογή του νέου μοντέλου ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ.

Το υδροσύστημα της Δυτικής Θεσσαλίας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, τόσο λόγω της γεωμορφολογίας του όσο και λόγω των εκτεταμένων αρδευτικών χρήσεων νερού. Λόγω της αλληλεπίδρασης των διεργασιών, φυσικών και ανθρωπογενών, απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση όσον αφορά στην προσομοίωση του υδροσυστήματος. Το μοντέλο ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ παρέχει αυτή τη δυνατότητα, αφού ενσωματώνει διαδικασίες αναπαράστασης των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών διεργασιών, ταυτόχρονα με την περιγραφή της λειτουργίας των τεχνικών έργων αξιοποίησης των υδατικών πόρων της λεκάνης.

Βεβαίως, το μοντέλο από μόνο του δεν αρκεί ούτε μπορεί να υποκαταστήσει την επιστημονική εμπειρία και κρίση, η οποία είναι απαραίτητη τόσο κατά την σχηματοποίηση του υδροσυστήματος όσο και κατά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων του.

Ειδικότερα, στη σχηματοποίηση μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το σύνολο της διαθέσιμης γνώσης για το υδροσύστημα. Αυτή περιλαμβάνει τρία επίπεδα προσομοίωσης:

- το υδρογραφικό δίκτυο, η χάραξη του οποίου γίνεται με βάση τις θέσεις μέτρησης της παροχής (κόμβοι, στους οποίους ελέγχεται η απορροή)·
- ο υδροφορέας, η διακριτοποίηση του οποίου βασίζεται στη γνώση της πιεζομετρίας της περιοχής·
- το σχήμα διαχείρισης των υδατικών πόρων, που μπορεί να περιγραφεί με όση λεπτομέρεια επιτρέπει η γνώση του συγκεκριμένου ζητήματος, καθώς το μοντέλο παρέχει απεριόριστη ευελιξία.

Όσον αφορά στη διαδικασία της βαθμονόμησης, το πρόγραμμα επιτρέπει στον χρήστη την επιλογή των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων και τη διατύπωση των κριτηρίων καλής προσαρμογής. Το μοντέλο παρουσιάζει ιδιαίτερη ευελιξία στην αξιοποίηση της παρεχόμενης υδρολογικής πληροφορίας, ανεξάρτητα από το χρονικό βήμα και το τύπο της πληροφορίας. Ακόμη και η ελάχιστη γνώση μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμη, όπως φάνηκε στην περίπτωση των πηγών Κεφαλόβρυσου, για τις οποίες υπήρχε μόνο μια χονδρική εκτίμηση της μέσης παροχής τους.

Επιπλέον, το μοντέλο ενσωματώνει μια εξελιγμένη τεχνική βελτιστοποίησης, που εντοπίζει με σχετικά μικρό αριθμό δοκιμών τη βέλτιστη λύση σε έντονα μη γραμμικούς χώρους αναζήτησης. Πρόκειται για ένα σημαντικό εργαλείο, που σε συνδυασμό με την παρέμβαση του χρήστη, βοηθά στην προσέγγιση μιας λύσης που εξασφαλίζει ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου για το σύνολο των κριτηρίων που έχουν τεθεί.

Αναμφίβολα, σε πολύπλοκες εφαρμογές, όπως είναι η περίπτωση της Δυτικής Θεσσαλίας, η διαδικασία της βαθμονόμησης, παρά τη χρήση αυτοματοποιημένων τεχνικών βελτιστοποίησης, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Στην πραγματικότητα, η σχηματοποίηση και βαθμονόμηση δεν είναι δυο αυστηρά «σειριακές» διαδικασίες, αλλά δύο αλληλένδετες εργασίες που η μία κατευθύνει την άλλη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η προσπάθεια ρύθμισης της απορροής στον Αλή Εφέντη, που οδήγησε σε διαδοχικές αναθεωρήσεις της σχηματοποίησης, με αποτέλεσμα την ακόμα καλύτερη

περιγραφή του συστήματος (βλ. 4.5.2 και 4.5.3). Βεβαίως, οι μεταβολές στον αρχικό σχεδιασμό είχαν ως συνέπεια ακόμη μεγαλύτερες καθυστερήσεις στην προσπάθεια ανεύρεσης της βέλτιστης λύσης.

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα του φυσικού συστήματος, την ανεπάρκεια των μετρήσεων καθώς και τα σφάλματα σε αυτές, πετύχαμε ικανοποιητική προσαρμογή του μοντέλου, σε ένα εξαιρετικά απαιτητικό πρόβλημα ελέγχου μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Οι παράμετροι που προέκυψαν για το επιφανειακό και υπόγειο μοντέλο είναι, σε γενικές γραμμές, συμβατές με τα φυσικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Το γεγονός αυτό ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικό, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα μοντέλο φυσικής βάσης.

## **8.2 Συμπεράσματα για το υδροσύστημα της Δυτικής Θεσσαλίας**

Η διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο τη γεωυδρολογική ερμηνεία της περιοχής της Δυτικής Θεσσαλίας, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων για την κατανόηση της συμπεριφοράς του επιφανειακού και υπόγειου υδροσυστήματος. Η κατανόηση αυτή αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την κατάρτιση επιχειρησιακών σχεδίων ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων της περιοχής.

Από την ανάλυση του υδτικού ισοζυγίου προκύπτει ότι, κατά μέσο όρο, οι υδατικές ανάγκες της περιοχής καλύπτονται κατά 21,4% από επιφανειακά νερά (απευθείας απολήψεις από τα υδατορεύματα της περιοχής), κατά 46,1% από γεωτρήσεις και κατά 32,5% από εξωτερικά νερά, που προέρχονται από τον ταμιευτήρα Πλαστήρα. Ωστόσο, σε περιόδους χαμηλής υδροφορίας, οπότε και η φυσική τροφοδοσία του υδροφορέα λόγω κατεισόδσεων είναι μειωμένη, η συνεισφορά των υπόγειων νερών είναι ακόμη μεγαλύτερη, με συνέπεια τη σημαντική ταπείνωση της στάθμης.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της μελέτης στην περιοχή της Καρδίτσας, όπου και έγινε αναλυτικότερη περιγραφή του υδροσυστήματος, μπορούμε να σταθούμε στα παρακάτω σημεία:

- Κατά την περίοδο 1972-1993, οι αρδευτικές ανάγκες του υδροσυστήματος αυξάνονται συνεχώς, ενώ δεν ολοκληρώνονται τα αναγκαία έργα υποδομής, με συνέπεια να παρατηρείται υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδροφορέα.
- Η εξέλιξη της επανατροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με την εξέλιξη των αρδευτικών αναγκών του κάθε κόμβου ζήτησης.
- Ο δυσμενέστερος κόμβος ως προς την κατανάλωση υπόγειων νερών είναι αυτός των Σοφάδων, που αντιπροσωπεύει τη μεγαλύτερη αρδευόμενη έκταση της περιοχής.
- Η λίμνη Πλαστήρα αρδεύει πολλαπλάσια στρέμματα από το αρχικό σχεδιασμό της. Επιπλέον, έχουν κατασκευαστεί αρδευτικά έργα, όπως του Μεσενικόλα και του Ξυνονερίου, χωρίς να υπάρχει ολοκληρωμένο διαχειριστικό σχέδιο, με συνέπεια τη μη ορθολογική χρήση των αποθεμάτων του Πλαστήρα.

Η έρευνα που έγινε κατέδειξε την αναγκαιότητα της ύπαρξης συστηματικών μετρήσεων, σε αντιπροσωπευτικά σημεία του υδροσυστήματος. Όσο αυξάνει η υδρολογική πληροφορία, τόσο μειώνεται η αβεβαιότητα που υπάρχει στη διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου.

## **8.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Με γνωστές πλέον τις παραμέτρους του μοντέλου, αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί για διαχειριστικούς σκοπούς, καθώς και για τη μελέτη νέων έργων, ακόμη και σε μικρότερη χωρική κλίμακα από αυτή της συγκεκριμένης σχηματοποίησης. Συγκεκριμένα:

- Σε πρόσφατο ερευνητικό έργο του ΕΜΠ, διερευνήθηκαν σενάρια διαχείρισης της λίμνης Πλαστήρα, με βάση τα οποία καθορίστηκαν τιμές ασφαλούς απόληψης. Η μελέτη αυτή μπορεί να

επεκταθεί στην κατεύθυνση της βέλτιστης διανομής των απολήψεων, με βάση τη σχηματοποίηση της παρούσας εργασίας.

- Σημαντική μπορεί να είναι η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της εργασίας όσον αφορά στη μελέτη λειτουργίας του ταμιευτήρα Σμοκόβου και του υπό κατασκευή αρδευτικού δικτύου, που προβλέπεται να αρδεύσει την περιοχή των Σοφάδων, όπου και εντοπίστηκε το μεγαλύτερο πρόβλημα ανεπάρκειας επιφανειακών υδατικών πόρων.

Αυτό που πρέπει να τονιστεί με έμφαση είναι η αξία της συνεχούς μέτρησης των υδρολογικών μεταβλητών. Πολλές μετρήσεις σε πολλές θέσεις βοηθούν στην ερμηνεία του υδροσυστήματος και μειώνουν τις αβεβαιότητες που διέπουν την λειτουργία του. Είναι βέβαιο ότι αν στο μέλλον υπάρξει περισσότερη και πιο αξιόπιστη υδρολογική πληροφορία, η προσαρμογή του μοντέλου θα είναι ακόμα καλύτερη.

Ολοκληρώνοντας, μπορεί να ειπωθεί ότι στο μοντέλο αυτό μπορούν να στηριχθούν μελλοντικές μελέτες διαχείρισης του συνολικού υδροσυστήματος της Δυτικής Θεσσαλίας, αποτιμώντας τα αναγκαία αρδευτικά έργα, σταθμίζοντας αποφάσεις κατασκευής νέων έργων και αναθεωρώντας, πιθανόν, συμπεράσματα προηγούμενων υδρολογικών μελετών, που λόγω των απλοποιημένων παραδοχών που έγιναν να οδήγησαν σε λανθασμένες εκτιμήσεις.

## Βιβλιογραφία

---

- Bear, J., *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill, New York, 1979.
- 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.
- 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 Fifth International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1423-1428, International Water Association, 2002.
- Efstratiadis, A., D. Koutsoyiannis, and D. Xenos, Minimising water cost in the water resource management of Athens, *Urban Water Journal*, 1(1), 3-15, 2004.
- Efstratiadis, A., E. Rozos, A. Koukouvinos, I. Nalbantis, G. Karavokiros, and D. Koutsoyiannis, An integrated model for conjunctive simulation of hydrological processes and water resources management in river basins, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 03560, European Geosciences Union, 2005.
- Freer, J., K. J. Beven, and B. Ambroise, Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach, *Water Resources Research*, 32(7), 2161-2173, 1996.
- 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.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680, 1983.
- Koutsoyiannis, D., A. Efstratiadis, and G. Karavokiros, A decision support tool for the management of multi-reservoir systems, *Journal of the American Water Resources Association*, 38(4), 945-958, 2002.
- Nalbantis, I., E. Rozos, G. M. T. Tentes, A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, Integrating groundwater models within a decision support system, *Proceedings of the 5th International Conference of European Water Resources Association: "Water Resources Management in the Era of Transition"*, edited by G. Tsakiris, Athens, 279-286, European Water Resources Association, Athens, 2002.

- Nelder, J. A., and R. Mead, A simplex method for function minimization, *Computer Journal*, 7(4), 308-313, 1965.
- Refsgaard, J. C., Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *Journal of Hydrology*, 198, 69-97, 1997.
- Rozos, E., A. Efstratiadis, I. Nalbantis, and D. Koutsoyiannis, Calibration of a semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), 819-842, 2004.
- Rozos, E., and D. Koutsoyiannis, Application of the Integrated Finite Difference Method in groundwater flow, *2nd General Assembly of the European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, Vienna, 00579, European Geosciences Union, 2005.
- 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.
- SOGREAH, Έργο αναπτύξεως υπογείων υδάτων Θεσσαλίας, Μαθηματικά Ομοιώματα, Υπουργείο Γεωργίας, 1979.
- Ευστρατιάδης Α., Α. Κουκουβίνος, Δ. Κουτσογιάννης, Ν. Μαμάσης, Υδρολογική μελέτη, Διερεύνηση των δυνατοτήτων διαχείρισης και προστασίας ποιότητας της λίμνης Πλαστήρα, Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ, Αθήνα, 2002.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Ε. Ρόζος, και Ι. Ναλμπάντης, Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου προσομοίωσης υδρολογικών-υδρογεωλογικών διεργασιών λεκάνης απορροής, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΛΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: NAMA, Τεύχος 4, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- Ευστρατιάδης, Α., *Διερεύνηση μεθόδων αναζήτησης ολικού βελτίστου σε προβλήματα υδατικών πόρων*, Μεταπτυχιακή εργασία, 139 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2001.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ε. Ρόζος, Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού - Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, 196 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Καραβοκυρός, Γ., Α. Ευστρατιάδης, και Δ. Κουτσογιάννης, Υδρονομείας (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, 142 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Κουκουβίνος Α και Ε. Ρόζος, Τελική Έκθεση, Εκσυγχρονισμός του πρωτογενούς αρχείου δεδομένων επιφανειακής και υπόγειας υδρολογίας του Υπουργείου Γεωργίας στη Θεσσαλία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, και Ν. Μαμάσης, Αποτίμηση του επιφανειακού υδατικού δυναμικού και των δυνατοτήτων εκμετάλλευσής του στη λεκάνη του Αχελώου και τη Θεσσαλία, Κεφ. 5 της Μελέτης υδατικών συστημάτων, *Συμπληρωματική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων*

- εκτροπής του Αχελώου προς τη Θεσσαλία, Εργοδότης: Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, Ανάδοχος: Υδροεξυγιαντική, Συνεργαζόμενοι: Δ. Κουτσογιάννης, 2001.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., Σ. Ρώτη, Ι. Τζεράνης, και Θ. Ξανθόπουλος, Μετρήσεις παροχής, Καμπύλες στάθμης - παροχής, *Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Παράρτημα Ε, 197 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 1987.
- Κουτσογιάννης, Δ., Σ. Ρώτη, Ι. Τζεράνης, και Θ. Ξανθόπουλος, Τελική Έκθεση, *Υδρολογική διερεύνηση υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας*, Τεύχος 7, 105 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 1988.
- Κωνσταντινίδης, Δ., και Π. Περγαλιώτης, Ανάπτυξη υπόγειων υδάτων Θεσσαλίας, Τελική μελέτη, Υπουργείο Γεωργίας 1986.
- Ματσούρης, Α. *Διερεύνηση του ισοζυγίου προσφοράς και ζήτησης νερού της περιοχής Καρδίτσας με χρήση του λογισμικού Mike Basin*, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2003.
- Πέππας, Α. *Προσομοίωση υδατικών πόρων και χρήσεων νερού στη Θεσσαλία*, Διπλωματική εργασία ΕΜΠ, 2001.
- Ρόζος, Ε., Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου εκτίμησης υδατικών αναγκών, *Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελεγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)*, Ανάδοχος: ΝΑΜΑ, Τεύχος 5, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005.
- ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, ΚΕΠΕ, *Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης υδατικών πόρων της χώρας, Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Αθήνα Ιανουάριος 2003.
- Μόρφης, Α., Μ. Παγούνης, και Γ. Γκιώνη, Παράρτημα 3: *Εκτίμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού, Ταξινόμηση ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων με βάση τις αποδελτιωμένες μελέτες του ΥΒΕΤ, με χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας*, Ανάδοχος: Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 327 σελίδες, Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Νοέμβριος 1996.

## Παράρτημα Α: Χρονοσειρές

### ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΑΝΤΗ ΠΗΝΕΙΟΥ-ΕΝΙΠΕΑ

	ΟΚΤ.	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ.	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ.	ΑΠΡ.	ΜΑ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠ.
72-73	153,2	8,4	16,4	80,8	60,2	113,2	20,3	12,7	9,1	59,2	17,2	80,4
73-74	81,7	53,9	89,6	92,6	134,3	66,6	94,3	39,4	80,9	0	1,1	22,7
74-75	42,3	82,3	29,9	34,4	87,1	34,9	21,8	43,6	71,6	11,4	31,5	4,3
75-76	53,8	69,1	71,9	38,9	112,1	35,3	53	76,5	21,6	53,1	59,6	5,3
76-77	31,2	60,7	30,5	27,8	10,7	19,7	24,6	20,8	24,3	2,8	4,8	32,4
77-78	7,5	42,2	69,5	103,2	34,8	51	49,9	40,5	8,6	0	2,2	128,1
78-79	70,2	31	70,8	69,3	38	24,4	71,7	82,7	11,2	28,2	16,9	10,5
79-80	97,8	165,6	75	87,9	34	89,3	41,3	63,3	33,2	11,6	9,5	5,7
81-82	126,4	58,3	58,8	141,6	33,2	19,3	46,3	15,7	9,5	23,9	27,1	52,2
82-83	90,5	70	62,4	10,9	126,1	65,9	164,1	126	20	9,5	28,3	26,3
83-84	101,2	93,1	46,9	17	42,2	34,1	17,5	24	71,1	117,1	9,1	5,1
84-85	29	68,7	219,4	45,4	94,5	48,4	101,3	23,2	17,6	10,5	52,2	21,1
85-86	6,9	62,3	43	62,9	14,1	68,2	37,9	17,9	1,8	13	0,1	1,1
86-87	80,1	160,9	9,7	33,8	86,2	32,1	8,3	50,4	69,1	3,3	7,7	16,4
87-88	56,7	64	37,5	67,5	66,6	143,7	100,2	44,1	25	0,3	21,6	5
88-89	88	93	50,9	56,1	26,6	39,2	33,6	33,7	6,5	24,5	0	14,8
89-90	17,4	144	82,7	0	39,8	69	18,7	38,7	29,4	32,2	13,6	4,2
91-92	38,4	54	9,7	25,7	9,6	21,7	141	73,4	58,7	12,6	0	0,2
92-93	47,8	63,3	34	86,3	48	44,6	22,1	113	11,6	3,3	0,1	4,8

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΑΝΤΗ ΠΗΝΕΙΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	233,9	26,1	31,5	126,1	114,7	206,2	13,2	41,8	15	58,8	27,7	77,4
73-74	151,8	81,5	119,5	108,9	177,9	116,1	138,3	37,2	40,7	1,7	1,3	46,8
74-75	101,9	138,2	59,6	21,2	142,4	54,6	34,6	44,8	64,6	13,6	56,3	13,4
75-76	67,8	113,2	79,6	52,5	155,5	63,2	86	59,3	32,8	24,2	39,2	13,1
76-77	105,3	100,2	117,9	48,3	30,4	16,5	48,2	18	20,8	12	7,3	53,9
77-78	7,5	80,2	125,3	132,9	70,5	60,8	106,5	29,9	9,8	4,9	6,8	130,5
78-79	87,3	87,3	106,3	125,4	106,9	49	122,3	135	38,9	19,7	23,1	11,5
79-80	187,8	180,5	166,8	147,6	68	170,1	58,1	103	18,8	1,7	17,6	15
81-82	187,9	95,6	142,8	166,7	93,3	25,7	87,9	42,5	19,1	4,8	35,7	52,9
82-83	107,1	93,1	165,7	29,8	143,1	189,6	145,8	160	13,5	15,1	24,7	45,9
83-84	136,6	185,9	126,1	17,7	55,2	38,1	25,5	29,3	109	54,7	12,3	14,1
84-85	68,5	107,5	246,9	135,8	169,5	105,6	147,6	38,3	13,3	4,5	68	30,4
85-86	10,6	114,4	66,8	131,7	43,5	86,1	139,1	25,9	7,6	7,4	3,3	4,8
86-87	101,2	205,1	65,3	82,4	161,1	70,6	20,3	66,9	95,7	22,7	16,2	20,7
87-88	90,7	99,4	54,6	110,3	94,9	196,6	85,5	52,5	24,4	12,6	26,3	5,2
88-89	142,4	145,2	71,9	93,8	70,6	52,2	47	18,9	12,6	10	2	12,5
89-90	75,6	169,9	112,3	11,9	70,6	71	24,5	36,4	22,1	54,6	5,8	7,8
91-92	56,2	83,2	33,1	48,2	25,9	38,4	182,1	96,9	84,6	24,7	0,6	11,8
92-93	77,9	57,9	94,1	94	119,8	77,8	40,1	119	19,5	3,4	7,3	12,1



ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΑΝΤΗ ΣΑΡΑΚΗΝΑΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	350,2	36,5	27,8	141,1	196,6	246,2	8,5	47,2	33,8	50,7	44	102
73-74	148,7	89,4	145,5	115,6	177,7	105,1	132,6	44,3	50,9	4,5	1,5	30,3
74-75	156	163,1	46,7	37,4	93,2	55,1	18,9	41,3	53	13,5	62,6	19,9
75-76	86	111,3	87,4	59,8	144	58	146,8	76,6	37,6	54,3	26,6	20,2
76-77	112,1	204,6	189,9	44	16,4	15,2	59,3	17,3	45,5	14,4	16,7	60,3
77-78	7,5	108,7	175,3	153,2	115,8	58	181,3	38,9	16	3,1	6,2	161,8
78-79	115,4	159,4	157,2	150	82,6	54,6	164	183	44,1	12	33,2	17
79-80	185,7	240,4	179,1	153,1	49	172,9	50	150	29,5	2,3	28,5	12,5
81-82	297,6	137,6	205,4	216,1	108,5	24,7	89,8	72,7	28,1	6,3	43,4	52,4
82-83	167,4	63,6	287,3	15,4	156,5	231,9	159,7	164	18,1	10,1	28,1	51,4
83-84	118,6	148,3	106,9	19,1	46,3	28,9	52,5	45,2	152	57,1	10,4	41,1
84-85	89,2	133,5	257,1	208,7	170,6	114,1	180,7	23,8	11,3	0,6	48,5	84,7
85-86	2,8	137,6	45,1	241,5	54,9	60	148,5	39,6	12,4	9,5	3,2	6
86-87	95,6	305,4	64,3	113,4	176,6	54,7	16,2	44,7	77,4	54,1	10,9	5,5
87-88	156,2	118,4	99,1	36,8	121,5	294,9	92,3	78,4	39,4	35,5	37,2	7
88-89	193,3	200	84,8	80,2	121,8	70,8	20,7	24,9	21	8	8,2	13,6
89-90	113	192,8	166,6	10,1	93	98,1	30,1	61,6	54,7	123	3,5	4
91-92	52,2	154,6	47,9	32,5	34,9	45,7	298,9	131	90,9	28,2	6,3	9,4
92-93	100,3	68,3	195,2	112,4	139,9	73,3	45	158	25,2	4	13,5	19,3

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΤΩ ΕΝΙΠΕΑΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	136	24,5	6,9	76,1	60,9	59,6	37,9	14,5	4,3	49	41,6	95
73-74	120,7	41,2	79,4	87,7	78,6	61,3	49,2	40,7	43,5	0,2	7,3	6,3
74-75	20,8	70	15,5	3,3	78,8	28,2	50,7	30,4	101	44,5	66,9	0,7
75-76	28,3	64,5	59,4	24,8	104,2	22	61,2	63,8	12,4	40	64,1	1,6
76-77	31	47,7	20,6	12,2	14,3	32,7	27,3	14,2	25,9	13,7	0,8	38,8
77-78	7,5	26,5	86,7	107,5	38,3	10	80,3	25,1	0,7	0	0,2	176,8
78-79	56,8	26,7	114,8	82,7	82,8	12,9	46,1	74	3,6	14,1	31,8	13,5
79-80	145,3	158,5	59,9	68	52	74,7	91,8	39,9	30,2	0,8	1,1	10,7
81-82	221,1	53,3	35,1	148,3	40,4	7,6	13,6	6,6	0,5	1,4	11,8	27,6
82-83	48,6	19,4	57,1	26,4	145,4	70,7	169	126	28	18,3	24,5	9,4
83-84	55,6	74,3	59,7	36,7	47,8	48,7	37	23,1	87,7	35,5	2,6	8,6
84-85	38,1	57,1	230,7	38,7	78,5	70,6	110,7	26,2	14,1	14	48,7	4,6
85-86	1,5	81,4	26,8	63,4	20,7	70,6	57,8	20,7	12,5	21,7	0,5	0,2
86-87	114,1	145,4	11,8	38,7	62,5	40	27,2	40	47,8	20,2	9,4	3
87-88	96,4	49,1	53,2	71	33,8	191,1	105,9	29	18,5	1,9	2	1
88-89	92,9	109,2	45,2	66,6	32,7	42,4	60,3	24,4	9	32	0	16,8
89-90	12,2	127,6	43,3	1	16,9	59	29,4	78,5	66,4	36,6	29,5	0,4
91-92	61,2	77,2	9,4	20,3	23,5	64,7	118	99,1	99,6	28,3	0,8	0,4
92-93	96	49,3	41	125,8	6,3	50,7	24,8	88,9	25,5	0,4	0,3	0,4

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΤΩ ΣΟΦΑΔΙΤΗΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑ	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	119,4	18,8	8	83,5	59,9	130,8	31,2	4,4	4,9	17,5	41	36,2
73-74	120,9	38,9	95	92,4	112	74,3	90,5	36,9	37,4	0,1	4,3	11,2
74-75	34	71,9	29,4	19,4	114,7	34,7	33,9	46,9	113	13,9	45,3	7
75-76	26,1	70,9	83,9	34,5	134,1	42,2	53,1	29,7	11,9	27,7	53,1	4,4
76-77	45,8	60,2	26,9	21,3	33,4	18,2	42,8	15,6	23,5	3,2	2,1	41,1
77-78	7,5	64	113,2	122,9	46,8	61,7	62,7	37	5,7	1	4,6	93,6
78-79	85,9	32,2	81,5	74,5	105,4	29,4	68,3	104	24,9	31,7	15,2	12,1
79-80	161,2	147	103,8	95,6	108,5	128,9	68,6	55,3	25,9	0	8,4	13,6
81-82	196,6	65,4	65,5	164,8	52,1	9,9	45,5	21,4	6,8	0,9	19,4	35,9
82-83	36,7	67,5	98,4	23,9	128,9	171,5	126,2	113	13,6	20,7	9,3	21,2
83-84	109,9	82,5	33	21,9	58,3	56,7	10,7	11,3	74,6	27	14,7	15,5
84-85	65	69,5	179,8	53,8	80,2	64,6	146,9	28,7	15,3	9,2	98,4	10,9
85-86	14	43,6	52,9	75,6	30,1	60,6	66,9	36,8	3	6,3	0,1	1,2
86-87	96	145,4	28,7	44	127,1	47,9	14,2	104	95,1	27,2	29,7	16,6
87-88	172,5	80,5	48,4	85,6	43,3	228,7	70,5	41	15,4	0,5	13,2	18,5
88-89	81,5	89,1	62,1	44,2	46,7	42,7	49,1	14,8	7,5	5,5	0	6,6
89-90	30,9	166,6	79,8	0,4	17,6	92	19,8	40,8	27,8	51,4	5,9	11,8
91-92	41,1	30,3	26,1	29,4	32,3	40,2	106,2	68,4	45,2	20,6	0	7,3
92-93	38,9	36,2	51,5	47,2	68,6	47,1	29,3	72,3	52	6,6	1,2	3,3

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΩ ΠΑΜΙΣΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	293,7	93,3	49,1	193,3	188,2	211,9	51	49,6	19,3	24,4	79,2	62,7
73-74	253,7	144,6	194,2	92,4	301,2	136,4	263	78,6	30,6	1,9	8,6	114,1
74-75	264,7	206,8	61,9	37,4	229,9	90,4	81,5	78,3	74,4	16,7	60,6	24,6
75-76	121,6	193,8	184,8	112	226,3	115,7	153,8	46,2	35	40,9	45,4	24,9
76-77	162,6	156,1	334,8	82	57	35,6	97,1	31,1	23,7	3,4	21	101,4
77-78	7,5	160,8	233,4	216,7	134,8	112,4	151,1	48,8	18,8	6	4,3	178,6
78-79	93,8	112,8	206,7	204,5	250,6	56,1	189,4	172	25,3	47,3	20,7	25,3
79-80	298,4	201,6	247,6	206,7	145,5	281,3	107	120	29,3	0,3	14	24,5
81-82	343,2	144,2	264,6	329,4	187,7	51,7	89,5	85,7	36,7	11,6	26,7	58,4
82-83	142,9	125,1	340,7	57,3	198,6	247,5	150,7	144	42,1	8,5	26,2	57,5
83-84	150,3	200,7	201	50,6	117,8	67,1	29,6	40,1	75,4	46,6	24,2	24,6
84-85	96,7	188,9	277,2	150,5	288,9	158,3	202,6	61,5	21,1	15,1	54,4	44,9
85-86	9,5	156,7	133	228,9	71,9	145,5	168,7	75,2	11,8	16,4	5,7	5,3
86-87	152,2	303,9	135,1	199,3	297,5	118,9	67,7	90	110	14,8	31,7	45,8
87-88	197,3	82,8	129,3	308,4	154,3	220,8	118,2	75,8	28	9,5	25,8	3,8
88-89	202,5	216,2	136,1	110,7	127,2	112,6	73,2	26,3	18,1	5,7	3	26,6
89-90	110,1	222,6	205,3	37,2	131,6	120,5	95,3	86,4	36,7	72,1	6	17,3
91-92	136,1	185,9	74,2	54,1	51,1	85,4	237,6	111	47,3	19,7	3,3	24,2
92-93	174,3	144,7	178,2	166	233,2	117,7	86	113	25,7	11,6	10,4	13,4

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΛΕΤΖΗ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ.	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	241,6	45,7	15,3	83,3	62,6	139,2	31,7	13,8	11,3	24,4	33	23,6
73-74	141,2	57,5	63,2	71,5	159,8	77,1	160,1	38,1	48,2	0,3	2	35,4
74-75	93,9	108,5	52,4	15,5	102,4	54,2	48,5	33	92,1	10,1	36,6	4,9
75-76	52,9	96	45,5	44,3	110,9	60,5	73,7	37,8	22	19,5	30,4	7,3
76-77	84	90,1	124	30,6	44,3	18,4	52	22,3	25,8	1,4	5,9	44,3
77-78	7,5	85,3	111,7	80,6	62,3	53,4	65,5	28,1	5,8	1,2	6,7	115,4
78-79	54,8	78	107,3	107,9	141,1	33,2	102,4	98,6	27,1	18	11,8	15,5
79-80	243,7	152,3	134,7	86,1	89,9	118,8	49,2	53	22,1	0,5	14	16
81-82	213,4	82,7	95,4	105,9	63,6	26	48	34,7	18,6	3	15,4	48,1
82-83	79,2	70,4	153,8	38,6	111,9	155,5	125,1	98,5	7	18,4	11,1	40,6
83-84	98,1	94,1	89,5	27	68,4	61,7	22,5	25,6	86,7	22,1	25,1	16,7
84-85	76,3	113,3	173,5	71,8	92,7	75,6	159,8	53,6	17,9	7,8	73,2	31,5
85-86	15,3	79,5	115,6	174,9	39,4	112,6	99,6	49,3	4,6	11,6	0,8	3,2
86-87	106	141,2	84,7	89,4	150,8	96,6	38,7	87,5	84,8	26,2	39,7	38,9
87-88	185,4	55,9	65	96,8	64,5	167,8	76,7	47,8	14,6	1,9	17,8	3,5
88-89	94,8	106,1	75,1	89,6	92,5	62,7	48,8	20,1	16,1	1,2	0,7	7,4
89-90	63,2	142	97,6	9,6	50	98,4	36,1	27,7	14,9	62,6	12	12,2
91-92	50,9	68,7	26,5	29,7	41,5	51,4	129,7	79,4	46,2	21,6	0,7	9,5
92-93	43,3	55,7	78,5	50,9	83,9	57,6	47,9	62,4	41,3	8	7	7,2

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΚΑΤΩ ΠΑΜΙΣΟΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	191,2	23	16,8	95,8	74,8	141,9	15,8	24	13,1	37	51,3	49,3
73-74	167,7	73,2	74	74,3	160,5	103,4	144,8	36,5	27,8	0,3	2,3	39,7
74-75	98,9	124,2	52,1	11,4	112,1	49,5	44,8	39,9	79,8	14,9	54	8,9
75-76	79	125,2	75,3	48,4	148,2	72,2	99,9	31,1	23,4	23,1	33,4	7,8
76-77	85,8	88,4	115	47,8	29,1	19,3	61,7	21,8	23,3	3,6	8,7	57,3
77-78	7,5	78,5	100,6	98,7	60,1	50,8	87	23,1	11,4	0,2	5,3	120
78-79	68,8	78,3	98,3	82	149,6	33,1	126,4	104	28,2	20,2	14,9	11,9
79-80	194,2	159,1	128,8	110,6	102	151,6	54,7	54	18,6	0,3	9	16,7
81-82	209,8	77,7	112,9	109,2	53,3	25,1	65,6	32,3	35,1	2,3	15,9	37
82-83	92,3	77,9	150,4	27	100	163,9	125,5	115	7,2	16,1	23,2	29,9
83-84	121	129,5	124,1	30	45,3	54,1	23,3	34,2	63,8	21,1	22,8	10,2
84-85	64,6	100,1	214,9	97,5	127	94,9	134,8	52,9	16,1	6,4	56,7	32,8
85-86	15	92,9	91,2	130,7	29,3	90,2	114,6	28,8	5,3	7,3	3,4	4
86-87	102,5	168,2	79,1	71,1	152,2	85,4	28,6	74,4	85,6	12,9	25,1	34,8
87-88	112	78,7	31,9	126,3	79,2	170,8	74,1	44,6	11,9	5,5	14,2	3,3
88-89	120,1	100,3	67,4	88,2	73,6	54,8	51,1	13,8	9,8	5	3,5	7,1
89-90	74,5	133,4	94,2	22	35,7	52,8	30,5	24,9	11,8	57,1	5,8	9,3
91-92	58	59,3	37,4	57,7	29,4	35,1	148,3	78,2	51,7	18,2	3,4	7,6
92-93	55,1	49,6	75	80,6	103,4	68,3	44,6	68,4	16,9	7,1	6	5,6

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΑΝΤΗ ΑΛΗ ΕΦΕΝΤΗ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	185,9	7,1	17,9	91,6	71,9	151,2	20,9	14,4	12,8	68,9	18,1	93,4
73-74	87,5	66,4	96,6	104,8	159,6	81,2	115,6	40,8	92,3	0	0,6	28,9
74-75	58,2	101,4	32	41	92,7	46,7	17,9	57,9	78,9	13,2	31,9	6
75-76	62,9	83,8	82,1	44	140,2	42,6	61	95,8	27,5	61,5	78,3	7,3
76-77	42,5	77,6	44,7	33,8	14,1	20	30,6	24	27,9	0,9	7	39
77-78	7,5	53,8	88,9	122,9	37,5	66,2	61,9	47,8	9,5	0	2,7	138,8
78-79	77	39,2	71,5	69,8	35,2	28,8	90,5	91,4	17,8	34,8	27,8	13,5
79-80	121	195,8	86,3	92,4	32,7	111,8	36,7	79,1	36,8	13,6	16,3	5,9
81-82	124,8	69,3	81,1	150,1	42,1	24,7	60,2	21,2	16,3	29,2	35,2	56,6
82-83	112,6	92,8	73,1	8,6	131,9	86	187,8	144	22,4	6,9	36,7	31,2
83-84	129,8	141,6	62,3	13,2	46,7	40	17,5	35,7	84,8	136,7	9,2	4,2
84-85	32,2	87,7	220,9	57,2	114	55,9	118,5	28,2	23,3	9,4	67,6	27,2
85-86	7,1	75,5	52,9	75,6	18,1	82,4	39,8	25,3	7,3	11	0	1,2
86-87	83,3	202,4	16,7	45,6	111,8	47,8	7,4	60,3	76,7	6,2	8,5	18,7
87-88	65,1	80,9	35	69,7	74,6	164,5	107,9	59,9	28,9	7,1	39,4	10,7
88-89	100,9	110	55,3	67,7	33,1	43,9	33,4	35,4	8	26,9	0,6	15,4
89-90	26,5	155,3	103,1	1	49	77	19,8	39,2	25,5	32,1	14,2	5,9
91-92	39,2	56	12	29,4	9,9	16,2	156,2	84,4	68,8	9,6	0	0
92-93	52,9	74,5	41,7	91	67,6	45,6	22,1	134	10,2	3,5	4,9	9,7

ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΑΝΩ ΣΟΦΑΔΙΤΗ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	186,5	80,7	30,3	129,9	107,6	122,7	50,8	9,1	15,4	12,9	46,1	30,5
73-74	127,5	71,7	173,4	87,2	172,6	78,5	127,5	56,8	58,5	0,3	6,9	27,2
74-75	79,4	112,5	72,1	28,2	147,3	49,6	55	45,3	143	5,4	39,6	12,1
75-76	44,1	112,8	128,4	115,7	177,6	84,2	97,8	50,2	16,8	29,5	30	3,4
76-77	83,7	105,1	93,3	37,1	42,4	24	78,5	17	27,4	6,9	3,2	52,5
77-78	7,5	99,4	215,8	272,6	90,9	78,1	74,4	31,7	7	4,9	12,3	144,9
78-79	95,5	49,5	129,5	121,6	99,3	27,4	75,6	93,7	12,5	30	19,6	19,4
79-80	197,4	187,2	133,9	138,2	119	213,9	71,5	52,4	37,9	6,6	13,1	14,2
81-82	207,8	118,2	132,5	278,6	69,7	47,5	92,8	28,6	20,9	11	28,8	75,1
82-83	88,7	150,8	144,5	67,3	173,4	214,3	156,3	137	15,1	10,9	21,9	31,6
83-84	119,7	154,4	89,1	55,4	104	44,6	25,5	11,2	94,8	37	10,5	36,9
84-85	88,8	118	217,5	75,9	104,1	79	184,8	54,1	19,9	16,8	112,1	22,6
85-86	17,5	102	105,4	173	89,4	120,7	66,6	52,4	4,8	13,1	2,5	2,7
86-87	118,5	200,9	59,7	65,4	131,6	88,3	27,5	101	80,4	32,7	24,6	27,6
87-88	231	101,7	79,9	174,1	76,1	234	99,2	55	21,4	7	31,8	19,8
88-89	95	111	78	65,9	87,3	68,1	57,1	30,2	11,5	1,5	4,7	10
89-90	51,2	169,4	115,8	21,1	64,3	129,2	34,9	49	25,5	50,2	18,2	26,6
91-92	79,2	74,2	87,8	66,2	73,3	57,3	124,7	58,8	36,8	25	10	15,7
92-93	65,3	85,8	94,5	76,6	134,6	76,9	52,5	77,5	69,8	13	3,4	57,9

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	-	-	-	-	-	-	-	98	97,7	97,2	96,5	96,2
73-74	96,3	96,3	96,5	97,4	-	97,9	98,5	98,7	98,8	98,7	98,4	97,4
74-75	96,6	96,5	96,5	97	96,9	-	97,1	97,5	97,4	97,3	96,4	96,7
75-76	97,1	96	95,9	95,9	95,9	96	-	-	-	-	-	-
76-77	97,6	97,5	96,8	96,5	96,2	96,1	96,2	-	96,1	96,1	96	95,9
77-78	7,5	95,5	95,5	94,5	94,4	94,4	94,5	94,5	-	94,8	95,1	95,5
78-79	95,7	95,7	95,6	95,4	94,8	94,5	94,6	94,7	95	-	95,5	95,8
79-80	96,2	96,4	96,2	-	-	95	94,8	94,7	94,8	95,6	-	97,2
81-82	97,8	98,3	98,2	98	97,1	95,8	96,1	95,9	96,3	96,6	97,8	-
82-83	98	98,8	99	98,9	98,8	98,6	97,5	96,9	96,5	-	97	96,5
83-84	-	96,6	97,5	98	98,5	98,8	99	98,5	98,3	98,3	98,3	98,5
84-85	98,1	-	98,1	98,5	98,4							

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΑΓΝΑΝΤΕΡΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	97,4	97,5	97,6	-	97,8	98	98,1	98	97,5	96,7	95,9	95,9
73-74	96,4	96,7	97,2	97,5	-	97,9	98,2	98,2	98,6	97,9	97,3	95,6
74-75	95,5	96,2	96,6	96,7	97	-	97,1	97,3	97,4	97,3	97	96,8
75-76	95,4	94,8	95,1	95,8	96,1	96,5	-	-	97,6	98	98	97,2
76-77	97,1	95,9	95,5	95,8	96,2	96,4	96,6	-	96,9	97	96,8	96,3
77-78	7,5	94,1	92,4	92,2	92,5	93,2	94	94,5	-	95,1	95,7	96,1
78-79	96,1	95,4	94	92,4	91,6	91,5	92	93,3	94,4	-	94,8	95,4
79-80	95,7	96,2	96,4	-	91,9	92,2	93	93,7	94,6	95,6	-	97,2
81-82	97,4	97,4	97,1	97	95	93	93	93,5	94,2	94,8	95,1	-
82-83	96,2	96,6	96,4	96,5	95,2	93,8	91,5	92	93	93,6	94,2	94,6
83-84	-	94,8	96,1	96,8	96,7	96,8	96	94,1	94,6	93,8	93,9	95,8
84-85	96,2	-	96,3	96,5	96,9							

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΑΣΤΗΡΙΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	116	116,1	116,2	-	116,5	116,7	116,9	117	117	116,4	115,6	115
73-74	115	115,2	115,4	115,8	-	116	116,4	117	117	117,2	117,1	116
74-75	115,1	115,2	115,5	115,8	115,8	-	116	116	116	116,5	116,4	116
75-76	115,1	114,5	114,4	114,5	114,8	115	-	115	116	116	116,1	116,2
76-77	116	115,3	114,7	114,5	114,7	115	115,1	-	115	115,5	115,6	115,7
77-78	7,5	114,6	113,5	112,5	112,5	112,5	112,7	113	-	113,3	113,5	113,7
78-79	114	114,1	113,5	112,2	111,4	111,5	111,7	112	112	-	112,6	113
79-80	113,2	113,5	113,8	113,2	112,9	112,2	112,1	113	113	113,4	-	113,9
81-82	114,2	114,6	115	115,1	115,1	114,6	113,8	114	114	114,4	114,6	-
82-83	115,1	115,4	115,6	115,8	115,9	115,3	114,5	114	114	113,8	113,9	114
83-84	-	114,1	114,5	115	115,2	115,5	115,4	115	115	114,5	114,7	114,9
84-85	115,2	-	115,2	115,3	115,5	115,7						

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΓΕΦΥΡΙΩΝ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	106,3	106,6	106,8	-	107,4	108	108,2	105	105	103,6	101,8	100
73-74	104,5	105,8	106,7	107,8	-	108,1	109,2	108	108	106,7	105	99,5
74-75	102	103,4	105	106	106,2	-	-	-	107	-	-	-
75-76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107,8	107	106,8
76-77	104	101	99,8	102	103,6	104,6	105,8	-	105	105,8	103,2	102,1
77-78	7,5	96	94,6	96,4	98	100,8	101	102	-	102,5	103,5	104
78-79	102,5	100,2	96,1	93,4	96,8	98	100	101	102	-	103	104,2
79-80	103,8	103,4	102,1	99,8	97	98	99	100	103	104,3	-	105,7
81-82	107	107,8	106,5	103,6	101,8	99,4	100,5	102	104	105,5	107	-
82-83	108,2	109,2	108,8	107,1	105,6	102,8	100	101	103	104,1	105	105,8
83-84	-	106	107,9	108,7	109	109,5	106,8	104	103	103,5	104,8	106
84-85	107											

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΒΛΟΧΟΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	84,7	84,7	84,8	-	85	85,6	86,2	85,9	85,5	84,5	84	84,2
73-74	84,5	84,6	85	85,7	-	86,6	87,8	87,7	87,5	86,7	86,3	85
74-75	84,5	84,8	85	85	85,2	-	85,2	85,5	85,6	85,5	85,5	84,9
75-76	83,9	83,9	84,2	84,3	84,5	84,6	-	85,3	85,5	85,5	85,6	85,8
76-77	85,2	84,5	-	-	-	-	-	-	85,1	85,1	85	84,9
77-78	7,5	84,7	84,7	84	83,3	83,3	83,4	83,5	-	83,6	83,7	83,8
78-79	84	83,6	83,3	83,2	83,2	83,3	-	-	83,6	-	84	84,2
79-80	84,7	84,7	84,6	-	-	83,1	83,4	83,8	84	85	-	85,4
81-82	85,4	86,2	86,1	86	85,7	85	84,7	84,9	85	85,2	86	-
82-83	86,5	87	87,1	86,9	86,9	86,3	86,2	84,7	85,5	85,4	85	85,2
83-84	-	85,1	85,6	87	87,5	87,6	87,6	86,2	85,2	85	85,3	85,3
84-85	86	-	86,1	86,3								

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΦΗΚΗΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	125,5	126,4	127	-	127,6	129,6	129,1	128	126	124,5	123	121,7
73-74	121	122	125,3	128,2	-	128,2	128,8	130	130	127	124,8	123,5
74-75	122,8	121,2	121,3	121,8	122,2	-	125,8	127	127	124,9	123,8	122
75-76	121,9	120,8	120,5	121,3	121,8	122,2	-	124	125	126,8	126,7	125,8
76-77	124,6	122,5	120,8	120,8	122	127,6	129,1	-	128	127,3	126,1	125,1
77-78	7,5	122,1	119	118,8	118,8	119,7	122,1	125	-	127,2	128,6	129
78-79	128,9	127,3	125,2	123,1	122,6	122,7	122,6	123	122	-	129	120,1
79-80	129	128,8	128,6	124	123	122,2	121,8	124	128	129,7	-	129,8
81-82	128,5	129,6	128,2	126,9	124,8	122,6	121,2	121	124	126,5	125,5	-
82-83	125,5	126,1	128,1	127,5	126,7	124,8	122,6	121	121	122	126,8	126,9
83-84	-	126,2	126,5	126								



ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΜΕΓΑΡΧΗΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	131,6	131,5	131	-	132,3	136	140	142	140	138,7	138	132,4
73-74	130,3	129,4	124	128,1	-	137,5	140	143	143	142,1	139,8	135,5
74-75	130,5	128,5	130,5	133	133,4	-	134	135	139	139,2	137,5	135,4
75-76	133,2	131,5	129,4	128,4	128,5	129	-	131	135	136,4	138,4	138,4
76-77	136,2	134,2	132,2	130	129,4	130,4	131,5	-	133	134,5	134,4	134,3
77-78	7,5	129,8	126,7	125	124	122,8	124,5	128	-	132	135	137,5
78-79	139,8	138,5	134,5	131	130,4	128	128,5	128	133	-	137,1	138,2
79-80	138,1	138,7	138	135,4	132,1	130,4	128,7	131	132	135,4	-	136,8
81-82	136,8	137,1	140,1	141	138,7	134	132,2	132	132	132,8	136,1	-
82-83	138,4	140	139,8	140	139,8	137,8	132	132	130	129,7	133,2	135,4
83-84	-	135,3	137,5	138,4	138,2	139,2	138,7	137	134	133,4	134	139
84-85	138,5	-	138,7	136,4	133,4	133,2	139,2	139	136	133,5	133,5	134
85-86	139	138,5	-	137,7	137,8	137,3						

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΖΗΛΕΥΤΗΣ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	93,6	93,8	94,1	-	94,5	94,7	95,1	95,3	95,2	94,6	94	
73-74	92,7	93,3	93,6	94	-	94,6	95	95,5	95,9	96	95,7	
74-75	93	93	93,3	93,8	94	-	94,2	94,5	94,8	94,9	94,5	
75-76	92,6	92	91,9	92,1	92,6	93	-	93,5	94	94,3	94,4	
76-77	94	92,9	92,1	92,3	92,4	92,7	93	-	93,2	93,3	93,4	
77-78	7,5	92,1	90,5	89,3	89,4	89,7	90,1	90,8	-	91,5	91,8	
78-79	92,4	92,7	92	91,3	90,8	91,1	91,4	91,6	92,1	-	92,5	
79-80	93,2	93,5	94	93,9	93,4	92,9	92,9	93,4	94,1	94,6	-	
81-82	95,5	96	96,2	96,3	96,2	95,5	94,8	94,6	95,2	95,6	96	
82-83	96,5	96,7	96,7	96,6	96,6	95,9	94,9	94,1	94,1	94,3	94,5	
83-84	-	95	95,3	95,9	96,4	96,7	96,6	95,4	94,5	94,5	94,9	
84-85	95,6	-	95,8	95,9	96							

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΠΑΛΙΟΚΛΗΣΙΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	99,5	99,5	99,5	99,5	100	100	100	99,5	99,5	99	98,9	99
73-74	99	99	99	99,5	99,4	99,6	99,5	99,8	99,2	99	98,8	98,8
74-75	98,5	98,6	98,6	98,9	98,9	99,3	99,3	99	98,8	98,8	98,8	98,8
75-76	98,5	98,5	98,6	98,9	99	99	99,2	99	99	99	99,1	99,1
76-77	98,9	98,8	98,8	99	99	99,1	98,9	98,8	98,5	98,5	98,5	98,5
77-78	7,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5	98,5			

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΚΑΛΛΙΘΗΡΟΥ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	135,1	135	135,2	135,1	135,2	135,8	135,8	136	135	134,9	134,5	134,5
73-74	134,5	134,5	134,5	134,7	134,9	135	135,1	135	135	135	134,5	134,5
74-75	134,5	134,5	134,5	134,5	134,5	134,8	134,9	135	135	134,5	134,5	134,2
75-76	134,5	134,5	134,5	134,5	134,6	134,8	135	135	135	134,6	134,2	134
76-77	134,1	134,5	134,5	134,5	134,5	134,5	134,5	135	134	134	134,7	134
77-78	7,5	134,1	134,2	134,3	134,5	134,6	134,2	135				

ΓΕΩΤΡΗΣΗ ΠΑΤΟΥΛΙΑ

	ΟΚΤ	ΝΟΕΜΒ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	94,2	94,5	94,5	94,5	95	95	95,5	95	94,6	94,4	94	93,5
73-74	93,7	94	94,2	95,1	94	94	94,1	94,2	94,9	94,8	94,7	94,6
74-75	94,5	94,2	93,8	93,5	93,6	93,6	93,7	93,7	93,9	94,8	94,5	94,8
75-76	95,1	94,5	94,1	93,8	93,9	93,9	94,1	94,2	94,3	94,3	94,3	94,2
76-77	93,8	93,2	92,5	92,1	92,2	92,3	92,4	92,6	93,9	94,5	94,5	94,5
77-78	7,5											

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΑΓΙΟΠΗΓΗΣ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	1356500	2184900	2066500	1755200
73-74	0	1419000	2228800	2075000	1736400
74-75	0	1481500	2272700	2083500	1717600
75-76	0	1544000	2316600	2092000	1698800
76-77	0	1606500	2360500	2100500	1680000
77-78	0	1669000	2404400	2109000	1661200
78-79	0	1731500	2448300	2117500	1642400
79-80	0	1794000	2492200	2126000	1623600
81-82	0	1856500	2536100	2134500	1604800
82-83	0	1919000	2580000	2143000	1586000
83-84	0	1990300	2740900	2417700	1850500
84-85	0	2262600	2901800	2692400	2115000
85-86	0	2262600	3062700	2967100	2379500
86-87	0	2262600	3223600	3241800	2644000
87-88	0	2262600	3384500	3516500	2908500
88-89	0	2262600	3545400	3791200	3173000
89-90	0	2262600	3706300	4065900	3437500
91-92	0	2632000	4189000	4890000	4231000
92-93	0	2632000	4189000	4890000	4231000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΜΕΣΣΕΝΙΚΟΛΑ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	114800	181800	132600	86200
73-74	0	145600	212600	123200	79400
74-75	0	176400	243400	113800	72600
75-76	0	207200	274200	104400	65800
76-77	0	238000	305000	95000	59000
77-78	0	268800	335800	85600	52200
78-79	0	299600	366600	76200	45400
79-80	0	330400	397400	66800	38600
81-82	0	361200	428200	57400	31800
82-83	0	392000	459000	48000	25000
83-84	3300	365700	439000	67000	41100
84-85	6600	339400	419000	86000	57200
85-86	9900	313100	399000	105000	73300
86-87	13200	286800	379000	124000	89400
87-88	16500	260500	359000	143000	105500
88-89	19800	234200	339000	162000	121600
89-90	23100	207900	319000	181000	137700
91-92	33000	129000	259000	238000	186000
92-93	33000	129000	259000	238000	186000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΑΛΛΑΜΑ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	13633700	19962200	22063300	22231000
73-74	0	13267400	19447400	21687600	21864000
74-75	0	12901100	18932600	21311900	21497000
75-76	0	12534800	18417800	20936200	21130000
76-77	0	12168500	17903000	20560500	20763000
77-78	0	11802200	17388200	20184800	20396000
78-79	0	11435900	16873400	19809100	20029000
79-80	0	11069600	16358600	19433400	19662000
81-82	0	10703300	15843800	19057700	19295000
82-83	0	10337000	15329000	18682000	18928000
83-84	700	10430700	15432800	18952000	19212000
84-85	1400	10524400	15536600	19222000	19496000
85-86	2100	10618100	15640400	19492000	19780000
86-87	2800	10711800	15744200	19762000	20064000
87-88	3500	10805500	15848000	20032000	20348000
88-89	4200	10899200	15951800	20302000	20632000
89-90	4900	10992900	16055600	20572000	20916000
91-92	7000	11274000	16367000	21382000	21768000
92-93	7000	11274000	16367000	21382000	21768000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΛΑΣΤΗΡΑ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	6435300	9397700	9027200	8517000
73-74	0	6367600	9370400	9344400	8811000
74-75	0	6299900	9343100	9661600	9105000
75-76	0	6232200	9315800	9978800	9399000
76-77	0	6164500	9288500	10296000	9693000
77-78	0	6096800	9261200	10613200	9987000
78-79	0	6029100	9233900	10930400	10281000
79-80	0	5961400	9206600	11247600	10575000
81-82	0	5893700	9179300	11564800	10869000
82-83	0	5826000	9152000	11882000	11163000
83-84	2300	6150200	9900900	12628300	11897100
84-85	3500	6151400	9902100	12629500	11898300
85-86	4700	6152600	9903300	12630700	11899500

86-87	5900	6153800	9904500	12631900	11900700
87-88	7100	6155000	9905700	12633100	11901900
88-89	8300	6156200	9906900	12634300	11903100
89-90	9500	6157400	9908100	12635500	11904300
91-92	23000	9068000	16641000	19345000	18504000
92-93	23000	9068000	16641000	19345000	18504000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ  
ΣΟΦΑΔΩΝ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	7981000	11048200	12172300	11681000
73-74	0	8339000	11504400	12756600	12224000
74-75	0	8697000	11960600	13340900	12767000
75-76	0	9055000	12416800	13925200	13310000
76-77	0	9413000	12873000	14509500	13853000
77-78	0	9771000	13329200	15093800	14396000
78-79	0	10129000	13785400	15678100	14939000
79-80	0	10487000	14241600	16262400	15482000
81-82	0	10845000	14697800	16846700	16025000
82-83	0	11203000	15154000	17431000	16568000
83-84	1800	11475300	15624100	18258300	17401900
84-85	3600	11747600	16094200	19085600	18235800
85-86	5400	12019900	16564300	19912900	19069700
86-87	7200	12292200	17034400	20740200	19903600
87-88	9000	12564500	17504500	21567500	20737500
88-89	10800	12836800	17974600	22394800	21571400
89-90	12600	13109100	18444700	23222100	22405300
91-92	18000	13926000	19855000	25704000	24907000
92-93	18000	13926000	19855000	25704000	24907000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ  
ΤΡΙΚΑΛΩΝ

ΑΝΑΓΚΕΣ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	90488	10811633	17047154	15552555	13129366
73-74	80434	10577872	17056351	15599284	13073382
74-75	70380	10344110	17065548	15646014	13017398
75-76	60326	10110349	17074746	15692743	12961415
76-77	50271	9876588	17083943	15739473	12905431
77-78	40217	9642826	17093140	15786202	12849447
78-79	30163	9409065	17102338	15832931	12793463
79-80	20109	9175304	17111535	15879661	12737479
81-82	10054	8941542	17120732	15926390	12681495
82-83	0	8707781	17129930	15973120	12625511
83-84	14110	8954967	17371517	16436186	13145419
84-85	28220	9202153	17613105	16899253	13665326
85-86	42331	9449339	17854693	17362320	14185234
86-87	56441	9696525	18096280	17825387	14705142
87-88	70551	9943711	18337868	18288454	15225049
88-89	84661	10190897	18579456	18751520	15744957
89-90	98772	10438083	18821043	19214587	16264864
91-92	141102	11179641	19545806	20603788	17824587
92-93	141102	11179641	19545806	20603788	17824587

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΞΥΝΟΝΕΡΙΟΥ					
	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	151300	256700	158100	129500
73-74	0	165600	271400	173200	146000
74-75	0	179900	286100	188300	162500
75-76	0	194200	300800	203400	179000
76-77	0	208500	315500	218500	195500
77-78	0	222800	330200	233600	212000
78-79	0	237100	344900	248700	228500
79-80	0	251400	359600	263800	245000
81-82	0	265700	374300	278900	261500
82-83	0	280000	389000	294000	278000
83-84	500	272600	386700	306800	291500
84-85	1000	265200	384400	319600	305000
85-86	1500	257800	382100	332400	318500
86-87	2000	250400	379800	345200	332000
87-88	2500	243000	377500	358000	345500
88-89	3000	235600	375200	370800	359000
89-90	3500	228200	372900	383600	372500
91-92	5000	206000	366000	422000	413000
92-93	5000	206000	366000	422000	413000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕΛΑΝΩΝ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	1100	5511100	7105900	7362000	7556300
73-74	2200	5625200	7328800	7602000	7772600
74-75	3300	5739300	7551700	7842000	7988900
75-76	4400	5853400	7774600	8082000	8205200
76-77	5500	5967500	7997500	8322000	8421500
77-78	6600	6081600	8220400	8562000	8637800
78-79	7700	6195700	8443300	8802000	8854100
79-80	8800	6309800	8666200	9042000	9070400
81-82	9900	6423900	8889100	9282000	9286700
82-83	11000	6538000	9112000	9522000	9503000
83-84	11100	6655600	9506500	10103500	9945700
84-85	11200	6773200	9901000	10685000	10388400
85-86	11300	6890800	10295500	11266500	10831100
86-87	11400	7008400	10690000	11848000	11273800
87-88	11500	7126000	11084500	12429500	11716500
88-89	11600	7243600	11479000	13011000	12159200
89-90	11700	7361200	11873500	13592500	12601900
91-92	12000	7714000	13057000	15337000	13930000
92-93	12000	7714000	13057000	15337000	13930000

ΑΡΔΕΥΤΙΚΕΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΦΘΙΩΤΙΔΑΣ

	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓ	ΣΕΠ
72-73	0	1356500	2184900	2066500	1755200
73-74	0	1419000	2228800	2075000	1736400
74-75	0	1481500	2272700	2083500	1717600
75-76	0	1544000	2316600	2092000	1698800
76-77	0	1606500	2360500	2100500	1680000
77-78	0	1669000	2404400	2109000	1661200
78-79	0	1731500	2448300	2117500	1642400
79-80	0	1794000	2492200	2126000	1623600
81-82	0	1856500	2536100	2134500	1604800
82-83	0	1919000	2580000	2143000	1586000
83-84	0	1990300	2740900	2417700	1850500
84-85	0	2262600	2901800	2692400	2115000
85-86	0	2262600	3062700	2967100	2379500
86-87	0	2262600	3223600	3241800	2644000
87-88	0	2262600	3384500	3516500	2908500
88-89	0	2262600	3545400	3791200	3173000
89-90	0	2262600	3706300	4065900	3437500
91-92	0	2632000	4189000	4890000	4231000
92-93	0	2632000	4189000	4890000	4231000



## Παράρτημα Β: Φωτογραφίες

---



Φωτογραφία 1. Θέση υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη στο Πηνειό Ποταμό (Λήψη φωτογραφίας τέλη Ιουνίου)





Φωτογραφία 2 Γέφυρα Σαρακήνας, υδρομετρικός σταθμός Πηνειού ποταμού (τέλη Ιουνίου)



Φωτογραφία 3 Άποψη του Πηνειού ποταμού από το χωριό Αγία Παρασκευή των Τρικάλων (Τέλη Ιουνίου)



Φωτογραφία 4 Πηγές Γοργύριου-Προδρόμου (Τέλη Ιουνίου)





Φωτογραφία 5 Φαρσαλιώτης ποταμός στη θέση του επαρχιακού δρόμου Καρδίτσας-Λάρισας. Εμπλουτισμός του με υπόγεια γεώτρηση μεγάλης παροχής (Λήψη Τέλη Ιουνίου)



Φωτογραφία 6 Άποψη Ενιπέα ποταμού στη θέση της γέφυρας του χωριού Ιτέα (Λήψη τέλη Ιουνίου).





Φωτογραφία 7 Θέση υδρομετρικού σταθμού Κέδρου και οικολογική παροχή ποταμού Σοφαδίτικου.



Φωτογραφία 7. Αποστραγγιστικό κανάλι Κρούπι αμέσως ανάντη του Αλή Εφέντη. Μέσω αυτού του καναλιού διοδεύονται οι χειμερινές απορροές του Πλαστήρα στη θέση του υδρομετρικού σταθμού Αλή Εφέντη. (Λήψη τέλη Ιουνίου)





Φωτογραφία 8. Γέφυρα Καραϊσκάκη (Μουζάκι) και υδρομετρικός σταθμός (Λήψη Τέλη Αυγούστου)



Φωτογραφία 9. Άποψη του Παμίσου ποταμού από τη γέφυρα Καραϊσκάκη (Λήψη τέλη Σεπτεμβρίου).